



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**ROBOT ELİN HASSAS
KAVRAMA GÖREVİ İÇİN
BULANIK MANTIK İLE
KAVRAMA KUVVETİNİN
KONTROLÜ**

Canfer İŞLEK

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

EKİM 2021



İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ



**ROBOT ELİN HASSAS KAVRAMA GÖREVİ İÇİN BULANIK MANTIK
İLE KAVRAMA KUVVETİNİN KONTROLÜ**

Canfer İŞLEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2021

Canfer İŞLEK tarafından hazırlanan “ROBOT ELİN HASSAS KAVRAMA GÖREVİ İÇİN BULANIK MANTIK İLE KAVRAMA KUVVETİNİN KONTROLÜ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ersin ÖZDEMİR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. Halil EROL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 01/10/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

İmza

Canfer İŞLEK

...../...../.....

ROBOT ELİN HASSAS KAVRAMA GÖREVİ İÇİN BULANIK MANTIK İLE
KAVRAMA KUVVETİNİN KONTROLÜ
(Yüksek Lisans Tezi)

Canfer İŞLEK

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ekim 2021

ÖZET

Bu çalışmada, bir robot elin hassas kavrama görevinde özellikleri bilinmeyen bir nesnenin kalıcı deformasyona uğramadan ve düşürülmeden kavranıp kaldırılması için kavrama kuvvetinin kontrolünü sağlamak amaçlanmıştır. Nesnelere kavramak, robot el için belirsizlikler içeren karmaşık bir görevdir. İnsanlar bu görevi başarıyla yerine getirebilmektedir. Nesne kavramaya yönelik insan yeteneklerini makineye aktarmak ve kavrama kuvvetinin kontrolünü sağlamak için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. İnsanlar nesnelere kavrayıp kaldırırken, kavrama kuvvetinin minimum sınır değerinin üzerine güvenlik için fazladan kuvvet eklemektedirler. Bu fazladan kuvvet literatürde “Güvenlik marjı” olarak ifade edilmiştir. Güvenlik marjının, kavrama kuvvetinin minimum sınır değerine göre yüzde oranı ise “Güvenlik marjı oranı” olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmanın ilk adımında insanlarla hassas kavrama-kaldırma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden optimum güvenlik marjı verileri elde edilmiştir. Sonuç olarak, insanların, değişen yüzey sürtünme özelliğine ve ağırlığa bağlı olarak güvenlik marjını %9 ile %20 arasında değişen oranlarda uyguladıkları bulunmuştur. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi tasarlanmıştır. Yapılan performans testlerinde bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi, deneylerdeki aynı nesne koşulları için %8 ile %21 arasında değişen oranlarda güvenlik marjı hesaplamıştır. Daha sonra, bir robot elin parmaklarını temsil eden eyleyici tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi, eyleyici ve diğer kontrol ve kumanda öğeleri entegre edilerek kavrama kuvveti kontrol sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemde güvenlik marjının daha optimize edilmesine olanak sağlayan yerel ağırlık yaklaşımı geliştirilmiştir. Literatürde güvenlik marjı oranının %10 ile %40 arasında değiştiği belirtilmiştir ve bazı çalışmalarda sabit %20 kabul edilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan kavrama kuvveti kontrol sistemi, değişen nesne koşullarına bağlı olarak %3 ile %16 arasında değişen oranlarda güvenlik marjı ile nesnelere gerçek zamanlı olarak kavrayıp kaldırmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmadaki metot ve yaklaşımın robot elin hassas kavrama görevinde kavrama kuvvetinin kontrolü için uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler : Robot El, Kavrama Kuvveti, Hassas Kavrama, Güvenlik Marjı,
Bulanık Mantık
Sayfa Adedi : 112
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ersin ÖZDEMİR

CONTROL OF GRIP FORCE WITH FUZZY LOGIC FOR PRECISION GRASP TASK OF ROBOTIC HAND

(M. Sc. Thesis)

Canfer İŞLEK

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

October 2021

ABSTRACT

In this study, it is aimed to ensuring control of the grasping force in order to grip and lift an unknown object without permanent deformation and dropping in the precision grasp task of a robotic hand. Grasping objects is a complex task involving uncertainties for the robotic hand. Humans are able to perform this task successfully. The fuzzy logic method was used for ensuring control of the grip force by transferring human abilities oriented to grasping object to machine. When humans grip and lift objects, they add extra force for safety above the minimum limit value of the grasping force. This extra force is expressed in the literature as the "Safety margin". The percentage ratio of safety margin according to minimum limit value of grasping force is expressed as "Safety margin ratio". In the first step of this study, precision grip-lift experiments were conducted with humans. Optimum safety margin data were obtained from these experiments. As a result, it was found that humans apply safety margin between 9% and 20% by varying ratios, depending on the varying surface friction property and weight. A fuzzy safety margin calculation system was designed by using the data obtained from the experiments. In the performance tests, the fuzzy safety margin calculating system calculated safety margin for the same object conditions in the experiments between 8% and 21% by varying ratios. Later, the actuator which representing the fingers of a robot hand was designed and manufactured. The design of the grip force control system was realized by integrating the fuzzy safety margin calculation system, actuator and other control and command elements. In the designed system, the local weight approach was developed, which allows the safety margin to be more optimized. In the literature was stated that the safety margin ratio varies between 10% and 40% and in some studies was accepted as a constant %20. The grip force control system designed in this study was gripped and lifted objects in real-time by the safety margin varying between 3% and 16% depending on changing object conditions. The obtained results were demonstrated the applicability of the method and approach in this study for the control of grip force in the precision grasp task of the robot hand.

Key Words : Robotic Hand, Grip Force, Precision Grasp, Safety Margin,
Fuzzy Logic
Page Number : 112
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Ersin ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinde araştırılmasında ve yazımında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile her türlü yardımı esirgemeyen, umutsuzluğa kapıldığım anlarda çalışmalarımın ilerlemesinde ve başarıyla sonlanmasında büyük katkıları olan saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ersin ÖZDEMİR'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı 9861 dosya numaralı proje olarak destekleyen Mustafa Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne, çalışmalarımaya maddi ve manevi destek veren ve isimlerini burada zikredemediğim tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Kavrama Kuvveti Kontrol Sistemi.....	18
3.2. Eyleyici.....	20
3.3. Yatay ve Dikey Sürücüler.....	24
3.4. Hassas Kavrama-Kaldırma Deneyleri.....	25
3.4.1. Deney nesnesi.....	25
3.4.2. Deney düzeneği.....	27
3.4.3. Yüzey materyallerinin belirlenmesi.....	29
3.4.4. Deney düzeneğinin HKKD için kurulumu.....	34
3.4.5. Hassas kavrama-kaldırma deneylerinin yapılışı.....	35
3.5. Bulanık Güvenlik Marjı Hesaplama Sistemi.....	36
3.5.1. Bulanık mantık.....	36
3.5.2. Bulanık kümeler.....	38
3.5.3. Üyelik fonksiyonları.....	40
3.5.4. Bulanık mantık denetleyiciler.....	42

	Sayfa
3.5.5. Bulanıklaştırma birimi	43
3.5.6. Bilgi tabanı.....	44
3.5.7. Çıkarım birimi	45
3.5.8. Durulaştırma birimi	48
3.6. Bulanık Güvenlik Marjı Hesaplama Sisteminin Tasarımı.....	51
3.6.1. BGHS'nin giriş ve çıkış değişkenleri.....	52
3.6.2. Girişler için bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları	52
3.6.3. Çıkış için bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları	55
3.6.4. Bulanık kural tabanının oluşturulması	58
3.6.5. Bulanık çıkarım metodu.....	60
3.6.6. Durulaştırma yöntemi.....	60
3.6.7. BGHS'nin performans testlerinin yapılışı	62
3.7. Kavrama Kuvveti Kontrol Sisteminin Tasarımı	64
3.8. Kavrama Kuvveti Kontrol Sisteminin Çalışması.....	68
3.9. Kavrama Kuvveti Kontrol Sisteminin Performans Testlerinin Yapılışı.....	69
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	72
4.1. HKKD'de Elde Edilen Veriler	73
4.2. HKKD'den Elde Edilen Optimum Performans Verileri	82
4.3. BGHS'nin Performansı.....	86
4.4. KKKS'nin Kavrama ve Kaldırma Performansı	93
4.4.1. KKKS'nin kaldırma performansı	94
4.4.2. KKKS'nin kavrama performansı.....	98
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR.....	106
DİZİN.....	112

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Belirlenen yüzey materyalleri için elde edilen μ_{sk} ve μ_{sort} değerleri.....	33
Çizelge 3.2. Klasik mantık ve bulanık mantık arasındaki bazı farklılıklar	37
Çizelge 3.3. F_{tk} giriş değişkenin bulanık kümeleri ve tanım aralıkları	53
Çizelge 3.4. F_{nk} giriş değişkeninin bulanık kümeleri ve tanım aralıkları.....	54
Çizelge 3.5. K-Ortalamlar yöntemi ile elde edilen küme merkezleri	57
Çizelge 3.6. Kural tablosu	59
Çizelge 3.7. BGHS'nin kavrama performansının örnek simülasyon verileri.....	63
Çizelge 3.8. Ek olarak belirlenen materyal çiftleri ve yaklaşık μ_s değerleri.....	70
Çizelge 4.1. HKKD'de katılımcılardan elde edilen deney verileri örneği	73
Çizelge 4.2. HKKD'den elde edilen G_m örnek değerleri.....	74
Çizelge 4.3. Katılımcılardan elde edilen % G_m örnek değerleri.....	75
Çizelge 4.4. Katılımcılardan elde edilen F_{ng} verilerinin değişim aralığı.....	76
Çizelge 4.5. Katılımcılardan elde edilen F_{ng} verilerinin aritmetik ortalamaları.....	77
Çizelge 4.6. Katılımcılardan elde edilen G_m verilerinin değişim aralıkları.....	78
Çizelge 4.7. Katılımcılardan elde edilen G_m verilerinin aritmetik ortalamaları.....	78
Çizelge 4.8. Katılımcılardan elde edilen % G_m değerlerinin değişim aralığı.....	80
Çizelge 4.9. Katılımcılardan elde edilen % G_m değerlerinin aritmetik ortalamaları.....	80
Çizelge 4.10. Katılımcılardan elde edilen optimum G_m örnek veri kümeleri	82
Çizelge 4.11. Katılımcılardan elde edilen minimum G_m değerlerinin değişim aralıkları.....	83
Çizelge 4.12. Katılımcılardan elde edilen optimum G_m değerleri.....	83
Çizelge 4.13. Katılımcılardan elde edilen optimum % G_m değerleri	84
Çizelge 4.14. BGHS'nin kaldırma performansına ait G_m test verileri	88
Çizelge 4.15. BGHS'nin kaldırma performansına ait % G_m test verileri	88
Çizelge 4.16. HKKD'deki nesne özellikleri için BGHS'den elde edilen G_m verileri ...	92

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.17. HKKD'deki nesne özellikleri için BGHS'den elde edilen %Gm verileri	92
Çizelge 4.18. BGHS ve insan performansının sayısal olarak karşılaştırılması	92
Çizelge 4.19. KKKS'nin HKKD'deki nesne özelliklerinde kaldırma performansı verileri	94
Çizelge 4.20. KKKS'nin farklı nesne özelliklerinde kaldırma performansı verileri.....	95
Çizelge 4.21. KKKS ve insan performansının sayısal olarak karşılaştırılması	97
Çizelge 4.22. KKKS'nin kavrama performansından elde edilen örnek veriler.....	98



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Güvenlik marjı ve nesne kavrama.....	5
Şekil 3.1. Yatay sürtünme sistemi.....	13
Şekil 3.2. Bir nesnenin iki parmakla kaldırılması.....	14
Şekil 3.3. Yerel ağırlık yaklaşımının gösterimi.....	16
Şekil 3.4. Açık çevrim kontrol sistemi.....	18
Şekil 3.5. Kapalı çevrim kontrol sistemi.....	19
Şekil 3.6. KKKS'nin genel yapısı.....	19
Şekil 3.7. Yatay doğrusal hareket sisteminin prensip şeması.....	21
Şekil 3.8. Dikey doğrusal hareket sisteminin prensip şeması.....	21
Şekil 3.9. HKKD deney düzeneği için MATLAB/Simulink modeli.....	34
Şekil 3.10. Klasik mantık ve bulanık mantık karşılaştırması.....	37
Şekil 3.11. Bulanık renk kümeleri.....	38
Şekil 3.12. Yaş durumlarını gösteren alt kümeler: a) Klasik küme, b) Bulanık küme...	39
Şekil 3.13. Üçgen üyelik fonksiyonu.....	40
Şekil 3.14. Yamuk üyelik fonksiyonu.....	41
Şekil 3.15. Gauss üyelik fonksiyonu.....	42
Şekil 3.16. Bulanık mantık denetleyicinin genel yapısı.....	43
Şekil 3.17. Kümelerde kesişim ve birleşim kuralları.....	43
Şekil 3.18. Bulanıklaştırma işlemi.....	44
Şekil 3.19. Mamdani metodu bulanık çıkarım işlemi.....	46
Şekil 3.20. Takagi-Sugeno metodu bulanık çıkarım işlemi.....	47
Şekil 3.21. Tsukamoto metodu bulanık çıkarım işlemi.....	48
Şekil 3.22. Ağırlık merkezi yöntemi.....	49
Şekil 3.23. Alan ortası yöntemi.....	50

Şekil	Sayfa
Şekil 3.24. En büyüklerin ortalaması metodu	50
Şekil 3.25. En büyüklerin en büyüğü yöntemi	51
Şekil 3.26. En büyüklerin en küçüğü yöntemi	51
Şekil 3.27. BGHS'nin giriş ve çıkış değişkenleri.....	52
Şekil 3.28. F_{tk} girişi üyelik fonksiyonları.....	52
Şekil 3.29. F_{nk} giriş değişkeninin üyelik fonksiyonları	54
Şekil 3.30. G_{mk} çıkış değişkeninin üyelik fonksiyonları	57
Şekil 3.31. BGHS'nin kontrol yüzey grafiği	60
Şekil 3.32. BGHS'nin kavrama performansı için MATLAB/Simulink modeli.....	62
Şekil 3.33. BGHS'nin kaldırma performansı testi için MATLAB/Simulink modeli.....	63
Şekil 3.34. KKKS'nin donanım yapısının şematik gösterimi	64
Şekil 3.35. KKKS'nin yazılımına ait akış diyagramı	66
Şekil 4.1. Katılımcılardan elde edilen F_{ng} verilerinin dağılım grafiği	74
Şekil 4.2. Katılımcıların uyguladığı G_m değerlerinin dağılım grafiği	75
Şekil 4.3. Katılımcılardan elde edilen % G_m değerlerinin dağılım grafiği.....	76
Şekil 4.4. Katılımcıların F_{ng} ortalamalarının μ_s 'ye göre değişim grafiği	77
Şekil 4.5. Katılımcıların F_{ng} ortalamalarının F_{tmax} 'a göre değişim grafiği.....	77
Şekil 4.6. Katılımcıların G_m ortalamalarının μ_s 'ye göre değişim grafiği	79
Şekil 4.7. Katılımcıların G_m ortalamalarının F_{tmax} 'a göre değişim grafiği	79
Şekil 4.8. Katılımcıların % G_m ortalamalarının μ_s 'ye göre değişim grafiği	81
Şekil 4.9. Katılımcıların % G_m ortalamalarının F_{tmax} 'a göre değişim grafiği.....	81
Şekil 4.10. Katılımcıların optimum G_m değerlerinin μ_s 'ye göre değişim grafiği	84
Şekil 4.11. Katılımcıların optimum G_m değerlerinin F_{tmax} 'a göre değişim grafiği.....	84
Şekil 4.12. Katılımcıların optimum % G_m değerlerinin μ_s 'ye göre değişim grafiği.....	85
Şekil 4.13. Katılımcıların optimum % G_m değerlerinin F_{tmax} 'a göre değişim grafiği .	85

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. BGHS'nin kavrama süreci %Gm performansı grafiği	86
Şekil 4.15. BGHS'nin kavrama süreci Gmk performansı grafiği	87
Şekil 4.16. BGHS'nin kaldırma performansı Gm verilerinin Ftmax'a göre değişim grafiği	89
Şekil 4.17. BGHS'nin kavrama performansı %Gm verilerinin Ftmax'a göre değişim grafiği	90
Şekil 4.18. BGHS'nin kavrama performansı Gm verilerinin CoF'a göre değişim grafiği	90
Şekil 4.19. BGHS'nin kavrama performansı %Gm verilerinin CoF'a göre değişim grafiği	91
Şekil 4.20. BGHS ve insan Gm performanslarının grafiksel karşılaştırılması.....	93
Şekil 4.21. BGHS ve insan %Gm performanslarının grafiksel karşılaştırılması	93
Şekil 4.22. KKKS'nin kaldırma performansı Gm dağılım grafiği	96
Şekil 4.23. KKKS'nin kaldırma performans %Gm dağılım grafiği.....	96
Şekil 4.24. İnsan ve KKKS'nin Gm performansının grafik olarak karşılaştırılması	97
Şekil 4.25. İnsan ve KKKS'nin %Gm performansının grafik olarak karşılaştırılması ..	98
Şekil 4.26. KKKS'nin kavrama performansının Gmk değişim grafiği.....	99
Şekil 4.27. KKKS'nin kavrama performansının %Gmk değişim grafiği.....	100

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Baş ve işaret parmağın kullanıldığı hassas kavrama.....	2
Resim 3.1. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen eyleyici	20
Resim 3.2. Step motorlar: a) SY42STH47-1684A, b) SY57STH76-2804A.....	21
Resim 3.3. Esnek kaplin	21
Resim 3.4. Bilyeli somun-vidalı mil modülü	21
Resim 3.5. Lineer ray ve araba.....	22
Resim 3.6. Uç yatakları: a) Yatay hareket için, b) Dikey hareket için	22
Resim 3.7. Eyleyicinin kavrama tırnakları	24
Resim 3.8. M542 microstep step motor sürücü.....	24
Resim 3.9. SMPS güç kaynağı	25
Resim 3.10. Deney nesnesi.....	26
Resim 3.11. Yük hücresi.....	26
Resim 3.12. Deney nesnesinin değiştirilebilir özellikleri	27
Resim 3.13. HX711 yük hücresi için sensör modülü ve bağlantı şeması.....	28
Resim 3.14. Sensör modül kartı	28
Resim 3.15. Arduino Uno R3 kartı	28
Resim 3.16. Deney düzeneği	29
Resim 3.17. Katılımcıların parmak ucunda BOPP filmin kullanımı	30
Resim 3.18. Eyleyicinin tırnak kavrama yüzeylerinde BOPP filmin kullanımı.....	31
Resim 3.19. Statik sürtünme katsayılarının ölçümü.....	31
Resim 3.20. Hesaplanan μ_{sort} ve μ_{sk} değerlerini gösteren örnek ekran çıktısı	32
Resim 3.21. Belirlenen yüzey materyalleri ile oluşturulmuş kavrama yüzeyleri: a) PMMA, b) PP, c) A4, d) HDPE, e) PTFE.....	33
Resim 3.22. HKKD için deney düzeneğinin kurulumu	35
Resim 3.23. Hassas kavrama-kaldırma deneyi.....	35

Resim	Sayfa
Resim 3.24. F_{tk} giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi	53
Resim 3.25. F_{nk} giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi	55
Resim 3.26. G_{mk} çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi	58
Resim 3.27. Kural tabanın MATLAB/Fuzzy Rule editor görüntüsü	59
Resim 3.28. BGHS'nin MATLAB ortamındaki modellenmesi	61
Resim 3.29. BGHS'nin MATLAB/Fuzzy Rule Viewer gösterimi	61
Resim 3.30. AMR3 kartı.....	65
Resim 3.31. Kontrol ve kumanda devresi	65
Resim 3.32. Bağlantı dağıtım kartı.....	67
Resim 3.33. Buton kartı	67
Resim 3.34. KKKS'nin fiziki görünümü	68
Resim 3.35. KKKS'nin kaldırma performansı örnek ekran çıktısı	71
Resim 3.36. KKKS'nin kavrama performansı örnek ekran çıktısı.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
A4	210x297 mm ebatlarında ISO 216 kâğıt boyutu standardı
J	“n” tane verinin kendi küme merkezlerinden toplam uzaklığı
m	Kütle
MΩ	Megaohm
w	Ağırlıklı ortalama verilerin ağırlıkları
z*	Durulaştırma işleminin kesin çıktısı
$\mu_A(x)$	x’in A kümesine üyelik derecesini ifade eden üyelik fonksiyonu
$\mu_C(z)$	Bütünleşik bulanık çıkarımın üyelik derecesi
μ_{sort}	Ortalama statik sürtünme katsayısı
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
μ_{sk}	Kayma noktasında oluşan statik sürtünme katsayısı
F_n	Normal kuvvet (Kavrama kuvveti)
F_{ng}	Güvenli kavrama kuvveti
F_{ngk}	Kayma noktası için gerekli olan güvenli kavrama kuvveti
F_{nk}	Kayma noktasındaki normal kuvvet
F_{Smax}	Maksimum statik sürtünme kuvveti
F_s	Statik sürtünme kuvveti
F_t	Teğetsel kuvvet (Ağırlık)
F_{tk}	Kayma noktasındaki teğetsel kuvvet (Yerel ağırlık)
F_{tmax}	Maksimum teğetsel kuvvet (Toplam ağırlık-Global ağırlık)
gf	Gram-force (Gram-kuvvet)
G_m	Güvenlik marjı
G_{mk}	Kayma noktasındaki güvenlik marjı
%G_m	Güvenlik marjı yüzde oranı
kg	Kilogram
mV	Milivolt
MHz	Megahertz

Kısaltmalar	Açıklamalar
A/D	Analog/Dijital
AUR3	Arduino Uno Revision 3
AMR3	Arduino Mega Revision 3
BGHS	Bulanık Güvenlik Marjı Hesaplama Sistemi
BMD	Bulanık Mantık Denetleyici
BOPP	Biaxially Oriented Polypropylene
HDPE	High Density Polyethylene
HKKD	Hassas Kavrama-Kaldırma Deneyleri
IDE	Integrated Development Environment
KB	Kilobyte
KKKS	Kavrama Kuvveti Kontrol Sistemi
LKS	Lateks Köpük Sünger
LA	Limit Aşımı
PE	Polietilen
PMMA	Polymethyl Methacrylate
PP	Polipropilen
PTFE	Polytetrafluoroethylene
RMS	Root Mean Square
SMPS	Switch Mode Power Supply
SPS	Sample Per Second
USB	Universal Serial Bus
VDC	Volts Direct Current

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte robotlar, farklı problemlerin çözümü için çeşitli uygulamalarla yaşamımızın her alanında görülmektedir. Robotlar, programlanabilir algoritmalara sahip olan, algılama ve görev yapma yeteneği olan, elektronik ve mekanik birimlerden oluşan disiplinlerarası cihazlardır. Ek olarak, robotlar başta insan olmak üzere zeki canlıların yeteneklerini ve davranışlarını taklit edebilen cihazlardır. Bir robottan beklenen en önemli yeteneklerden biri de nesnelere hassas bir şekilde kavrayıp kaldırabilmektir. Kavrama, nesnenin yapısal özelliklerine, parmakların durumuna ve kavrama görevinin niteliğine göre Cutkosky tarafından iki ana sınıfa ayrılmıştır [1]:

- Güvenliğin ve kararlılığın önemli olduğu güçlü kavrama
- Becerinin ve hassasiyetin önemli olduğu hassas kavrama

Robot el için kavrama ve manipülasyon, kinematik açıdan hareket planlamasını; statik ve dinamik açıdan da kuvvet kontrolünü içeren karmaşık bir görevdir [2]. Bu görevin karmaşık olması, kavranan nesnenin geometrisine, dayanıklılığına, sertliğine ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Kavrama ve manipülasyonu karmaşık bir görev haline getiren analitik modelleme sorunları Cutkosky tarafından aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır [1].

- Nesne geometrisine bağlı problemler
- Kinematik problemler
- Dinamik problemler
- Yapısal özellik ilişkilerinden kaynaklanan problemler

Kavranıp kaldırılan bir nesnenin parmaklar arasında düşmeden asılı durmasına neden olan temel unsur statik sürtünme kuvvetidir. Bu durum insan kavraması ve robot kavramasının her ikisi için de geçerlidir. Statik sürtünme kuvveti, parmak uçları ile nesne yüzeyleri arasındaki sürtünme ilişkisine ve uygulanan kavrama kuvvetine bağlıdır. Bu ilişkiyi Eş. 1.1’de verilen Coulomb sürtünme denklemi, açıklamaktadır.

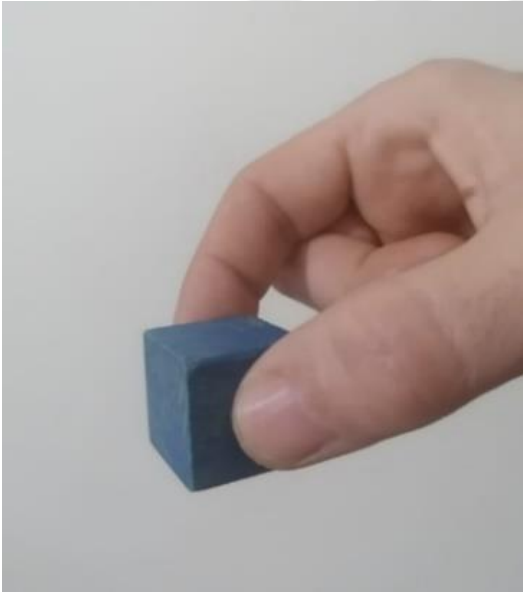
$$F_{s_{max}} = F_n \cdot \mu_s \quad (1.1)$$

Eş. 1.1’deki $F_{s_{max}}$, zemine paralel (Eksenel) yönde nesneye uygulanan itme veya çekme kuvvetine karşı eşit ve zıt yönde oluşan maksimum statik sürtünme kuvvetidir. Bu kuvvet,

nesne kaymadan uygulanabilecek itme ya da çekme kuvvetinin maksimum değerine eşittir. $F_{s_{max}}$ ' dan daha büyük bir sürtünme kuvveti değeri oluşturmak için kuvvet uygulandığında nesne kaymaya başlar. F_n (Normal kuvvet), nesne ağırlığına karşı zeminin normali yönünde oluşan tepki kuvvetidir. μ_s ise nesne ve zemin arasında oluşan statik sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Sonuç olarak, nesnenin kaymadan statik durumunu koruması için Eş. 1.2'deki F_s (Statik sürtünme kuvveti) koşulunun sağlanması gerekir.

$$F_s \leq F_n \cdot \mu_s \quad (1.2)$$

Eş. 1.2, nesnenin statik sürtünme koşulunu yatay düzlem için ortaya koymaktadır. Bir robot elin kavrama görevinde ise nesnenin statik sürtünme koşulu dikey düzlem için ortaya konulmalıdır. Bu çalışmada Resim 1.1'de görüldüğü gibi baş ve işaret parmağın kullanıldığı, yumuşak parmak uçlu, iki parmaklı hassas kavrama modeli ele alınmıştır.



Resim 1.1. Baş ve işaret parmağın kullanıldığı hassas kavrama

Çalışma kapsamında ele alınan kavrama modeline yönelik olarak Eş. 1.2 düzenlenip Eş. 1.3'deki gibi ifade edilmiştir. Eş. 1.3' de, baş ve işaret parmağın kullanıldığı, kavranan nesnenin rijit, yüzeylerinin birbirine dik ve düzgün geometrik şekle sahip olduğu, kavrama yüzeylerinin homojen olduğu, F_n ve teğetsel kuvvetin birbirine dik olduğu ve açısal veya doğrusal farklı kuvvet etkilerinin olmadığı, her iki parmakta eşit F_n değerinin oluştuğu varsayılmıştır.

$$F_t \leq 2 \cdot F_n \cdot \mu_s \quad (1.3)$$

Eş. 1.3’ deki F_t (Teğetsel kuvvet), nesnenin ağırlığından dolayı oluşan teğetsel kuvvettir. Eşitlikteki F_n , tek bir parmağın uyguladığı kuvvet değeridir. Bu nedenle toplam F_t ’nin elde edilmesi için eşitliğin F_n ve μ_s tarafı 2 ile çarpılmıştır. μ_s değerine bağlı olarak, nesne minimum F_n ile kaldırıldığında nesnenin kaymayacağı maksimum F_s değeri elde edilmektedir. Maksimum F_s değeri ise kendisine eşit ve zıt yönlü maksimum F_t değerine eşit olmaktadır. Maksimum F_t değeri de kaldırılan nesnenin maksimum ağırlığına eşittir. Eş. 1.3’e göre uygulanması gereken kavrama kuvveti, yüzey sürtünme koşullarına bağlı olarak nesne ağırlığını kaldırabilecek miktarda olmalıdır. İnsanlar güçlü kavramada, kırma, çatlatma gibi kalıcı şekil değişikliğine uğratma kaygısı olmadan kararlı ve güvenli bir şekilde nesnelere sıkıca kavrayıp kaldırabilmektedir. Güçlü kavramada, nesneyi kalıcı şekil değişikliğine uğratma kaygısı olmadığı için uygulanan fazladan kuvvetin pek önemi olmamaktadır. Fakat Hassas kavraman durumunda ise uygulanacak kontrolsüz fazladan kuvvet, cisim kalıcı şekil değişikliğine uğratabilir. Fakat kalıcı şekil değişikliğine uğratma kaygısından dolayı yeteri kadar baskı uygulanmazsa nesne kayıp düşebilir. Belirtilen durumlar bir robot elin kavrama görevi için de geçerlidir. Bir robot elin hassas kavrama görevi için kavrama kuvveti, nesneyi kalıcı şekil değişikliğine uğratacak kadar fazla olmamalıdır; nesnenin kayıp düşmesine neden olacak kadar da az olmamalıdır. Bu durum kuvvetinin kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Hassas kavrama görevinde nesnenin kalıcı şekil değişikliğine uğramasına veya parmaklar arasından kayarak düşmesine neden olan temel unsurun F_n ’nin niceliği olduğu açıktır. O halde, bir robot elin hassas kavrama görevinde kavrama kuvvetinin kontrolü için F_n ’nin optimum değerinin tespit edilmesi gereklidir.

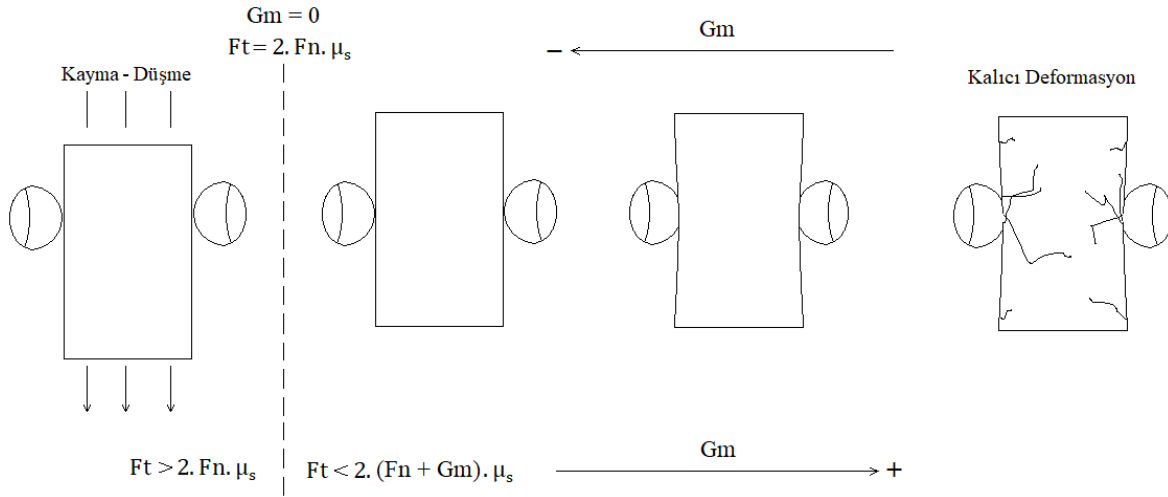
Literatürde belirli nesnelere ya da nesne grupları ile bilinen parametreler üzerinden kayma noktasının tahminine dayalı çalışmalar mevcuttur [4-7]. Fakat doğal koşullarda kavranıp kaldırılacak herhangi bir nesne için mukavemet değerleri, sürtünme katsayısı, ağırlık gibi değerler önceden bilinen değerler değildir. Ayrıca, nesnelere yüzeyleri kir, nem, yağ gibi yabancı maddelerin varlığından ve farklı pürüzlülük dağılımından dolayı homojen değildir. Literatürdeki birçok çalışmada kavranıp kaldırılacak nesne, “Özellikleri bilinmeyen nesne (Unknown object)” olarak ifade edilmiştir [5, 8-10]. Kavranacak herhangi bir nesne ile ilgili bu belirsizlikler, bir robot el için kavrama kuvvetinin kontrolünü belirsizlikler içeren bir problem haline getirmektedir. Fakat İnsanlar günlük yaşantısında, nesne ile ilgili bilgilere sahip olmadan herhangi bir nesneyi hassas bir şekilde kavrama ve kaldırma görevini başarıyla yerine getirebilmektedir. İnsanlar bu becerilerini bebekliklerinden itibaren pratik deneyimlerle kazanmaktadırlar. Bir insanın, özellikleri bilinmeyen herhangi bir nesneyi kalıcı şekil

değişikliğine uğratmadan ve düşürmeden hassas bir şekilde kavrayıp kaldırılabiliyor olması, bu tez çalışmasında sunulan metodun ve modellemenin temelini oluşturmaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda, insanların nesnelere kavrayıp kaldırırken Eş. 1.3 ile hesaplanabilen minimum F_n değerinin üzerine güvenlik için fazladan kuvvet ekleyerek kaldırdıkları ortaya koyulmuştur [3, 11-16]. İnsanların nesnelere kaldırırken uyguladıkları bu fazladan kuvvet, literatürde genellikle “**Güvenlik marjı**” olarak ifade edilmiştir. Bu tez çalışmasında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar da insanların nesnelere kavrayıp kaldırırken güvenlik marjı uyguladıklarını ortaya koymuştur. Güvenlik marjının farklı nesne koşullarına göre daha anlamlı bir değer ifade etmesi için güvenlik marjı oranı hesaplanmaktadır. **Güvenlik marjı oranı**, güvenlik marjının minimum F_n değerine göre yüzde oranıdır.

Güvenlik marjı, farklı sürtünme koşullarından etkilenmektedir. Kuvvet kontrolü de ağırlıktan, sürtünme koşullarından ve güvenlik marjından etkilenmektedir [11,12]. Önceki bazı çalışmalarda, güvenlik marjının bir aralıkta değişken olduğu görüşü kabul edilse de sabit bir oran ya da katsayı olarak kullanılmıştır [17]. Tremblay ve Cutkosky, çalışmalarında, %15 ile %100 arasında değiştiğini belirttikleri güvenlik marjı oranını %20 kabul etmişlerdir [18]. Wettels ve diğerleri, güvenlik marjı oranını %20 olarak uygulamışlardır [19]. Bergmann Tiest ve Kappers, çalışmalarında nesne ağırlığı sabit olmak üzere yüksek statik sürtünme katsayıları için güvenlik marjı oranını %60 olarak bildirmişlerdir [20]. Yapılan bazı çalışmalarda güvenlik marjı oranının %10 ile %40 arasında değiştiği belirtilmiştir [5, 21, 22]. Bazı çalışmalarda ise önceki yaygın görüşün aksine güvenlik marjının değişken nesne ve çevre koşullarından etkilendiği belirtilerek sabit bir parametre olmadığı ortaya konulmuştur [15, 17, 23-25]. Bu tez çalışmasında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar da insanların değişen ağırlık ve yüzey sürtünme özelliklerine karşı farklı güvenlik marjı uyguladıklarını göstermiştir. Bazı çalışmalarda, güvenlik marjı ile ileri besleme yapılarak kavrama kuvvetinin ayarlanabileceği belirtilmiştir [17, 23]. Wang ve diğerleri, güvenlik marjının tespitine dayalı bir kavrama kuvveti kontrolünün etkinliğini ortaya koymuşlardır [26].

Bir hassas kavrama görevinde, kalıcı şekil değişikliğine uğratma kaygısından dolayı güvenlik marjının minimize edilmesi gerekir. Çünkü güvenlik marjının minimize edilmesi, Şekil 1.1’de görüldüğü gibi cismi düşürmeden uygulanabilecek minimum F_n değerine yakınlaştırırken, cismi kalıcı şekil değişikliğine uğratacak F_n değerinden uzaklaştıracaktır.



Şekil 1.1. Güvenlik marjı ve nesne kavrama

Güvenlik marjı odaklı yapılan önceki bazı çalışmalarda değişen nesne koşullarına göre ayarlanan güvenlik marjı yaklaşımı kabul görmektedir. Fakat farklı nesne özelliklerine bağlı olarak güvenlik marjının nasıl değiştiği ile ilgili etkin bir matematik model mevcut değildir. Nesneye ve çevresel koşullara bağlı değişkenlikler ve belirsizliklerden dolayı bir matematik model ortaya koymak da oldukça güçtür. İnsanların, özelliklerini bilmedikleri nesnelere optimum güvenlik marjı ile kavrayıp kaldıracakları olması, bu tez çalışmasının odak noktasını oluşturmaktadır. Bu bağlamda insanların bu yeteneğini uzman bilgisi olarak işleyebilen bir yöntem olarak bulanık mantık yöntemine başvurulmuştur.

Bu tez çalışmasında, hassas kavrama görevinde kavrama kuvvetinin kontrolü için optimum güvenlik marjı hesaplayan bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin veri tabanını oluşturmak üzere insanlarla farklı ağırlıklar ve farklı yüzey özellikleri için hassas kavrama-kaldırma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde, hassas kavrama görevinde insanların farklı ağırlıktaki ve yüzey özelliğindeki nesnelere kavrayıp kaldırırken ne kadar güvenlik marjı uyguladıkları tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen güvenlik marjı verileri kullanılarak farklı ağırlıktaki ve farklı yüzey özelliğindeki nesnelere optimum güvenlik marjı verileri elde edilmiştir. Bu veriler bulanık mantık denetleyici için veri tabanı olarak kullanılmıştır. Oluşturulan veri tabanı ile bir bulanık mantık denetleyici olan bulanık güvenlik marjı hesaplama sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bir robot elin baş ve işaret parmağını temsil eden 2 parmaklı, yatay ve dikey olmak üzere eksenli eyleyici tasarlanıp üretilmiştir. Bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi (BGHS), eyleyici ve diğer tasarım elemanları birleştirilerek kavrama kuvveti kontrol sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kavrama kuvveti kontrol sistemi (KKKS) ile bu çalışmada ortaya konulan metot ve yaklaşımın performansı test edilmiştir. Tasarlanan KKKS'nin hem kavrama hem de

kaldırma performansları ayrı ayrı test edilmiştir. Yapılan performans testleri ilk önce Hassas kavrama-kaldırma deneyleri (HKKD) için kullanılan ağırlıklarda ve yüzey özelliklerinde yapılmıştır. Daha sonra farklı ağırlıklar ve yüzey özellikleri için yapılmıştır. Tüm deneyler, testler ve bunların sonuçlarına yönelik performans değerlendirmesi yapılırken kavranan nesnelerin, düzgün geometrik şekle sahip ve rijit olduğu kabul edilmiştir. Kavranıp kaldırılan nesneye iki boyutta saf yatay ve dikey kuvvetlerin etki ettiği ve başkaca açısız ve doğrusal kuvvet etkisinin olmadığı kabul edilmiştir. KKKS ile sabit bir kavrama-kaldırma hızı uygulanmıştır. İvmelenme, açısız nesne hareketleri ve nesnedeki esneme etkileri sonuçlara yansımamıştır. HKKD’de olabildiğince homojen nesne yüzeyleri kullanılmaya çalışılmıştır. Nesne yüzeyleri kir, nem, yağ gibi yabancı maddelerden olabildiğince arındırılmıştır. HKKD, 4 farklı ağırlık için ve 5 farklı μ_s değeri için yapılmıştır. KKKS’nin kavrama ve kaldırma performansı testleri eyleyici ile gerçek zamanlı olarak yapılmıştır. Kaldırma performansı testleri 29 farklı ağırlık için ve 10 farklı μ_s değeri için yapılmıştır. KKKS’nin kavrama performansı testi ise kaldırma performansı testlerinde kullanılan 5 farklı μ_s değerine ek olarak test ve deneyler esnasında kullanılmamış 5 farklı ağırlık değeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HKKD’den elde edilen sonuçlar, insanların hassas kavrama görevinde farklı yüzey sürtünme özelliklerinde ve farklı ağırlıklarda nesnelere kavrayıp kaldırırken %9 ile %20 arasında güvenlik marjı oranı uyguladıklarını göstermiştir. Belirtilen kabul ve sınırlılıklar çerçevesinde bu tez çalışmasındaki performans testlerinden elde edilen sonuçlara göre farklı nesne özelliklerine bağlı olarak hassas kavrama için güvenlik marjı oranı, %3 ile %16 aralığına başarıyla minimize edilmiştir. Eyleyici ile yapılan gerçek zamanlı performans testleri, bu çalışmada sunulan kavrama kuvveti kontrol metodunun bir robot elin hassas kavrama görevi için uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.

Robotik alandaki yapay zekâ çalışmaları, makinelere insan yeteneklerinin kazandırılması açısından önemli bir çalışma alanıdır. Nesnelerin insan gibi kavranıp kaldırılması da robotlara kazandırılmaya çalışılan önemli bir yetenektir. Bu tez çalışmasında, bir robot elin hassas kavrama görevinde özellikleri bilinmeyen bir nesnenin kavranıp kaldırılabilmesi için bulanık mantık tabanlı, güvenlik marjı odaklı, kavrama kuvveti kontrol metodu sunulmuştur. Bu kapsamda, hassas kavrama görevinde insanların farklı ağırlıkta ve farklı yüzey özelliğinde nesnelere kavrayıp kaldırdıklarında uyguladıkları güvenlik marjı değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak KKKS tasarlanmıştır. Bu çalışmada sunulan metodun, bu kapsamda yapılacak diğer çalışmalara katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Robot el kavrama çalışmalarından önce uzun bir süre insan kavrama becerileri üzerine çalışılmıştır. İnsan elinin kavrama becerilerine yönelik ilk çalışmalar, el cerrahisinde, yaralanma ve doğuştan kusurlu olan bireylerde kusur derecelerinin ölçülmesi ve protez el tasarlamak üzerine olmuştur. Böylelikle insan elinin kavrama becerilerine yönelik önemli tıbbi literatür meydana gelmiştir [27]. Yapay el ile ilgili kinematik, dinamik, algılama, kavrama ve kuvvet kontrolü alanlarında gelişim ve yön verici çalışmalar 1980'li yılların başlarından itibaren başlamıştır [2, 9]. Robot el kavraması üzerine yapılan araştırma ve tasarımların birçoğuna Mark R. Cutkosky yön vermiştir [2].

Westling ve Johansson, hassas kavrama esnasında kuvvet kontrolünü etkileyen faktörleri incelemiştir. Ağırlığı ve yüzey özellikleri değiştirilebilen bir kavrama-kaldırma düzeneği kullanarak insanlarla yaptıkları deneylerde nesneye uygulanan normal kuvvet değeri, oluşan teğetsel kuvvet değeri ve nesnenin dikey konumu sürekli kaydedilmiştir. Bu şekilde nesnenin parmaklar arasında kaymasını önlemek için uygulanan minimum kavrama kuvveti ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarda, cismin kavranıp kaldırıldığında ölçülen kavrama kuvveti ile hesaplanan minimum kavrama kuvveti arasında fark olduğu görülmüştür. Bu fark güvenlik marjı olarak tanımlanmıştır. Kavrama kuvvetinin kontrolünün, sürtünmeye ek olarak nesnenin ağırlığından ve güvenlik marjından büyük ölçüde etkilendiği ortaya koyulmuştur [11].

Johansson ve Westling, pürüzlü ve kaygan nesnelerin hassas kavranmasında kuvvet kontrolünü kılız deri reseptörleri ve duyu motor hafıza açısından incelemesini ve analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada kavrama kuvveti kontrolünün başarısının, cisme uygulanan kuvvetlerin hassas bir koordinasyonuna bağlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca cismin kaymaması ve güvenli kavrama için parmakların minimum kavrama kuvvetinin üzerine bir miktar kuvvet uyguladığı belirtilmiştir [28].

Howe ve diğerleri, elastomer parmak ucu malzemesi kullanılan bir robot parmak için kesme ve burulma gerilmeleri altında kayma dinamiğini inceleyerek moment ve kuvvet büyüklüklerini elde edip kayma başlangıcını tahmin etmeye yönelik bir model ortaya koymuşlardır [29].

Tremblay ve diğerleri, kavranan nesne ile robot elin parmak yüzeyi arasında oluşacak büyük kaymadan önce gerçekleşen küçük yeni başlayan kaymaların tespit edilmesiyle kavrama kuvvetinin kontrolünü gerçekleştirebilecek bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Yaptıkları

çalışmada, küçük yeni başlayan kaymaları, yumuşak parmak ucu içine gömülü ivmeölçer ile tespit etmişlerdir. Ayrıca insanların, nesnelere kavrarırken gerekli minimum kavrama kuvvetinin üzerinde bir sınır elde etmek için sürekli olarak ayarlanan ek kuvvet uyguladığını ortaya koymuşlardır. Bu ek kuvveti “Güvenlik marjı” olarak ifade etmişlerdir [30]

Edin ve diğerleri, insan hassas kavramasında parmak uçlarının bağımsız kontrolü konusunu ele almışlardır. Çalışmalarında, yüzey sürtünme özellikleri değiştirilebilir bir deney nesnesi üzerinde insanlarla kavrama-kaldırma denemeleri yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçla parmakların, nesnenin kaymasını engellemek için belirli bir güvenlik marjı uygulayacak şekilde kuvvetleri koordine ettiğini ortaya koymuşlardır. Güvenlik marjını ise sürtünme koşullarının belirlediğini ve farklı sürtünme koşullarında parmak uçları tarafından farklı güvenlik marjı uygulandığını ortaya koymuşlardır [12].

Bicchi ve diğerleri, kavramada temas yerinin ve geometrisinin önemli olmadığını, temas yerinden gelen kuvvet algısının önemli olduğu ve cismin manipülasyonunun bu kuvvet algısına karşı verilen tepki ile gerçekleşeceğini ortaya koymuşlardır [8].

Tremblay ve Cutkosky, yaptıkları deneysel çalışma ile bir robot elin kaygan veya kırılabilir nesnelere hassas kavrama görevi için bir slip sensör kullanılarak nesne ile parmak arasında büyük kayma öncesi oluşan küçük yerel kaymaların algılanması ile sürtünme katsayısının optimum tahmini metodunu ve kavrama kuvveti kontrol stratejisi sunmuşlardır. Çalışmalarında, kavrama kuvvetinin nesneye zarar vermemesi için gereken minimum seviyenin biraz üzerinde tutulması gerektiği belirtilerek güvenlik marjını sabit %20 kabul etmişlerdir [18].

Maeno ve diğerleri, tasarladıkları dokunsal sensör ile yaptıkları deneysel çalışmalarında, elastik bir parmağın içerisindeki kayma gerilme/gerinme dağılımının, sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yapmışlardır. Bu analiz ile nesneye aşırı kuvvet uygulamadan ve nesneyi tamamen kaydırmadan kavranabilmesine yönelik kontrol yaklaşımı sunmuşlardır [31].

Dubey ve diğerleri, tasarladıkları sensörden alınan kayma genliği ve parmak ucu kuvvet değerlerinin işlendiği bulanık mantık tabanlı kontrol metodunu ve denetleyici sistemi sunmuşlardır. Çalışmada, özellikleri bilinmeyen bir nesnenin optimum kuvvet ile kavranması için kayma algılanana kadar kavrama kuvvetinin azaltılması esasına dayanan “Kuvvet gevşetme” algoritması önerilmiştir [32].

Glossas ve Aspragathos, iki parmaklı bir robotik kavrama sistemi için nesne hakkında bilgilere gerek olmadan kırılğan ve hassas nesnelerin güvenli ve minimum kuvvet ile kavranmasına yönelik bulanık mantık tabanlı bir kontrol metodu sunmuşlardır. Önerilen kontrol metodunda minimum kavrama kuvveti, parmak ucu kuvvetini ölçmeden dokunsal sensörden alınan hız, ivme ve frekans dağılım bilgileri ile kavrayıcının parmak hareketini ayarlayarak oluşmaktadır [33].

Domínguez-López ve diğerleri, özellikleri bilinmeyen bir nesneyi zarar vermeden ve kaydırmadan optimum kuvvet ile kavranması için sinirsel bulanık (Neuro-Fuzzy) tabanlı kontrol metodu ve hibrit denetleyici sistem sunmuşlardır. Çalışmada nesneye ait özellikler ve buna bağlı olarak optimum kavrama kuvvetinin belirlenmesi, kavrayıcı ve çevresi arasındaki etkileşim yoluyla öğrenmeye dayalı gerçekleştirilmiştir [34].

Maeno ve diğerleri tasarladıkları elastik parmak şekilli sensör ve düzlemsel bir yüzey arasında oluşan gerinim dağılımını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ederek iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısının tahmin edilebileceğini göstermişlerdir. Böylelikle bir nesnenin ağırlığı ve sürtünme katsayısı bilinmeden, kalıcı şekil değişikliğine uğratmadan ve kaydırmadan kavranıp kaldırılabilmesi için bir yaklaşım sunmuşlardır [35].

İkeda ve diğerleri, yumuşak bir cismin kavranmasında sürtünme katsayısının bilinmesine gerek duymadan kayma marjı geribildirimini kullanan görsel tabanlı bir kavrama kuvveti kontrol metodu önermişlerdir. Stick-Slip sürtünme modeli temelinde, Stick ve Slip rejimlerindeki teğetsel kuvvet etkisiyle oluşan değişim, bir kamera ile gözlenerek görsel geribildirimlere dönüştürmüşlerdir. Kayma marjını, bu geri bildirimleri kullanılarak hertzian temas modeli ile hesaplamışlardır [36].

Koda ve Maeno, geliştirdikleri kısmi kayma sensöründen alınan geribildirimlerle sürtünme özelliği bilinmeyen bir nesnenin kararlı bir şekilde kavranması için Master-Slave kontrol metodunu ortaya koymuşlardır [37].

Mazid ve Ali, dokunsal sensör kullanarak kayma esnasında oluşan titreşimlerin enerji dağılımlarını makine öğrenme teknikleri ile hesaplayarak kavrama kuvvetinin tahminine yönelik yeni bir metot sunmuşlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında, kavrama kuvvetini destek vektör makineleri ile daha uygun doğrulukla tahmin ettiklerini görmüşlerdir [4].

Wettels ve diğeri, antropomorfik yapıya sahip bir mekatronik protez elin kavrama kuvvetinin kontrolünde biomimetik dokunsal sensör ile Bayesian çıkarım metoduna dayalı, kalman filtresinin kullanıldığı kontrol metodu fikrinin ispatını sunmuşlardır. Çalışmalarında, statik sürtünme katsayısını sabit 0,5 kabul edip güvenlik marjı oranını ise sabit %20 olarak uygulamışlardır [19].

Sugaiwa ve diğeri, özellikleri bilinmeyen yumuşak, ağır ve kaygan nesnelerin çok parmaklı bir robot el ile kavranıp kaldırılmasında kavrama kuvvetinin referans değerini ayarlamak için bir metot sunmuşlardır. Sunulan metotta nesnenin özellikleri ve kayma, eklemlere yerleştirilen mekanik pasif sensörlerle ile belirlenmektedir [38].

O'Toole ve diğeri, yumuşak ve kırılabilir nesnelerin minimum temas gücüyle kaymadan kavranması için bulanık kayan mod denetleyici ile kontrol metodunu sunmuşlardır. Sunulan bulanık mantık tabanlı metotta, kayma olayının oluşması ile kavrayıcının optimum pozisyonu tahmin edilmektedir [39].

Ho ve Hirai, yumuşak bir parmak ucu ile bir nesnenin kararlı bir şekilde kavranışında önemli bir faktör olarak görülen, kayma esnasındaki Stick-Slip geçişine odaklanmışlardır. Bu geçişin dinamik davranışının açıklanabilmesi ve modellenmesi için Stick-Slip sürtünme modeline uygun tasarlanan bir sensör üzerinde Coulomb sürtünme yasası ile beraber sonlu elemanlar analizinin de kullanıldığı bir metot önermişlerdir [40].

De Maria ve diğeri, antropomorfik bir robot elin parmaklarına entegre edilmiş bir dokunsal sensör ile işletilen yeni bir kayma kontrol algoritması sunmuşlardır. Çalışmada, temas geometrisi değişkenlerini, temas kuvveti bileşenlerini ve sürtünme katsayısını tahmin etmek için genişletilmiş kalman filtresi kullanmışlardır. Genişletilmiş kalman filtresinin kuvvet ve tork parametrelerini, 2 katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı ile tahmin etmişlerdir [41].

Tsuji ve diğeri, çalışmalarında bir nesnenin elastik parmak uçları ile kavrandığında parmak uçlarında oluşan yerçekimi potansiyel enerji ile birlikte elastik deformasyon potansiyel enerjisini de hesaba katan kavrama kararlılık analizi indeksi önermişlerdir [42].

Lin ve diğeri, bir robotik el için deforme olabilen bir cisim kavrayıp kaldırma stratejisini sunmuşlardır. Sunulan stratejide dokunsal algılama kullanılmadan nesnenin zemin ile teması kesilene kadar tekrarlanan kaldırılabilirlik testleri ile nesne sıkılmaktadır. Tekrarlanan

kaldırılabilirlik testleri boyunca kayma hesaplaması için sonlu elemanlar yöntemi, ağırlığın tahmininde ise enerji ve mukavemet denklemleri kullanılmıştır [43].

Yuan ve diğerleri, yaptıkları deneysel çalışmalarında, bir robot elin kavrama görevi için optik tabanlı GelSight dokunsal sensör ile normal, kesme ve burulma kuvvetlerinin algılanması ve büyük kayma öncesi oluşan kısmi yerel kayma başlangıcının tespit edilmesi için bir metot önermişlerdir [44].

Hadjiosif ve Smith, yaptıkları deneysel çalışma ile güvenlik marjının nesneye ve çevreye bağlı koşullardan etkilendiğini ve ayarlanabilir güvenlik marjı ile verimli bir kavrama kuvveti kontrolünün sağlanacağını ortaya koymuşlardır [17].

Barrea ve diğerleri, μ_s ile F_n arasındaki ilişkiye odaklanmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma ile μ_s ve F_n arasında doğrusal kabul edilen ilişkinin aslında doğrusal olmadığını belirterek bu ilişkiyi ölçebilecek herhangi bir yöntemin olmadığını belirtmişlerdir. Kavrama-kaldırma sürecinde F_n 'nin bir fonksiyonu olarak μ_s 'nin sürekli tahmin edilmesini sağlayan metot ve algoritma önermişlerdir [6].

Wang ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile başlangıçta tanımlanan güvenlik marjına bağlı olarak istenen güvenlik marjının tespit edilmesine dayanan gradyan akış optimizasyon algoritmasını geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile kavrama kuvvetinin optimizasyonu probleminin çözümünde güvenlik marjının tespit edilmesinin etkinliğini göstermişlerdir [26].

Morita ve diğerleri, tasarladıkları μ -LDV (Mikro Lazer Doppler Hızölçer) cihazını slip sensör gibi kullanarak kavrama kuvveti kontrol metodu sunmuşlardır. Çalışmalarında, ağırlıkları ve sürtünme katsayıları bilinen 3 farklı nesne için metot test edilerek minimum kavrama kuvveti tahmin edilmeye çalışılmıştır [7].

Pettersson-Gull ve Johansson, Anti-Slip metodu olan nesne hareketi odaklı kavrama tekniğini kullanarak, yetenekli bir robot kavrama tekniği sunmuşlardır. Sunulan teknik, nesnenin kayma esnasındaki göreceli hareketini durdurana kadar normal kuvvetin artırılmasıyla minimum kavrama kuvvetinin oluşturulması prensibine dayanmaktadır [10].

Bergman Tiest ve Kappers, yaptıkları deneysel çalışma ile nesne daha kaldırılmadan önce kavramanın erken sürecinde yüzey sürtünme özelliğiyle yüksek oranda ilişkili olarak kavrama

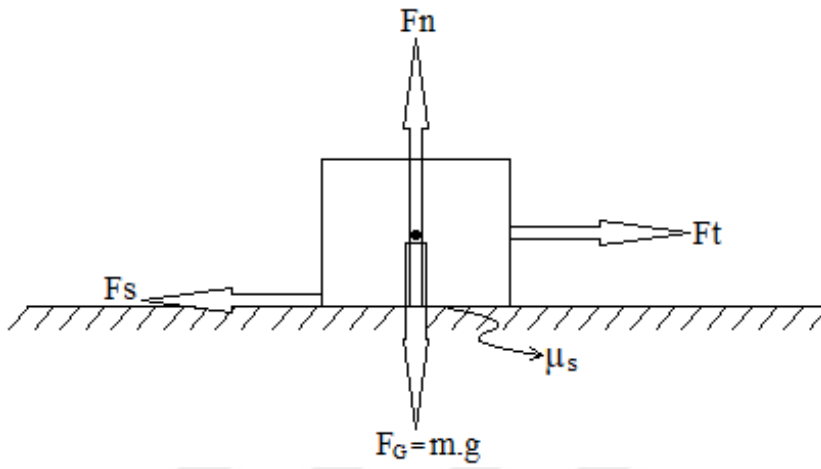
kuvvetinin insanlar tarafından modüle edildiğini ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışmada sabit nesne ağırlığında yüksek sürtünme katsayıları için güvenlik marjı oranının %60 olduğunu bildirmişlerdir [20].

Kavrama kuvvetinin kontrolü için önceki birçok çalışmadaki yaklaşım ve metot genel olarak kayma noktasının tahminine odaklanmıştır. Bazı çalışmalarda uygun sensör ve modellerle küçük yerel kaymalara bağlı olarak kayma noktası tahmin edilmektedir. Bazı çalışmalarda uygulanan yaklaşım ise gevşetme-sıkma algoritması yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda nesnenin kaymaya başlamasıyla oluşan izafi hareket durdurulana kadar parmaklar sıkılmakta ve bir kayma meydana gelene kadar parmaklar gevşetilmektedir. Literatürdeki diğer yaklaşımlar ise enerji ve mukavemet denklemleri ve yapay zekâ teknikleri ile kayma noktasının tahmini ve kavrama kuvvetinin kontrolü yaklaşımlarıdır.

Literatür incelendiğinde insanların, hesaplanan minimum kavrama kuvveti değerinin üzerine güvenlik marjı olarak ifade edilen fazladan kuvvet uyguladıkları ortaya koyulmuştur. Bu çalışmadaki deneysel sonuçlar da insanların nesne kavrama görevinde güvenlik marjı uyguladığını göstermiştir. Yapılan ilk çalışmalarda %15'den %100'e kadar farklı aralıklarda güvenlik marjı oranları bildirilmekle beraber sabit %20 güvenlik marjı oranının uygulandığı görülmektedir. Bazı çalışmalarda görece düşük sürtünme katsayıları için %10 ile %40 arasında değişen güvenlik marjı oranının bildirilmesi ile birlikte sabit %20 güvenlik marjı oranı uygulanmıştır. Önceki çalışmalarda güvenlik marjının bir aralıkta değişken olduğu görüşü kabul edilse de sabit güvenlik marjı oranı uygulandığı görülmektedir. Yapılan son çalışmalarda ise önceki çalışmalardaki yaygın görüşün aksine, güvenlik marjının nesne ve çevre koşullarına göre değişken olduğu, sabit bir parametre olmadığı ve güvenlik marjının tespit edilmesiyle etkin bir kavrama kuvveti kontrolünün gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir [15, 17, 23-26]. Fakat literatürdeki çalışmalarda güvenlik marjının nesne özelliklerine ve/veya çevresel koşullara bağlı olarak ne kadar değiştiği ile ilgili bir çalışma mevcut değildir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

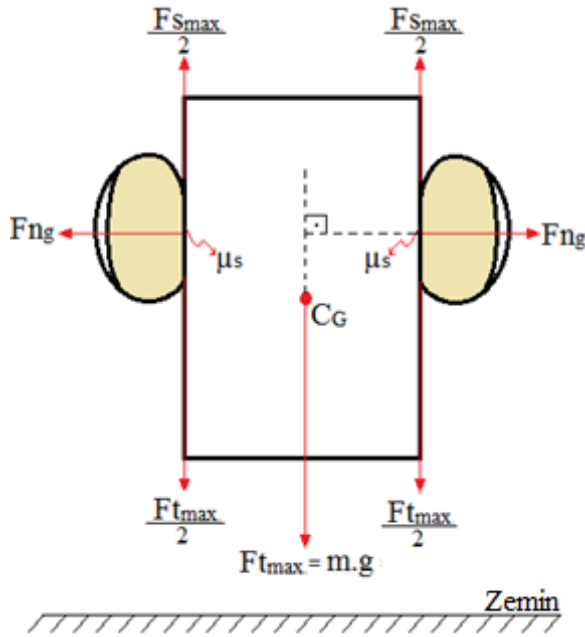
Bir nesnenin kavranıp kaldırılması için nesne yüzeyinin kavrayıcı yüzeye tutunması gerekir. Şekil 3.1’deki gibi bir yatay sürtünme sistemi incelendiğinde, nesnenin kütlesine (m) yerçekimi ivmesinin (g) etkimesiyle oluşan nesne ağırlığının (F_G) zemine uyguladığı etki kuvvetine karşı zemin tarafından zıt yönde ve F_G ’ye eşit bir normal kuvvet (F_n) tepkisi oluşacaktır. Bu durumda nesneye, zemine paralel olarak bir kuvvet (F_t) uygulanırsa, bu etkiye karşı zıt yönde ve kendisine eşit miktarda statik sürtünme kuvveti (F_s) tepkisi oluşur.



Şekil 3.1. Yatay sürtünme sistemi

Zemin ile nesne arasındaki statik sürtünme katsayısına (μ_s) bağlı olarak teğetsel kuvvet (F_t) uygulanan nesnenin kayma olayı gerçekleşmeden statik durumunu koruyabileceği maksimum F_s ($F_{s_{max}}$) değerini Eş. 1.1’deki Coulomb sürtünme denklemi vermektedir. Denklem göre F_n ve μ_s ’ye bağlı olarak oluşabilecek $F_{s_{max}}$ değerini aşan bir F_t değeri oluştuğunda, nesne kaymaya başlayacaktır. Nesnenin kaymadan statik durumunu koruyabilmesi için Eş. 1.2’deki koşulun sağlanması gerekmektedir.

Eş. 1.1’deki denklemi bir nesnenin kavranıp kaldırılma durumunu ifade eden dikey bir sürtünme sistemi için uygularsak, nesne ağırlığı F_t olarak ve nesneyi kavramak için parmakların uyguladığı kavrama kuvveti ise F_n olarak ifade edilebilir. Şekil 3.2, bir nesnenin zeminle teması kesilecek şekilde baş ve işaret parmağı ile kaldırılma durumunu göstermektedir.



Şekil 3.2. Bir nesnenin iki parmakla kaldırılması

Şekil 3.2’de gösterilen güvenli normal kuvvet (F_{n_g}), her bir parmağın nesne kaldırıldığında uygulamış olduğu, güvenlik marjı (G_m) eklenmiş normal kuvvet değeridir. F_{n_g} , Eş. 3.1’deki gibi ifade edilebilir.

$$F_{n_g} = F_n + G_m \quad (3.1)$$

Bir nesnenin kaldırılması durumuna uygun olarak bu çalışmada Eş. 1.1, her bir parmak için Eş. 3.2’deki gibi ifade edilmiştir. Eşitlikteki maksimum teğetsel kuvvet ($F_{t_{max}}$), nesnenin toplam ağırlığına eşit olan maksimum teğetsel kuvvet değerini ifade etmektedir. Kavrama kuvvetini uygulayan her bir parmak için düzenlendiğinde Eş. 3.3’deki gibi ifade edilmektedir. Buradan G_m ’yi hesaplamak için Eş. 3.4 kullanılabilir.

$$F_{t_{max}} = 2 \cdot F_n \cdot \mu_s \quad (3.2)$$

$$F_{t_{max}} = 2 \cdot (F_{n_g} - G_m) \cdot \mu_s \quad (3.3)$$

$$G_m = F_{n_g} - \frac{F_{t_{max}}}{2 \cdot \mu_s} \quad (3.4)$$

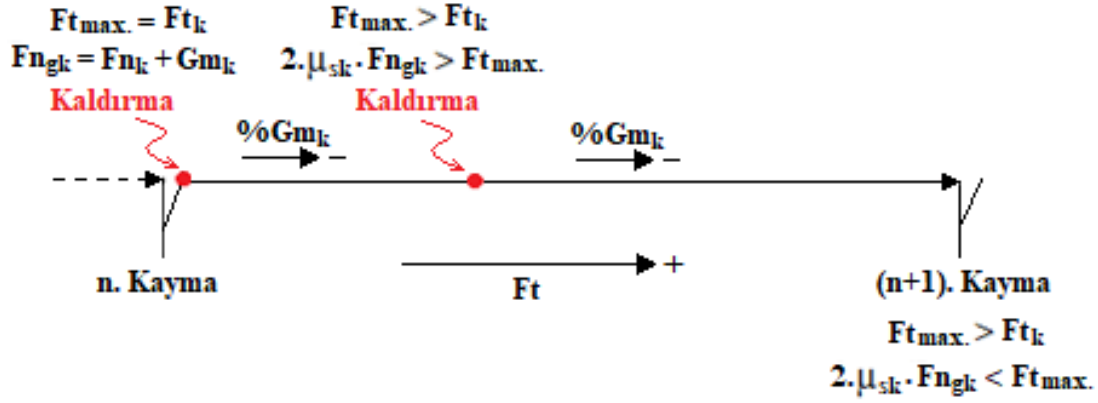
Eş. 3.3’deki denklem, ağırlığını ve yüzey özelliğini bilmediğimiz herhangi bir nesnenin kaldırıldığı andaki durumunu ifade etmektedir. Bir kavrama-kaldırma sürecinde parmak ile nesne yüzeyi arasında küçük kaymalar meydana gelmektedir. İnsan parmak ucu modeline

uygun olan Stick-Slip kayma modelinde de stick bölgedeki oluşacak büyük kaymanın meydana gelmemesi için slip bölgedeki küçük yerel kaymalar değerlendirilmektedir [40,45]. Ağırlığı ve yüzey sürtünme özellikleri bilinmeyen herhangi bir nesne kavranıp kaldırıldığında nesnenin toplam ağırlığı, parmaklardaki kaldırılma anında oluşan maksimum statik sürtünme kuvvetlerinin toplamına eşit olur. Eğer parmaklarda oluşan toplam F_n , $F_{t_{max}}$ 'ın μ_s 'ye oranına eşit veya bu orandan büyük olursa süreç kaldırma ile; eğer küçük olursa kayma ile sonuçlanacaktır. Her kayma noktası, o noktada uygulanan kavrama kuvvetinin nesnenin toplam ağırlığını, yüzey özelliğine bağlı olarak kaldırmaya yetmediği noktadır.

Bu çalışmada, kavrama süreci boyunca oluşan her bir kayma noktasındaki ölçülen yerel teğetsel kuvveti (F_{t_k}), nesnenin toplam ağırlığı ($F_{t_{max}}$) olarak kabul edip buna bağlı hesaplanan G_m 'nin uygulandığı yerel ağırlık yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda her kayma noktası için hesaplanan normal kuvvet değeri F_{n_k} , her kayma noktası için hesaplanan güvenlik marjı G_{m_k} , her kayma noktası için hesaplanan statik sürtünme katsayısı μ_{s_k} ve her kayma noktası için elde edilen güvenli kavrama kuvveti $F_{n_{gk}}$ olarak ifade edilmiştir. Bu yaklaşıma göre ağırlığı bilinmeyen bir nesneyi kavrayıp kaldırırken oluşan her kayma noktası için ölçülen F_{t_k} değerini nesnenin toplam ağırlığıymış gibi değerlendirip o kayma noktası için hesaplanan G_{m_k} 'yi F_{n_k} üzerine ekleyip $F_{n_{gk}}$ ile nesneyi kaldırmak için yukarıya doğru çekersek 3 durum meydana gelir:

- Eğer $F_{t_{max}}$, gerçekten F_{t_k} değerine eşitse nesne uygulanan G_{m_k} kadar $F_{n_{gk}}$ ile kaldırılır.
- Eğer $F_{t_{max}}$, F_{t_k} 'dan daha büyükse ve $F_{n_{gk}}$, $F_{t_{max}}$ 'ı kaldırmaya yetiyorsa nesne bir sonraki kayma meydana gelmeden daha düşük bir G_{m_k} oranı ile kaldırılır.
- Eğer $F_{t_{max}}$, F_{t_k} 'dan daha büyükse fakat $F_{n_{gk}}$, $F_{t_{max}}$ 'ı kaldırmaya yetmiyorsa bir sonraki kayma olayı gerçekleşir.

Yerel ağırlık yaklaşımı, kaldırma anında elde edilen güvenlik marjı yüzde oranından daha düşük bir güvenlik marjı yüzde oranı ile nesnenin kaldırılmasına olanak sağlar. Bu tez çalışmasında ortaya koyulan yerel ağırlık yaklaşımı için belirtilen 1. durum teoriktir ve gerçekleşmesi oldukça zordur. 2. durum ya da 3. durum ise gerçekleşmesi muhtemel durumlardır. Böylelikle, ağırlığı ve yüzey özelliği bilinmeyen bir nesne kaldırıldığında oluşan en yüksek güvenlik marjı yüzde oranı (% G_m), kayma noktası için hesaplanan optimum G_{m_k} 'ya bağlı % G_m kadar olur. Şekil 3.3'de yerel ağırlık yaklaşımının gösterimi verilmiştir. Şekil 3.3'de verilen % G_{m_k} , kayma noktası için hesaplanan G_m 'ye (G_{m_k}) göre elde edilen % G_m değeridir.



Şekil 3.3. Yerel ağırlık yaklaşımının gösterimi

Yerel ağırlık yaklaşımının gösterimi verilen Şekil 3.3'deki iki kayma arasındaki tüm kavrama süreci, nesnenin kaldırılma testinin yapıldığı süreçtir. Nesne iki kayma arasındaki sürecin herhangi bir noktasında kaldırılabilir. İki kayma arasında $\%Gm_k$ 'nın küçülmesinin sebebi, nesnenin yukarı çekilmesi ile artan ağırlığa göre izafi bir küçülmedir. Kavrama-kaldırma sürecinde herhangi bir kayma noktasındaki yerel değerler için Eş. 3.2, tekrar düzenlenip Eş. 3.5'deki gibi ifade edilmiştir.

$$F_{t_k} = 2 \cdot F_{n_k} \cdot \mu_{sk} \quad (3.5)$$

Eş. 3.3'ü Eş. 3.5 için tekrar düzenleyip Eş. 3.6 elde edilmiştir. Eş. 3.6, bu çalışmada tanımlanan kavrama-kaldırma sürecinin Coulomb sürtünme modeline uygun temel denklemdir.

$$F_{t_k} = 2 \cdot (F_{n_{gk}} - Gm_k) \cdot \mu_{sk} \quad (3.6)$$

Eş. 3.5 ve Eş. 3.6 kullanılarak bir kayma noktası için uygulanacak Gm_k değerini ifade eden Eş. 3.7 elde edilmiştir.

$$Gm_k = F_{n_{gk}} - F_{n_k} \quad (3.7)$$

Eş. 3.8'de ise kavrama ve kaldırma süreci için güvenlik marjı yüzde oranının hesaplandığı denklem verilmiştir. $\%Gm$ hesaplamada, nesnenin kaldırıldığı durum için de kavrama sürecindeki herhangi bir kayma noktası için de Eş. 3.8 kullanılmıştır.

$$\%Gm = \left(\frac{Gm}{F_{ng} - Gm} \right) \cdot 100 \quad (3.8)$$

Yerel ağırlık yaklaşımını daha net ortaya koyabilmek için aşağıdaki teorik sayısal örnek verilmiştir. Örnekte, 300 gf ağırlığa ve ortalama 0,75 μ_s değerine sahip nesnenin bir robot el tarafından kavranıp kaldırılması senaryosu işlenmiştir. Nesnenin kaldırılmadan hemen önceki kayma noktası için ölçülen ve hesaplanan örnek değerler ise aşağıdaki gibi olsun:

$$F_{tk} = 278 \text{ gf,}$$

$$F_{nk} = 185 \text{ gf,}$$

$$G_{mk} = 33 \text{ gf,}$$

$$\mu_{sk} = 0,75$$

Nesne bu şekilde kaldırılmaya çalışılırken bir kayma olayı daha gerçekleşmeden kaldırma olayı gerçekleşmiş olsun. Bu durumda Eş. 3.1, Eş. 3.2, Eş. 3.7 ve Eş. 3.8 kullanılarak hesaplandığında aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$F_{ngk} = F_{nk} + G_{mk} = 185 + 33 = 218 \text{ gf (Nesne kaldırıldığı için } F_{ngk} = F_{ng} \text{ olmaktadır),}$$

$$F_n = F_{t_{max}} / (2 \cdot \mu_{sk}) = 300 / (2 \cdot 0,75) = 200 \text{ gf,}$$

$$G_m = F_{ng} - F_n = 218 - 200 = 18 \text{ gf,}$$

$$\%G_m = (G_m / F_n) \cdot 100 = (18 / 200) \cdot 100 = \%9$$

Son kayma noktasında uygulanan F_{ngk} değerini Eş. 3.2'de F_n 'nin yerine yazıp hesapladığımızda 327 gf ağırlığın kaldırılabilir olduğu ortaya çıkacaktır. Fakat nesne 300 gf ağırlığındadır. Bu nedenle bir sonraki kayma meydana gelmeden nesne kaldırılarak daha düşük G_m ve $\%G_m$ elde edilmektedir. Çünkü son kayma noktasındaki 278 gf, nesnenin ağırlığı olsaydı ve kaldırılırdı $\%G_m$ değeri $\%18$ olacaktı. Ek olarak, nesne 310 gf olsaydı, $\%G_m$ değeri $\%5$ olurdu. Nesne 328 gf olsaydı, kaldırılmadan bir sonraki kayma meydana gelecekti.

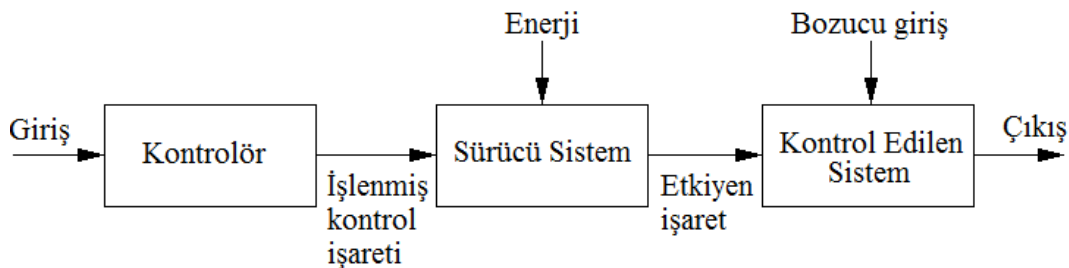
Eş. 3.7'yi kullanarak bir G_{mk} hesaplanabilmesi için kayma anındaki μ_{sk} , F_{tk} ve F_{ngk} değerlerini veya F_{nk} ve F_{ngk} değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. F_{tk} ve F_{nk} değerleri kavrama-kaldırma sürecinde kuvvet algılayıcıları ile ölçülebilir değerlerdir. μ_{sk} ise kayma noktası için hesaplanabilir değerdir. F_{ng} , G_{mk} 'nin uygulanması sonucunda ortaya çıkan bir değerdir. G_{mk} ise nesne özelliklerine bağlı olarak ne kadar olacağı belirsiz bir değerdir. Gerçek dünya kesin olmayan ve belirsizdir. Net doğru sonuç ve kesinlik, çözüm maliyeti barındırır. Esnek hesaplama yöntemlerinde, kolay işlenebilirlik, sağlamlık ve düşük çözüm maliyeti elde etmek için kesin olmamanın ve belirsizliğin toleransından yararlanır [46]. Esnek hesaplamanın ana bileşenleri bulanık mantık, sinirsel hesaplama ve olasılıksal akıl yürütmedir. Esnek

hesaplamanın temel fikri, insan zekâsının bilişsel yaklaşım modelini oluşturmaktır; insan zekâsını taklit etmektir [10]. Bulanık Mantık, klasik denetim sistemlerinin aksine karmaşık işlemlere ve matematiksel modele ihtiyaç duymadan insanların düşünme ve karar verme mekanizmasına benzer şekilde denetim işlemini gerçekleştirebilmektedir [47, 48]. Bu çalışmada, bir robot elin özellikleri bilinmeyen bir nesneyi kavrama-kaldırma sürecinde G_m 'nin hesaplanması için esnek hesaplama yöntemlerinden bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında sunulan güvenlik marjı odaklı bulanık mantık tabanlı kavrama kuvveti kontrol metodunun performansını test etmek için kavrama kuvveti kontrol sistemi tasarlanmıştır. Kavrama kuvveti kontrol sisteminin tasarımı, eyleyici, bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi, sürücüler, kontrol birimi, yazılım ve deney nesnesinin birleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kavrama kuvveti kontrol sisteminin performansı eyleyici ve deney nesnesi ile gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Performans testlerinde verilerin okunması ve kaydedilmesi için bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır.

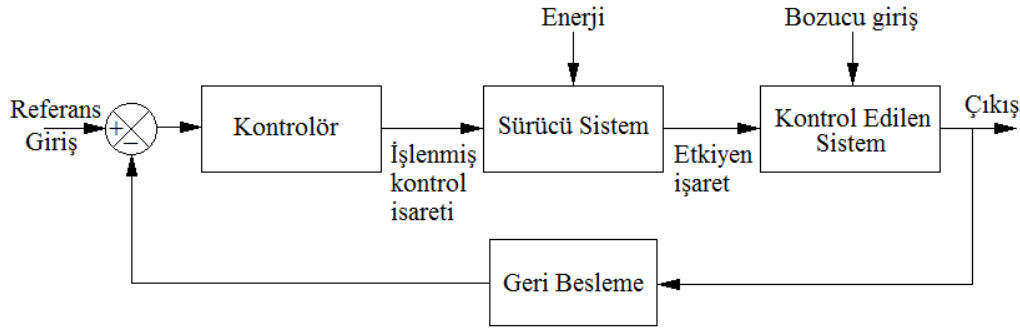
3.1. Kavrama Kuvveti Kontrol Sistemi

Kontrol sistemleri, belirli bir amaca yönelik bir işi gerçekleştirmek için belirli bir mantıksal düzene göre bir araya getirilmiş mekanik ve/veya elektronik bir düzeneğin davranışlarını, barındırdığı strateji ile yöneten sistemler olarak tanımlanabilir. Kontrol sistemleri genel olarak açık çevrim ve kapalı çevrim olarak iki tiptir [49-51]. Şekil 3.4'de görülen açık çevrim kontrol sistemlerinde çıkışın giriş üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Denetim hareketi sistem çıkışından bağımsızdır. Giriş işlenirken sistem cevabı dikkate alınmaz. Gürültü, titreşim, ısı vb. gibi bozucu etkilerden çıkış etkilenir. Bu nedenle bozucu giriş etkilerinin az veya hiç olmadığı durumlarda daha çok kullanılır. Açık çevrim kontrol sistemlerinin tasarımları basittir ve bir algılayıcıya ihtiyaç duyulmaz.



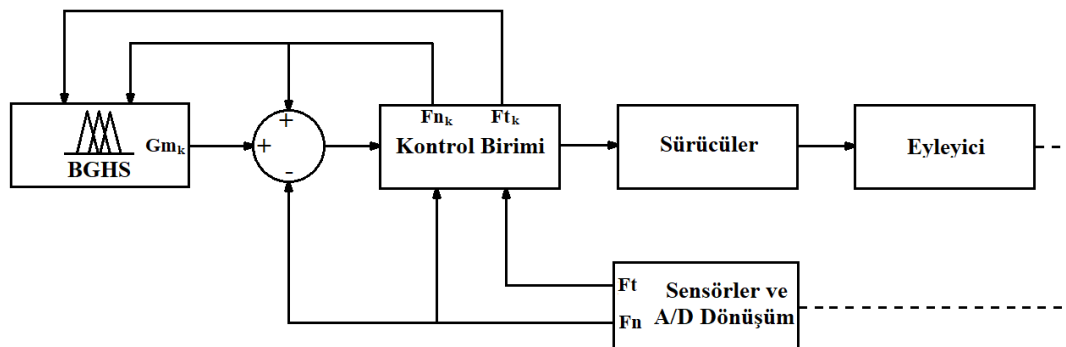
Şekil 3.4. Açık çevrim kontrol sistemi

Şekil 3.5’de görülen kapalı çevrim sistemlerde ise denetim, sistem çıkışına bağlı olarak değişebilmektedir. Sistemin çıkışından alınan geri besleme ile giriş denetlenmektedir. Geri beslemeyi ise ölçülen fiziksel değişim sağlamaktadır. Herhangi bir fiziksel değişimin kontrol sistemi tarafından denetlenebilmesi için ölçmesi gerekir. Bu ölçüm algılayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.5. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde bozucu etki girişlerinin çıkış üzerindeki olumsuz etkilerine karşı denetim performansı daha başarılıdır. Bozucu etki girdileri, sensörler ile algılanıp geri besleme sağlanarak istenilen çıkışın alınması için sistemin çalışması kontrol edilir. Genel olarak bozucu etkilerden kaynaklı çıkışta bir hata meydana gelmektedir ve kontrol sistemi bu hatayı referans girişi kullanarak sıfırlamaya ya da belirli bir düzeyde tutmaya çalışmaktadır. Sistemin çıktısı, belirlenen örnekleme zamanına bağlı olarak belirli zaman aralıkları ile ölçülüp referans giriş ile karşılaştırılmaktadır. Ardından, tekrar girdi üretilerek çıkışa işlenmektedir. Bu tez çalışmasında tasarlanan KKKS'nin genel yapısına ait blok diyagram Şekil 3.6'da verilmiştir.

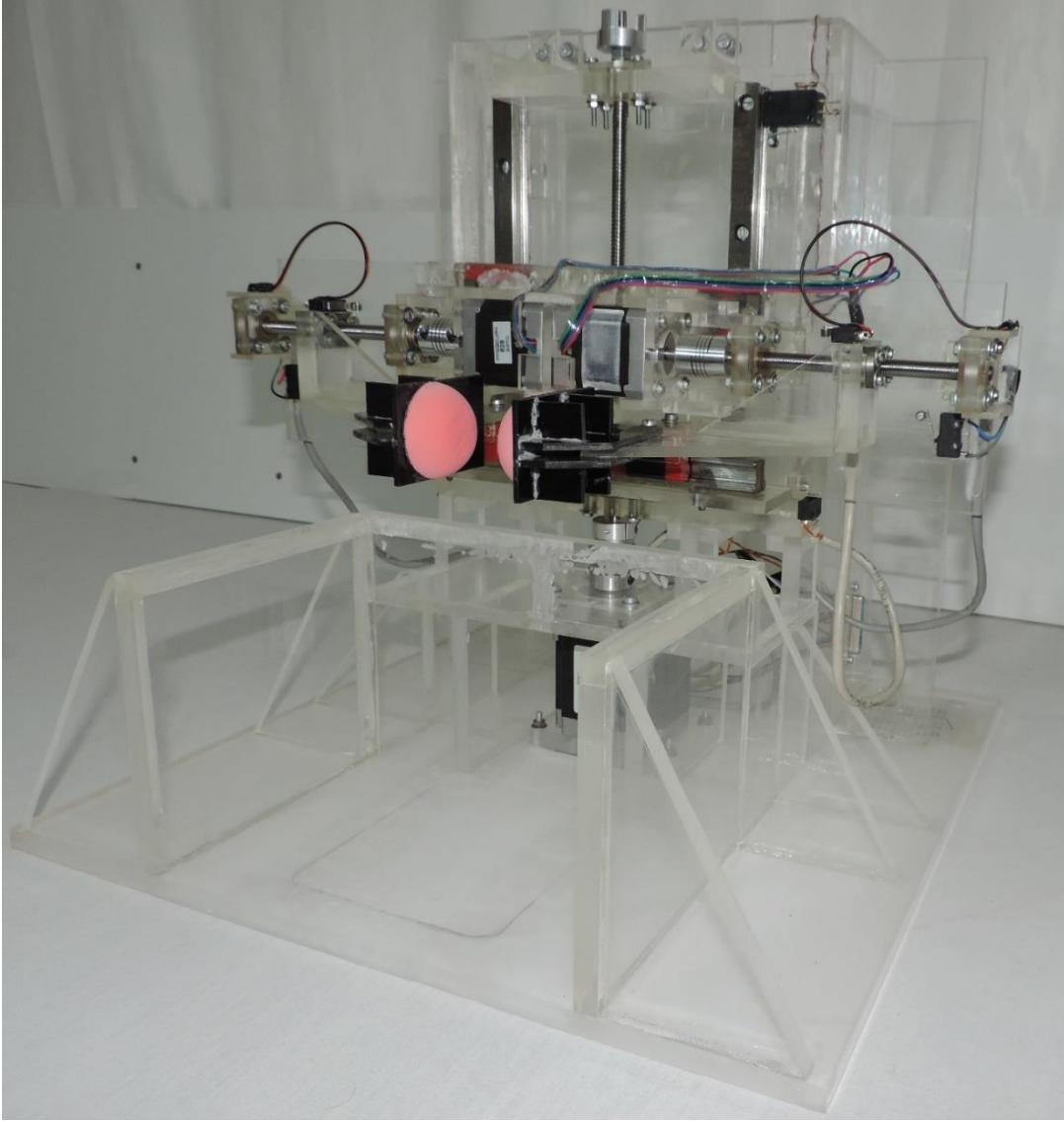


Şekil 3.6. KKKS'nin genel yapısı

KKKS, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi BGHS, kontrol birimi, sensörler ve A/D (Analog/Dijital) dönüşüm, sürücüler ve eyleyici olmak üzere 5 ana kısımdan oluşan bulanık mantık denetimli kapalı çevrim bir kontrol sistemidir.

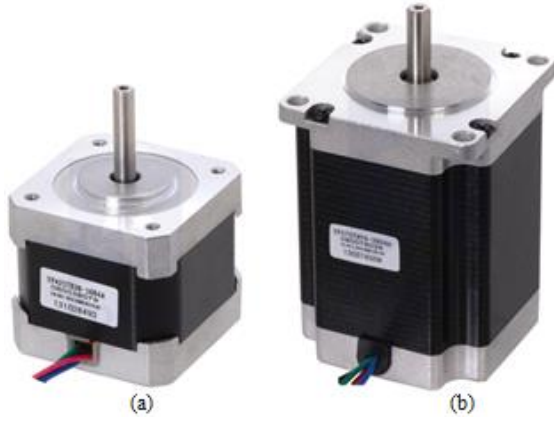
3.2. Eyleyici

Bu tez çalışmasında sunulan kavrama kuvveti kontrol metodunun performansının gerçek zamanlı test edileceği ve diğer ölçümlerin yapılacağı 2 parmaklı, 2 eksenli eyleyici tasarlanıp üretilmiştir. Resim 3.1’de eyleyicinin yapısı görülmektedir. Eyleyici, birbirinden bağımsız hareket edebilen 2 adet kavrama tırnağından oluşan yatay hareket sistemine ve kavranan nesnenin kaldırılmasını sağlayan dikey hareket sistemine sahiptir. Kavrama tırnakları hassas kavrama görevi için işaret ve başparmağın görevini yerine getirmektedirler.



Resim 3.1. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen eyleyici

Eyleyicinin yatay hareketi için Resim 3.2’de gösterilen 2 adet Soyo SY42STH47-1684A, Nema 17, 1,8°, 200 adım/tur, 4 telli, bipolar step motor ve dikey hareket için 1 adet Soyo SY57STH76-2804A, Nema 23, 1,8°, 200 adım/tur, 4 telli, bipolar step motor kullanılmıştır.



Resim 3.2. Kullanılan step motorlar: a) SY42STH47-1684A, b) SY57STH76-2804A

Step motorların rotor hareketini motor şaftından vidalı mile aktarmak için Resim 3.3’de görülen esnek kaplin kullanılmıştır. Esnek kaplinler, aksel kaçıklıktan dolayı oluşabilecek dönme düzgünlüğünü karşılayan hareket aktarım elemanıdır.



Resim 3.3. Esnek kaplin

Step motorlar esnek kaplinlerle yatay hareket için 1 mm hatveli Gten 0801-FSD; dikey hareket için ise 2 mm hatveli Gten 0802-FSD biyeli somun-vidalı mil modüllerine bağlanmıştır. Resim 3.4’de görülen biyeli somun-vidalı mil modülü, üzerinde bulunan biyeli kayar somun sayesinde step motor şaftının açısıl hareketini doğrusal harekete çeviren bir makine elemanıdır.



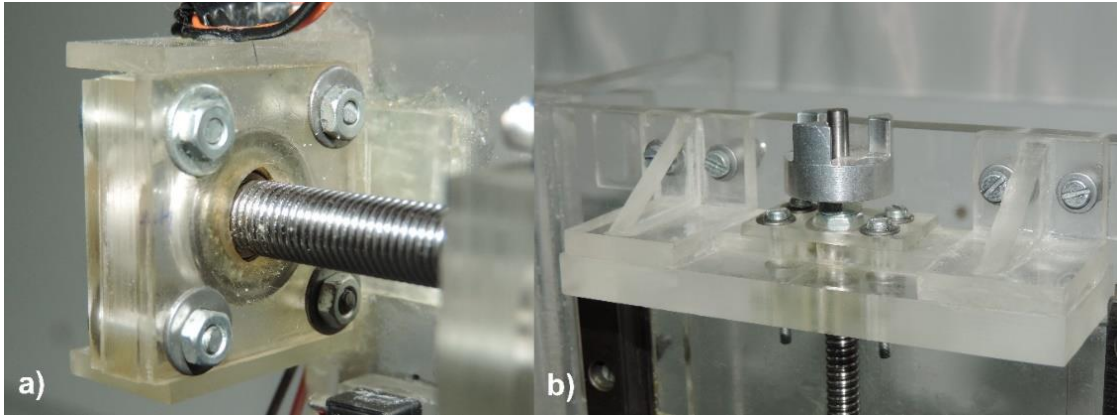
Resim 3.4. Biyeli somun-vidalı mil modülü

Yatay ve dikey yöndeki doğrusal hareketler için biyeli somunlara bağlı Schneeberger Bmk 15 kısa dar arabalar ve bunların üzerinde kaydığı, yatay yönde Schneeberger Bm 15x100 mm lineer ray ve dikey yönde Schneeberger Bm 15x200 mm lineer ray kullanılmıştır. Lineer ray ve araba sistemi Resim 3.5’de gösterilmiştir.



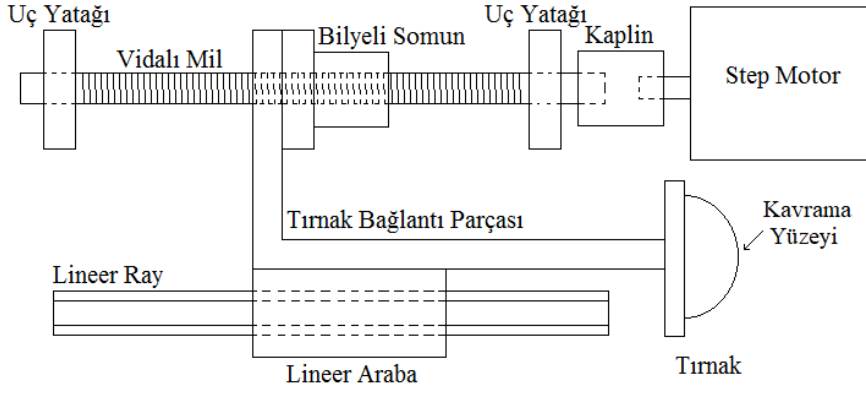
Resim 3.5. Lineer ray ve araba

Kaplinlerle step motorların şaftına bağlı olan biyeli somun-vidalı mil modülünün vidalı mil kısımları, yalpalama olmadan düzgün bir doğrusal hareket sağlanması için Resim 3.6’da görülen uç yataklarına yerleştirilmiştir. Uç yataklarının göbeklerinde dönme hareketini sağlayan rulmanlar mevcuttur. Vidalı miller, rulmanlarla beraber iki uç yatağı arasında dönmektedir.



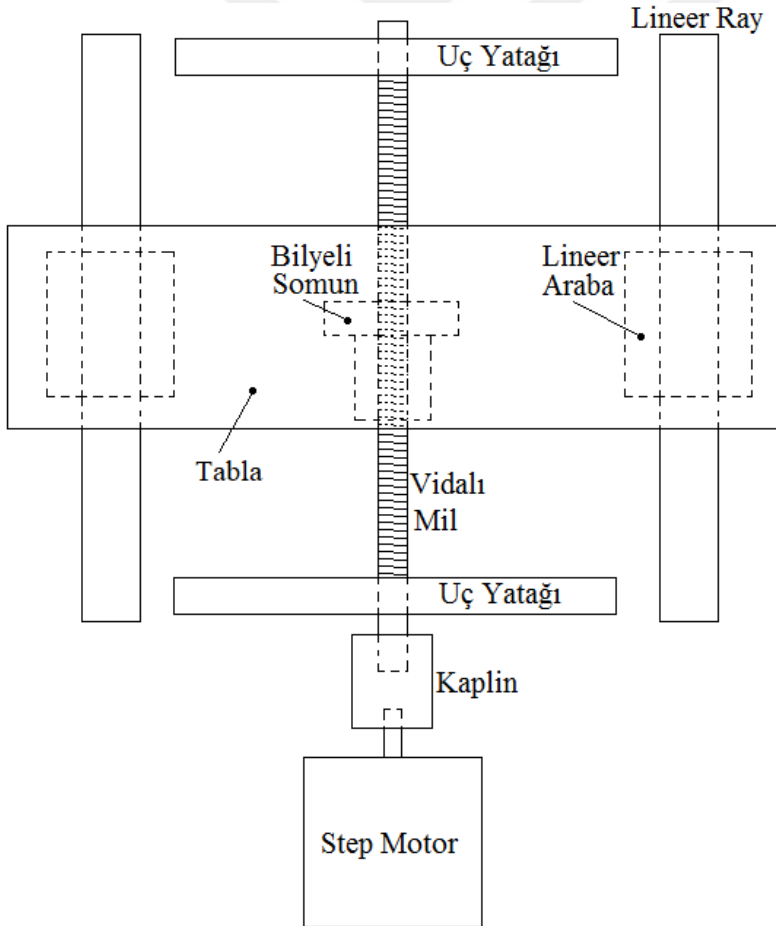
Resim 3.6. Uç yatakları: a) Yatay hareket için, b) Dikey hareket için

Step motor, uç yatakları, biyeli somun-vidalı mil modülü, Lineer ray ve araba ile oluşturulan yatay doğrusal hareket sisteminin prensip şeması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Yatay doğrusal hareket sisteminin prensip şeması

Şekil 3.7’de gösterilen yatay hareket sistemi, birbirinin simetriği olan sağ ve sol yatay hareket için verilmiştir. Dikey hareket için tasarlanan doğrusal hareket sisteminin prensip şeması ise Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

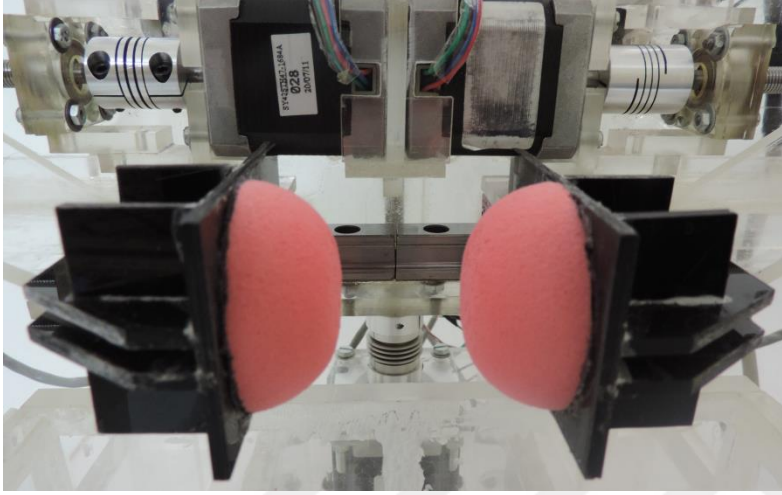


Şekil 3.8. Dikey doğrusal hareket sisteminin prensip şeması

Eyleyici sistemin taşıyıcı statik tasarımı, 3 mm ile 10 mm arasında farklı kalınlıklardaki pleksiglas malzemedan gerçekleştirilmiştir. Yatay ve dikey hareketleri sonlandırmak için limit

anahtarları kullanılmıştır. Eyleyici ile kontrol devresi arasındaki tüm bağlantılar eyleyici üzerine monte edilmiş DB25 erkek konnektör ile sağlanmaktadır.

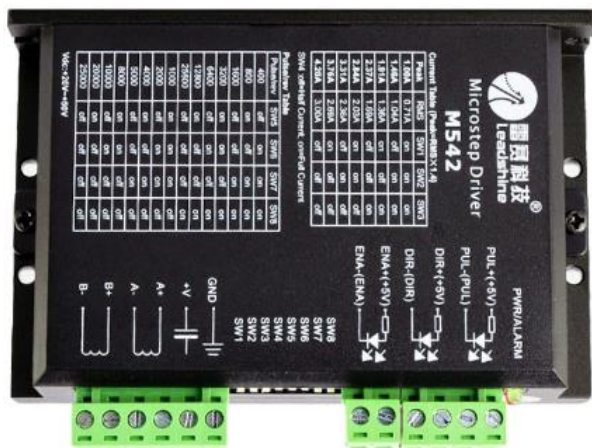
Eyleyicinin kavrama tırnaklarını yumuşak parmak ucu modeline uygun hale getirmek için Resim 3.7’de gösterilen yarı küresel lateks köpük sünger kullanılmıştır. Böylece eyleyicinin parmak ucu kavrama yüzeyi elde edilmiştir.



Resim 3.7. Eyleyicinin kavrama tırnakları

3.3. Yatay ve Dikey Sürücüler

Eyleyicinin üzerindeki step motorlar, Resim 3.8’de gösterilen Leadshine M542 V2.0 microstep sürücüler tarafından sürülmektedir. Yatay sağ, yatay sol ve dikey step motorlar için toplam 3 adet step motor sürücü kullanılmıştır.



Leadshine M542 sürücü, tipik 36 VDC ve +20 VDC ile +50 VDC arasında çalışma gerilimi aralığına sahip, 1 A'den 4,2 A'e (3A RMS) kadar çıkış akımı verebilen, 300 Khz maksimum sürücü puls frekansına sahip, izolasyon direnci 500 M Ω olan ve 25600 step/tur microstep çözünürlüğüne sahip bir sürücüdür.

Step motorlar için kullanılan microstep sürücülerin üzerlerinde microstep çözünürlüğü için seçim anahtarları bulunmaktadır. Bu anahtarlar step motorun 1 tam turunda vidalı mil hatvesinin kaç bölüneceğini; 1 tam turda kaç adım atılacağını belirlemektedir. Bu çalışmada kullanılan step motorlar 1,8°, 200 adım/tur olduğundan normal durumda hatveyi 200'e bölerek 1 tam turda 200 adım atmaktadırlar. Microstep çözünürlüğü artırılarak 1 tam tur daha fazla adıma bölünebilmektedir. Çalışmada yatay hareket için kullanılan sürücülerin çözünürlüğü 1/800 adım/tur ve dikey hareket için kullanılan sürücünün çözünürlüğü ise 1/1600 adım/tur olarak ayarlanmıştır.

Step motor sürücüleri için güç kaynağı olarak Resim 3.9'da gösterilen Mean Well NES-350-36, 36V, 350W anahtarlama güç kaynağı (Switch Mode Power Supply (SMPS) kullanılmıştır. Güç kaynağının 3 adet 36VDC çıkışı, 3 adet step motor sürücüsünü beslemektedir.



Resim 3.9. SMPS güç kaynağı

3.4. Hassas Kavrama-Kaldırma Deneyleri

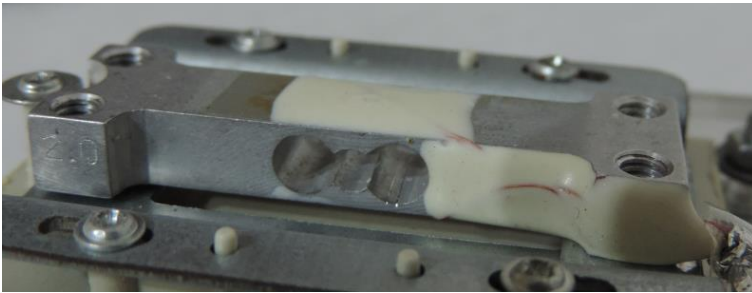
3.4.1. Deney nesnesi

Bu tez çalışmasında HKKD'de ve diğer deney ve ölçme işlemlerinde kullanılacak bir deney nesnesi tasarlanmıştır. Tasarlanan deney nesnesi Resim 3.10'da görülmektedir. Deney nesnesinin taşıyıcı konstrüksiyonu, 3 mm kalınlıkta şeffaf plexiglass malzemeden üretilmiştir.



Resim 3.10. Deney nesnesi

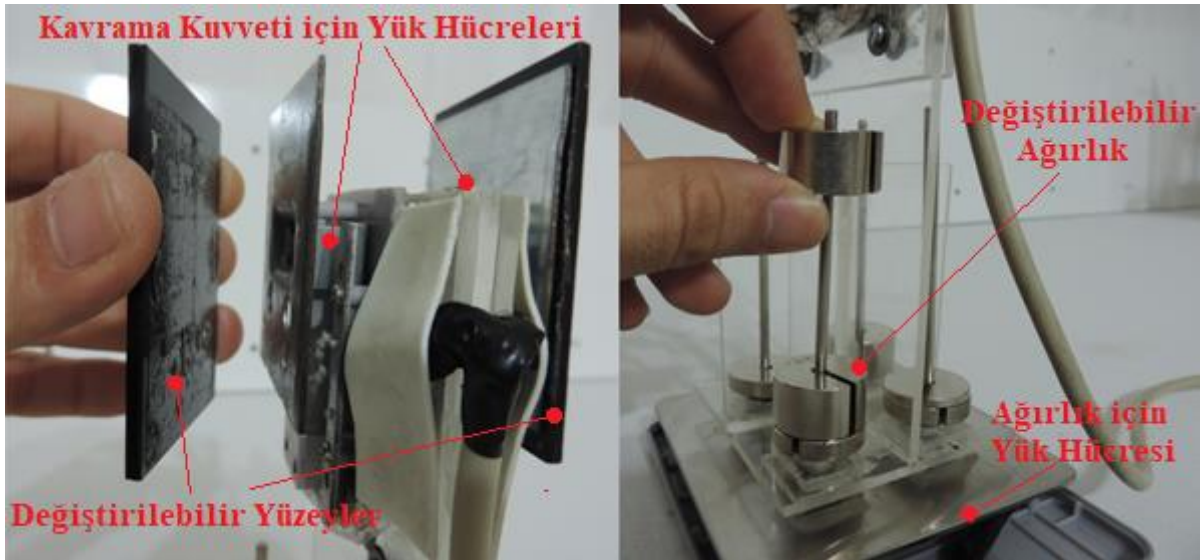
Deney nesnesi, kavranıp kaldırılacak nesne yerine kullanılmaktadır. Başparmağın ve işaret parmağının kavrayacağı şekilde yük hücresi (Loadcell) bağlı iki adet kavrama yüzeyine sahiptir. Yük hücreleri, genel olarak etiket değerlerinin %150 üzerinde yüklenebilmektedirler. Deney nesnesinde kullanılan yük hücrelerinin etiket yükleme değerleri 2 kg olup, bu değerlerin %55 üzerinde; 3,1 kg yüklemeye kadar kullanılmıştır. Kavrama esnasındaki normal kuvvet, kavrama yüzeylerine bağlı yük hücreleri ile algılanmaktadır. Kaldırma esnasında oluşan teğetsel kuvvet ise deney nesnesinin üzerine koyulduğu ve altında yük hücresi bulunan platform ile algılanmaktadır. Yük hücrelerinin çıkış elektrik işareti genliği tam yüklemeye 2mV civarındadır. 2 adet normal kuvvet için 1 adet de teğetsel kuvvet için kullanılan yük hücresi Resim 3.11’de görülmektedir.



Resim 3.11. Yük hücresi

Kavrama-kaldırma işleminden önce yazılım içerisinde deney nesnesinin darası alınmaktadır. Bu şekilde, deney nesnesi yukarı çekilmeye başlandığında taban yük hücresi üzerinden okunan teğetsel kuvvet değeri eksi yönde azalış göstermektedir. Okunan değerler yazılım içerisinde -1 ile çarpılarak artı yönde artış şekline dönüştürülmektedir.

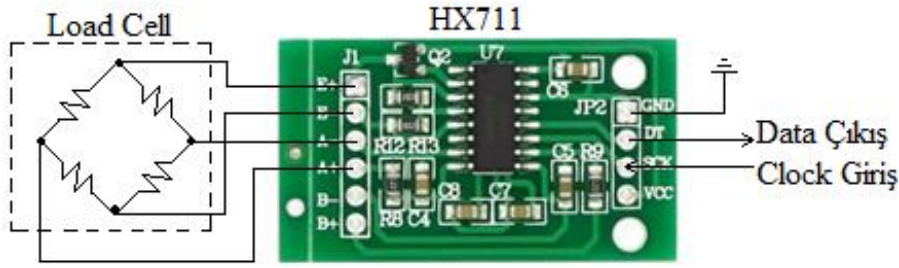
Deney nesnesi, tabanına monte edilmiş metal çubuklara farklı ağırlıktaki nesnelerin yerleştirilebildiği değiştirilebilir ağırlık özelliğine sahiptir. Ayrıca farklı yüzey sürtünme özelliklerine sahip yüzeylerin takılabildiği değiştirilebilir kavrama yüzeyi özelliğine sahiptir. Deney nesnesinin değiştirilebilir özellikleri Resim 3.12’de gösterilmiştir. Ağırlık çubukları boş iken deney nesnesi yaklaşık 300 gf ağırlığa sahiptir.



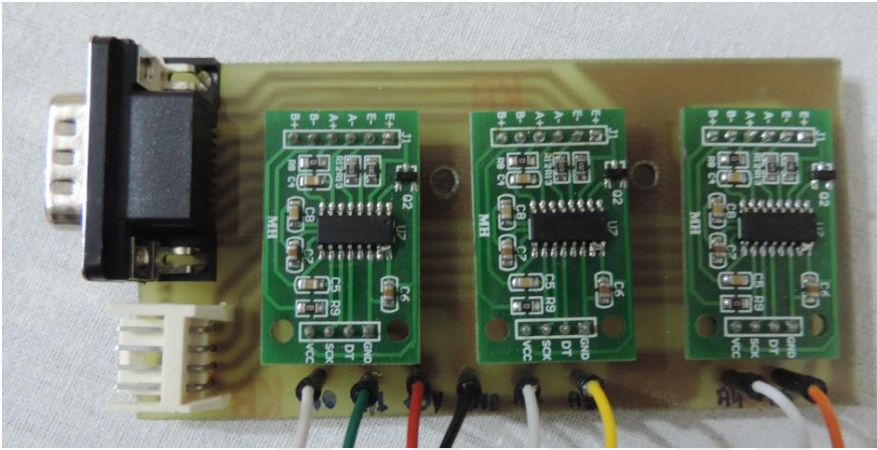
Resim 3.12. Deney nesnesinin değiştirilebilir özellikleri

3.4.2. Deney düzeneği

Bu çalışmada yapılan deney ve ölçme işlemlerinde kullanılmak üzere deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney nesnesinde kullanılan 3 adet yük hücresinin her birinin 4 adet çıkış kablosu mevcuttur. Yük hücrelerinin her biri Resim 3.13’de görülen HX711 sensör modülüne bağlanmaktadır. HX711 sensör modülünün yapısında 24 bit A/D çevirici ve programlanabilir kazanç yükselteci mevcuttur. HX711 sensör modülünün normalde 10 SPS (Sample per second) olan veri dönüştürme hızı, kart üzerindeki entegre devrenin 15 numaralı pini toprak bağlantısından ayrılıp besleme gerilimine lehimleyerek 80 SPS yapılmıştır. HX711 modüllerinden Resim 3.14’de görülen sensör modül kartı elde edilmiştir.



Resim 3.13. HX711 yük hücresi için sensör modülü ve bağlantı şeması



Resim 3.14. Sensör modül kartı

Yük hücrelerinden alınan sinyallerin sensör modül kartı ile genliği yükseltilecek A/D dönüşümü yapılmaktadır. Bu verilerin işlenmesi için Resim 3.15’de görülen AUR3 (Arduino Uno R3) kartı kullanılmıştır.

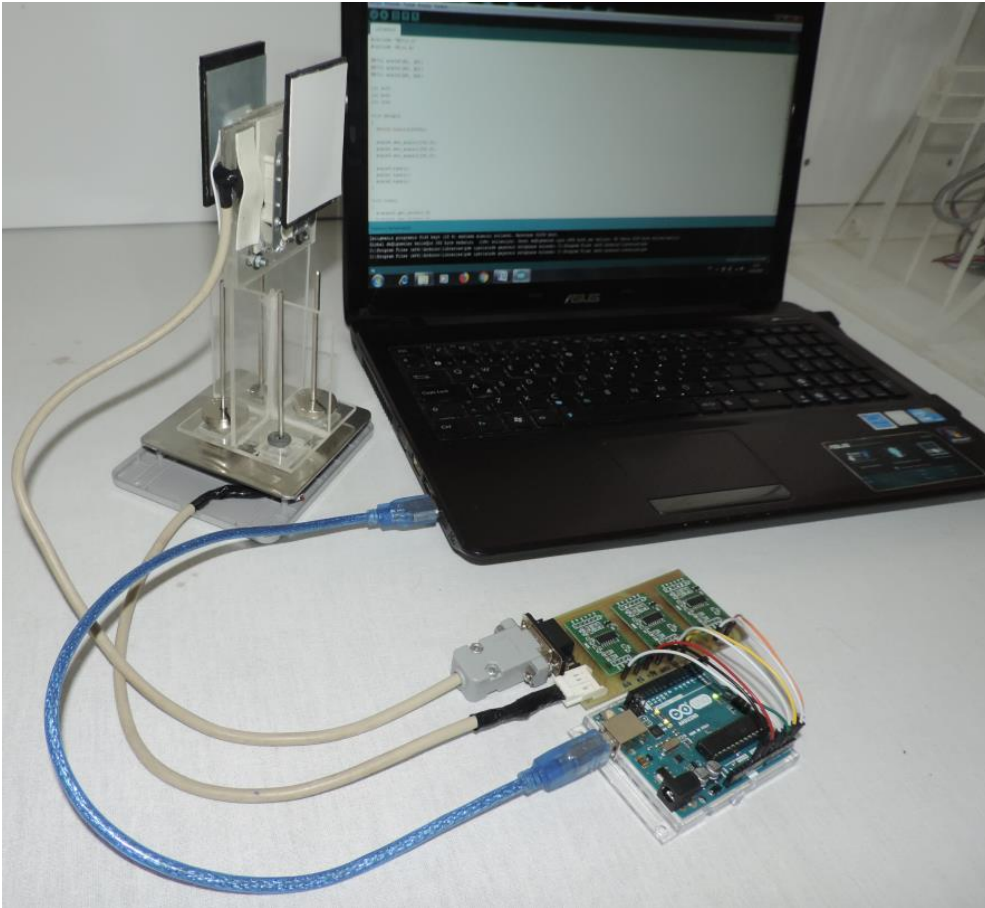


Resim 3.15. Arduino Uno R3 kartı

AUR3 kartı üzerinde Atmel Atmega328P-PU mikrodenetleyici mevcuttur. AUR3 kartı, +5 VDC çalışma gerilimine ve 7-12 VDC tavsiye edilen besleme gerilimine sahip, 14 adet dijital giriş/çıkış pinlerine ve 6 adet analog giriş pinlerine sahip, 32KB flash hafızası olan ve saat

frekansı 16 MHz olan mikrodenetleyicili bir geliştirme kartıdır. AUR3 kartı bilgisayara USB (Universal serial bus) kablosu ile bağlanmaktadır. Bilgisayara bağlıyken +5 VDC besleme gerilimi seri bağlantı kablosu yolu ile sağlanmaktadır. Bağlı değil iken 7-12 VDC ile harici besleme sağlanabilmektedir.

Sensör modül kartının tüm saat girişlerinin ve seri data çıkışlarının AUR3 kartı ile bağlantısı yapıp bilgisayar ile USB bağlantısı yapılarak Resim 3.16'da görülen deney düzeneği elde edilmiştir. AUR3 kartına, sensör modüllerinden alınan verilerin okunmasını ve işlenmesini sağlayacak yazılım yüklenmiştir. Sensör modüllerinden okunan veriler, 1gf hassasiyetle okunup işlenmektedir.



Resim 3.16. Deney düzeneği

3.4.3. Yüzey materyallerinin belirlenmesi

Deney nesnesinin kavrama yüzeylerini değiştirilebilmek için kullanılacak olan yüzey materyalleri belirlenmeye çalışılmıştır. Materyallerin seçiminde kolay elde edilebilir materyaller değerlendirilmiştir. Çok kaygandan çok sürtünmeliye yüzey özelliklerini yeteri

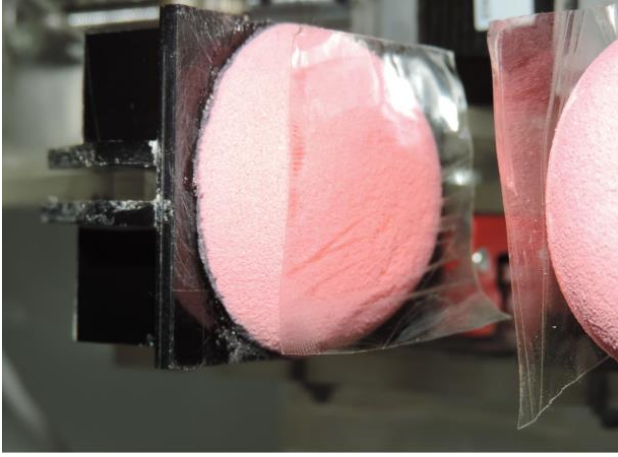
kadar temsil edebilecek şekilde 5 adet yüzey materyal belirlenmiştir. Yüzey materyalleri, seçilen materyallerin μ_s değerleri ölçülerek belirlenmiştir. μ_s değerlerinin ölçümü için deney düzeneği ve eyleyici kullanılmıştır. μ_s değerlerinin ölçümü için seçilen materyaller, kesilip şekillendirilerek deney nesnesinin kavrama yüzeylerine yerleştirilebilen türden materyallerden seçilmiştir. Seçilen materyallerini μ_s değeri belirlendikten sonra eğer uygun değilse başka bir materyalin denemesine geçilmektedir. Bu şekilde istenilen μ_s değerlerinde materyaller bulunmaya çalışılmıştır.

İnsan parmak ucu materyali olan doğal deri, giyilebilir olmadığından gerek yüzey materyallerinin seçiminde gerekse yapılan deney ve testlerde uygun bir parmak ucu ara yüz materyaline ihtiyaç doğmuştur. Bu materyal insan duyuşal yeteneğini mümkün derecede etkilemeyecek incelikte ve giyilebilir olmalıdır. Bu nedenle, parmak ucu materyali olarak BOPP (Biaxially Oriented Polypropylene-Çift Yönlü Gerdirilmiş Polipropilen) film kullanılmıştır. Bu materyal 36 μ m kalınlıkta olup Ve-Ge Aslan 45 mm koli bandı kullanılarak elde edilmiştir. Çok ince film şeklinde olması ve kendinden yapışkanlı bir yapıya sahip olmasından dolayı uygun görülmüştür. HKKD’de, BOPP filmin katılımcıların parmak ucunda nasıl kullanıldığı Resim 3.17’de gösterilmiştir.



Resim 3.17. Katılımcıların parmak ucunda BOPP filmin kullanımı

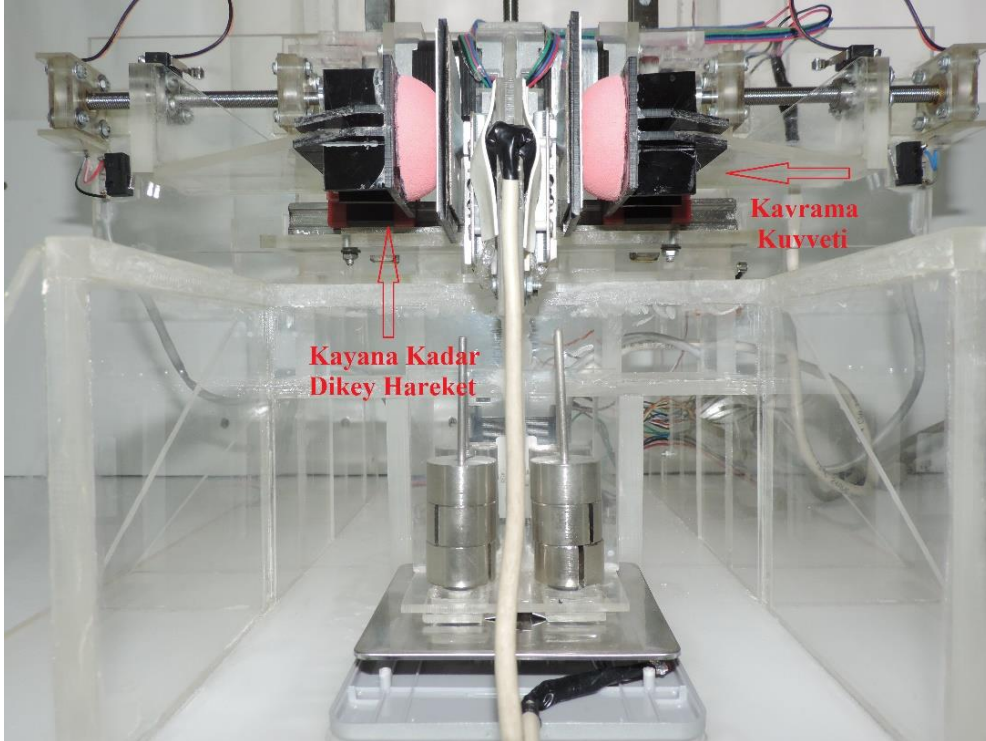
BOPP film, eyleyicinin kavrama yüzeyleri olan yarı küresel lateks köpük sünger üzerine yapıştırılarak eyleyicinin parmak ucu materyali olarak ta kullanılmıştır. Böylece insan ve eyleyici arasında ortak yüzey materyali belirlenmiştir ve izafi değerlendirmeye olanak sağlanmıştır. BOPP filmin eyleyicinin tırnak kavrama yüzeylerinde nasıl kullanıldığı ise Resim 3.18’de gösterilmiştir.



Resim 3.18. Eyleyicinin tırnak kavrama yüzeylerinde BOPP filmin kullanımı

Yüzey materyallerinin statik sürtünme katsayısı (μ_s) değerlerinin belirlenmesi

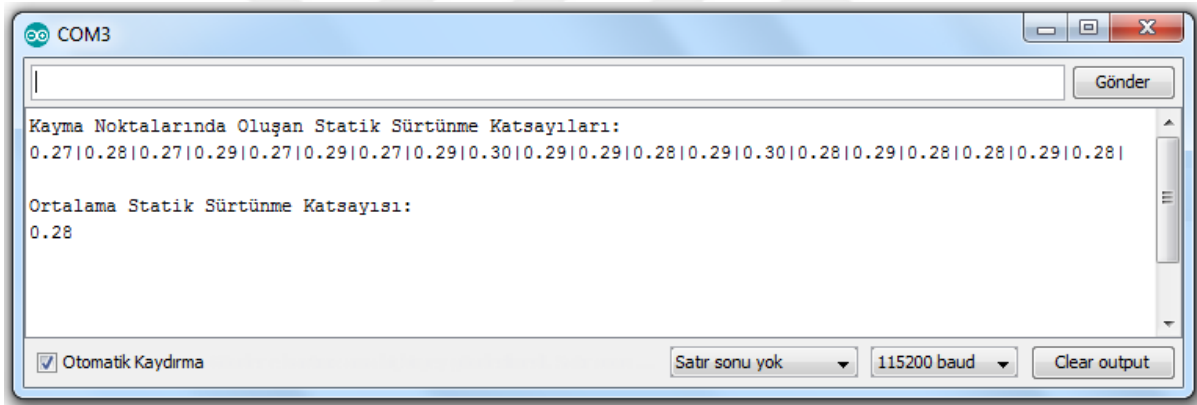
Yüzey materyalinin belirlenmesinde μ_s değerlerinin ölçülmesi için Resim 3.19'da görüldüğü gibi ölçümü yapılacak materyal, deney nesnesinin kavrama yüzeylerine yerleştirilmektedir. Eyleyicinin kavrama yüzeylerine ise BOPP film yapıştırılmaktadır.



Resim 3.19. Statik sürtünme katsayılarının ölçümü

μ_s değerlerinin ölçülmesi için geliştirilen yazılım, Arduino IDE (Integrated Development Environment- Tümlleşik Geliştirme Ortamı) kullanılarak yazılmıştır. Geliştirilen yazılım, deney

düzeninde bulunan AUR3 kartına yüklenmiştir. Deney nesnesinin değiştirilebilir ağırlık çubuklarına ise 600 gf ağırlık yerleştirilip nesne ağırlığı sabit 900 gf yapılmıştır. Bu şekilde eyleyicinin sağ ve sol kavrayıcılarından başlangıç değeri 100 gf olmak üzere 20 gf 'luk artışlarla normal kuvvet uygulanmıştır. Kayma oluncaya kadar deney nesnesi yukarı çekilmektedir. Kayma meydana geldiğinde F_{nk} ve F_{tk} değerleri kaydedilmektedir. Kayma anındaki F_{nk} ve F_{tk} değerleri üzerinden her yüzey materyali için toplam 20 adet μ_{sk} , hesaplanmıştır. Yazılım, μ_{sk} 'yi hesaplarken Eş. 3.5'i kullanmaktadır. Hesaplama yapılırken elde edilen ondalıklı veriler, en yakın yüzde birler basamağına yuvarlanmıştır. Elde edilen 20 adet μ_{sk} verisinin aritmetik ortalaması yazılım içerisinde hesaplanarak her bir yüzey materyali için μ_{sort} (Ortalama statik sürtünme katsayısı) hesaplanmıştır. Resim 3.20'de örnek bir çıktı olarak, A4 yüzey materyali için hesaplanan μ_{sk} değerlerini ve bu değerlerden hesaplanan μ_{sort} değerini gösteren Arduino IDE seri port ekran çıktısı görülmektedir. Elde edilen μ_{sort} değerleri, yüzey materyalinin BOPP film ile oluşturduğu yaklaşık μ_s değeri olarak kabul edilmiştir.

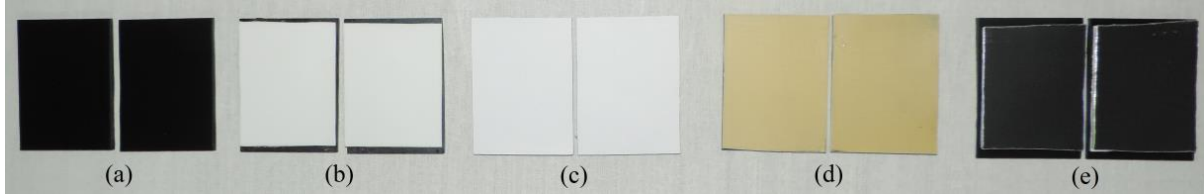


Resim 3.20. Hesaplanan μ_{sort} ve μ_{sk} değerlerini gösteren örnek ekran çıktısı

Belirlenen yüzey materyalleri

BOPP film ile yüzey materyalleri arasında oluşan μ_{sort} değerlerine göre çok kaygandan çok sürtünmeliye μ_s aralığını temsil edebilecek 5 adet yüzey materyali belirlenmiştir. Bu materyaller: PMMA (Polymethyl Methacrylate- Pleksiglas), PP (Polypropylene-Polipropilen), Fotokopi kâğıdı olarak kullanılan A4 Kâğıdı, HDPE (High Density Polyethylene-Yüksek Yoğunluklu Polietilen) ve PTFE (Polytetrafluoroethylene-Teflon) olarak belirlenmiştir. Belirlenen materyaller 60x50 mm ebatlarında kesilmiş siyah plexiglass taban üzerine uygun şekilde kesilip çift taraflı film bant ile yapıştırılarak kavrama yüzeyleri oluşturulmuştur. Plexiglass taban ise yine çift taraflı yapışkan film bant ile deney nesnesinin kavrama yüzeylerine tutturulmaktadır. Belirlenen materyaller ile oluşturulmuş kavrama yüzeyleri Resim

3.21’de görülmektedir. Çizelge 3.1’de ise bu materyallerin BOPP film materyali ile oluşturduğu μ_{sk} ve μ_{sort} değerleri verilmiştir. μ_{sort} değerleri, belirlenen yüzey materyallerinin BOPP film ile oluşturdukları yaklaşık μ_s değeri olarak kabul edilmiştir.



Resim 3.21. Belirlenen yüzey materyalleri ile oluşturulmuş kavrama yüzeyleri:
a) PMMA, b) PP, c) A4 Kâğıdı, d) HDPE, e) PTFE

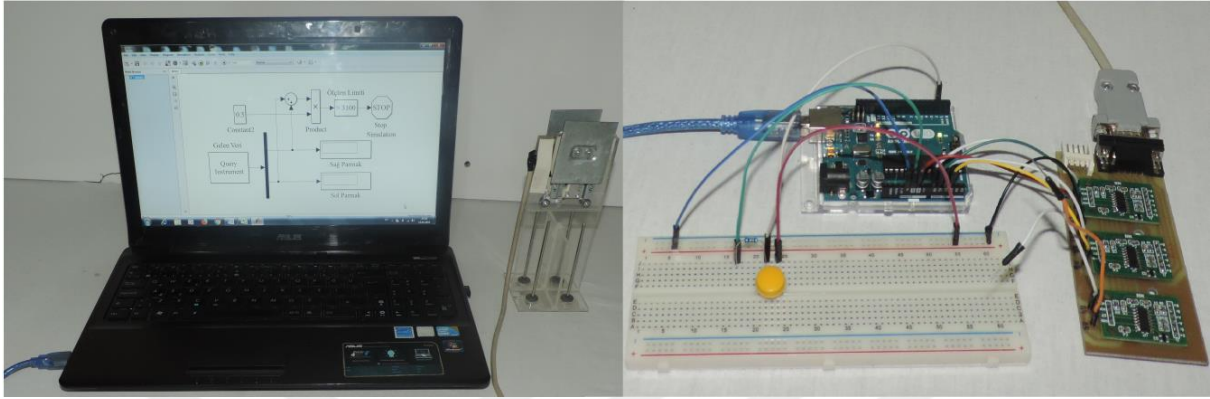
Çizelge 3.1. Belirlenen yüzey materyalleri için elde edilen μ_{sk} ve μ_{sort} değerleri

	PMMA	PP	A4 Kâğıdı	HDPE	PTFE
	0,76	0,55	0,27	0,14	0,07
	0,76	0,54	0,28	0,14	0,08
	0,75	0,56	0,27	0,16	0,07
	0,75	0,55	0,29	0,15	0,08
	0,76	0,55	0,27	0,14	0,07
	0,74	0,56	0,29	0,15	0,08
	0,77	0,54	0,28	0,14	0,08
	0,76	0,55	0,29	0,14	0,07
	0,76	0,55	0,3	0,14	0,06
μ_{sk}	0,74	0,56	0,29	0,15	0,08
	0,75	0,55	0,29	0,15	0,08
	0,76	0,56	0,3	0,12	0,07
	0,77	0,56	0,29	0,13	0,06
	0,75	0,53	0,3	0,14	0,08
	0,76	0,53	0,3	0,15	0,06
	0,75	0,56	0,29	0,14	0,07
	0,75	0,55	0,28	0,14	0,08
	0,75	0,55	0,28	0,14	0,07
	0,76	0,56	0,29	0,13	0,07
	0,75	0,56	0,28	0,14	0,08
μ_{sort}	0,75	0,55	0,28	0,14	0,07

HDPE ve PP, yiyecek ve içecek ürünlerinin kutuları, kırtasiye malzemeleri, market poşetleri ve evsel eşyalar gibi geniş kullanım alanına sahiptir. PTFE ise evsel ürün olarak teflon tavalarda yoğun olarak kullanılan bir malzemedir. PTFE, bir teflon tavanın tabanı kesilerek elde edilmiştir. HDPE, bir marketin plastik poşetinden; PP ise bir dondurma kutusundan kesilerek elde edilmiştir. PMMA, 3 mm kalınlıkta plaka olarak satın alınmıştır. A4 kâğıdı ise 80gr A4 fotokopi kâğıdından elde edilmiştir.

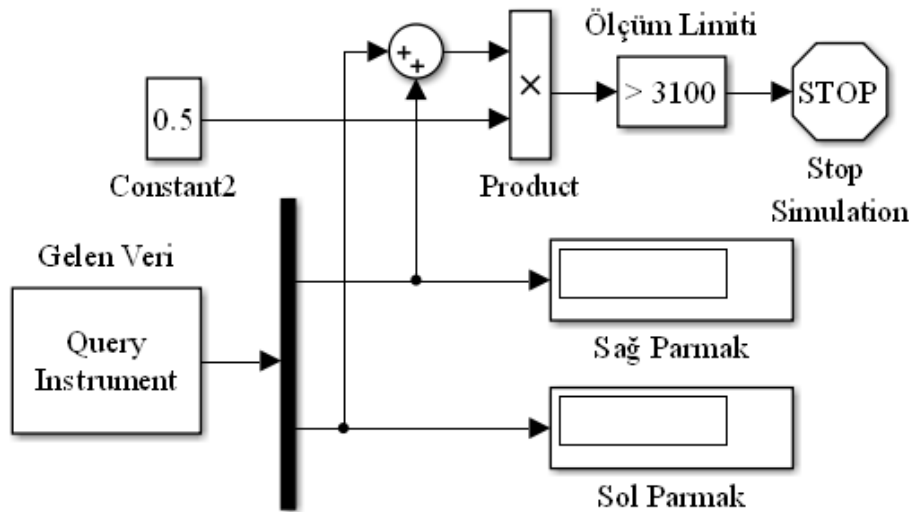
3.4.4. Deney düzeneğinin HKKD için kurulumu

HKKD için Resim 3.22’de görülen deney düzeneği hazırlanmıştır. HKKD’ de veriler, Resim 3.22’de görülen breadboard üzerindeki okuma butonuna basılarak okunmaktadır.



Resim 3.22. HKKD için deney düzeneğinin kurulumu

HKKD’de katılımcıların deney nesnesini kaldırdıkları andaki ölçüm verilerini okumak için Şekil 3.9’da görülen MATLAB/Simulink modeli hazırlanmıştır. AUR3 kartının MATLAB ile haberleşmesi için Arduino IO Library eklentisi MATLAB’a eklenmiştir. HKKD için gerekli yazılım Arduino IDE ile yazılıp AUR3 kartına yüklenmiştir.



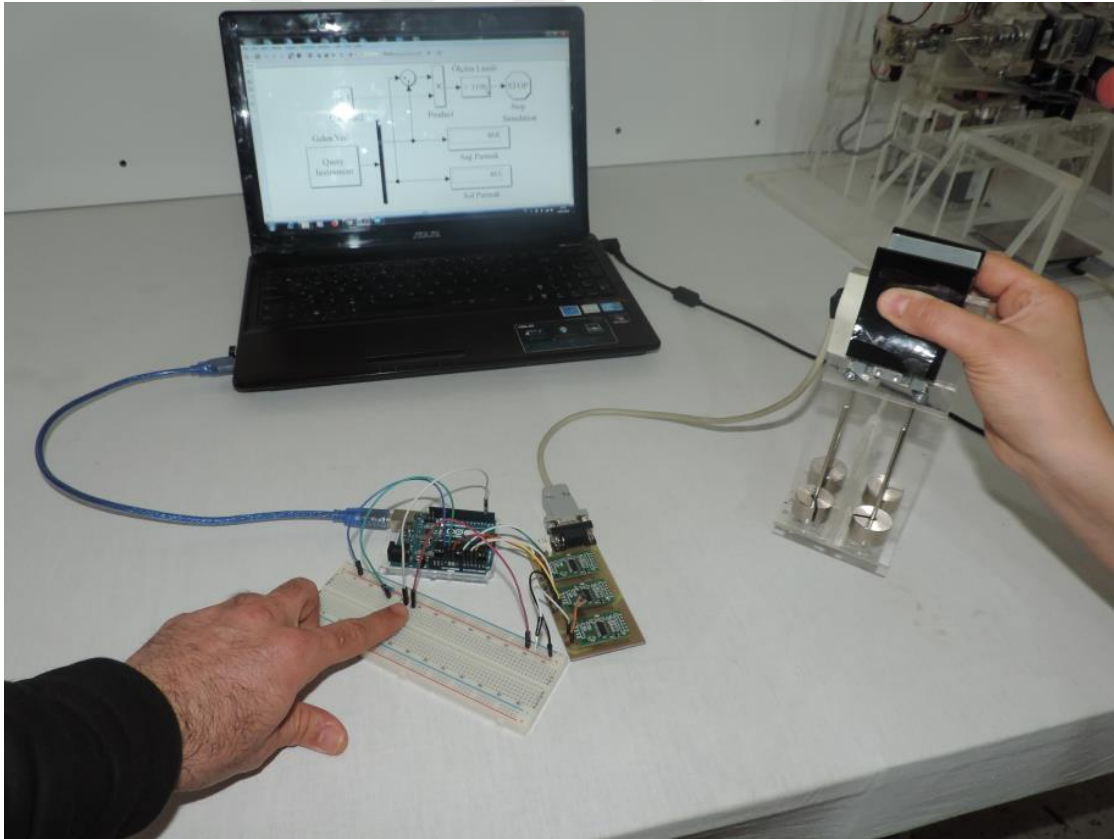
Şekil 3.9. HKKD deney düzeneği için MATLAB/Simulink modeli

MATLAB/Simulink ortamında AUR3 kartından gelen veriler sağ ve sol parmak için anlık olarak görüntülenmektedir. Eğer parmaklardaki kuvvet ortalaması 3100 gf değerini aşarsa simülasyon durmaktadır. HKKD’de, katılımcının kaldırma eylemini gerçekleştirdiğine karar

verildiğinde okuma butonuna basılarak display görüntüsü dondurulmaktadır. Böylece her iki parmak için kavrama kuvveti okunmaktadır. HKKD’de katılımcıların deney nesnesini kaldırdıkları andaki ölçülen kavrama kuvveti, F_{ng} değeridir.

3.4.5. Hassas kavrama-kaldırma deneylerinin yapılışı

Bu tez çalışmasında, bulanık güvenlik marjı hesaplama sisteminin veri tabanını elde etmek için insanlarla hassas kavrama-kaldırma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, Yaşları 19 ile 46 arasında, sağ ellerini kullanan 6’sı kadın ve 8’i erkek olmak üzere sağlıklı 14 kişi ile 5 farklı yüzey özelliği ve 4 farklı ağırlık değeri için işaret ve başparmak kullanılarak Resim 3.23’de görüldüğü gibi yapılmıştır. Katılımcılar bilgilendirilmiş onam formu ile onay vermişlerdir. Tüm deney protokolleri Mustafa Kemal Üniversitesi Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından 02.04.2020 tarihinde 05 sayılı toplantıda 7 sayılı karar ile onaylanmıştır.



Resim 3.23. Hassas kavrama-kaldırma deneyi

Deneyler yapılırken katılımcılara çatlayıp kırılacak bir nesne kaldırdıkları ve minimum kavrama kuvveti uygulamaya çalışarak kaldırmaları ama nesneyi de düşürmemeleri gerektiği söylenmiştir. Deneyler esnasında katılımcıların parmak uçlarına BOPP film yapıştırılmıştır

(Bkz. Resim 3.17). Bu deneyler ile bir hassas kavrama görevinde insanların farklı yüzey özelliklerinde ve farklı ağırlıklarda nesnelere ne kadar kavrama kuvveti uygulayarak kaldırdıkları ölçülmeye çalışılmıştır. Her katılımcıya her bir yüzey özelliği ve ağırlık için 5 deneme yaptırılmıştır. Deneyler esnasında her iki parmağın eşit kuvvet uygulayacakları kabul edilerek sağ ve sol parmakların uyguladıkları kuvvetlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Aritmetik ortalama sonucu ondalıklı sayı elde edilmişse, bu değer en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır. Bu şekilde her bir katılımcıdan her bir yüzey özelliği ve ağırlık için 5 veri elde edilmiştir. 14 katılımcıdan 5 yüzey ve 4 ağırlık için toplam 1035 adet veri elde edilmiştir. Bazı yüzey ve ağırlıklar için ölçüm limiti aşıldığından veri elde edilememiştir.

3.5. Bulanık Güvenlik Marjı Hesaplama Sistemi

Bu çalışmada, bir robot elin hassas kavrama görevi için bulanık mantık kullanarak kavrama kuvvetinin kontrolü metoduna yönelik olarak bir bulanık mantık denetleyici (BMD) olan bulanık güvenlik marjı hesaplama sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

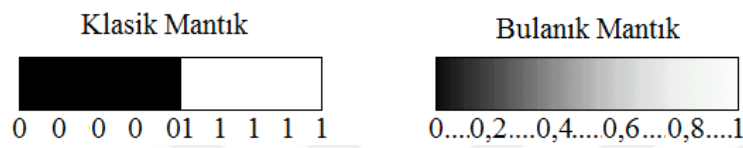
3.5.1. Bulanık mantık

Gerçek dünyada olaylar belirsizlik ve doğrusal olmama özellikleri taşır. Bu nedenle insanların günlük hayatta kullandığı birçok ifade belirsizlik içeren bulanık bir yapıya sahiptir. Bir olayı anlatırken, bir şeyi açıklarken, betimleme yaparken, emir verirken ve diğer birçok durumda, belirsizlik içeren bulanık ifadeler kullanılır. Örneğin, suyun sıcaklığından bahsederken sıcak, soğuk, ılık, çok sıcak, çok soğuk gibi ifadeler kullanılır. Bir kişinin boyunu ifade ederken kısa, uzun, orta, normal, çok uzun, çok kısa gibi ifadeler kullanılır. Araba kullanan bir kişi, duracağı noktaya yaklaştıkça fren pedalına “Daha çok” basar. Tüm bu örnekler insanların gerçek dünya olayları karşısında tanımlama, yorumlama ve karar verme biçimleri ile ilgilidir.

İnsanların bilgisayarlardan farklı olarak yaklaşık düşünme özelliği ve belirsizlik durumunda uygun çözüm bulma yeteneği vardır. Bilgisayar sistemlerinde kullanılan Aristo mantığı denilen klasik mantık, bir değer “var” ya da “yok” olabileceği ya da “1” veya “0” olabileceği ilkesine dayanır. Bulanık mantıkta ise bu verilerin arasında da değerler olabileceği kabul edilir. Klasik mantıkta bir şey ya tamamen siyahtır ya da beyazdır. Bulanık mantıkta ise siyah ve beyazın arasındaki gri tonlar da işlenerek, bir şey kısmen siyah veya kısmen beyazdır. Çizelge 3.2’de ve Şekil 3.10’da klasik mantık ve bulanık arasındaki farklılıklar gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Klasik mantık ve bulanık mantık arasındaki bazı farklılıklar

Klasik Mantık	Bulanık Mantık
A veya A değil	A ve A değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Belirli Derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 Arasında Süreklilik
İkili Birimler	Bulanık Birimler



Şekil 3.10. Klasik mantık ve bulanık mantık karşılaştırması

İlk olarak 1965 yılında Azerbaycan asıllı Lütü Aliasker zade (Lotfi A. Zadeh) tarafından ortaya çıkarılan bulanık mantık, insanın yaklaşık akıl yürütme ve karar verme özelliklerini mantıksal algoritmalarla modelleyebilen ve uzman bilgisini işlenebilir algoritmalara dönüştüren bir yöntemdir. Bulanık mantık, belirsizliğin fazla olduğu, karmaşık ve matematik modelinin çıkarılması zor süreçlere sahip olan endüstriyel uygulamalarda başarı ile kullanılmaktadır [52]. Bulanık mantık, sistem modellemesi, proses kontrolü, tahmin teknolojileri, akıllı makineler v.b. alanlarda kullanımı yaygındır. Başta kontrol sistemleri olmak üzere birçok sistem tasarımında bulanık mantık tabanlı akıllı sistemlerin diğer geleneksel yöntemlerden daha üstün performansa sahip olduğu bilinmektedir [53,54]. Bulanık mantığın temel olarak sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

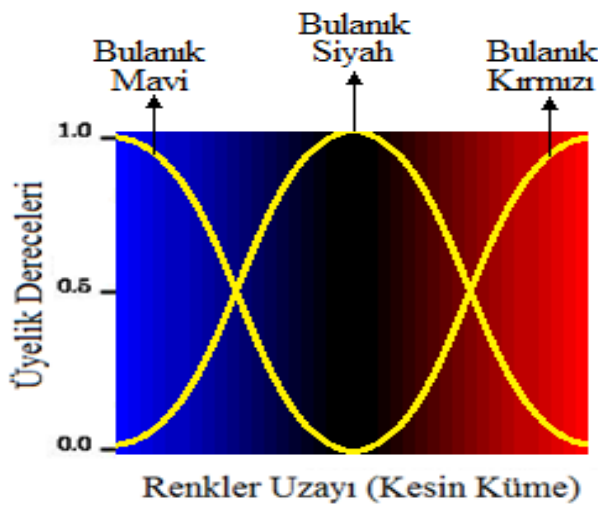
- İnsan düşünce sistemine uygundur.
- Mutlaka bir matematiksel model kullanılmak zorunda değildir.
- Basit yazılımlardan oluşur ve diğer sistemlere göre daha ekonomiktir.
- Kolay anlaşılırdır ve zor işlemler gerektirmez.
- Kullanılan üyelik değerleri sayesinde daha esnek bir yapıya sahiptir.
- Belirsiz bilgilerde kullanılma imkânı sunar.
- Doğrusal olmayan fonksiyonların kullanılmasını sağlar.
- Sadece uzman kişiden yardım alarak çok kolay bir şekilde sistem tasarlanabilir.
- Matematiksel ve geleneksel kontrol tekniklerine uygundur [55,56].

Bulanık mantığın sağladığı avantajlarla birçok alanda aktif şekilde kullanılmasının yanı sıra bazı dezavantajları da mevcuttur. Bulanık mantığın dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Bulanık mantıkta çok fazla tecrübeye dayalı kural oluşturulur. Uzman deneyimlerine ihtiyaç vardır.
- Üyelik fonksiyonu seçerken belirgin bir yöntem yoktur. Bu da birden çok deneme-yanılma yapılması gerektiğinden zaman kaybına neden olabilir.
- Sistemin üreteceği sonuçlar önceden saptanamaz ve sistemin kararlılık analizi de yapılamaz. Ancak benzetim çalışması yapılabilir [57].

3.5.2. Bulanık kümeler

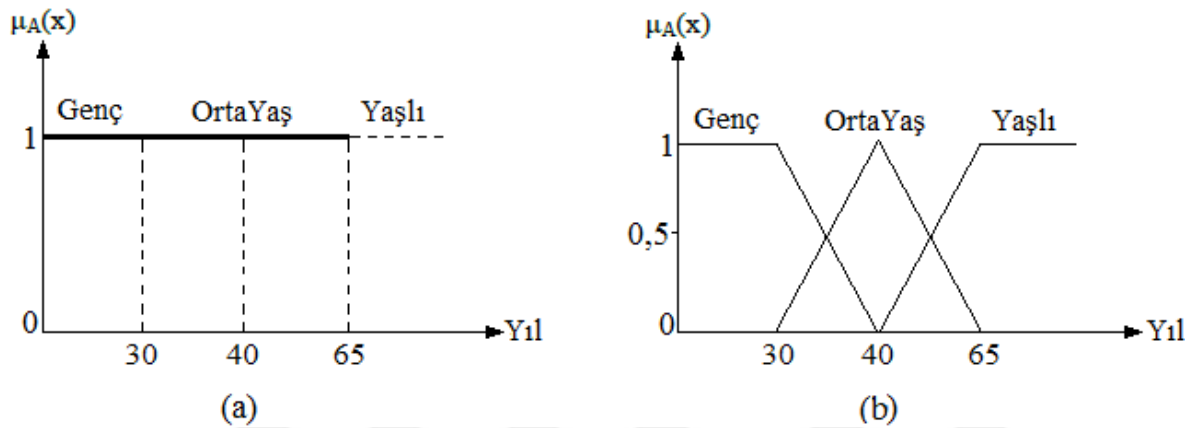
Bulanık mantığın temelini bulanık kümeler oluşturmaktadır. Klasik bir küme, kesin sınırları olan bir kümedir. Bulanık küme ise açıkça tanımlanmış kesin sınırları olmayan bir kümedir. Bulanık kümeler, 0 ile 1 arasında sürekliliği olan farklı derecelerde üyelik değerine sahip elemanlar içerir. Üyelik derecesi, bir elemanın bir kümeye ait olma derecesidir. Klasik kümelerde bir eleman A kümesine kesinlikle aittir veya değildir. Fakat bulanık kümelerde bir eleman A kümesine %80, B kümesine %50 ve C kümesine de %20 ait olabilir. Bulanık kümelerde ait olma oranları 0 ile 1 aralığında sürekliliği olan değerlerle ifade edilmiştir. Şekil 3.11'da bulanıklık ve bulanık küme kavramlarının anlaşılabilmesi açısından renkler uzayında tanımlı mavi, siyah ve kırmızı bulanık kümeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Bulanık renk kümeleri

Renk uzayını gösteren resmin herhangi bir bölgesinde seçeceğimiz bir noktanın kesin bir renk değeri yoktur. Üyelik fonksiyonuna bağlı olarak renklere ait oluşturulan bulanık kümeler ile her noktanın her üç renge ait olma dereceleri tanımlanmış olur.

Bir kümeye ait üyelik derecesi 1 ise, o eleman o kümede kesinlikle bulunur. Üyelik derecesi 0 ise o eleman o kümede kesinlikle yoktur. Belirsizlik durumlarında ise 0 ile 1 arasında ara değerler atanır. Şekil 3.12’de kişilerin yaş durumlarının klasik küme ve bulanık küme yaklaşımlarına göre nasıl sınıflandırıldığı gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Yaş durumlarını gösteren alt kümeler: a) Klasik küme, b) Bulanık küme

Klasik küme yaklaşımında keskin olan küme sınırları, bulanık küme yaklaşımında üyelik fonksiyonuna göre içi içe geçerek bulanıklaştırılır. Küme sınırları içerisindeki elemanlar 0 ile 1 arasında değişken değerlere atanarak her elemanın bir kümeye hangi üyelik derecesiyle ait olduğu üyelik fonksiyonuna göre belirlenmiş olur. X bir nesnelere uzayı ve x , bu uzayın bir elemanı ise bir A bulanık kümesi Eş. 3.9 ve Eş. 3.10’deki gibi tanımlanabilir.

$$\mu_A(x) \in [0,1] \quad (3.9)$$

$$A = \{(x, \mu_A(x))\}, x \in X \quad (3.10)$$

Burada $\mu_A(x)$, x ’in A kümesine üyelik derecesini ifade eden üyelik fonksiyonudur. Üyelik fonksiyonu, bulanık küme elemanlarının kümelere ait olma derecelerini gösteren bir eğri fonksiyonudur.

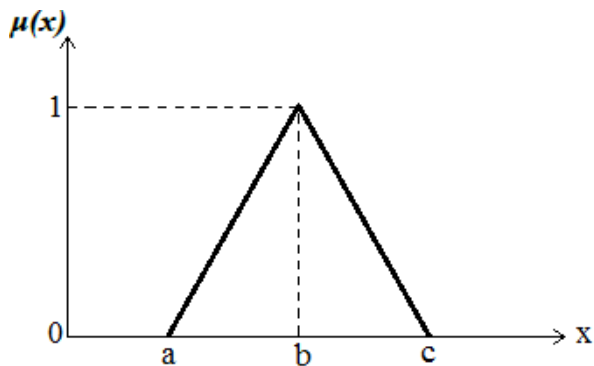
3.5.3. Üyelik fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları, bulanık kümelerin sınırlarını belirleyen ve sonucu doğrudan etkileyen faktörlerdir. Uygun üyelik fonksiyonunun seçimi, bir bulanık sistemin karar vermedeki doğruluk oranını arttırmada önemli rol oynamaktadır. Üyelik fonksiyonları ile her bir üyeliğin derecesi sıcak, ılık, çok fazla, normal, çok az v.b. gibi dilsel bir veri ile belirlenmektedir. Farklı şekillerde birçok üyelik fonksiyonu tanımlanabilir.

Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde belirli bir yöntem yoktur. Problemin durumuna göre, yapılan çalışmalarla tecrübe edilerek ve uzman bilgisi dikkate alınarak istenilen sonuca göre en uygun üyelik fonksiyonu belirlenir. Bazı durumlarda tek üyelik fonksiyonu kullanılırken bazen de birden fazla üyelik fonksiyonu bir arada kullanılabilir. Bu durumu bulanık mantığın dezavantajı olarak nitelendirsek de aynı durum bize bulanık mantığın esnek bir yapıya sahip olması avantajını getirmektedir. Yaygın olarak üçgen, yamuk ve gauss üyelik fonksiyonları kullanılmakla birlikte problem durumuna göre farklı şekillerde üyelik fonksiyonları da kullanılabilir.

Üçgen üyelik fonksiyonu

Maksimum ve minimum değerleri arasında doğrusal artış ve doğrusal azalış gösteren üyelik fonksiyonudur. Üçgen üyelik fonksiyonu a , b ve c gibi 3 parametre ile tanımlanır. Şekil 3.13’de bir üçgen üyelik fonksiyonu gösterilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonunun matematiksel ifadesi ise Eş. 3.11’de verilmiştir.

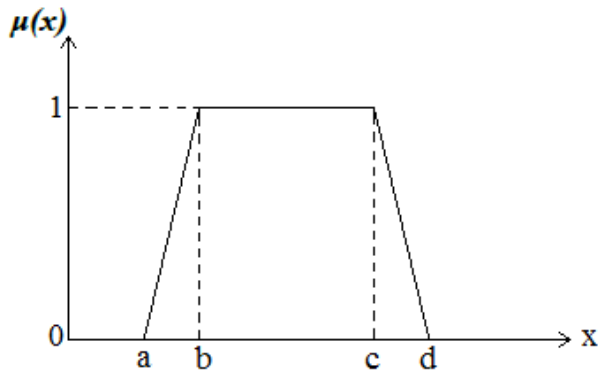


Şekil 3.13. Üçgen üyelik fonksiyonu

$$\text{Üçgen}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Yamuk üyelik fonksiyonu

Mutlak 1 olma aralığının daha geniş olduğu üyelik fonksiyonudur. Yamuk üyelik fonksiyonu a , b , c ve d gibi 4 parametre ile tanımlanır. Şekil 3.14’de bir yamuk üyelik fonksiyonu gösterilmiştir. Eş. 3.12’de ise yamuk üyelik fonksiyonuna ait matematiksel ifade verilmiştir.

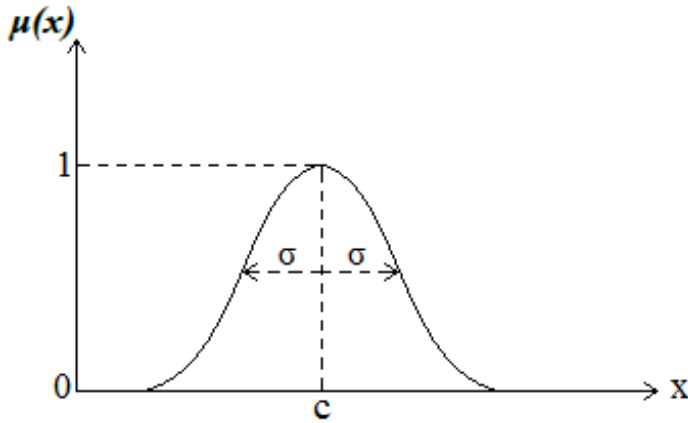


Şekil 3.14. Yamuk üyelik fonksiyonu

$$\text{Yamuk}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Gauss üyelik fonksiyonu

Gauss üyelik fonksiyonu c ve σ gibi iki parametre ile ifade edilebilir. Gauss üyelik fonksiyonunun yapısı Şekil 3.15’de gösterilmiştir. Eş. 3.13’da ise gauss üyelik fonksiyonuna ait matematiksel ifade verilmiştir.



Şekil 3.15. Gauss üyelik fonksiyonu

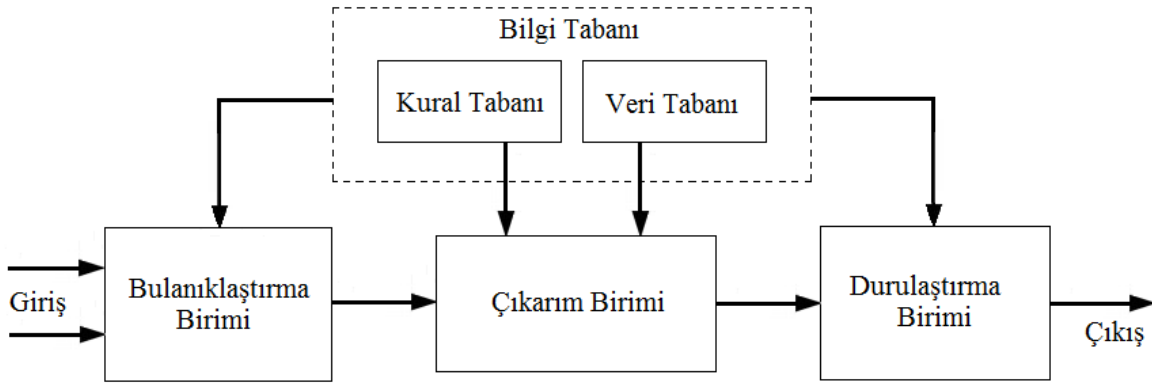
$$\text{Gauss}(x, c, \sigma) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.13)$$

Denklemdaki c , üyelik fonksiyonunun merkezini ifade etmektedir. Denklemdaki σ ise üyelik fonksiyonunun genişliğini ifade etmektedir. Fonksiyonun genişliği, problem durumuna göre ayarlanmaktadır.

3.5.4. Bulanık mantık denetleyiciler

BMD’nin esnek yapıya sahip olması, modellenirken denetlenecek sistem modelinin tam olarak bilinmesine ihtiyaç duyulmaması, diğer denetim sistemlerine kıyasla kullanımını oldukça yaygın hale getirmiştir.

Şekil 3.16’de bir BMD’nin genel yapısına ait blok şema görülmektedir. Şekil 3.16’de görüldüğü gibi bir BMD 4 temel birimden oluşmaktadır: Bulanıklaştırma birimi, çıkarım birimi, durulaştırma birimi ve bilgi tabanı. Bilgi tabanı, kural tabanı ve veri tabanı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

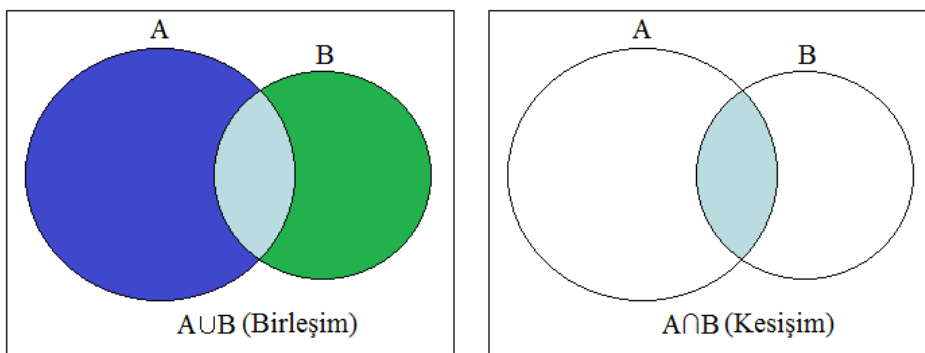


Şekil 3.16. Bulanık mantık denetleyicinin genel yapısı

3.5.5. Bulanıklaştırma birimi

Bulanıklaştırma işlemi ile net girdi değişkenleri, bir üyelik fonksiyonuna bağlı olarak dilsel değişkenlere dönüştürülür [58]. Denetlenen sistemden alınan giriş bilgileri, bulanıklaştırma işlemi ile dilsel niteleyicilerden oluşan sembolik değerlere dönüştürülmektedir [59].

BMD'nin giriş birimi olan bulanıklaştırma birimi, üyelik fonksiyonları ile belirlenen veri kümelerini kesiştirerek bulanıklaştırılır. Sistemin girişine uygulanan her değişken değeri için, değişkenin tanımlandığı tüm bulanık kümelere ait bir üyelik derecesi hesaplanır. Veri kümelerinin kesişim ve birleşim işlemleri Şekil 3.17'de görüldüğü gibi matematikteki küme işlemleri kullanılarak ifade edilebilir.



Şekil 3.17. Kümelerde kesişim ve birleşim kuralları

X uzayında tanımlı birer bulanık küme olan A ve B bulanık kümeleri için:

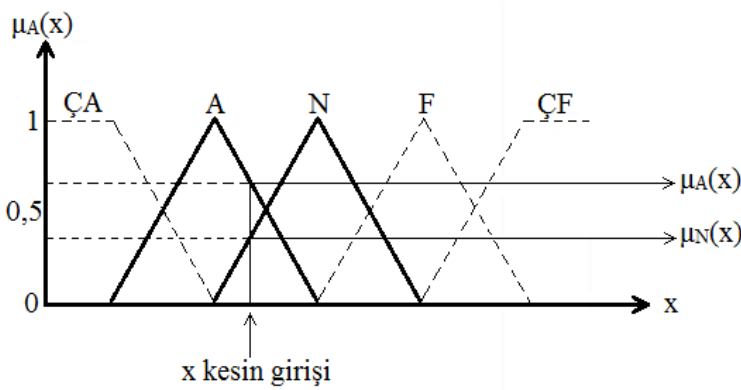
$\mu_A(x): x \rightarrow [0, 1]$ ve $\mu_B(x): x \rightarrow [0, 1]$ şeklindedir.

$\mu_A(x)$, A kümesinin üyelik fonksiyonu ve $\mu_B(x)$ ise B kümesinin üyelik fonksiyonudur. A ve B bulanık kümelerinin kesişim işleminin üyelik fonksiyonu:

$I = A \cap B \Rightarrow \mu_I(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$ şeklinde olmaktadır.

Şekil 3.18’de bir BMD’nin $\mu(x)$ üyelik fonksiyonuna ait örnek bir bulanıklaştırma işlemi ve x girişi için dilsel değişkenlerle tanımlanmış örnek bulanık kümeler gösterilmiştir.

ÇA: Çok Az A: Az N: Normal F: Fazla ÇF: Çok Fazla



Şekil 3.18. Bulanıklaştırma işlemi

3.5.6. Bilgi tabanı

Bilgi tabanı, kural tabanı ve veri tabanı olmak üzere 2 alt bileşenden oluşmaktadır. Veri tabanında sistem üzerinde yapılan çalışmalara ve uzmanların sistem hakkındaki bilgilerine dayanarak karar verilen üyelik fonksiyonları yer alır. Kural tabanı ise uzmanların karar verme yeteneğinin taklit edildiği birimdir.

Veri tabanı

Veri tabanının temel görevi, bulanıklaştırma, çıkarım ve durulaştırma işlemleri için gerek duyulan üyelik ve kural tablosu bilgilerini BMD’nin diğer birimlerinin kullanımına sunmaktır. Bu veriler, BMD’nin giriş ve çıkış değişkenlerine ait dilsel değerleri tanımlayan bulanık kümeleri, üyelik fonksiyonlarını ve ölçeklendirme faktörlerini kapsamaktadır. Her bir değişken için evrensel kümenin tanım aralığının belirlenmesi, bulanık kümelerin sayısının ve değer aralıklarının belirlenmesi ve üyelik fonksiyonlarının seçilip karar verilmesi ile veri tabanı

oluşturulmaktadır. Bir BMD'nin hassasiyetinin en temel belirleyici etkeni, her bir değişken için tanımlanan bulanık kümelerin sayısıdır [60].

Kural tabanı

Bulanık mantığın temelini dilsel ifadeler oluşturmaktadır. Dilsel ifadelerden oluşan değişkenler arasındaki ilişkiler aşağıdaki şekilde ifade edilerek bulanık denetim kuralları oluşturulur.

EĞER “öncül önerme” İSE “sonuç önerme”

Kural ifadesinde “EĞER” kısmı, denetleyici giriş değişkenlerine ait önermelerin bulunduğu şart kısmıdır. “İSE” kısmı denetleyici çıkış değişkenine ait önermenin bulunduğu sonuç kısmıdır. Bu şekilde girdilere ait ilişkilere dayanarak bir çıkarsama yapılır. Örneğin:

EĞER araç hızı “Biraz yüksek” İSE gaz pedalına “Daha az” bas

Kural ifadelerinde şart ve sonuç kısımlarına birden fazla durum da eklenebilir. Bunun için bağlaçlar kullanılır. Bu bağlaçlar; “VE” ve “VEYA” bağlaçlarıdır. Örneğin:

EĞER x “çok düşük” VE y “fazla” İSE z “normal” VEYA t “çok yüksek”

Bulanık kuralların oluşturulmasında belirli bir yöntem yoktur. Uzman tecrübesi veya denetim mühendisliği bilgisi, bulanık kuralların oluşturulmasında en önemli unsurdur.

3.5.7. Çıkarım birimi

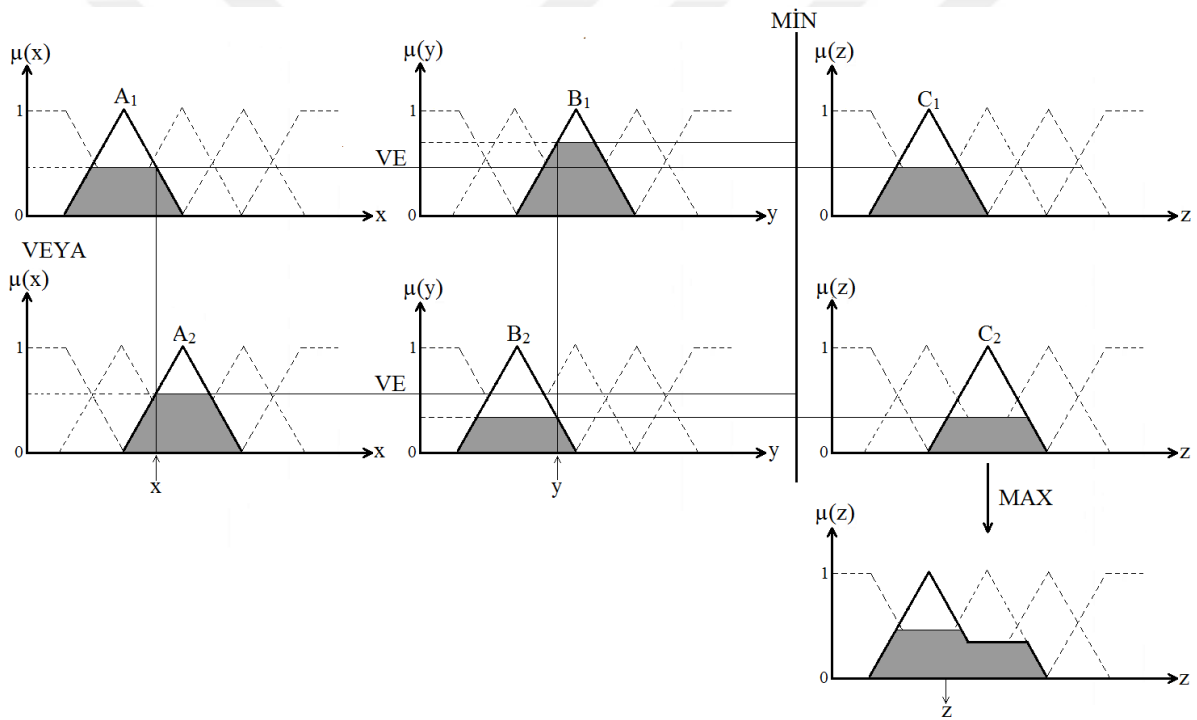
Çıkarım birimi, dilsel ifadelerle oluşturulmuş bulanık kurallara dayanan giriş bilgilerine göre hangi kuralların uygulanacağına karar vererek sistemin bulanık denetim davranışını belirlemektedir. Çıkarım yöntemi olarak farklı modeller uygulanmakla birlikte yaygın olarak Mamdani, Takagi-Sugeno ve Tsukamoto çıkarım yöntemleri kullanılmaktadır.

Mamdani çıkarım metodu

İlk defa Mamdani ve Assilian tarafından bir buhar makinesinin kontrolünde kullanılmıştır [61]. İnsan sezgisi ve davranışına uygun ve kolay kurulabilen bir yapıya sahip olduğu için yaygın

olarak kullanılan bir yöntemdir. Diğer çıkarım modellerinin temelini oluşturmaktadır. Mamdani tipi bulanık model genel olarak 5 adımdan oluşmaktadır:

- Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması
- Kural tabanının oluşturulması
- Öncül üyelik derecelerine “VE” işleminin uygulanması ve “MİN.” İşlemi ile enküçüklenerek kısmi çıkarımların elde edilmesi.
- Elde edilen kısmi çıkarımlar arasında “VEYA” işlemi uygulanıp “MAX” İşlemi ile enbüyüklenerek bütünleşik bir bulanık çıkarım elde edilmesi.
- Elde edilen bütünleşik bulanık çıkarımın, tek bir sayıya dönüştürülerek durulaştırılması.



Şekil 3.19. Mamdani metodu bulanık çıkarım işlemi

Mamdani çıkarım metoduna ait örnek bulanık çıkarım işlemi Şekil 3.19'de gösterilmiştir. Eş. 3.14'de ise matematiksel ifadesi verilmiştir. Eşitlikte $\mu_C(z)$, harmanlanarak toplanmış olan bütünleşik bulanık çıkarımın üyelik derecesini ifade etmektedir.

$$\mu_C(z) = \max \{ \min \{ \mu_{A_1}(x), \mu_{B_1}(x) \}, \min \{ \mu_{A_2}(x), \mu_{B_2}(x) \} \} \quad (3.14)$$

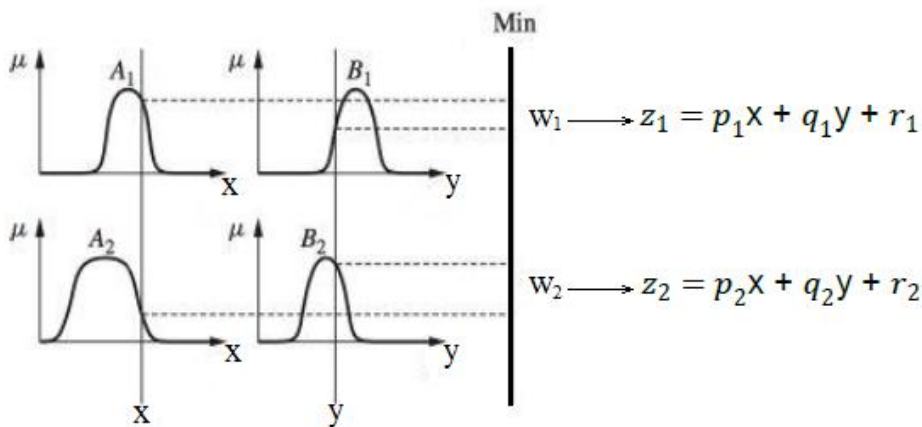
Takagi-Sugeno çıkarım metodu

İlk kez 1985 yılında kullanılmaya başlayan Takagi-Sugeno çıkarım metodu, Mamdani metodunun bir uyarlamasıdır. Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması ve bulanık mantık işlemleri, Mamdani metodu ile aynıdır. Fakat çıkış fonksiyonu bulanık değil, kesin lineer bir fonksiyon ya da sabittir. Eğer çıkış üyelik fonksiyonu sabit ise 0.derece; 1.derece bir fonksiyon ise 1.derece Sugeno bulanık model olarak adlandırılır. Mamdani modelinden daha karmaşık yapıya sahiptir fakat gösterim açısından daha uygundur. Takagi-Sugeno bulanık modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

EĞER $x=A$ VE $y=B$ İSE $z=px + qy + r$

A ve B değişkenleri giriş bulanık kümelerini, p, q ve r sonuç parametrelerini, z ise lineer denklemin yerine geçen sabiti ifade etmektedir. Takagi-Sugeno çıkarım metodunda sistemin bütüncül çıkarımını elde etmek için durulaştırma işlemine gerek yoktur [62]. Bunun yerine, sonuç kısmına aktarılan üyelik derecelerinin ağırlıklı ortalamaları hesaplanarak çıktı elde edilir. Takagi-Sugeno çıkarım metodunun bütüncül çıkarımı Eş. 3.15'de verilmiştir. Örnek bulanık çıkarım işlemi ise Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

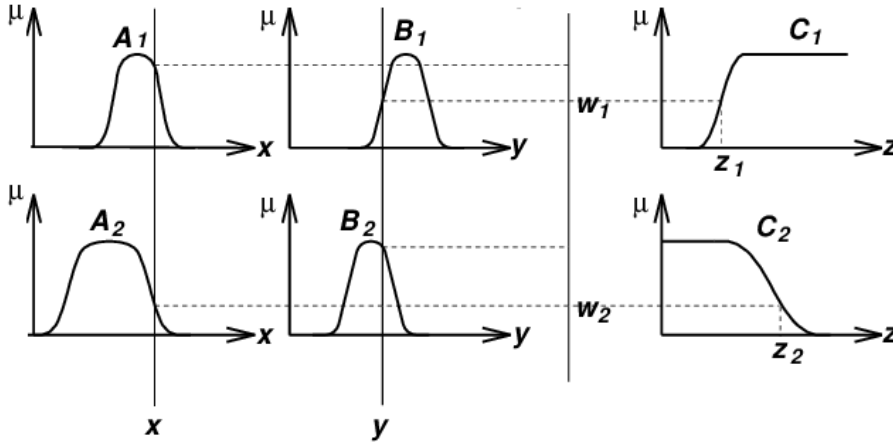
$$\hat{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i \quad (3.15)$$



Şekil 3.20. Takagi-Sugeno metodu bulanık çıkarım işlemi

Tsukamoto çıkarım metodu

Tsukamoto çıkarım metodunda kuralların öncül kısımlarındaki işlemler, Mamdani modelinde ve Takagi-Sugeno modelinde olduğu gibi aynıdır. Fakat kuralların sonuç kısımları, monoton olarak artan veya azalan üyelik fonksiyonlarından oluşur. Tsukamoto bulanık çıkarım işlemi Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Tsukamoto metodu bulanık çıkarım işlemi

Bu modelde çıkış, durulaştırma işlemine gerek olmadan keskin bir değer olarak tanımlanır. Sistemin bütüncül çıkarımı için yine Eş. 3.19 kullanılır. Tsukamoto çıkarım metodu, Mamdani metodunda olduğu gibi durulaştırma işlemine ve Takagi-Sugeno metodunda olduğu gibi hesaplamalara gerek duyulmaması yönüyle sağlıklıdır ama kullanım alanı oldukça sınırlıdır. Çünkü kuralların sonuç kısmı bakımından diğer iki yöntem kadar şeffaf değildir [61].

3.5.8. Durulaştırma birimi

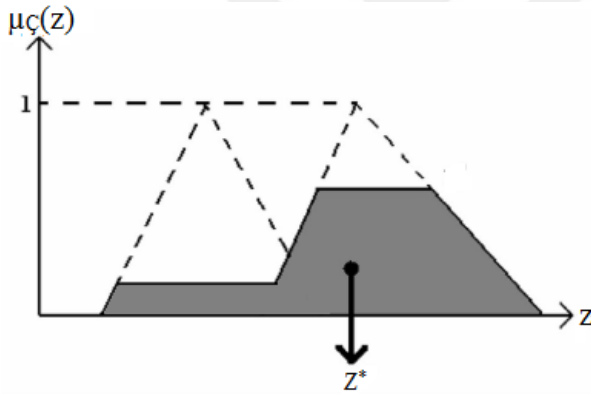
Durulaştırma işlemi, çıkarım biriminden alınan bulanık denetim değerlerinin keskin çıkış olarak sayısal bir değere dönüştürme işlemidir. Çünkü denetlenen sistem tarafından bulanık denetleyicinin çıktısının işlenebilmesi için keskin sayısal değerlere ihtiyaç vardır. Pratikte kullanılan farklı birçok durulaştırma yöntemi olmasıyla birlikte bu bölümde 5 çeşit durulaştırma yöntemi ele alınmıştır: Ağırlık merkezi (Center of Gravity-COG), alan ortası (Bisector), en büyüklerin ortalaması (Means of Maximum-MOM), en büyüklerin en büyüğü (Largest of Maximum-LOM), en büyüklerin en küçüğü (Smallest of Maximum-SOM).

Ağırlık merkezi yöntemi

Durulaştırma yöntemleri içerisinde en çok kullanılan yöntemdir [63]. Sistemin toplam bulanık sonucu olan bütünleşik bulanık küme alanının ağırlık noktası, değer eksenine ile kesiştirildiğine sistemin kesin çıktısı elde edilir. Ağırlık merkezi yöntemi ile kesin çıktı, sürekli durumda Eş. 3.16 ile kesikli durumda ise Eş. 3.17 ile elde edilmektedir. Şekil 3.22’de ise ağırlık merkezi yönteminin grafiksel gösterimi verilmiştir.

$$z^* = \frac{\int \mu_{\zeta}(z) \cdot z \cdot dz}{\int \mu_{\zeta}(z) \cdot dz} \quad (3.16)$$

$$z^* = \frac{\sum \mu_{\zeta}(z) \cdot z}{\sum \mu_{\zeta}(z)} \quad (3.17)$$

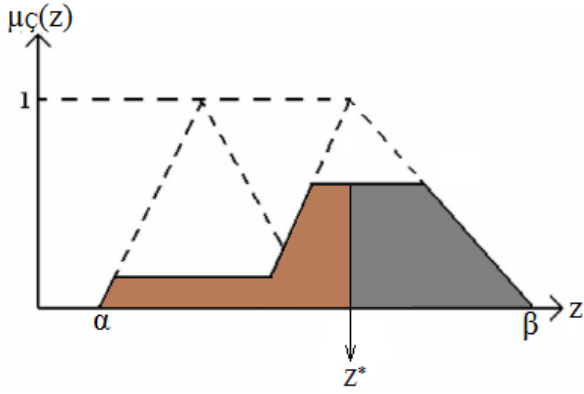


Şekil 3.22. Ağırlık merkezi yöntemi

Alan ortası yöntemi

Alan ortası yönteminde kesin çıktı değeri, çıkış bulanık kümesinin oluşturduğu alanı eşit iki bölgeye ayıran çizginin değer eksenine ile kesiştirilmesi ile bulunur. Bazen alan ortası, ağırlık merkezine de denk gelmektedir. Bu nedenle ağırlık merkezi yöntemiyle benzer sonuçlar verebilmektedir. Eş. 3.18’de alan ortası metodunun matematiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 3.23’de ise yöntemin grafiksel gösterimi verilmiştir.

$$\int_{\alpha}^{z^*} \mu_{\zeta}(z) \cdot dz = \int_{z^*}^{\beta} \mu_{\zeta}(z) \cdot dz \quad (3.18)$$

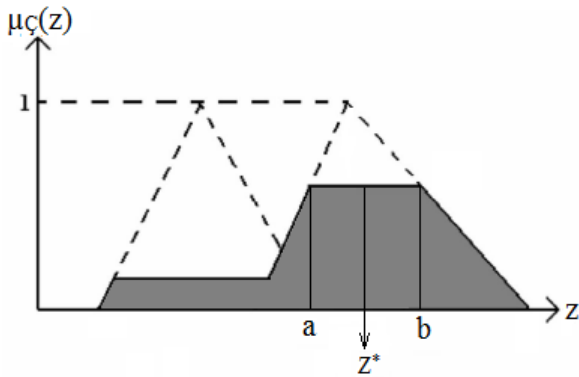


Şekil 3.23. Alan ortası yöntemi

En büyüklerin ortalaması

Bu yöntemde kesin çıktı elde etmek için çıkışa ait bütünleşik bulanık kümeden elde edilen en büyük üyelik derecelerinin ortalaması alınır. Eş. 3.19'de yöntemin matematiksel gösterimi ve Şekil 3.24'de ise grafiksel gösterimi verilmiştir.

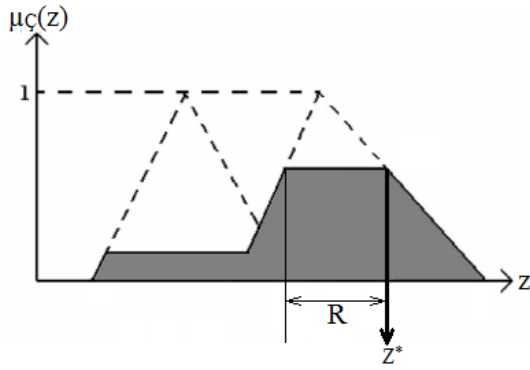
$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (3.19)$$



Şekil 3.24. En büyüklerin ortalaması metodu

En büyüklerin en büyüğü yöntemi

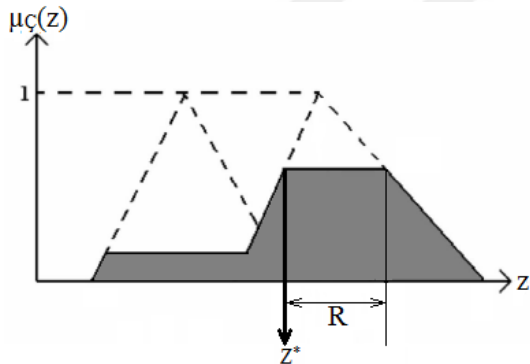
Bu yöntemde, oluşan en büyük üyelik derecelerinin değişim aralığında değer eksenini kesen en büyük değer sistemin kesin çıktısını vermektedir. Kesin çıktının elde edilişi ile ilgili grafiksel gösterim Şekil 3.25'de gösterilmiştir.



Şekil 3.25. En büyüklerin en büyüğü yöntemi

En büyüklerin en küçüğü yöntemi

Bu yöntemde de bir önceki yöntemle benzer şekilde en büyük üyelik derecelerinin değişim aralığında değer eksenini kesen en küçük değer sistemin kesin çıktısını vermektedir. Kesin çıktının elde edilişi ile ilgili grafiksel gösterim Şekil 3.26'de gösterilmiştir.



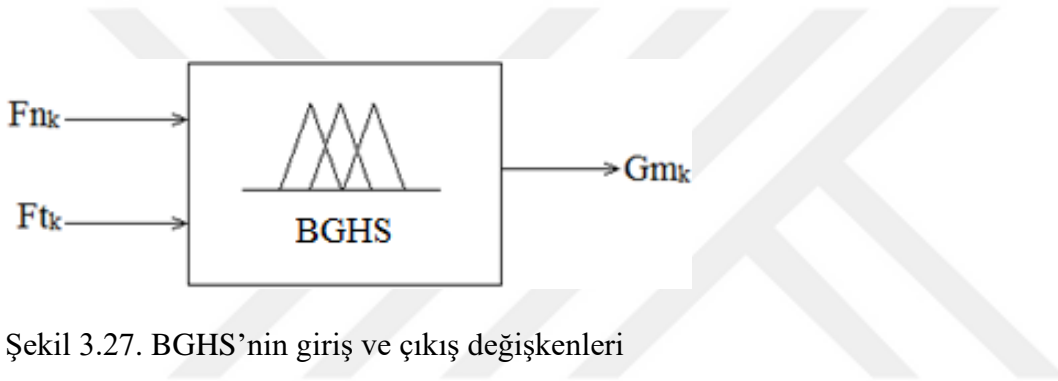
Şekil 3.26. En büyüklerin en küçüğü yöntemi

3.6. Bulanık Güvenlik Marjı Hesaplama Sisteminin Tasarımı

Bu çalışmada tasarlanan KKKS'nin yapısındaki bulanık denetim görevini yerine getirecek olan BGHS'nin tasarımı gerçekleştirilmiştir. İnsanlarla yapılan HKKD sonucu elde edilen veriler kullanılarak BGHS'nin modellenmesi ortaya konulmuş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sunulan BGHS, temel BMD yapısına sahiptir (Bkz. Şekil 3.16). Tasarlanan BGHS'nin tasarımı ve simülasyonu MATLAB R2013a/Fuzzy Logic Toolbox ortamında gerçekleştirilmiştir. BGHS'ye ait yazılım Arduino IDE editör ortamında yazılmıştır. Bu yazılım KKKS'ye ait yazılım içerisine entegre edilmiştir.

3.6.1. BGHS'nin giriş ve çıkış değişkenleri

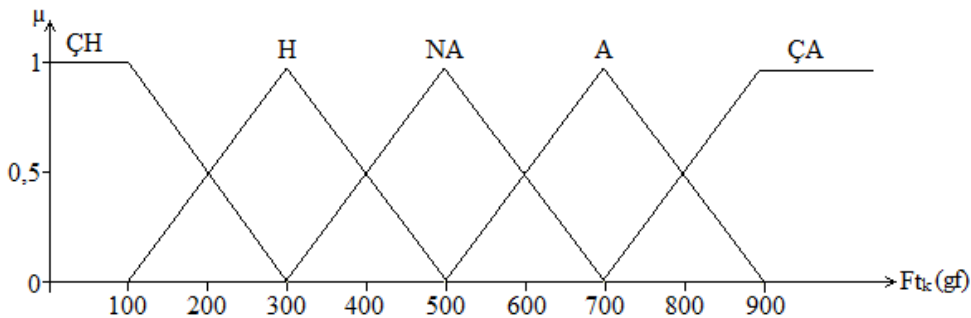
Bu çalışmada yapılan HKKD'de, insanların farklı μ_s değerlerinde ve farklı F_t değerlerinde nesnelere kaldırdıklarında uyguladıkları F_{ng} değerlerinden G_m değerleri elde edilmiştir. F_{ng} , F_n ile G_m 'nin toplamıdır. Dolayısıyla tasarlanan BGHS, F_n ve F_t değerlerine bağlı G_m hesaplayan BMD olarak tasarlanmıştır. Bu tez çalışmasında ortaya koyulan yerel ağırlık yaklaşımına göre, değişken μ_{sk} değerine bağlı olarak oluşan her kayma noktasında F_{nk} üzerine G_{mk} eklenerek nesne F_{ngk} ile kaldırılmaya çalışılmaktadır. μ_{sk} değeri de F_{nk} ve F_{tk} değerlerine bağlıdır. Bu durumda bir kayma noktası için G_{mk} değeri, F_{nk} ve F_{tk} değerlerine bağlı bulanık fonksiyonun kesin bir çıktısıdır. Böylelikle Şekil 3.27'de görüldüğü üzere BGHS'nin giriş değişkenleri F_{nk} ve F_{tk} dir. Çıkış değişkeni ise G_{mk} olmaktadır.



Şekil 3.27. BGHS'nin giriş ve çıkış değişkenleri

3.6.2. Girişler için bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları

BGHS'nin giriş değişkenleri için üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. F_{tk} değişkeni için 5 adet, F_{nk} değişkeni için 7 adet bulanık küme ve üyelik fonksiyonu belirlenmiştir. Şekil 3.28'de, F_{tk} giriş değişkenine ait bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



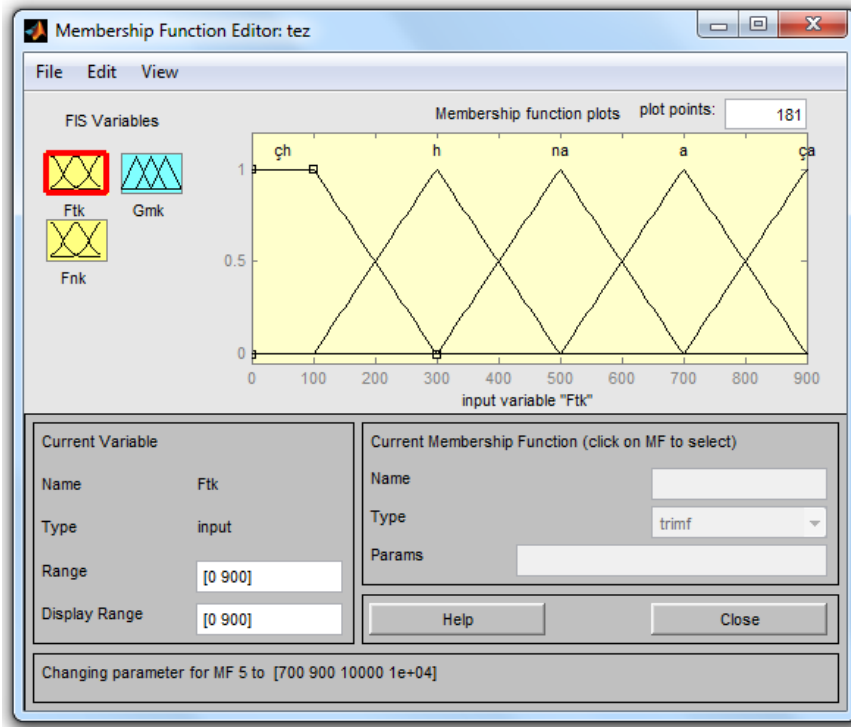
Şekil 3.28. F_{tk} girişi üyelik fonksiyonları

Şekil 3.28'deki dilsel ifadelerden oluşan bulanık kümeler, ÇH (Çok Hafif), H (Hafif), NA (Normal Ağır), A (Ağır) ve ÇA (Çok Ağır) şeklinde ifade edilmiştir. Çizelge 3.3'de F_{tk} giriş değişkenine ait bulanık kümeler, üyelik fonksiyonları ve tanım aralıkları verilmiştir.

Çizelge 3.3. F_{tk} giriş değişkeninin bulanık kümeleri ve tanım aralıkları

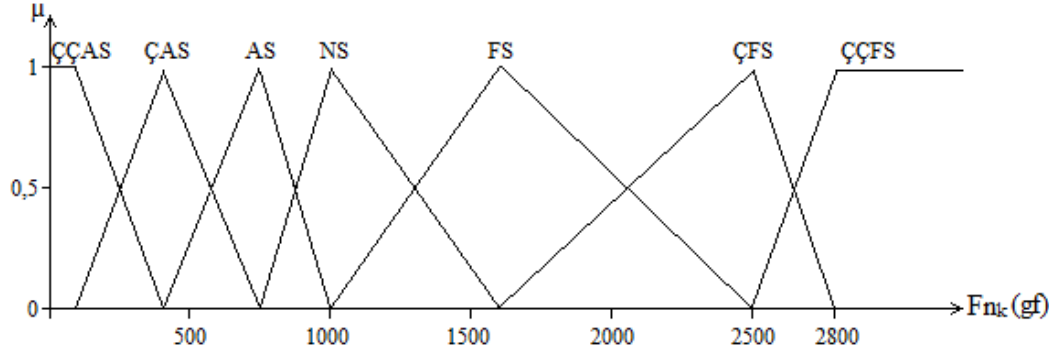
Bulanık Küme	Üyelik Fonksiyonu	Tanım Aralığı
Çok Hafif	Yamuk	0, 0, 100, 300
Hafif	Üçgen	100, 300, 500
Normal Ağır	Üçgen	300, 500, 700
Ağır	Üçgen	500, 700, 900
Çok Ağır	Yamuk	700, 900, $+\infty$, $+\infty$

F_{tk} değişkeni için belirlenen üyelik fonksiyonları ve bulanık kümelerin tanım aralıkları simetrik üyelik fonksiyonlarına sahiptir. 100 gf ile 900 gf aralığında eşit aralıklı 5 küme merkezi belirlenmiştir. 100 gf değeri ek küme merkezi olarak eklenmiştir. Resim 3.24'de, F_{tk} giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi verilmiştir.



Resim 3.24. F_{tk} giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi

Diğer bir giriş değişkeni olan F_{n_k} için 7 adet bulanık küme ve üyelik fonksiyonu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda F_{n_k} değişkeni için belirlenen üyelik fonksiyonları ve bulanık kümeler Şekil 3.29’da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



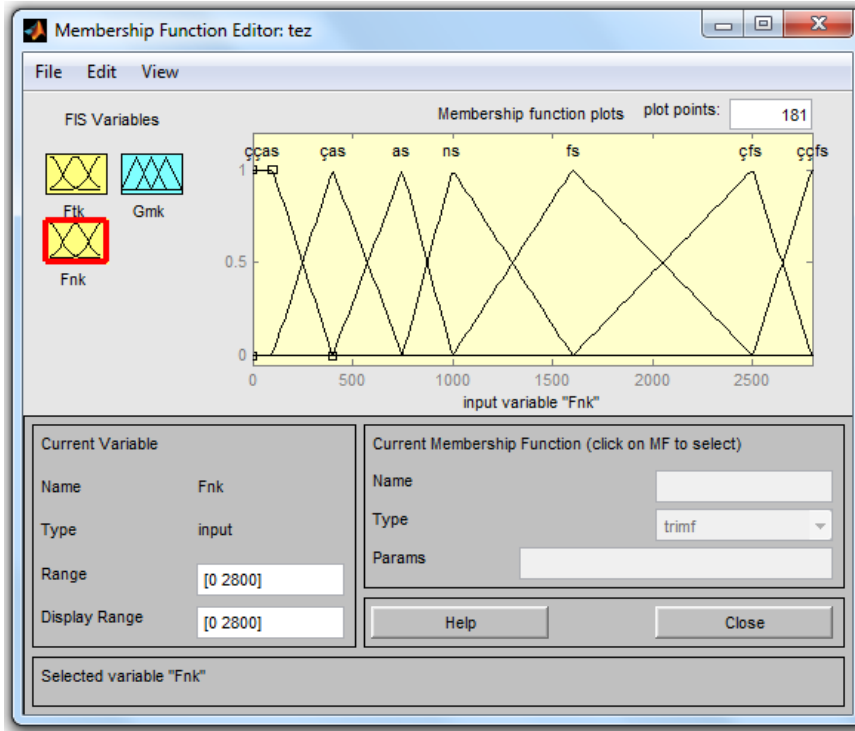
Şekil 3.29. F_{n_k} giriş değişkeninin üyelik fonksiyonları

Şekil 3.29’deki dilsel ifadelerden oluşan bulanık kümeler, ÇÇAS (Çok Çok Az Sık), ÇAS (Çok Az Sık), AS (Az Sık), NS (Normal Sık), FS (Fazla Sık) ÇFS (Çok Fazla Sık) ve ÇÇFS (Çok Çok Fazla Sık) şeklinde ifade edilmiştir. Çizelge 3.4’de, F_{n_k} giriş değişkenine ait bulanık kümeler, üyelik fonksiyonları ve tanım aralıkları verilmiştir.

Çizelge 3.4. F_{n_k} giriş değişkeninin bulanık kümeleri ve tanım aralıkları

Bulanık Küme	Üyelik Fonksiyonu	Tanım Aralığı
Çok Çok Az Sık	Yamuk	0, 0, 100, 400
Çok Az Sık	Üçgen	100, 400, 750
Az Sık	Üçgen	400, 750, 1000
Normal Sık	Üçgen	750, 1000, 1600
Fazla Sık	Üçgen	1000, 1600, 2500
Çok Fazla Sık	Üçgen	1600, 2500, 2800
Çok Çok Fazla Sık	Yamuk	2500, 2800, $+\infty, +\infty$

F_{n_k} için elde edilen üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi Resim 3.25’de verilmiştir. Yük hücresinin belirlenen maksimum F_n limit değeri 3100 gf olmasına rağmen, sistemin maksimum G_{m_k} çıktı değerine göre F_{n_k} limit değeri maksimum 2800 gf olarak ortaya çıkmıştır.



Resim 3.25. F_{nk} giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi

3.6.3. Çıkış için bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları

BGHS'nin çıkış değişkeni olan G_{mk} değişkenine ait üyelik fonksiyonlarını ve bunların tanım aralıklarını belirlemek için ilk olarak HKKD'den elde edilen F_{ng} değerleri kullanılarak 1035 adet G_m değeri hesaplanmıştır. G_m değerleri, yüzey materyallerinin μ_s değerlerine göre Eş. 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. HKKD'de elde edilen G_m verilerinden her bir yüzey materyali ve ağırlık için katılımcılar tarafından uygulanmış en düşük 14 veri tespit edilmiştir. Böylelikle her bir yüzey özelliği ve ağırlık için olmak üzere minimum G_m değerlerinden oluşan 15 adet veri kümesi elde edilmiştir. 15 adet veri kümesinin her birine ait 14 verinin ağırlıklı ortalamaları hesaplanarak her bir yüzey özelliği ve ağırlık için optimum G_m değerleri elde edilmiştir. Ağırlıklı ortalama hesaplanırken katılımcılardan elde edilen F_{ng} veri kümesi içerisindeki tekrarlamaya sayılarına göre ağırlıklar belirlenmiştir. Elde edilen 15 adet veri kümesinin elemanlarının incelenmesi sonucunda kümeler arası az ya da çok benzerlikler olduğu tespit edilmiştir. 15 adet veri kümesinin oluşturduğu toplam 210 adet veri üzerinde kümeleme analizi yapılmıştır. Kümeleme analizi sonucunda veriler arasındaki nicel uzaklığa ve yakınlığa göre keskin alt kümeler elde edilmiştir. Daha sonra G_{mk} çıkış değişkeni için elde edilen keskin alt kümeler üyelik fonksiyonları ile bulanıklaştırılmıştır.

Kümeleme analizi, çok sayıda veriden oluşan bir veri setini incelenen birimler arasında ortak özellikleri itibariyle alt veri setlerine ayırıp grup olarak toplayarak sınıflandırma yapma işlemidir [64,65]. Kümeleme analizi kullanılarak ortak özelliklere göre yapılan sınıflandırma ile bir araştırma sonucu elde edilen veri seti için genel tanımlamalar yapılabilir. Kümeleme analizi için birçok yöntem mevcuttur. En çok kullanılan ve en verimli yöntemlerden biri K-Ortalamlar kümeleme yöntemidir [66,67].

K-Ortalamlar kümeleme yöntemi, verilerin benzerlik ve farklılıklarına göre veri setini alt veri setlerine ayırarak sınıflandıran bir kümeleme algoritmasıdır [68]. İlk olarak K adet küme merkezi belirlenerek veri setindeki tüm verilerin belirlenen bu küme merkezlerine uzaklıkları hesaplanır. İki veya daha fazla boyutta gösterilebilen veri noktaları arasındaki uzaklık genel olarak Öklid uzaklığı ile bulunur. Her veri, en yakın uzaklıktaki küme merkezine göre kümelere ayrılır. Yeni oluşan K tane kümeye ait verilerin aritmetik ortalamaları alınarak yeni küme merkezleri oluşturulur. Güncellenen küme merkezlerine göre aynı adımlar küme merkezleri değişmeyene kadar ya da belirlenen bir bağıl hata yüzdesinin altına düşene kadar tekrarlanır. Algoritma bu şekilde Eş. 3.20'deki amaç fonksiyonunu minimize etmeye çalışır. Eş. 3.20'deki "n" veri sayısını, "k" küme sayısını, "x_{ij}" j. Kümedeki i. veriyi, "c_j" ise j. küme merkezini ifade etmektedir. "J", n verinin kendi küme merkezlerinden toplam uzaklığıdır.

$$J = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k ||x_{ij} - c_j||^2 \quad (3.20)$$

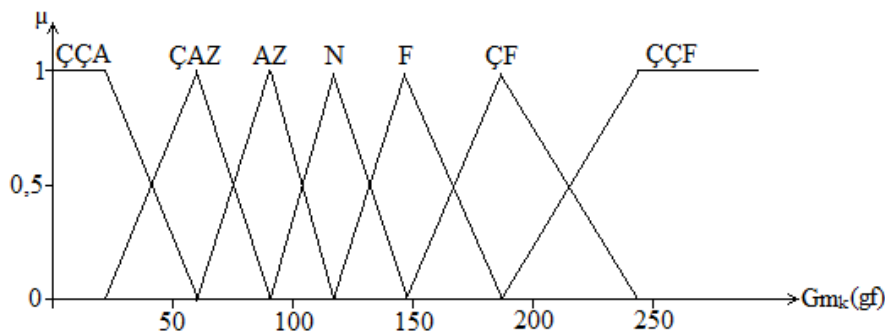
Bu çalışmada 210 adet minimum Gm verisi üzerinde K-Ortalamlar kümeleme yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak farklı küme sayıları ile denemeler yapılmıştır. Sonuç olarak 7 adet küme sayısı belirlenmiştir. K-Ortalamlar kümeleme yönteminde, algoritmanın başlangıcı için küme merkezleri genel olarak rastgele seçilmektedir. Fakat farklı küme merkezleri ve farklı küme sayıları, farklı kümelene sonuçları doğurmaktadır. Bu nedenle algoritmanın sonucu büyük ölçüde başlangıçtaki merkezlerin seçimine bağlıdır ve algoritma başlangıçtaki merkez değerlerine karşı hassastır. Bu nedenle başlangıçta uygun küme merkezlerinin seçimi de önemlidir [69,70]. Literatürde başlangıç küme merkezlerinin belirlenmesinde daha iyi kümeleme performansı için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen veri kümelerine ait 15 adet ağırlıklı ortalama değeri içerisinde 7 adet küme merkezi seçilmiştir. Veri kümelerinden elde edilen ağırlıklı ortalamalar, insanların yüzey sürtünme özelliğine ve ağırlığa bağlı olarak uyguladıkları kavrama kuvveti ile ilgili ortalama değerlerdir. Bu nedenle elde edilecek alt küme elemanlarını bu ortalama değerlerin (Optimum Gm değerleri) yakınlarında kümelemeye çalışılarak insanların ortalama davranışları temsil edilmeye

çalışılmıştır. 7 adet başlangıç küme merkezi için farklı optimum Gm değeri kullanılıp denemeler yapılmıştır. Elde edilen yeni küme merkezlerinin performansları istenilen çıkış değerlerini verebilirliği açısından incelenmiştir. Başlangıç için belirlenen küme merkezleri ve BGHS'nin çıkış üyelik fonksiyonlarında kullanılmak elde edilen küme merkezleri Çizelge 3.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. K-Ortalamlar yöntemi ile elde edilen küme merkezleri

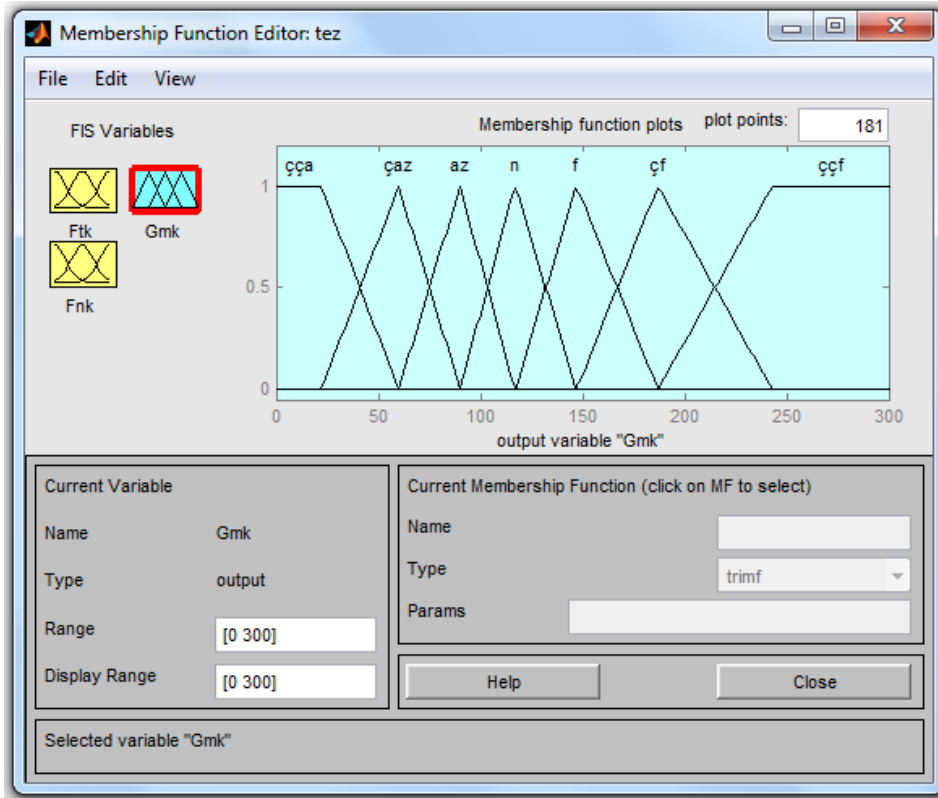
Başlangıç	İterasyon Sayısı							Sonuç	
	0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.		7.
33	23	22	22	22	22	22	22	22	22
51	56	57	58	59	59	60	60	60	60
81	80	83	85	86	87	88	90	90	90
110	116	115	115	116	116	116	117	117	117
160	153	149	147	147	147	147	147	147	147
190	190	189	187	187	187	187	187	187	187
247	248	248	243	243	243	243	243	243	243

Çizelge 3.5'de 8. İterasyon sonunda elde edilen sonuçlar kullanılarak çıkış değişkenine ait bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ve bunların tanım aralıkları belirlenmiştir. Gm_k çıkış değişkeni için elde edilen bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonu olarak yamuk ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 3.30. Gm_k çıkış değişkeninin üyelik fonksiyonları

Şekil 3.30'daki dilsel ifadelerden oluşan bulanık kümeler, ÇÇA (Çok Çok Az), ÇAZ (Çok Az), AZ (Az), N (Normal), F (Fazla), ÇF (Çok Fazla) ve ÇÇF (Çok Çok Fazla) şeklinde ifade edilmiştir. Resim 3.26'de ise Gm_k çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi verilmiştir.



Resim 3.26. Gm_k çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox gösterimi

3.6.4. Bulanık kural tabanının oluşturulması

Giriş ve çıkış değişkenleri bulanıklaştırılıp üyelik fonksiyonları elde edildikten sonra istenilen çıktıyı sağlayacak bulanık kural tabanı oluşturulmuştur. Elde edilen deney verilerinden yola çıkarak giriş değişkenleri ile çıkış değişkeni arasındaki ilişki “EĞER...İSE” kural cümleleriyle ifade edilmiştir. Bu ilişki, bulanık kümeleri ifade eden dilsel ifadeler arasında kurulmaktadır.

Bu çalışmada, giriş bulanık küme sayılarına göre (5x7) 35 adet kural satırından meydana gelen kural tabanı oluşturulmuştur. Çizelge 3.6’da giriş ve çıkış değişkenlerine ait kural tablosu görülmektedir. Aşağıda, bu çalışma için “EĞER...İSE” kural cümleleriyle oluşturulmuş 5 örnek kural cümlesi verilmiştir.

Eğer F_{tk} , ÇH ise ve F_{nk} , ÇÇAS ise Gm_k , ÇÇA dır.

Eğer F_{tk} , ÇH ise ve F_{nk} , ÇAS ise Gm_k , ÇÇA dır.

Eğer F_{tk} , ÇH ise ve F_{nk} , AS ise Gm_k , ÇÇA dır.

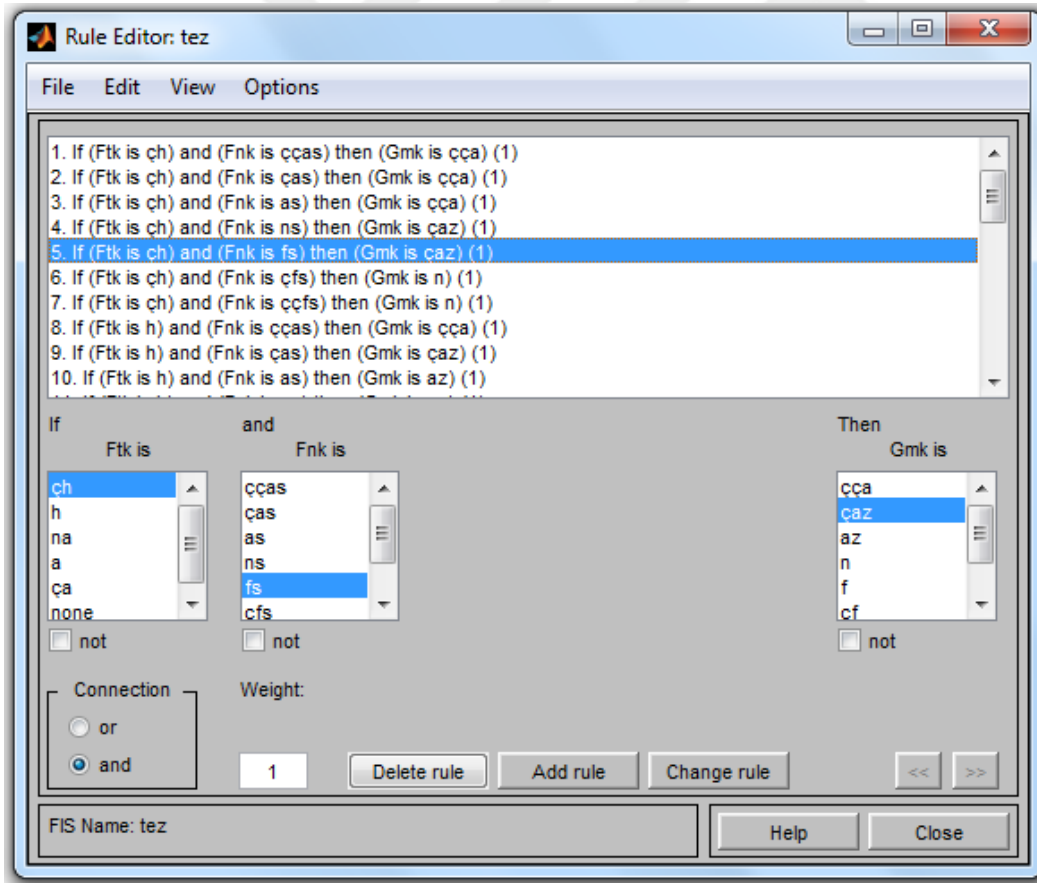
Eğer F_{tk} , ÇH ise ve F_{nk} , NS ise Gm_k , ÇAZ dır.

Eğer F_{tk} , ÇH ise ve F_{nk} , FS ise Gm_k , ÇAZ dır.

Çizelge 3.6. Kural tablosu

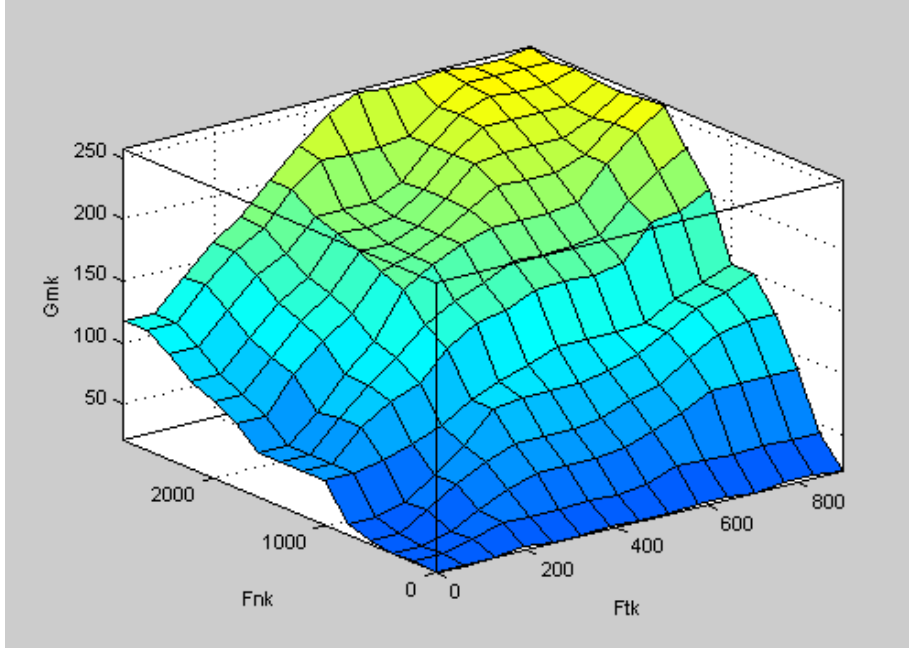
Gmk	Fnk							
	ÇÇAS	ÇAS	AS	NS	FS	ÇFS	ÇÇFS	
Ftk	ÇH	ÇÇA	ÇÇA	ÇÇA	ÇAZ	ÇAZ	N	N
	H	ÇÇA	ÇAZ	AZ	AZ	FS	ÇF	ÇF
	NA	ÇÇA	ÇAZ	AZ	N	ÇF	ÇF	ÇÇF
	A	ÇÇA	AZ	N	N	ÇF	ÇÇF	ÇÇF
	ÇA	ÇÇA	AZ	F	F	ÇÇF	ÇÇF	ÇÇF

Giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi düzenleyen bulanık kural tabanı, MATLAB/Fuzzy Rule Editor kullanılarak hazırlanmıştır. Kural tabanının MATLAB/Fuzzy Rule Editor görüntüsü Resim 3.27’de görülmektedir.



Resim 3.27. Kural tabanının MATLAB/Fuzzy Rule editor görüntüsü

Bulanık kural tabanında giriş değişkenlerinin çıkış değişkenine olan etkisi, kontrol yüzey grafiği şeklinde MATLAB/Fuzzy Surface Viewer ile görülebilmektedir. Şekil 3.31’de BGHS’nin bulanık kural tabanına ait kontrol yüzeyi grafiği görülmektedir.



Şekil 3.31. BGHS’nin kontrol yüzey grafiği

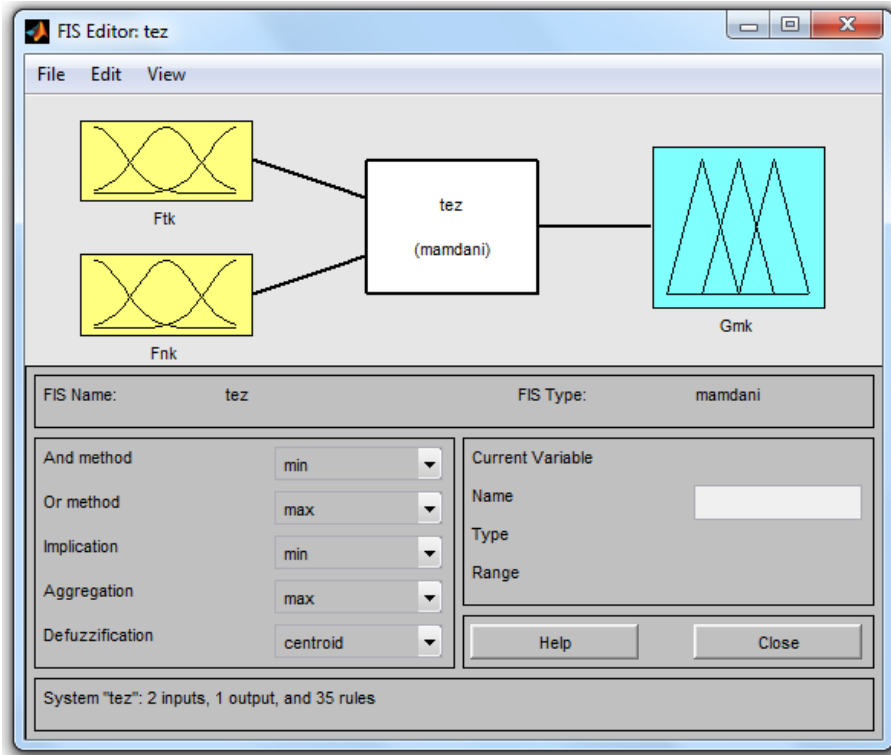
3.6.5. Bulanık çıkarım metodu

Veri tabanını ve kural tabanını kullanarak bulanık girişlere bağlı bulanık çıkarım elde edilebilmesi gerekir. Bu çalışmada tasarlanan BGHS’de insan sezgisi ve davranışına daha uygun ve kolay kurulabilen bir yapıya sahip olan Min-Max Mamdani çıkarım metodu kullanılmıştır.

3.6.6. Durulaştırma yöntemi

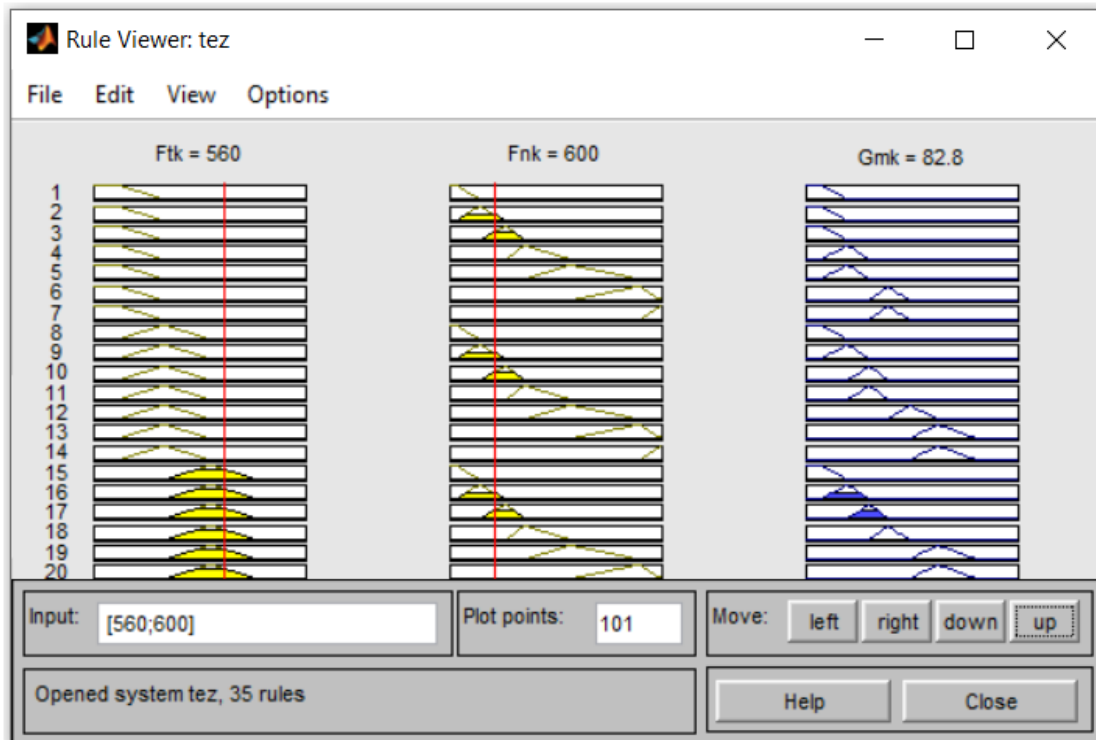
Bulanık çıkarım biriminden elde edilen bulanık sonuçların kontrol edilen bir sistem tarafından kullanılabilmesi için genel olarak duru ya da net bir sayıya dönüştürülmesi gerekir. Daha uygun çıkış değerlerini vermesi açısından sistemin çıkışı Bölüm 3.8.8’de ayrıntıları verilen farklı durulaştırma yöntemleri ile denenmiştir. Sonuç olarak, ağırlık merkezi yöntemi BGHS için durulaştırma yöntemi olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında tasarlanan BGHS’nin MATLAB R2013a/Fuzzy Logic Toolbox ortamındaki modellenmesi Resim 3.28’de görülmektedir.



Resim 3.28. BGHS'nin MATLAB ortamındaki modellenmesi

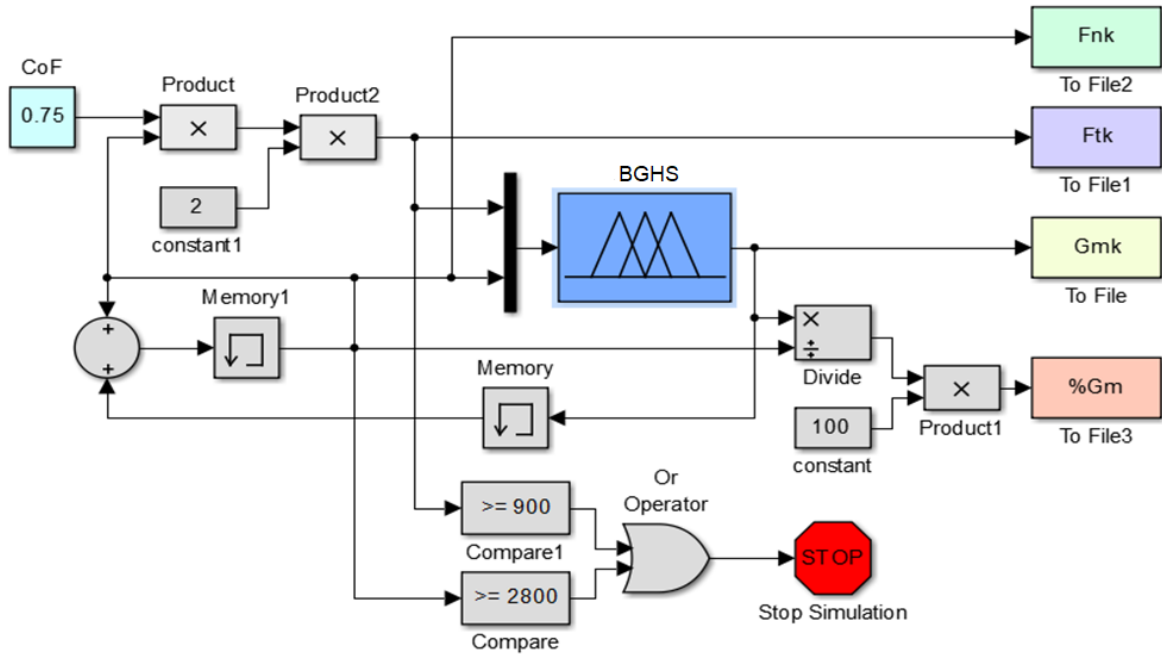
MATLAB ortamında modellenen BGHS'ye örnek giriş değerleri verilerek çıkışlar kontrol edilmiştir. Resim 3.29'de BGHS'ye girilen örnek giriş değerlerine göre elde edilen örnek Gm_k çıkış değerinin MATLAB/Fuzzy Rule Viewer görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.29. BGHS'nin MATLAB/Fuzzy Rule Viewer gösterimi

3.6.7. BGHS'nin performans testlerinin yapılışı

Bu çalışmada tasarlanan BGHS'nin kavrama sürecine yönelik G_{mk} ve $\%G_m$ performansını test etmek için Şekil 3.32'de görülen MATLAB R2013a/Simulink modeli hazırlanmıştır.



Şekil 3.32. BGHS'nin kavrama performansı için MATLAB/Simulink modeli

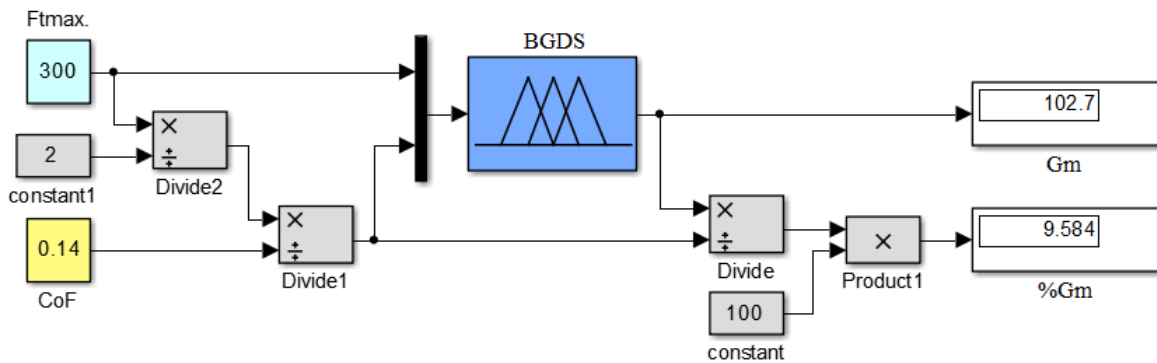
Şekil 3.32'de gösterilen CoF (Coefficient of Friction), μ_{sk} ' yı ifade etmektedir. BGHS'nin G_{mk} performansı testi, farklı yüzey özellikleri ve farklı ağırlıklar için belirlenen kavrama süreçleri için yapılmıştır. Belirlenen kavrama süreçleri için BGHS'den G_{mk} ve $\%G_m$ değerleri elde edilmiştir. Test için 0,07 ile 0,75 arasında 10 farklı CoF değeri belirlenmiştir. Her CoF değeri için olmak üzere 10 farklı kavrama sürecinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen her kavrama süreci için CoF değeri sabittir. Nesne ağırlığı ve bağlı olarak kavrama kuvveti ise artarak değişmektedir. Başlangıç için kavrama kuvvetinin önyükleme değeri 20 gf olarak belirlenmiştir. Önyükleme değeri aynı zamanda ilk F_{nk} değeri gibi işlem görmektedir. F_{nk} ve CoF değerleri ile birlikte Eş. 3.5 kullanılarak kayma olayının meydana geldiği andaki F_{tk} değeri hesaplanmaktadır. Kavrama süreci boyunca hesaplanan F_{tk} değerlerinde kayma meydana geldiği kabul edilmektedir. Bu şekilde elde edilen F_{nk} ve F_{tk} değerleri BGHS'ye girilerek G_{mk} hesaplanmaktadır. Hesaplanan Her G_{mk} değeri için Eş. 3.8 kullanılarak $\%G_m$ hesaplanmaktadır. Hesaplanan G_{mk} ve $\%G_m$ değerleri kaydedildikten sonra G_{mk} değeri F_{nk} değerinin üzerine eklenerek bir sonraki kayma noktası için F_{nk} ve F_{tk} değerleri hesaplanmaktadır. Elde edilen yeni F_{nk} ve F_{tk} değerleri aynı zamanda BGHS için yeni giriş değerleridir. Süreç bu şekilde F_{tk} değeri 900 gf oluncaya kadar veya F_{nk} değeri 2800 gf

oluncaya kadar devam etmektedir. Kavrama süreci boyunca hesaplanan tüm veriler en yakın tam sayıya yuvarlanarak kaydedilmiştir. Çizelge 3.7’de, 0,21 CoF değeri için 7 saniyede gerçekleşen kavrama sürecinin 2. saniyeye kadar elde edilen örnek simülasyon verileri görülmektedir.

Çizelge 3.7. BGHS’nin kavrama performansının örnek simülasyon verileri

	Time (Sec.)													
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	.	.	.
F_{tk} (gf)	-	8	17	26	35	44	53	62	71	81	90	.	.	.
F_{nk} (gf)	20	20	41	62	83	104	125	147	169	192	215	.	.	.
G_{mk} (gf)	-	21	21	21	21	21	22	22	23	23	24	.	.	.
%G_m	-	106	51	34	25	20	18	15	13	12	11	.	.	.

Kavrama sürecine yönelik performans testlerinden sonra BGHS’nin nesne kaldırıldığında G_m ve %G_m performansı test edilmiştir. Şekil 3.33’de BGHS’nin nesne kaldırıldığında G_m ve %G_m performansını test etmek için hazırlanan MATLAB/Simulink modeli görülmektedir. Hazırlanan model ile HKKD’de kullanılan nesne özellikleri dahil olmak üzere 10 farklı yüzey özelliği ve ağırlık değeri için G_m ve %G_m performansı test edilmiştir.



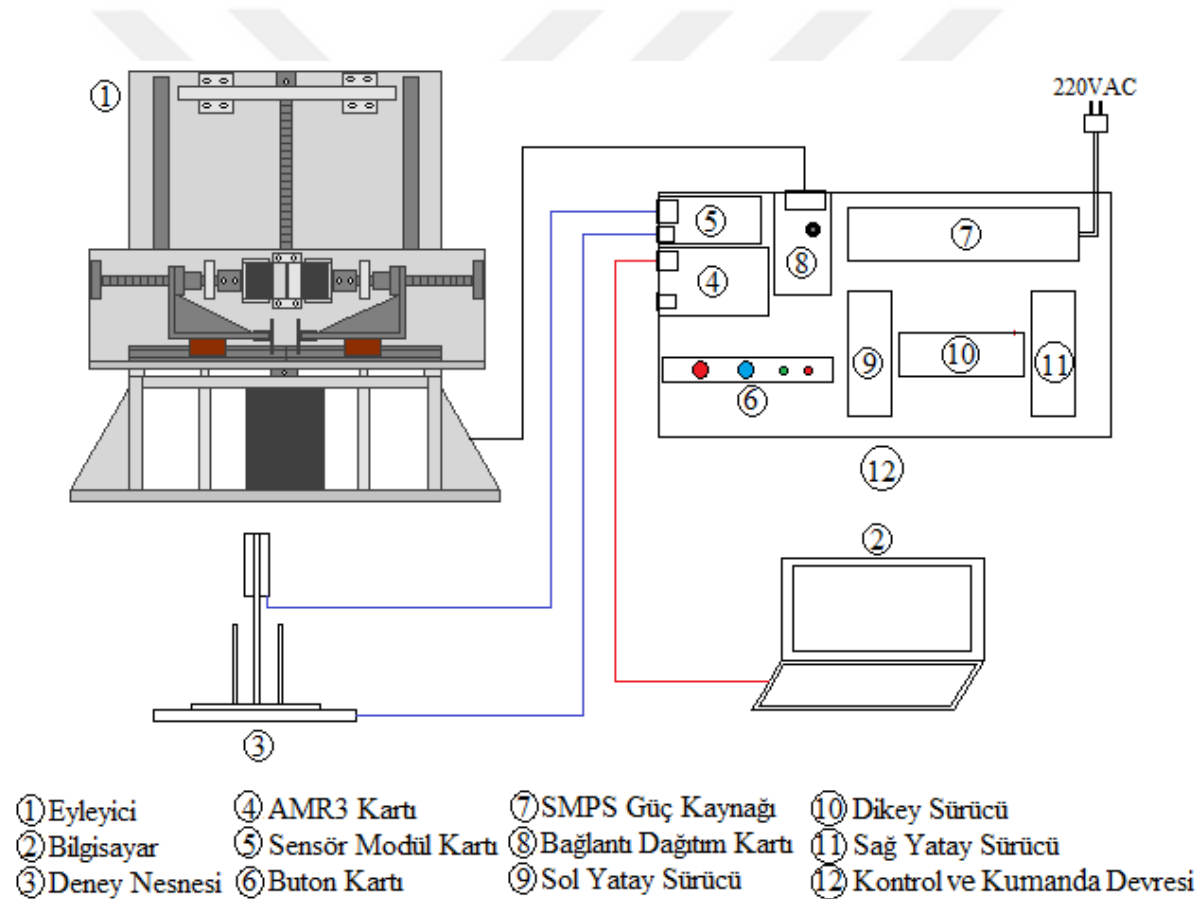
Şekil 3.33 BGHS’nin kaldırma performansı testi için MATLAB/Simulink modeli

Şekil 3.33’deki modelde, 10 farklı CoF değerinin her biri sabit değer olarak girilip 10 farklı Ft_{max} değeri ise farklı nesne ağırlıkları olarak girilmektedir. 0,07 ile 0,75 arasında 10 farklı CoF değerinin her biri için 50 gf ile 900 gf arasında 10 farklı Ft_{max} değeri girilerek performans sonuçları elde edilmiştir. Böylelikle BGHS’nin nesne kaldırıldığında hesapladığı G_m ve %G_m değerleri okunup kaydedilmiştir. Girilen CoF değeri ile Eş. 3.2 kullanılarak BGHS’ye Fn girdi

değeri hesaplanmaktadır. BGHS, girilen $F_{t_{max}}$ değerini ve hesaplanan F_n değerini giriş değerleri olarak alıp G_m hesaplanmaktadır. G_m değerinden Eş. 3.8 kullanılarak % G_m hesaplanmaktadır.

3.7. Kavrama Kuvveti Kontrol Sisteminin Tasarımı

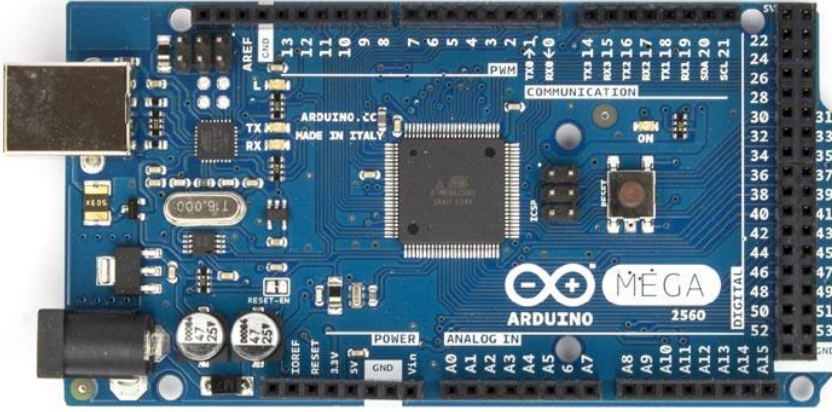
Bu çalışmada tasarlanan eyleyici, sürücüler, güç ünitesi, deney nesnesi, BGHS'ye ve kontrol birimine ait yazılım ve donanımlar, dizüstü bilgisayar ve diğer tasarım elemanları gerekli düzenlemelerle birleştirilerek KKKS'yi oluşturmuştur. Tasarımı tamamlanan KKKS ile bu çalışmada sunulan bir robot elin hassas kavra görevi için güvenlik marjı odaklı bulanık mantık tabanlı kavrama kuvvetinin kontrolü metodunun performansı test edilmiştir. Şekil 3.34'de KKKS'nin donanım yapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.34. KKKS'nin donanım yapısının şematik gösterimi

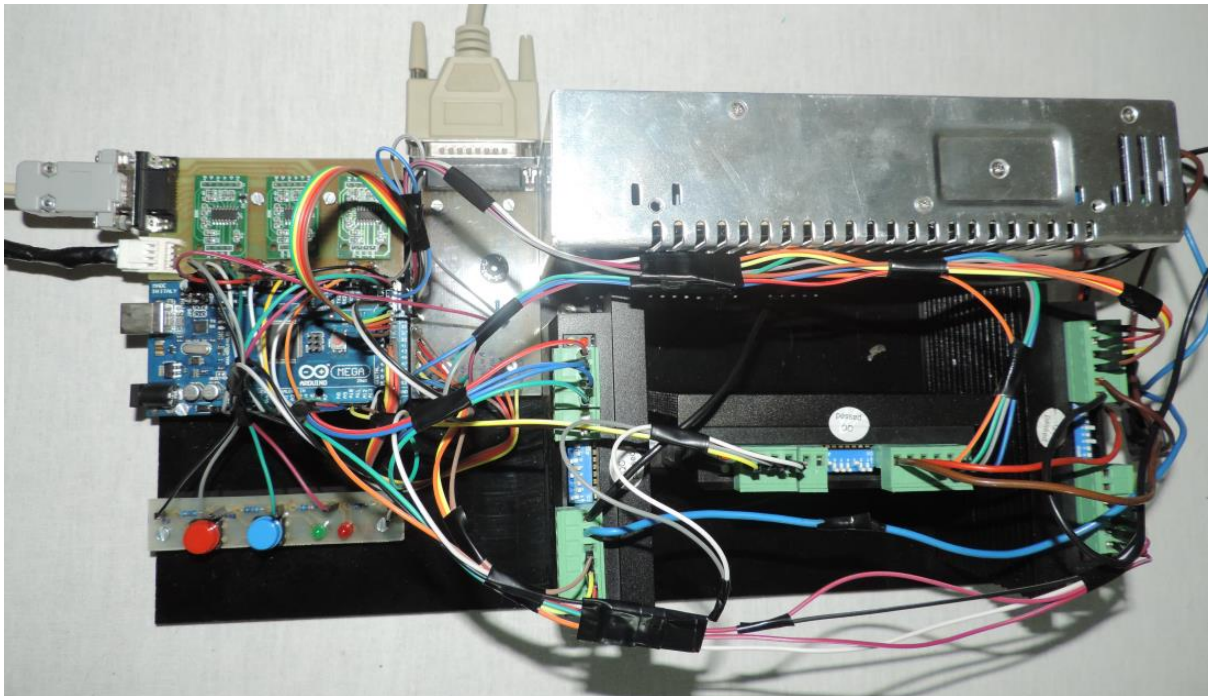
KKKS için gerekli giriş/çıkış port sayısı arttığından deney düzeneği üzerinde bulunan AUR3 kartı yetersiz kalmıştır. Bu nedenle AUR3 kartı yerine Resim 3.30'da görülen ve üzerinde Atmel Atmega2560-16AU mikrodenetleyici bulunan AMR3 (Arduino Mega 2560 R3) kartı kullanılmıştır. AMR3 kartı, +5 VDC çalışma gerilimine ve 7-12 VDC tavsiye edilen besleme gerilimine sahip, 54 adet dijital giriş/çıkış pinlerine ve 16 adet analog giriş pinlerine sahip,

256KB flash hafızası olan ve saat frekansı 16 MHz olan mikrodenetleyicili bir geliştirme kartıdır. Bilgisayara bağlı iken +5 VDC besleme gerilimi seri bağlantı kablosu yolu ile sağlanmaktadır. Bilgisayara bağlı değil iken 7-12 VDC ile harici besleme sağlanabilmektedir.

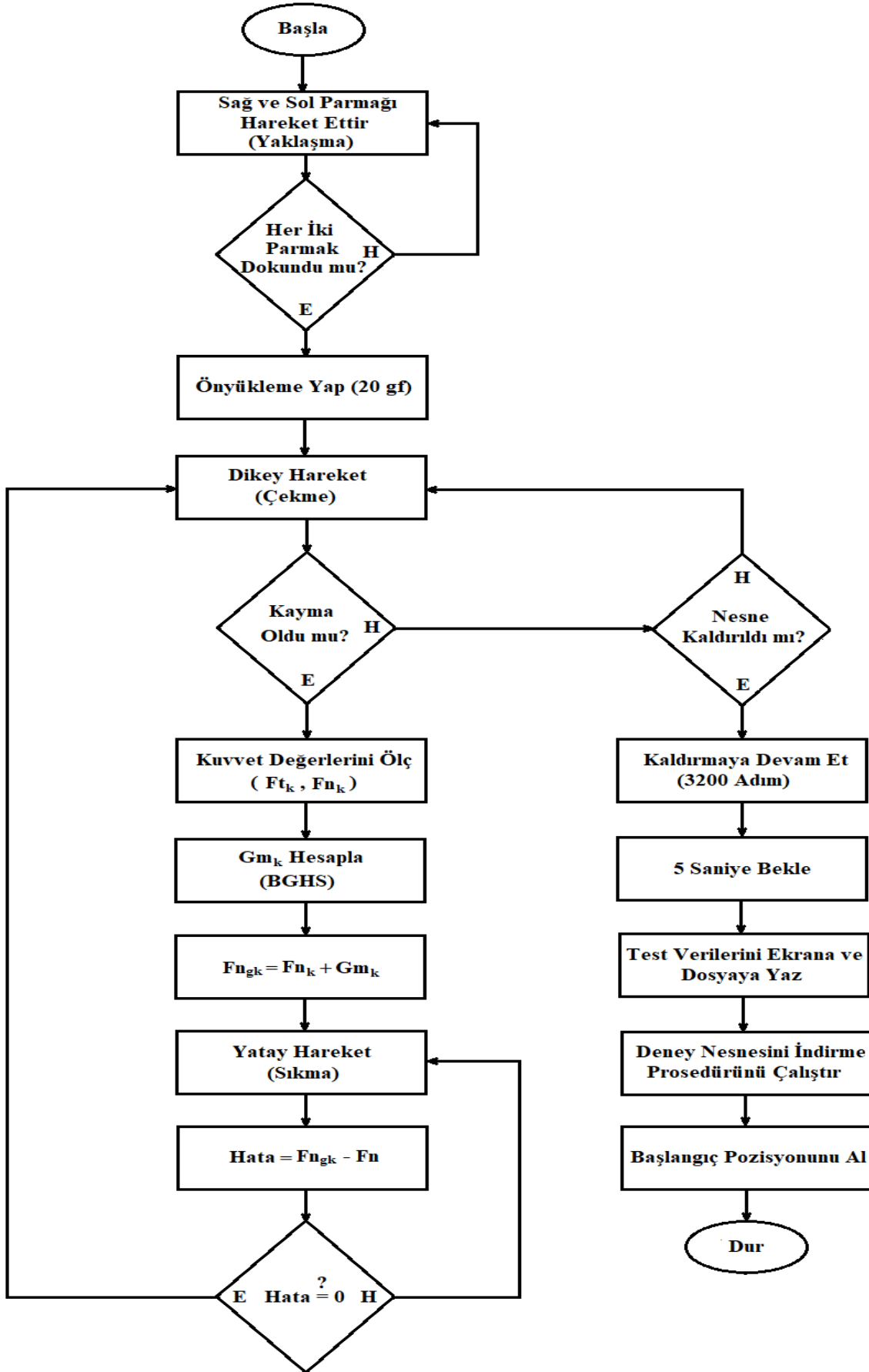


Resim 3.30. AMR3 kartı

AMR3 için yazılım ortamı olarak Arduino IDE kullanılmıştır. AMR3 kartı KKKS'nin kontrol birimi ve BGHS'den oluşan ana yazılımın yazıldığı donanımdır. KKKS için yazılan yazılıma ait akış diyagramı Şekil 3.35'de verilmiştir. AMR3 ile birlikte, sensör modül kartı, sürücüler, SMPS güç kaynağı, bağlantı dağıtım kartı ve buton kartı, pleksiglas bir platform üzerine monte edilerek Resim 3.31'da görülen kontrol ve kumanda devresi oluşturulmuştur.

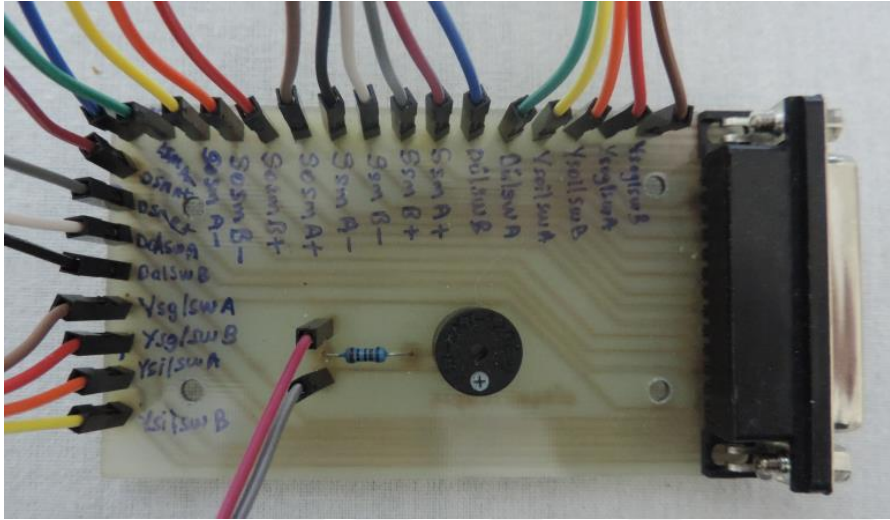


Resim 3.31. Kontrol ve kumanda devresi



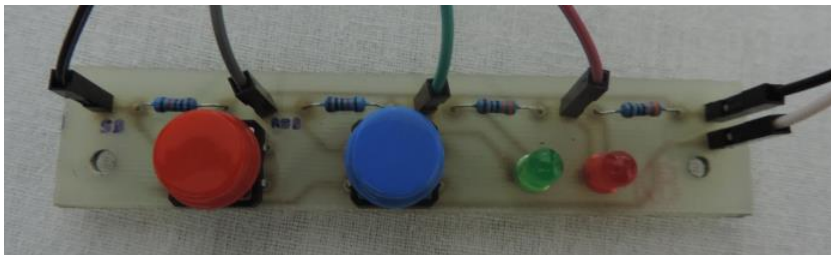
Şekil 3.35. KKKS'nin yazılımına ait akış diyagramı

Kontrol ve kumanda devresinde devre elamanlarının dahili ve çevresel bağlantılarının sağlanması için Resim 3.32’de görülen bağlantı dağıtım kartı üretilmiştir. Bağlantı dağıtım kartının üzerinde eyleyici ile bağlantıyı sağlayan DB25 dişi konnektör ve hata durumuna yönelik sesli bildirim yapan bir buzzer bulunmaktadır.



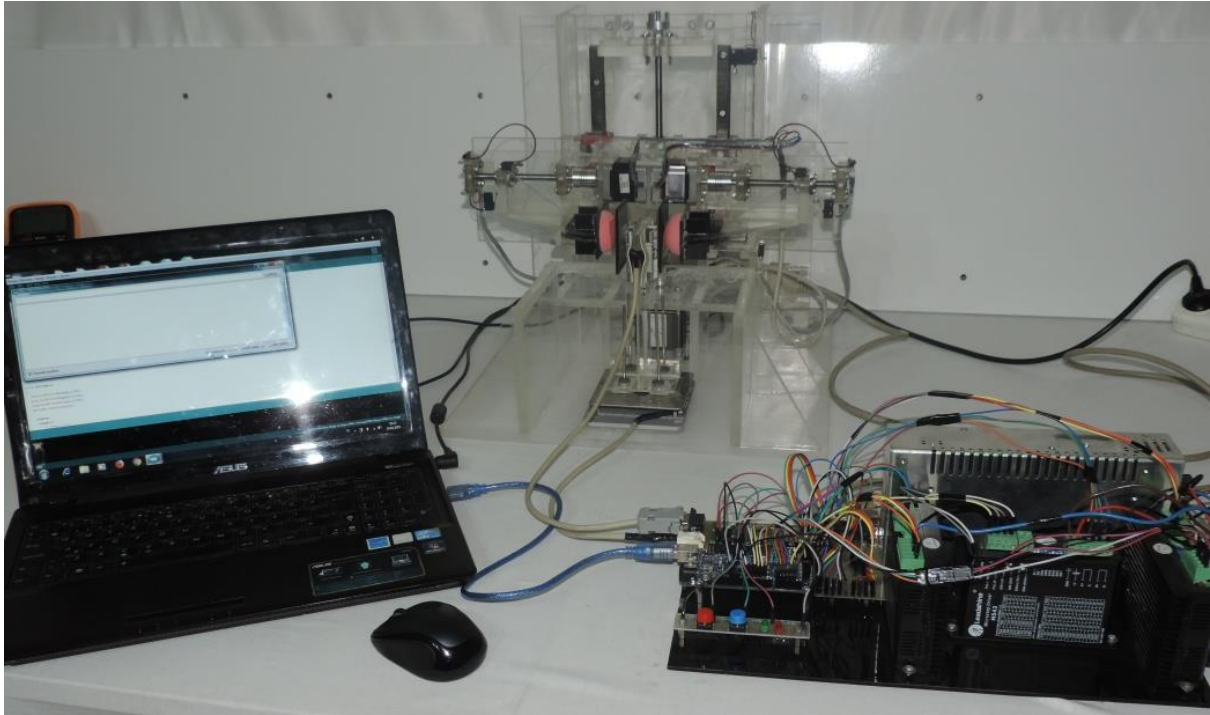
Resim 3.32. Bağlantı dağıtım kartı

Kontrol ve kumanda devresi için, üzerinde acil stop butonunun, başlatma butonunun ve bildirim ledlerinin bulunduğu Resim 3.33’de görülen buton kartı üretilmiştir. Buton kartının üzerindeki kırmızı led, eyleyicinin çalışmasını engelleyecek sorunlu bir durumda ışık vermektedir. Yeşil led ise eyleyicinin sorunsuz çalıştığı durumda ışık vermektedir.



Resim 3.33. Buton kartı

Step motor sürücüler için ise besleme SMPS güç kaynağından sağlanmaktadır. Sensör modül kartı, AMR3 kartından beslenmektedir. Kontrol ve kumanda devresindeki sensör modül kartı üzerinde normal yönde kuvvetleri ölçen yük hücrelerine bağlantı DB9 dişi konnektör ile sağlanmaktadır. Teğetsel kuvveti ölçen yük hücrelerine bağlantı ise 4 pin tunik konnektör ile sağlanmaktadır. Bilgisayar ile bağlantı ise AMR3 üzerindeki USB girişi ile sağlanmaktadır. KKKS’nin fiziki görünümü Resim 3.34’de görülmektedir.



Resim 3.34. KKKS'nin fiziki görünümü

3.8. KKKS'nin Çalışması

Kavrama yüzeyleri ve ağırlığı ayarlandıktan sonra deney nesnesi teğetsel kuvvet sensörünün bulunduğu zemine yerleştirilmektedir. Kavrama ve kaldırma işleminin başlatılması için başlat butonuna basıldıktan sonra çalışmayı engelleyecek bir sorun olup olmadığı sistem tarafından kontrol edilmektedir. Eğer sorun varsa buzzer sesli uyarı vererek kırmızı uyarı ledi yanmaktadır. Eğer sorun yoksa eyleyicinin kavrama tırnakları deney nesnesine doğru hareket etmektedir. Sağ ya da sol tırnaktan herhangi biri deney nesnesinin kavrama yüzeyine dokunduğunda o tırnağın yatay hareketi durmaktadır. Diğer tırnak da kavrama yüzeyine dokununca, 20 gf önyükleme değerine ulaşıncaya kadar kavrama tırnakları tarafından deney nesnesi sıkılmaktadır. Her iki tırnak da eş zamanlı şekilde hareket etmektedir. Önyükleme değerine ulaşıncaya, dikey hareket başlayarak nesne yukarı doğru çekilmektedir.

Kayma olayı meydana geldiği anda ölçülen normal kuvvet ve teğetsel kuvvet değerleri kaydedilmektedir. Kayma noktası için kaydedilen kuvvet değerleri BGHS'ye giriş olarak gönderilmektedir. BGHS, giriş değerlerine göre kayma noktası için güvenlik marjı (G_{mk}) hesaplamaktadır. Hesaplanan G_{mk} , Eş. 3.21'de gösterildiği gibi kayma noktasında ölçülen normal kuvvetin (F_{nk}) üzerine eklenerek güvenli kavrama kuvveti değeri (F_{ngk}) elde edilir. F_{ngk} , sistemin referans giriş değeridir. Referans giriş değeri, her kayma noktasında değişmektedir. F_{ngk} değeri, nesne sıkılmaya devam edildiği sürece artacak olan F_n (Kavrama

kuvveti) değeri ile karşılaştırılarak Eş. 3.22’de ifade edilen hata değeri oluşturulur. Artan F_n değeri $F_{n_{gk}}$ değerine eşit olduğunda hata sıfır olmaktadır.

$$F_{n_{gk}} = F_{n_k} + G_{m_k} \quad (3.21)$$

$$\text{Hata} = F_{n_{gk}} - F_n \quad (3.22)$$

Hata sıfır olunca yatay hareket durdurulur ve dikey hareket başlatılır. Deney nesnesi bir kayma olayı meydana gelene kadar yukarı doğru çekilir. Bu işlemler deney nesnesinin bulunduğu zeminle teması kesilene kadar devam etmektedir. Deney nesnesinin zeminle temasının kesildiği anlaşıldığında belirli bir mesafeye kadar (3200 step motor adımı) kaldırılarak sistem 5 saniye beklemektedir. Bu bekleme süresi, kaldırma gerçekleştiğinde nesnenin kayıp düşmeden güvenli şekilde kaldırıldığından emin olmak içindir. Süre dolduğunda kavrama-kaldırma testi ile elde edilen veriler ekrana gönderilerek ve dosyaya yazılarak nesne indirme prosedürü başlatılır. Deney nesnesi indirilip zemine bırakılarak eyleyici başlangıç pozisyonuna dönmektedir. Sistem çalışırken, bir sorun olup olmadığı sürekli kontrol edilmektedir. Eğer bir sorun varsa sistem tarafından uygun hata sinyali üretilerek gerekli prosedür çalıştırılmaktadır. Eğer çalışma esnasında gözlemlenen farklı bir sorun varsa acil stop butonu ile sistemin çalışması durdurulabilmektedir.

3.9. KKKS’nin Performans Testlerinin Yapılışı

Bu çalışmada sunulan kavrama kuvveti kontrol metodunun performansını test etmek için KKKS’nin kavrama ve kaldırma performansı eyleyici ile gerçek zamanlı test edilmiştir. Performans testleri yapılırken eyleyici üzerindeki step motorlardan sabit adımlama hızı uygulanmıştır. Kaldırma performansı için yapılan testler HKKD’de uygulanan yüzey materyalleri ve ağırlık değerlerine ek olarak farklı yüzey materyalleri ve farklı ağırlık değerlerinde kaldırma performansı test edilmiştir. Kavrama performansı testi için kaldırma performansı testinde uygulananlardan seçilen 5 farklı yüzey materyali ile hiç kullanılmamış 5 farklı ağırlık değeri için 5’er adet test yapılmıştır.

HKKD’de uygulananlardan farklı olarak belirlenen yüzey materyalleri yine kolay elde edilebilir materyallerden seçilerek Bölüm 3.4.3’de açıklandığı gibi hazırlanmıştır. Belirlenen materyaller: PE (Polyethylene-Polietilen) film, asetat film, cam ve lateks köpük sünger olarak belirlenmiştir. Bu materyaller ve HKKD’de kullanılan yüzey materyalleri ile birlikte farklı

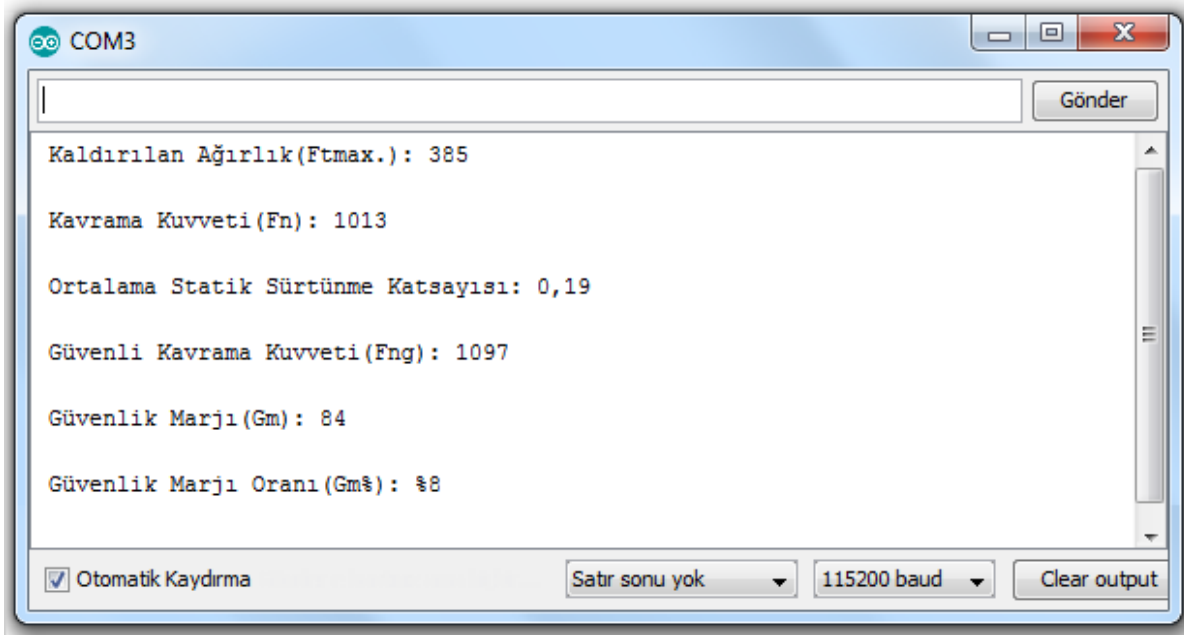
kombinasyonlar denenerek kaygandan sürtünmeliye farklı ara μ_s değerlerine karşılık gelecek şekilde yüzey materyal çiftleri tespit edilmiştir. Bu tespit, Bölüm 3.4.3’de açıklandığı gibi μ_s değerleri ölçülerek yapılmıştır. Yapılan denemeler ve ölçümler sonucunda 5 farklı yüzey materyal çifti belirlenmiştir. Ek olarak belirlenen materyal çiftleri ve ölçülen μ_{sort} değerleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Çizelgedeki LKS, lateks köpük sünger materyalini ifade etmekte olup eyleyicinin tırnak kavrama yüzeyi materyali ile aynıdır.

Çizelge 3.8. Ek olarak belirlenen materyal çiftleri ve yaklaşık μ_s değerleri

Materyal Çifti	μ_{sort}
PE-PMMA	0,19
Asetat-Asetat	0,36
BOPP-Asetat	0,47
BOPP-Cam	0,68
LKS-Asetat	0,87

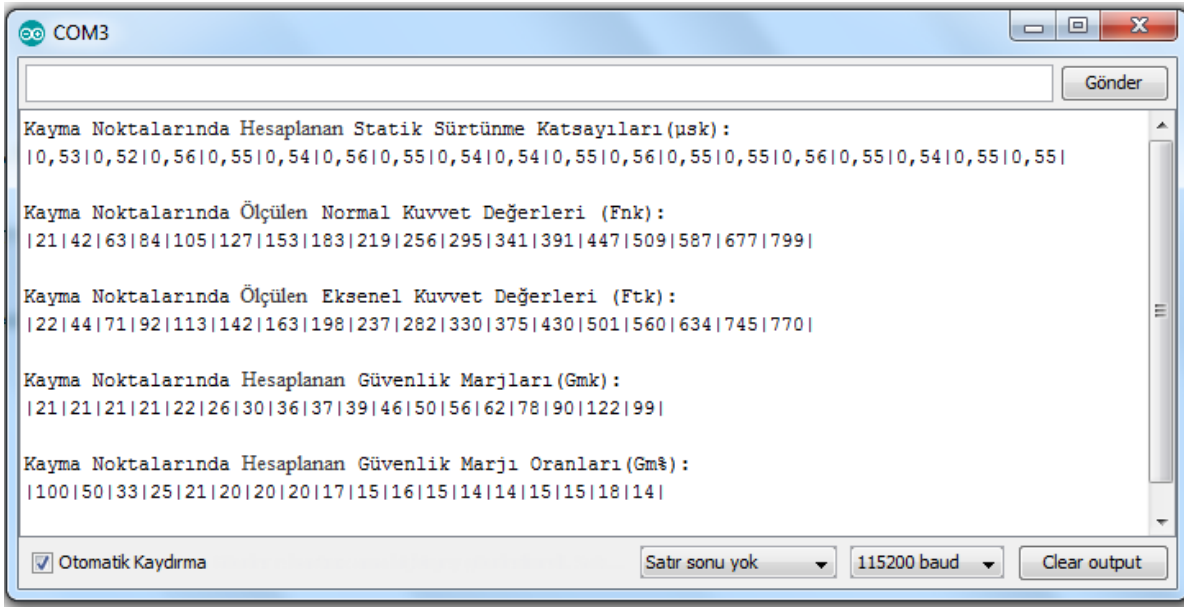
Yapılan performans testlerinde ilk olarak HKKD’deki aynı yüzey özellikleri ve ağırlık değerleri için eyleyici ile 5’er adet performans testi yapılmıştır. Ayrıca yeni belirlenen her bir materyal çifti için 5 farklı ağırlık değerinde performans testi yapılmıştır. Böylelikle kaldırma performansına ait veriler kaygandan sürtünmeliye 10 farklı yüzey özelliği ve 29 farklı ağırlık değeri için elde edilmiştir.

Bir yüzey özelliğine ve ağırlığa ait performans testi yapmak için ilk önce deney nesnesinin kavrama yüzeylerine ilgili yüzey materyali yerleştirilmektedir. Daha sonra deney nesnesin ağırlık çubuklarına ilgili ağırlıklar yerleştirilmektedir. Deney nesnesi ise taban yük hücresinin bulunduğu platform üzerine eyleyicinin tırnakları arasına gelecek şekilde yerleştirilmektedir. Kontrol devresinin üzerindeki mavi başlat butonuna basıldıktan sonra sistem çalışmaya başlamaktadır. Deney nesnesi kaldırıldığında performans verileri sistem tarafından Arduino IDE seri port ekranına ve dosyaya yazılmaktadır. Kaldırma performansı testlerinde seri port ekranından performans verileri olan Gm ve %Gm verileri ile birlikte, $F_{t_{\text{max}}}$, Fn, F_{n_g} , μ_{sort} , değerleri de okunmaktadır. Resim 3.35’de KKKS’nin kaldırma performansına ait örnek bir Arduino IDE seri port ekran çıktısı görülmektedir. Çıktıda görülen değerler PE-PMMA materyal çiftinin 385 gf ağırlık ile elde edilmiş test verilerine aittir.



Resim 3.35. KKKS'nin kaldırma performansı örnek ekran çıktısı

KKKS'nin kavrama performansı testlerinde ise seri port ekranından F_{nk} , F_{tk} , μ_{sk} , G_{mk} ve $\%G_m$ verileri okunmaktadır. Resim 3.36'da KKKS'nin kavrama performansına ait örnek bir Arduino IDE seri port ekran çıktısı görülmektedir.



Resim 3.36. KKKS'nin kavrama performansı örnek ekran çıktısı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bulanık mantık denetleyiciler, matematiksel modeli olmayan veya çıkarılması zor olan, insan karar ve kontrol yeteneğine ihtiyaç duyulan karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan sistemlerdir. Literatürdeki çalışmalar ve bu çalışmadaki deneysel sonuçlar insanların bir nesneyi kavrayıp kaldırırken Coulomb sürtünme denklemi ile hesaplanan minimum F_n değeri üstüne G_m eklediklerini göstermiştir. Bu çalışmada, insanların hassas kavrama görevinde değişen yüzey özelliğine ve değişen ağırlığa bağlı olarak G_m uygulama yetenekleri ölçülmüştür. Hassas kavrama görevinde insanların nesne kavrama yeteneklerine yönelik elde edilen veriler kullanılarak tasarlanan sistem ile kavrama kuvvetinin kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır.

Bu bölümde, insanlarla yapılan HKKD’de elde edilen veriler, BGHS’nin performansı, KKKS’nin kaldırma performansı ve KKKS’nin kavrama performansı incelenmiştir. HKKD’deki insan performansı ile BGHS’nin ve KKKS’nin performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular ortaya konularak sonuçlara ilişkin yorumlara yer verilmiştir.

Tasarlanan BGHS denetimli KKKS ile bir hassas kavrama görevi için insanların nesne kavrama-kaldırma yeteneğinin benzetimi yapılmaya çalışılmıştır. Buna bağlı olarak özellikleri bilinmeyen bir nesnenin bir robot el tarafından kalıcı şekil değişikliğine uğratılmadan hassas bir şekilde kavranıp kaldırılmasına yönelik kavrama kuvvetinin kontrolü metodu sunulmuştur. Bu çalışmanın performans parametreleri, farklı yüzey özelliklerinde ve farklı ağırlıklarda elde edilen G_m ve $\%G_m$ değerleridir.

Tüm deneyler, testler ve bunların sonuçlarına yönelik performans değerlendirmesi yapılırken kavranan nesnelerin, küp, kare prizma veya dikdörtgenler prizması gibi düzgün geometrik şekle sahip ve rijit olduğu kabul edilmiştir. Nesneye saf yatay ve dikey kuvvetlerin etki ettiği ve başkaca açılmalı ve doğrusal kuvvet etkisinin olmadığı kabul edilmiştir. HX711 sensör modülünün veri dönüştürme hızından dolayı insanların kavrama-kaldırma sürecine göre KKKS’nin kavrama-kaldırma süreci daha yavaş gerçekleşmiştir. Bununla birlikte nesnelerin sabit bir hızla kavranıp kaldırıldığı kabul edilerek step motorlarından sabit adımlama hızı uygulanmıştır. Bunlara bağlı olarak ivmelenme, açılmalı nesne hareketleri ve nesnedeki esneme etkileri gibi fiziksel etkiler sonuçlara yansımamıştır.

4.1. HKKD’de Elde Edilen Veriler

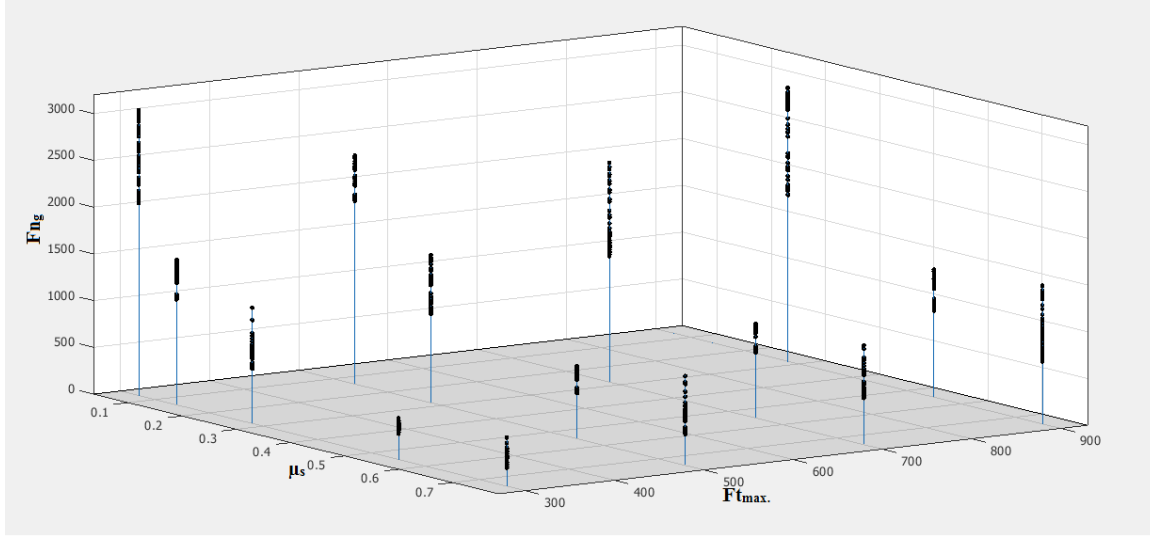
Bu tez çalışmasında insanlarla yapılan HKKD, yaşları 19 ile 46 arasında değişen ve sağ ellerini kullanan 6’sı kadın ve 8’i erkek olmak üzere bilinen sağlık problemi olmayan 14 kişi ile baş ve işaret parmakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey materyalleri belirlenirken μ_s ölçümlerinde, materyal yüzeyleri kir, nem, yağ gibi yabancı maddelerden olabildiğince temizlenmeye çalışılmıştır. Deney nesnesinin ağırlığı yaklaşık 300 gf dur. Tüm deney ve testlerde nesne ağırlığı en fazla 900 gr kabul edilmiştir. HKKD, 300 gf ile 900 gf aralığında eşit aralıklı 4 farklı ağırlık için ve 0.07 ile 0.75 aralığında 5 farklı μ_s değeri için yapılmıştır. Bununla beraber kullanılan yük hücresinin ölçüm sınırından dolayı bazı μ_s ve ağırlık değerleri için veri elde edilememiştir. Böylelikle toplam 1035 adet kavrama kuvveti verisi elde edilmiştir. KKKS performans testleri ise 300 gf ile 900 gf aralığında 29 farklı ağırlık için ve 0.07 ile 0.87 aralığında 10 farklı μ_s değeri için yapılmıştır. Kuvvet değerlerinin ölçümü için kullanılan yük hücrelerinin etiket değeri 2 kg dır. Çalışma kapsamında, yük hücreleri %55 fazladan yüklenerek ölçme limiti 3100 gf olarak belirlenmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen verileri gösteren çizelgelerde LA ile gösterilen veri noktaları, yük hücresinin ölçme limitinin aşıldığı veri noktalarıdır. LA (Limit aşımı) ile gösterilen veri noktalarında ya hiç veri elde edilememiştir ya da yeteri kadar veri elde edilememiştir.

Çizelge 4.1. HKKD’de katılımcılardan elde edilen deney verileri örneği

Materyal, μ_s , Ağırlık		BOPP-PP, 0.55, 500 gf													
Deneyler	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
	698	716	639	588	716	596	708	778	502	753	790	748	783	772	
	752	712	545	644	701	648	764	756	515	745	767	745	758	756	
KK (gf)	719	704	550	602	730	653	700	767	509	725	746	742	753	748	
	695	721	523	592	737	572	753	780	562	720	744	729	749	744	
	705	735	512	644	748	658	672	757	542	760	743	717	647	777	
Materyal, μ_s , Ağırlık		BOPP-A4, 0.28, 700 gf													
Deneyler	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
	2232	1469	1513	1971	1846	1503	1339	2161	2064	1601	1477	1515	1781	1507	
	2219	1406	1405	1800	1772	1547	1360	2045	1845	1611	1410	1401	1710	1531	
KK (gf)	2314	1572	1384	1483	1949	1588	1462	2071	2170	1591	1544	1383	1499	1495	
	2360	1658	1426	1618	1963	1447	1343	1944	2074	1615	1657	1425	1621	1619	
	2061	1537	1381	1503	2291	1452	1379	2136	2239	1580	1537	1382	1501	1625	

HKKD’de katılımcılardan elde edilen deney verileri örneği Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgedeki “KK”, kavrama kuvvetini ifade etmektedir. Çizelge 4.1’de, üç farklı yüzey özelliği ve ağırlık değeri için 14 katılımcı ile yapılan 5’er deney sonucu ölçülen kavrama kuvveti verileri

görülmektedir. Bu veriler, katılımcıların güvenlik marjı ekleyerek uyguladıkları kavrama kuvveti (F_{ng}) verileridir. HKKD’de katılımcılardan elde edilen 1035 adet F_{ng} verisine ait dağılım grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



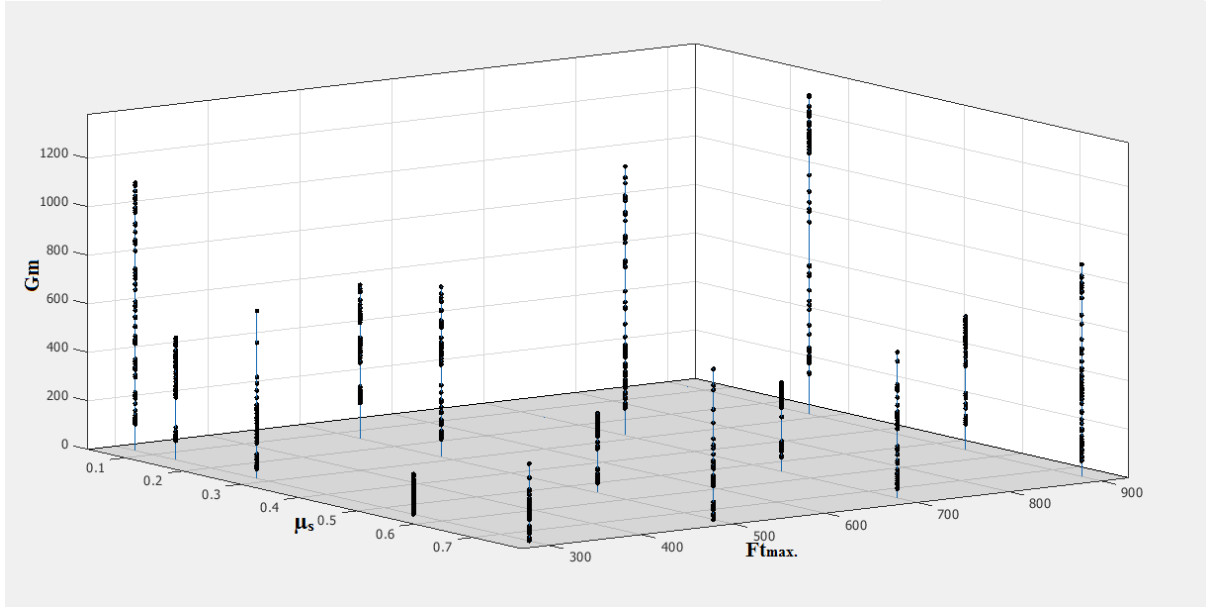
Şekil 4.1. Katılımcılardan elde edilen F_{ng} verilerinin dağılım grafiği

HKKD’den elde edilen deney verileri ve Eş. 3.4 kullanılarak Gm değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.2’de, 3 farklı yüzey özelliği ve ağırlık için 5’er deney sonucu hesaplanan Gm örnek değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. HKKD’den elde edilen Gm örnek değerleri

Materyal, μ_s , Ağırlık		BOPP-PP, 0.55, 500 gf													
Deneyler	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
	246	264	73	55	264	105	256	326	50	301	338	296	331	320	
	300	260	88	192	249	196	312	304	63	293	315	293	306	304	
Gm (gf)	267	252	64	70	278	201	248	315	57	273	294	290	301	296	
	243	269	71	67	285	90	301	328	110	268	292	277	297	292	
	253	283	60	192	296	206	220	305	85	308	291	265	195	325	
Materyal, μ_s , Ağırlık		BOPP-A4, 0.28, 700 gf													
Deneyler	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
	993	230	274	732	607	264	185	922	825	362	238	276	542	268	
	980	167	166	561	533	308	124	806	606	372	171	162	471	292	
Gm (gf)	1075	333	145	244	710	349	223	832	931	352	305	144	260	256	
	1121	419	187	379	724	208	188	705	835	376	418	186	382	380	
	822	298	142	264	1052	213	136	897	1000	341	298	143	262	386	

HKKD’de katılımcılardan elde edilen deney verilerine göre hesaplanmış 1035 adet Gm verisine ait dağılım grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



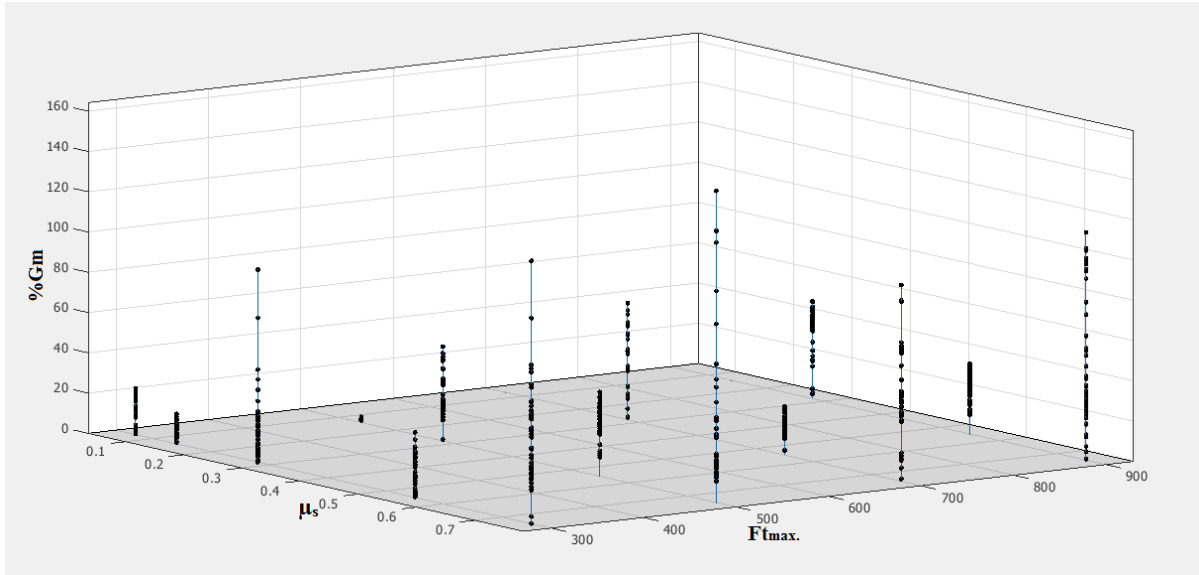
Şekil 4.2. Katılımcıların uyguladığı Gm değerlerinin dağılım grafiği

Elde edilen F_{ng} ve Gm değerleri kullanılarak HKKD’de katılımcılar tarafından uygulanmış 1035 adet %Gm değeri hesaplanmıştır. HKKD’de katılımcıların uygulamış oldukları %Gm değerleri hesaplanırken Eş. 3.8 kullanılmıştır. Hesaplanan %Gm örnek değerleri 3 farklı yüzey özelliği ve ağırlık için Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Katılımcılardan elde edilen %Gm örnek değerleri

Materyal, μ_s , Ağırlık		BOPP-PP, 0.55, 500 gf													
Deneyler	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
	54	58	16	12	58	23	57	72	11	67	75	65	73	71	
	66	58	19	42	55	43	69	67	14	65	70	65	68	67	
%Gm	59	56	14	15	62	44	55	70	13	60	65	64	67	65	
	54	60	16	15	63	20	67	73	24	59	65	61	66	65	
	56	63	13	42	65	46	49	67	19	68	64	59	43	72	
Materyal, μ_s , Ağırlık		BOPP-A4, 0.28, 700 gf													
Deneyler	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
	80	19	22	59	49	21	15	74	67	29	19	22	44	22	
	79	13	13	45	43	25	10	65	49	30	14	13	38	24	
%Gm	87	27	12	20	57	28	18	67	75	28	25	12	21	21	
	90	34	15	31	58	17	15	57	67	30	34	15	31	31	
	66	24	11	21	85	17	11	72	81	27	24	12	21	31	

HKKD’de elde edilen 1035 adet Gm verisine bağlı hesaplanan %Gm değerlerinin dağılım grafiği Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Katılımcılardan elde edilen %Gm değerlerinin dağılım grafiği

HKKD’de katılımcıların uyguladıkları güvenli kavrama kuvveti (F_{ng}) değerleri Şekil 4.1’de görüldüğü gibi her yüzey özelliği ve ağırlık için belirli bir aralıkta değişkenlik göstermektedir. HKKD’den elde edilen F_{ng} verilerinin değişim aralıkları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

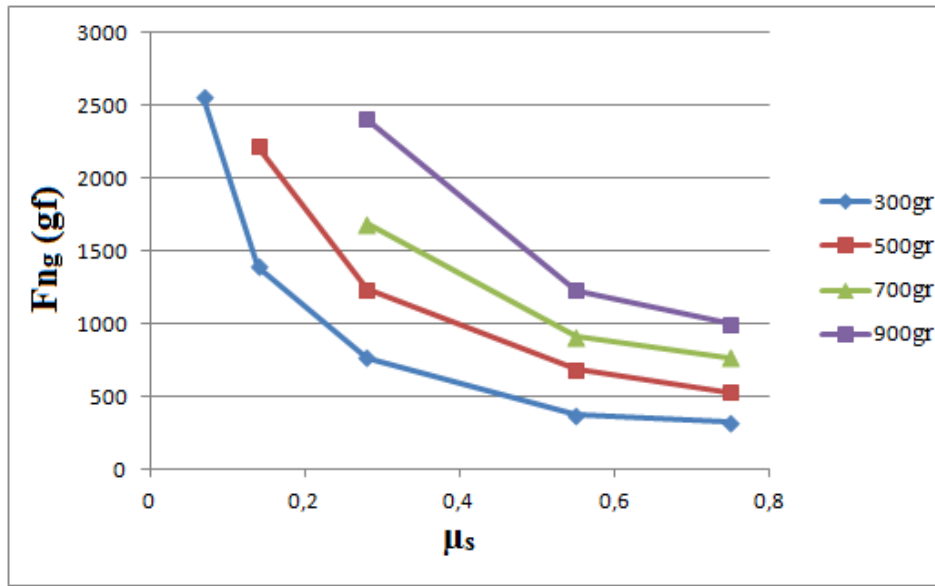
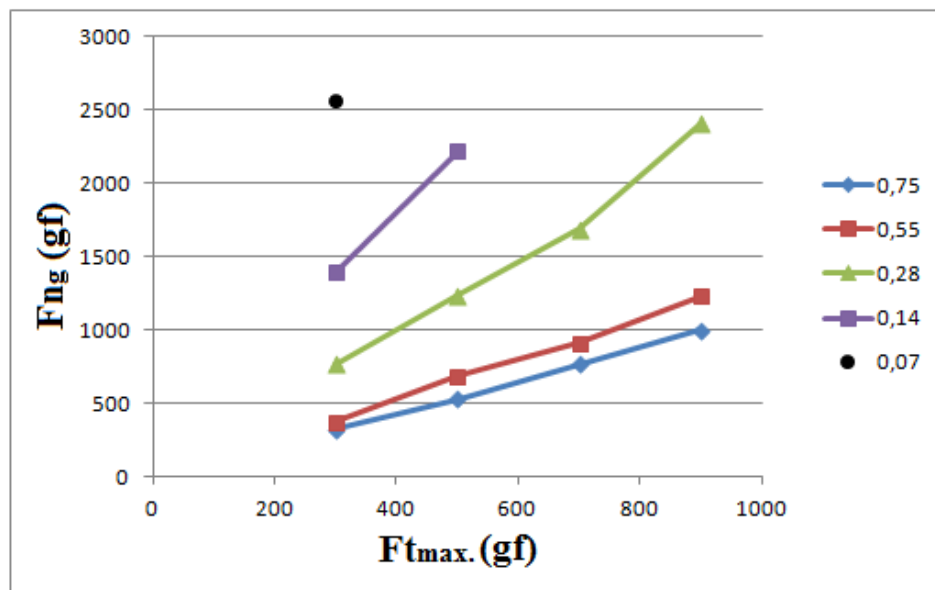
Çizelge 4.4. Katılımcılardan elde edilen F_{ng} verilerinin değişim aralığı

F_{ng} (gf)	F_{tmax} (gf)			
	300	500	700	900
0,75	208-531	345-965	513-1071	679-1488
0,55	287-452	502-790	714-1022	932-1377
μ_s 0,28	600-1252	965-1593	1363-2360	1793-2941
0,14	1140-1564	1972-2458	LA	LA
0,07	2070-3064	LA	LA	LA

Her bir yüzey özelliği ve ağırlık için belirli bir aralıkta değişim gösteren deney verilerinin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama değerler Çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Çizelge 4.5’de verilen aritmetik ortalama değerleri üzerinden Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilen değişim grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.4’de μ_s ’ye göre değişim grafiği; Şekil 4.5’de ise F_{tmax} ’a göre değişim grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Katılımcılardan elde edilen F_{ng} verilerinin aritmetik ortalamaları

F_{ng} (gf)	$F_{tmax}(gf)$				
	300	500	700	900	
0,75	326	529	770	996	
0,55	374	686	909	1228	
μ_s	0,28	769	1334	1688	2409
	0,14	1393	2221	LA	LA
	0,07	2557	LA	LA	LA

Şekil 4.4. Katılımcıların F_{ng} ortalamalarının μ_s 'ye göre değişim grafiğiŞekil 4.5. Katılımcıların F_{ng} ortalamalarının F_{tmax} 'a göre değişim grafiği

Yapılan HKKD sonucunda katılımcıların her bir μ_s ve $F_{t_{max}}$ değerlerinde uygulamış oldukları F_{ng} değerleri genel olarak incelendiğinde, kayganlığın ve nesne ağırlığının artmasına karşı katılımcıların nesneyi kaldırmak için uyguladıkları kavrama kuvvetinin de artma eğilimli olduğu görülmektedir. Sabit μ_s değerlerinde ağırlık arttıkça nesneyi kaldırmak için uygulanan F_{ng} değeri doğrusal bir artış eğilimindedir (Bkz. Şekil 4.5). Fakat aynı ağırlıkta kayganlığı artan nesneyi kaldırmak için uygulanan F_{ng} değerinde ise doğrusal olmayan bir artış eğilimi görülmektedir (Bkz. Şekil 4.4). Kayganlık arttıkça F_{ng} 'nin artışı daha da hızlanmaktadır. HKKD'den elde edilen F_{ng} verileri, F_n ve G_m verilerini birlikte içermektedir. Bu çalışmada sunulan kavrama kuvvetinin kontrolü metoduna yönelik olarak, HKKD'den elde edilen F_{ng} verilerinden Eş. 3.4 kullanılarak G_m değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.6'de μ_s ve $F_{t_{max}}$ değerlerine bağlı olarak hesaplanan G_m değerlerinin değişim aralıkları verilmiştir.

Çizelge 4.6. Katılımcılardan elde edilen G_m verilerinin değişim aralıkları

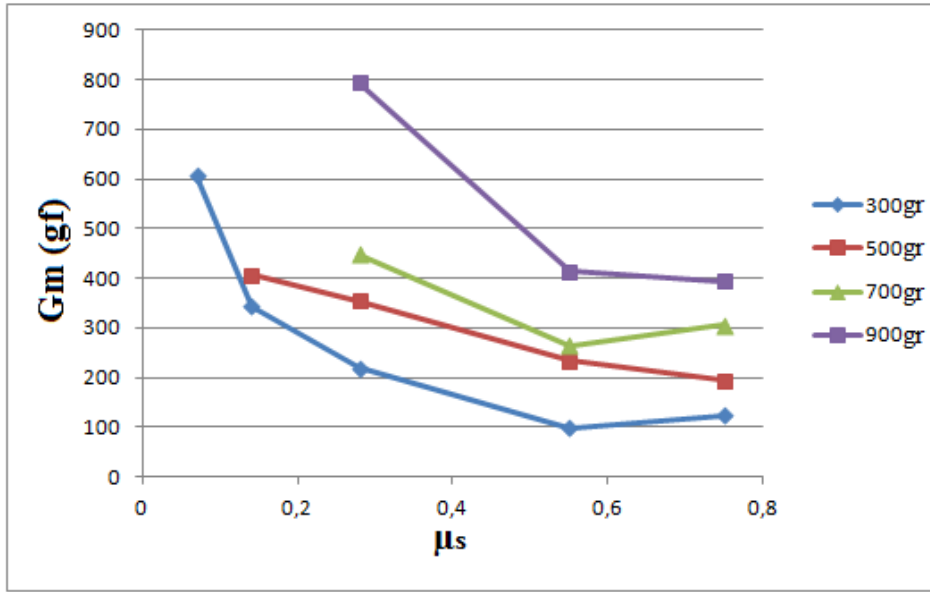
Gm (gf)	F_{t_{max}}			
	300	500	700	900
0,75	6-329	10-630	49-612	77-886
0,55	12-177	50-338	69-377	117-562
μ_s 0,28	50-702	85-713	124-1121	178-1326
0,14	90-514	157-643	LA	LA
0,07	120-1114	LA	LA	LA

G_m verilerinin Çizelge 4.6'de verilen μ_s ve $F_{t_{max}}$ değerlerine göre değişim aralıklarına dağılmış değerlerinin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Hesaplanan aritmetik ortalamalar Çizelge 4.7' de verilmiştir.

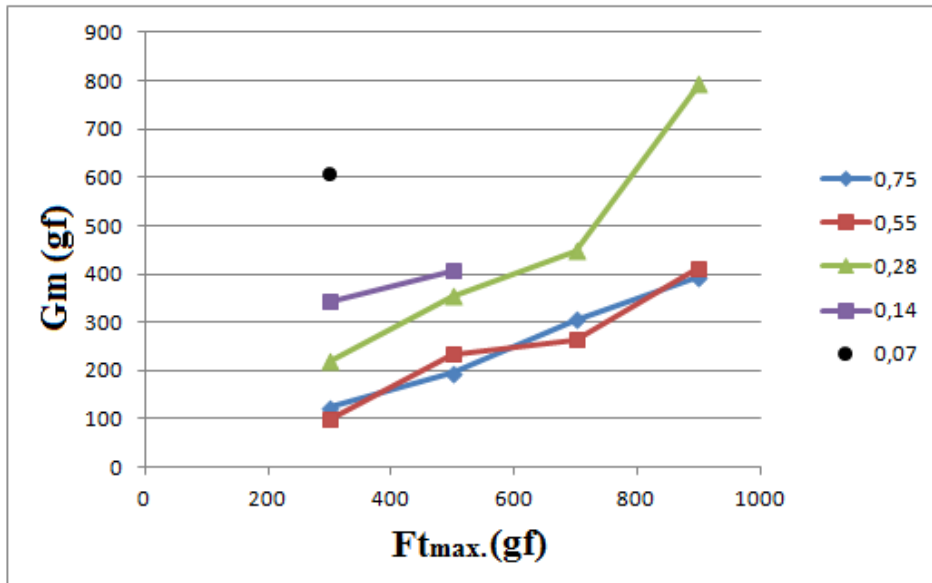
Çizelge 4.7. Katılımcılardan elde edilen G_m verilerinin aritmetik ortalamaları

Gm(gf)	F_{t_{max}} (gf)			
	300	500	700	900
0,75	124	194	306	394
0,55	99	234	264	413
μ_s 0,28	219	354	448	794
0,14	343	406	LA	LA
0,07	607	LA	LA	LA

Çizelge 4.7'deki Gm ortalamalarına bağlı olarak Şekil 4.6'da μ_s 'ye göre değişim grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.7'de ise $F_{t_{max}}$ 'a göre Gm ortalamalarının değişim grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Katılımcıların Gm ortalamalarının μ_s 'ye göre değişim grafiği



Şekil 4.7. Katılımcıların Gm ortalamalarının $F_{t_{max}}$ 'a göre değişim grafiği

Katılımcıların artan ağılığa ve artan kayganlığa bağlı uyguladıkları Gm miktarındaki değişim, F_{n_g} değerlerine ait değişim grafiklerindeki artış eğilimlerine benzer şekildedir. Gm, ağırlığın artışına karşı doğrusal bir artış eğilimine sahipken (Bkz. Şekil 4.7), artan kayganlığa karşı doğrusal olmayan bir artış eğilimine sahiptir (Bkz. Şekil 4.6). Kayganlık arttıkça Gm'nin artışı daha da hızlanmaktadır.

Gm miktarının ne kadar çok ya da az olduğu izafi bir kavramdır. Gm miktarının az ya da çok olduğunun değerlendirilebilmesi için Fn değerine göre incelenmesi gerekir. Örnek olarak: 200 gf'luk bir Fn değerine göre 100 gf'luk Gm, %50 oranında fazlalık ifade eder. Fakat 500 gf'luk bir Fn için aynı Gm miktarı %20 oranında bir fazlalık ifade eder. İki durumda da Gm miktarları aynı olmasına rağmen 200 gf'luk Fn için yüksek Gm miktarı uygulanmıştır. Gm'nin izafi olarak değerlendirilebilmesi için HKKD'den hesaplanan Gm değerleri ve Eş. 3.8 kullanılarak %Gm değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.8'de, hesaplanan %Gm değerlerine ait değişim aralıkları verilmiştir.

Çizelge 4.8. Katılımcılardan elde edilen %Gm değerlerinin değişim aralığı

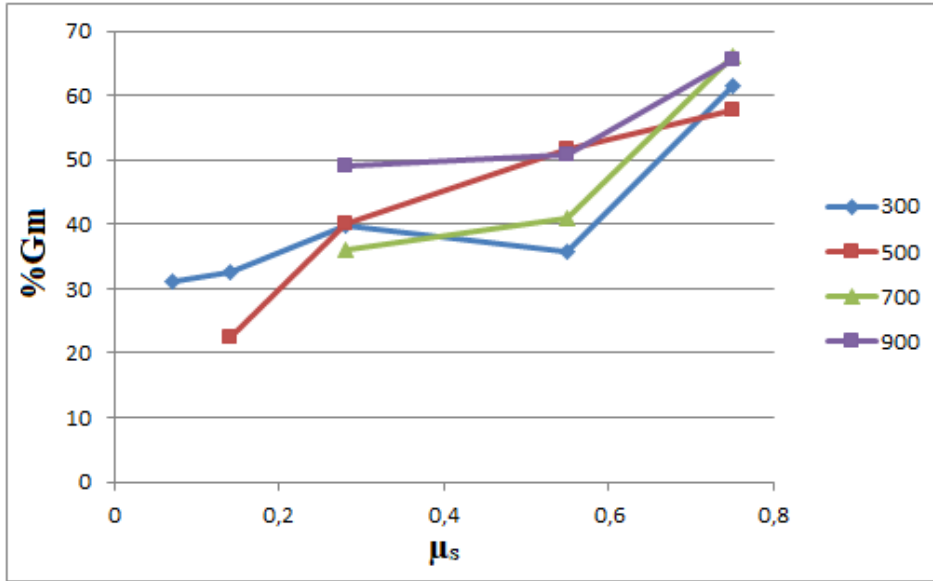
%Gm	F_{tmax} (gf)			
	300	500	700	900
0,75	3-163	3-188	10-132	13-147
0,55	4-64	11-75	11-58	14-69
μ_s	0,28	9-128	10-81	10-90
	0,14	9-49	9-35	LA
	0,07	6-57	LA	LA

%Gm değerlerinin Çizelge 4.8'te verilen μ_s ve F_{tmax} değerlerine göre değişim aralıklarına dağılmış değerlerinin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Hesaplanan aritmetik ortalamalar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

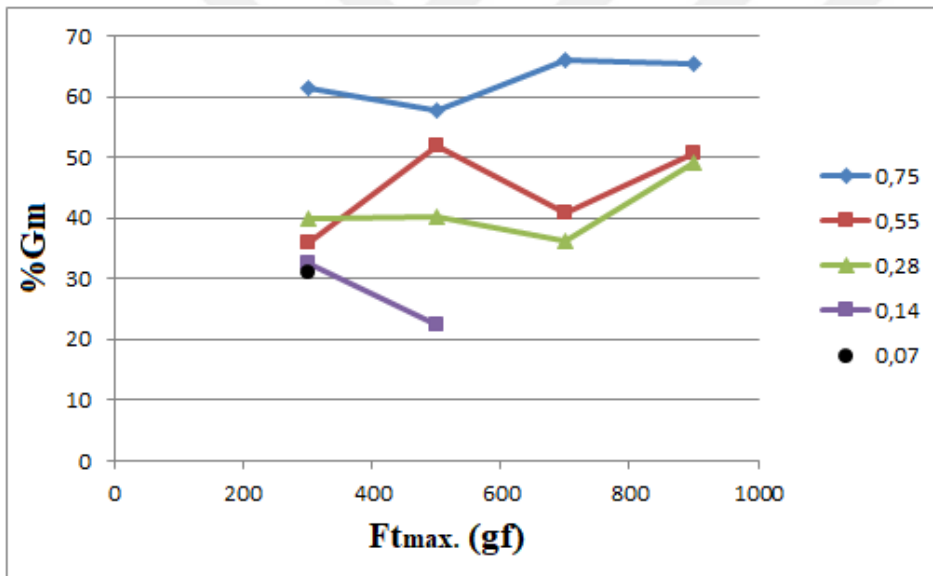
Çizelge 4.9. Katılımcılardan elde edilen %Gm değerlerinin aritmetik ortalamaları

%Gm	F_{tmax} (gf)			
	300	500	700	900
0,75	61	58	66	65
0,55	36	52	41	51
μ_s	0,28	40	40	36
	0,14	33	22	LA
	0,07	31	LA	LA

Çizelge 4.9'daki %Gm oranlarının ortalama değerlerine bağlı olarak Şekil 4.8'de μ_s değişimine göre değişim grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.9'da ise F_{tmax} 'a göre %Gm ortalamalarının değişim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Katılımcıların %Gm ortalamalarının μ_s 'ye göre değişim grafiği



Şekil 4.9. Katılımcıların %Gm ortalamalarının F_{tmax} 'a göre değişim grafiği

%Gm değerlerinin değişim grafikleri incelendiğinde sabit ağırlıklara karşı kayganlık arttığında insanların uyguladıkları %Gm değerlerinin de düştüğü görülmektedir (Bkz. Şekil 4.8). Fakat aynı kayganlıklarda ağırlığın artışına karşı insanların uyguladıkları %Gm değerlerinde sabit kalma eğilimi olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 4.9). Çizelge 4.9'daki ortalama değerler de incelendiğinde sabit μ_s değerinde F_{tmax} değerinin artışına karşı %Gm değerlerinde artma ya da azalma yönünde bir eğilim ortaya koyacak değişimin olmadığı görülmektedir. Çizelge 4.8'deki değişim aralıkları incelendiğinde, insanların her bir yüzey ve ağırlığa karşı uyguladıkları %Gm değerinin geniş bir aralığa yayıldığı görülmektedir. Aynı yüzey özelliği ve ağırlık için bazı katılımcıların oldukça düşük %Gm uyguladıkları görülürken bazı katılımcıların ise oldukça

yüksek %Gm uyguladıkları görülmektedir. Bu durum HKKD’de hassas kavrama davranışlarının gösterildiğini; fakat bazı katılımcıların veya bazı katılımcıların bazı deneylerde amaç dışı güçlü kavrama davranışları da gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın amacına yönelik olarak, HKKD’den elde edilen verilerinden güçlü kavrama verilerinin olabildiğince arındırılması gerekmektedir. Bunun için izlenecek yol olarak, 14 katılımcıdan her birinin deneylerde göstermiş oldukları optimum performanslar elde edilmiş ve böylelikle güvenlik marjının hassas kavrama için eniyilenmesi sağlanmıştır.

4.2. HKKD’den Elde Edilen Optimum Performans Verileri

Optimum performanslarının elde edilmesinde 5 farklı yüzey materyali ve 4 farklı ağırlık için 14 katılımcıdan elde edilen 70 adet veri içerisinde en düşük Gm değerine sahip 14 veri seçilmiştir. Seçilen her bir verinin 70 adet veri içerisindeki tekrarlama sayıları ağırlık olarak belirlenmiştir. Her bir yüzey ve ağırlık için 14 adet minimum Gm değerinden oluşmuş 15 veri kümesi elde edilmiştir. Elde edilen 15 adet veri kümesinden $0,75 \mu_s$ değeri ve 4 farklı nesne ağırlığı için elde edilen örnek veri kümeleri Çizelge 4.10’da verilmiştir. Çizelgede nesne ağırlığına ve yüzey sürtünme özelliğine göre elde edilen minimum 14 veri, bu verilerin ağırlıkları (w) ve optimum Gm değerlerini ifade eden ağırlıklı ortalamalar gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Katılımcılardan elde edilen optimum Gm örnek veri kümeleri

		F_{tmax}							
		w	300 gf	w	500 gf	w	700 gf	w	900 gf
BOPP-PMMA $\mu_s = 0,75$		1	6	1	10	1	49	1	77
		1	11	1	26	1	55	1	78
		2	12	1	34	1	67	1	94
		1	18	1	54	1	68	2	107
		1	44	1	62	1	74	2	90
		1	21	1	64	1	98	1	117
		3	25	1	81	1	108	1	120
		1	42	2	82	1	111	1	124
		2	53	3	50	1	113	1	136
		1	61	3	65	1	128	1	147
		1	72	1	70	1	91	1	155
		2	22	1	23	1	76	1	167
		1	49	1	28	1	82	1	178
		1	65	2	31	2	50	1	143
Optimum Gm		33		51		81		120	

Çizelge 4.10’da örnekleri gösterilmiş olan minimum Gm değerlerinin $F_{t_{max}}$ ve μ_s değerlerine bağlı değişim aralıkları Çizelge 4.11’de verilmiştir. Çizelge 4.12’de ise bu verilerin ağırlıklı ortalamaları ile elde edilen optimum Gm değerleri verilmiştir. Böylelikle, HKKD’de insanların değişen yüzey özelliğine ve değişen ağırlığa bağlı olarak uyguladıkları optimum Gm verileri elde edilmiştir.

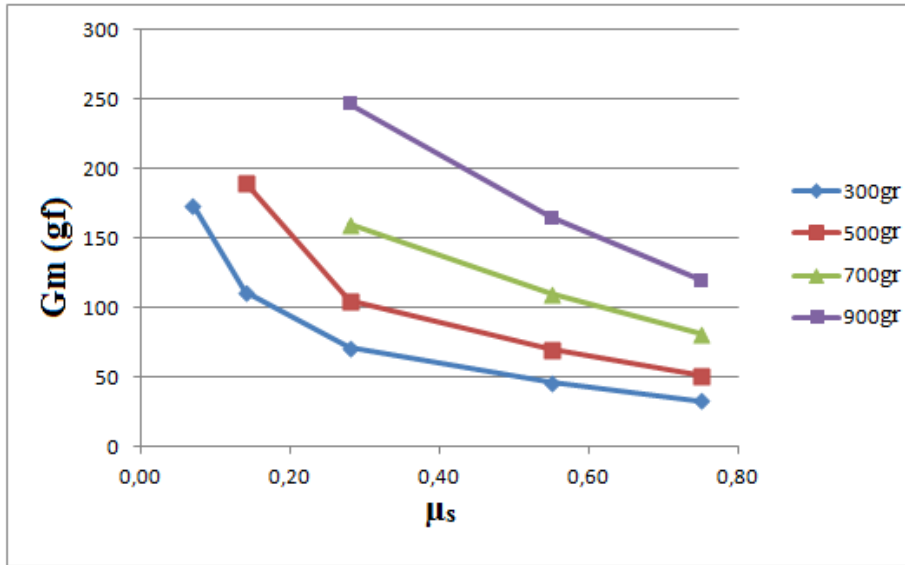
Çizelge 4.11. Katılımcılardan elde edilen minimum Gm değerlerinin değişim aralıkları

Gm(gf)	$F_{t_{max}}$ (gf)			
	300	500	700	900
0,75	6-72	10-82	49-128	77-178
0,55	12-78	50-105	69-135	117-245
μ_s 0,28	50-102	85-119	124-188	178-340
0,14	93-145	157-225	LA	LA
0,07	120-250	LA	LA	LA

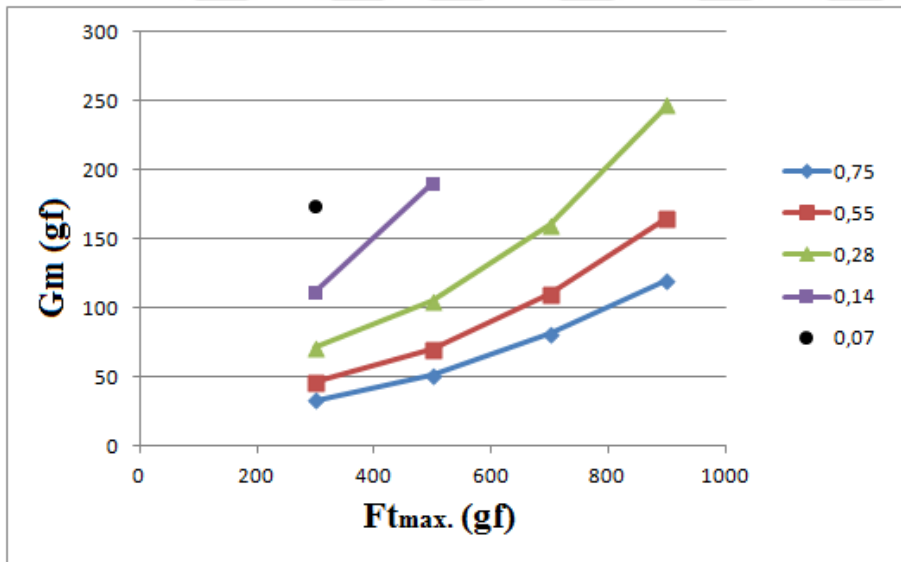
Çizelge 4.12. Katılımcılardan elde edilen optimum Gm değerleri

Gm (gf)	$F_{t_{max}}$ (gf)			
	300	500	700	900
0,75	33	51	81	120
0,55	46	70	110	165
μ_s 0,28	71	105	160	247
0,14	111	190	LA	LA
0,07	174	LA	LA	LA

Katılımcıların HKKD’de uygulamış oldukları Gm değerlerinden elde edilen optimum performanslarına ait değişim grafikleri, sabit $F_{t_{max}}$ için Şekil 4.10’da sabit μ_s için Şekil 4.11’de verilmiştir. Çizelge 4.12’deki değerler ve Eş. 3.8 kullanılarak, katılımcıların optimum performanslarına ait %Gm oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan optimum %Gm oranları Çizelge 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.10. Katılımcıların optimum Gm değerlerinin μ_s 'ye göre değişim grafiği

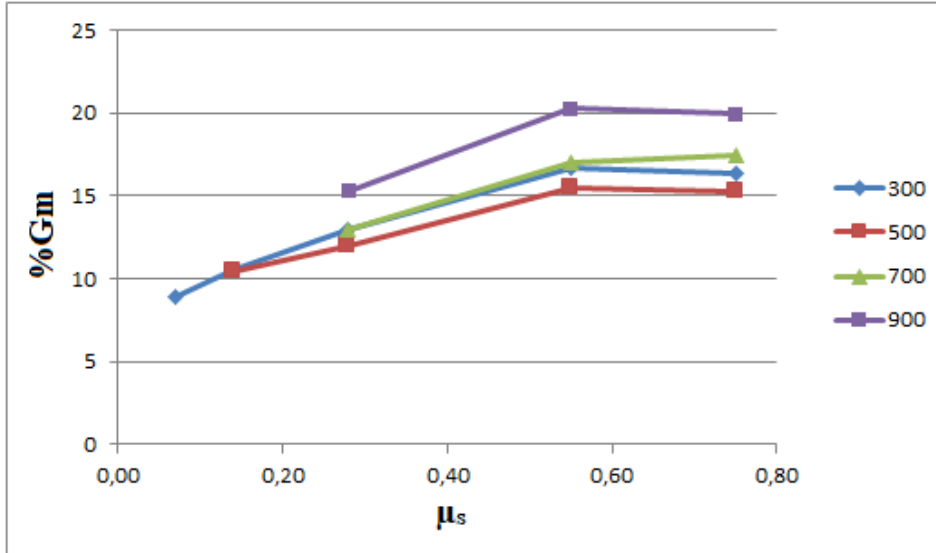


Şekil 4.11. Katılımcıların optimum Gm değerlerinin F_{tmax} 'a göre değişim grafiği

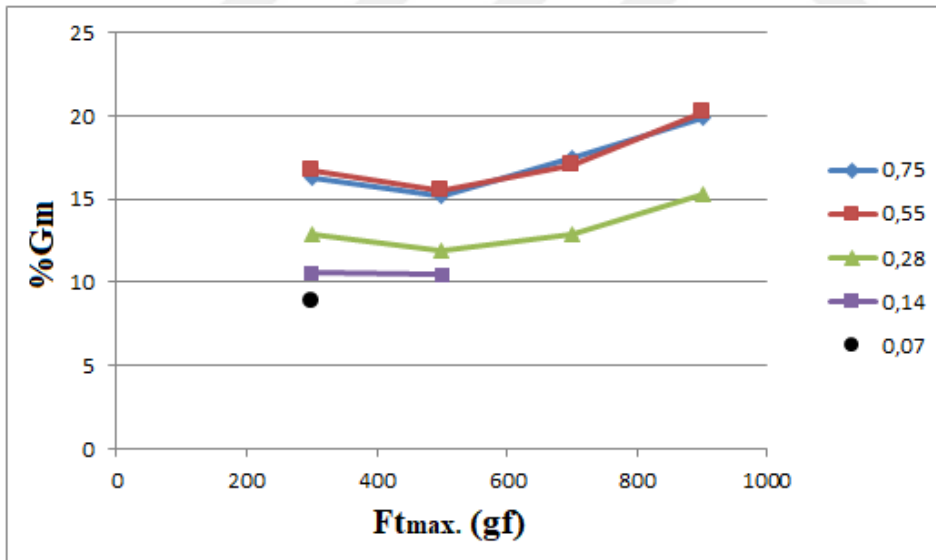
Çizelge 4.13. Katılımcılardan elde edilen optimum %Gm değerleri

%Gm	F_{tmax} (gf)			
	300	500	700	900
0,75	16	15	17	20
0,55	17	15	17	20
0,28	13	12	13	15
0,14	11	10	LA	LA
0,07	9	LA	LA	LA

Hesaplanan optimum %Gm oranlarının $F_{t_{max}}$ 'a göre değişim grafiği Şekil 4.12'da verilmiştir. Optimum %Gm oranlarının sabit μ_s değerlerine göre değişim grafiği ise Şekil 4.13'da verilmiştir.



Şekil 4.12. Katılımcıların optimum %Gm değerlerinin μ_s 'ye göre değişim grafiği



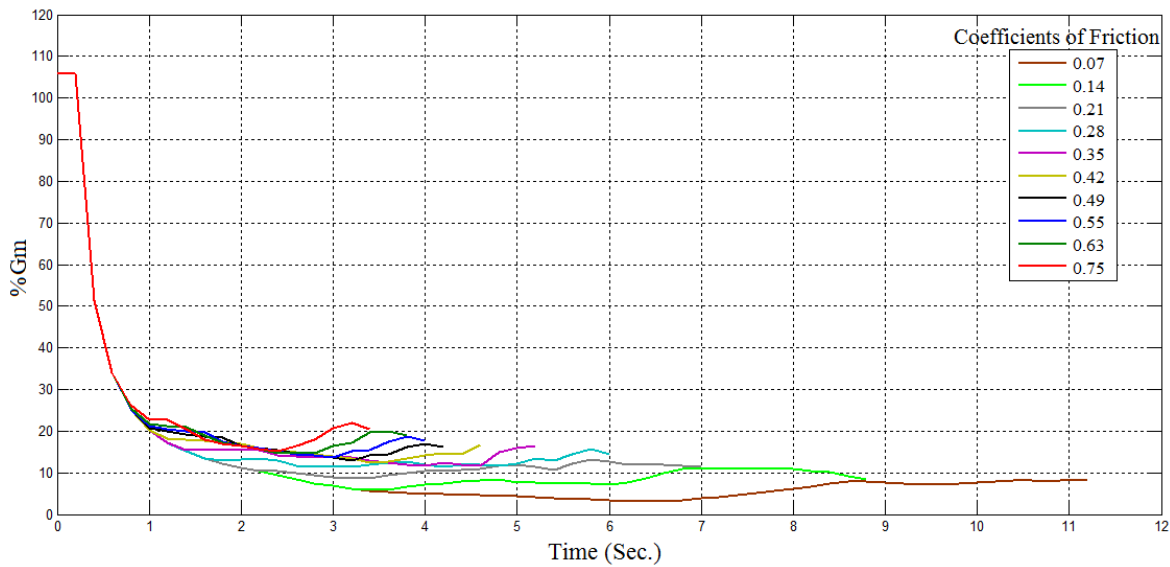
Şekil 4.13. Katılımcıların optimum %Gm değerlerinin $F_{t_{max}}$ 'a göre değişim grafiği

HKKD'de elde edilen optimum Gm ve %Gm değerlerine ait grafikler incelendiğinde, insanların kayganlık arttırıldığında aynı ağırlıktaki deney nesnesini kavrayıp kaldırmak için Gm'yi de arttırdıkları görölmektedir. Belirli bir kayganlık değerinden sonra (HKKD için yaklaşık $\mu_s=0,28$ seviyesi) Gm'nin daha hızlı arttığı görölmektedir (Bkz. Şekil 4.10). Bununla birlikte uygulanan %Gm değeri belli bir sürtünme değerine kadar (HKKD için yaklaşık $\mu_s=0,55$) sabit eğilimli olup kayganlık arttıkaça %Gm değeri düşmüştür (Bkz. Şekil 4.12). Katılımcılar, sabit yüzey

özelliğinde ağırlık artırıldığında G_m 'yi de arttırmışlardır (Bkz. Şekil 4.11). % G_m değerinde ise yine belli bir ağırlık değerine kadar (HKKD için yaklaşık 500 gf) sabit seyretme eğilimi görülmekle birlikte ağırlık arttıkça % G_m değerinde bir yükselme eğilimi görülmektedir (Bkz. Şekil 4.13). Elde edilen sonuçlara göre, katılımcılar HKKD'de farklı yüzey özelliklerinde ve farklı ağırlıklarda nesnelere %9 ile %20 arasında değişen oranlarda % G_m uygulayarak kaldırmışlardır.

4.3. BGHS'nin Performansı

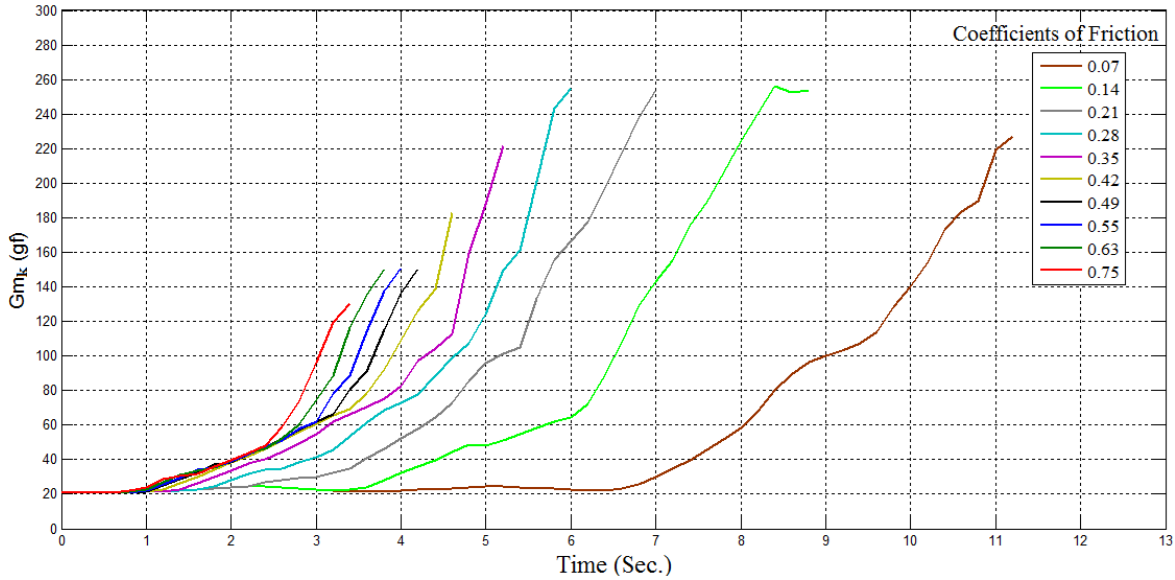
Bu çalışmada tasarlanan BGHS'nin kavrama ve kaldırma performansları test edilmiştir. İlk önce kavrama sürecine yönelik G_{mk} ve % G_m performansı Bölüm 3.6.7'deki Şekil 3.32'de verilen MATLAB/Simulink modeli ile test edilmiştir. Daha sonra, HKKD'de kullanılan yüzey özellikleri ve ağırlık değerlerine ek olarak farklı nesne özellikleri de kullanılarak nesne kaldırma durumlarına yönelik G_m ve % G_m performansı test edilmiştir. BGHS'nin kavrama sürecine yönelik yapılan performans testlerinden elde edilen veriler ile Şekil 4.14'de ve Şekil 4.15'de verilen grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.14'de % G_m performansına ait grafik verilmiştir. Şekil 4.15'de ise G_{mk} performansına ait grafik verilmiştir.



Şekil 4.14. BGHS'nin kavrama süreci % G_m performansı grafiği

Şekil 4.14'deki grafik incelendiğinde tüm CoF değerleri için başlangıçta çok yüksek olan % G_m değerlerinin hızla düştüğü görülmektedir. Tüm CoF değerleri için % G_m değerleri, %20 seviyesinin altına doğru azalmıştır. Sürecin başlarında, yüksek orandaki % G_m değerleri tüm CoF değerleri için yaklaşık aynı seyretmiştir. Kayganlık arttıkça kavrama süreci daha düşük

%Gm değerleri ile sonuçlanmıştır. En düşük %Gm değeri 0,07 CoF değerinde %3 olarak kaydedilmiştir. Şekil 4.14’de, azalan %Gm değerlerinde belirli bir ağırlık değerinden sonra bir artış eğilimi ve hemen ardından tekrar azalma görülmektedir.



Şekil 4.15. BGHS'nin kavrama süreci Gm_k performansı grafiği

Şekil 4.15'deki grafik incelendiğinde BGHS, görece düşük CoF değerlerinde, daha düşük Gm_k artış miktarları ile daha kısa süreli ve daha düşük Gm ile sonuçlanan bir kavrama süreci ortaya koymuştur. Görece yüksek CoF değerlerinde ise daha yüksek Gm_k artış miktarları ile daha uzun süreli ve daha yüksek Gm ile sonuçlanan bir kavrama süreci ortaya koymuştur. Tüm CoF değerlerinde ağırlığın değişimine karşı Gm_k 'nin da artarak değiştiği görülmektedir. Fakat bu artışın belirli bir ağırlık değerinden sonra başladığı ve belirli bir süre yaklaşık aynı Gm_k değerlerinin hesaplandığı görülmektedir. Bu süre, CoF değeri azaldıkça (Kayganlık arttıkça) uzamaktadır. Çünkü yüzey kayganlığı arttıkça kayma sayısı da artmaktadır. Bu durumda iki kayma arasındaki ağırlık değişimi az olacağından Gm_k değişimi de yaklaşık aynı kalmaktadır. Şekil 4.15'de 0,28'den sonra CoF değeri yükseldikçe daha düşük Gm değerleri ile kavrama sürecinin sonuçlandığı görülmektedir. Fakat bu durum, belirlenmiş olan limit değerlerden kaynaklanmaktadır (Bkz. Şekil 3.32). Daha yüksek CoF değerlerinde kavrama kuvveti 2800 gf değerine daha hızlı ulaşmış ve aşmış için kavrama süreci daha düşük ağırlıklarda sonlanmaktadır. Örnek olarak: 0,75 CoF değerinde 957 gf $F_{t_{max}}$, 638 gf F_{n_k} ve 130 gf Gm_k değerleri ile simülasyon sonlanırken 0,07 CoF değerinde ise 393 gf $F_{t_{max}}$, 2804 F_{n_k} ve 227 gf Gm_k değerleri ile simülasyon sonlanmıştır. Simülasyonun sonlanması nesnenin kaldırıldığı anlamına gelmektedir. Bölüm 3.6.7'deki Şekil 3.33'de verilen MATLAB/Simulink modeli ile BGHS'nin kaldırma performansı test edilmiştir. Burada ifade edilen kaldırma performansı, nesnenin

kaldırılma olayı gerçekleştiği andaki Gm ve %Gm değerlerini ifade etmektedir. Test için HKKD’de kullanılan ağırlık ve yüzey özelliklerine ek olarak farklı nesne özellikleri kullanılmıştır. 10 farklı CoF değerinin her biri için 10 farklı Ft_{max} değeri kullanılmıştır. Böylelikle BGHS’nin kaldırma performansına ait Gm ve %Gm test verileri elde edilmiştir. Çizelge 4.14 ‘de elde edilen Gm performansı test verileri görülmektedir. Çizelge 4.15 ‘de ise %Gm performansı test verileri görülmektedir.

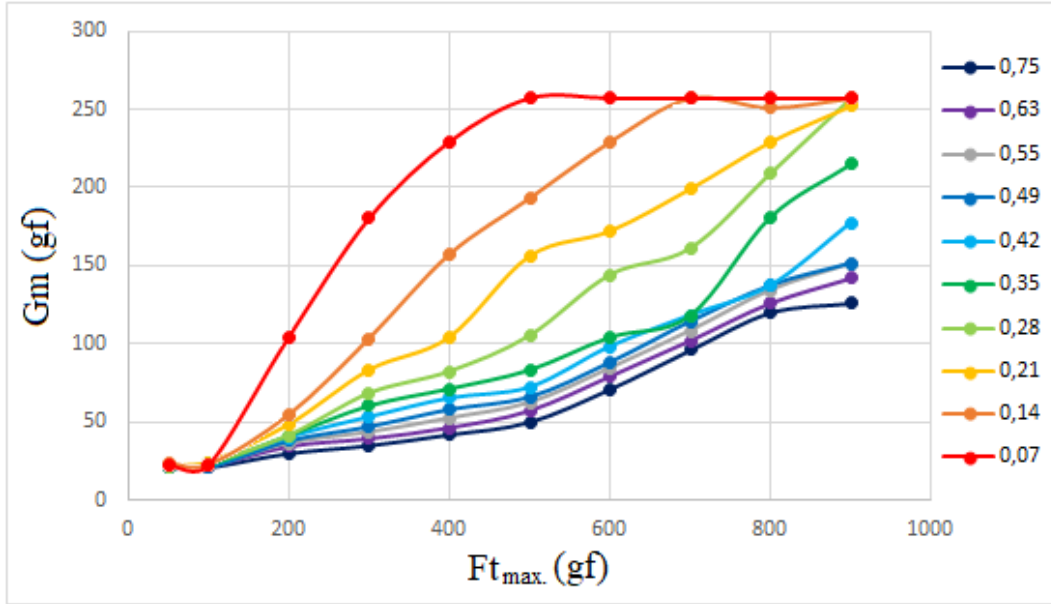
Çizelge 4.14. BGHS’nin kaldırma performansına ait Gm test verileri

Gm(gf)	μ_s									
	0,75	0,63	0,55	0,49	0,42	0,35	0,28	0,21	0,14	0,07
50	21	21	21	21	21	21	21	22	23	22
100	21	21	21	21	22	22	23	24	22	22
200	30	34	36	38	40	41	41	48	54	104
300	35	39	43	47	53	60	68	83	103	180
400	42	46	52	58	65	71	82	104	157	229
500	50	57	62	66	72	83	105	156	193	257
600	71	79	84	88	98	104	144	172	229	257
700	96	102	108	114	118	118	161	199	257	257
800	120	126	134	137	137	181	209	229	251	257
900	126	142	151	151	177	215	257	252	257	257

Çizelge 4.15. BGHS’nin kaldırma performansına ait %Gm test verileri

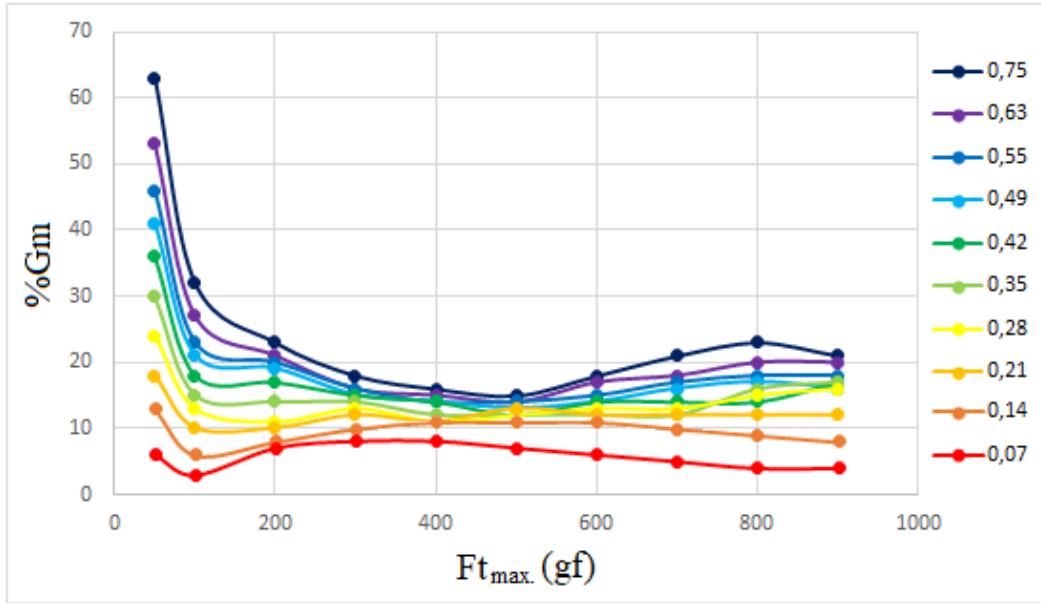
%Gm	μ_s									
	0,75	0,63	0,55	0,49	0,42	0,35	0,28	0,21	0,14	0,07
50	63	53	46	41	36	30	24	18	13	6
100	32	27	23	21	18	15	13	10	6	3
200	23	21	20	19	17	14	11	10	8	7
300	18	16	16	15	15	14	13	12	10	8
400	16	15	14	14	14	12	11	11	11	8
500	15	14	14	13	12	12	12	13	11	7
600	18	17	15	14	14	12	13	12	11	6
700	21	18	17	16	14	12	13	12	10	5
800	23	20	18	17	14	16	15	12	9	4
900	21	20	18	16	17	17	16	12	8	4

Çizelge 4.14'deki ve Çizelge 4.15'deki veriler kullanılarak değişen yüzey özelliğine ve değişen ağırlığa bağlı olarak BGHS'nin kaldırma performansına ait Gm ve %Gm değişim grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.16'da BGHS'nin kaldırma performansına ait Gm verilerinin nesne ağırlığına göre değişim grafiği verilmiştir.



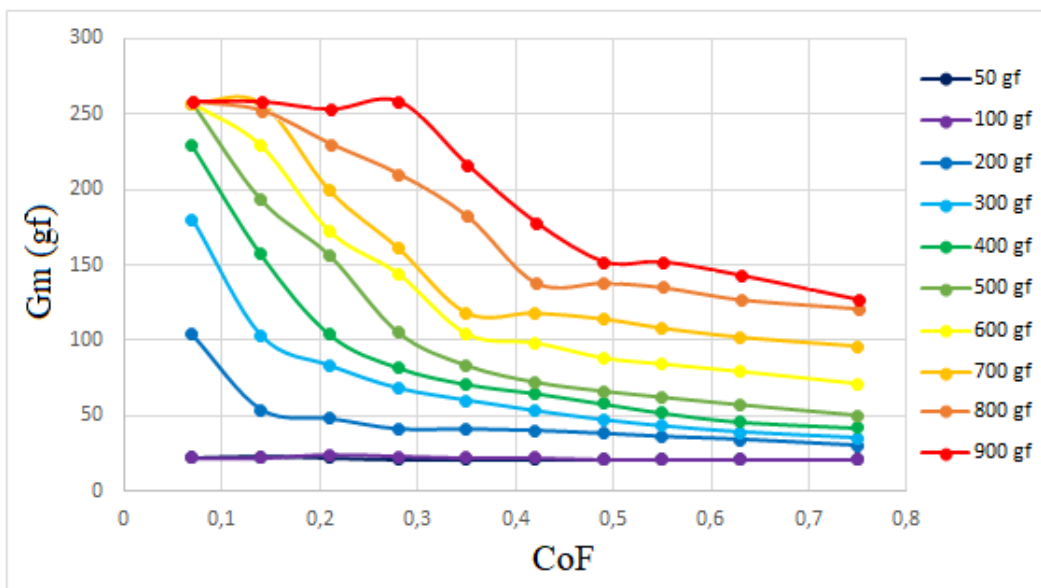
Şekil 4.16. BGHS'nin kaldırma performansı Gm verilerinin $F_{t_{max}}$ 'a göre değişim grafiği

Şekil 4.16'daki grafik incelendiğinde, aynı yüzey özelliğine sahip nesnelere daha ağır olan için BGHS tarafından daha yüksek Gm hesaplandığı görülmektedir. Ağırlık arttıkça nesneyi kaldırmak için hesaplanan Gm de artmaktadır. 0,07 CoF değerinde 500 gf ağırlık ve daha yukarı değerler için sabit Gm değerleri görülmektedir. Aynı durumun benzeri 0,14 CoF değerinde 700 gf ağırlık ve daha yukarı değerler için de görülmektedir. Bu durum, BGHS'nin sınır değeri olan 2800 gf aşıldığında aynı Gm değerlerinin hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Aynı ağırlığa sahip nesnelere yüzeyi daha kaygan olan için BGHS daha yüksek Gm hesaplamıştır. Kayganlık arttıkça nesneyi kaldırmak için hesaplanan Gm de artmaktadır. Şekil 4.16 incelendiğinde kayganlık arttıkça Gm'deki değişimi gösteren eğrinin eğiminin de arttığı görülmektedir. Bu da kayganlığın artışına bağlı Gm'deki artışın ağırlığın artışına bağlı Gm'deki artıştan daha hızlı olduğunu ortaya koymaktadır. BGHS, kayganlıktaki artışa karşı ağırlığa göre daha yüksek Gm ile tepki vermektedir. Bu tepki, kayganlık arttıkça daha da artmaktadır. Bu sonuçlar, HKKD'de elde edilen insan performansı ile uyumludur (Bkz. Şekil 4.8).



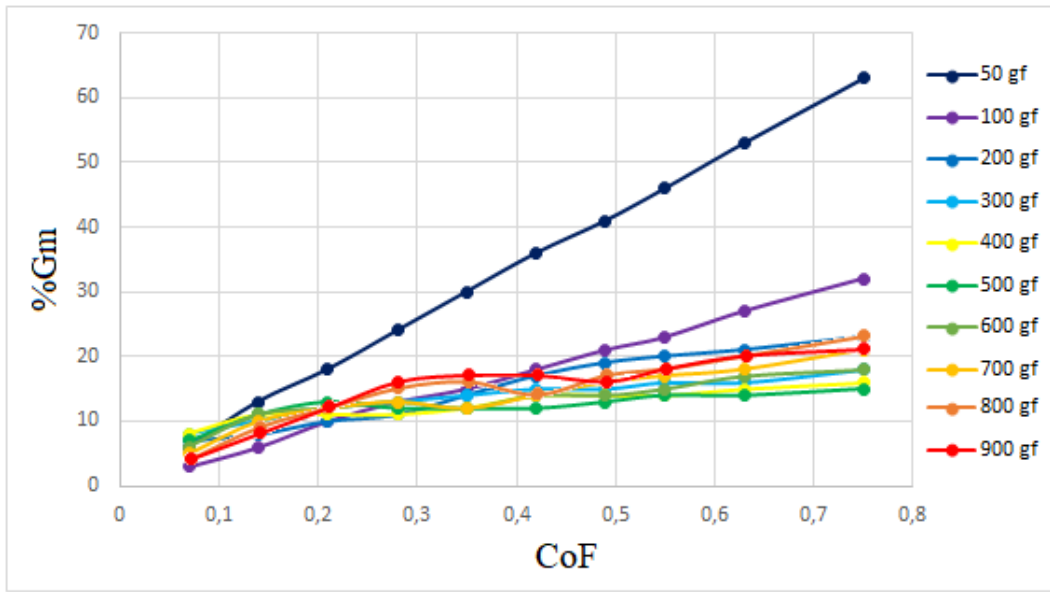
Şekil 4.17 BGHS'nin kavrama performansı %Gm verilerinin Ft_{max}'a göre değişim grafiği

Şekil 4.17 incelendiğinde, HKKD'de uygulanmayan 300 gf ağırlığın altındaki değerlerde BGHS'nin daha yüksek oranda Gm hesapladığı görülmektedir. 200 gf'dan daha ağır değerler için salınlı Gm değerleri ortaya çıksa da BGHS'nin %Gm değerini sabit tutmaya çalıştığı görülmektedir. Kayganlık arttıkça %Gm değerleri de düşmüştür. Elde edilen verilere göre en düşük %Gm değeri %3 olarak kaydedilmiştir. 200 gf'dan daha ağır değerler için sürtünmeliliğin artışına bağlı olarak BGHS'nin hesapladığı Gm değerleri ile hesaplanan %Gm değerlerinin %3 ile %23 arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.18. BGHS'nin kavrama performansı Gm verilerinin CoF'a göre değişim grafiği

Şekil 4.18 incelendiğinde, HKKD’de uygulanmayan 300 gf’ dan daha hafif nesnelere kaldırmak için gerekli Gm değerinin, kayganlık artsa da değişmeme eğiliminde olduğu görülmektedir. 50 gf ve 100 gf ağırlığındaki nesnelere kaldırmak için gerekli Gm değeri neredeyse hiç değişmemiştir. 200 gf’ dan sonra ağırlık arttıkça kayganlığın artışına bağlı olarak Gm değeri de hızla yükselmeye başlamıştır. Görece yüksek ağırlıklar için kayganlık arttıkça Gm de artmaktadır. Ağırlığın artışına bağlı olarak, kayganlıktaki artışın belirli bir düzeyinden sonra Gm’nin artışı daha da hızlanmaktadır.



Şekil 4.19. BGHS'nin kavrama performansı %Gm verilerinin CoF'a göre değişim grafiği

Şekil 4.19 incelendiğinde, BGHS'nin çok düşük ağırlıklarda CoF'un artışına göre doğrusal artış eğilimine sahip %Gm sağladığı görülmektedir. Fakat Ağırlık arttıkça %Gm değişim aralığı hızla düşerek %20 seviyesi ve altına doğru gerilemiştir. 200 gf'dan yüksek ağırlıklarda sürtünmeliliğin artışına bağlı olarak %Gm, %3 ile %23 aralığında değişmiştir. HKKD'de uygulanan ağırlık değerlerinde kayganlıktaki artışın belirli bir düzeyinden sonra %Gm daha hızlı düşmüştür. Genel olarak, BGHS kayganlıktaki artış ile daha düşük %Gm sağlamıştır.

Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'de nesnenin kaldırılma durumuna yönelik BGHS'den elde edilen performans verilerinden HKKD'de kullanılan nesne özellikleri için elde edilen veriler alınarak BGHS'nin performansı ile insan performansı verileri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.16'da HKKD'de uygulanan yüzey özelliği ve ağırlıklar için BGHS'den elde edilen Gm performans verileri gösterilmektedir. Çizelge 4.17'de ise %Gm verileri gösterilmektedir.

Çizelge 4.16. HKKD'deki nesne özellikleri için BGHS'den elde edilen Gm verileri

Gm (gf)	F _{tmax} (gf)			
	300	500	700	900
0,75	35	50	96	125
0,55	43	62	108	151
CoF 0,28	68	105	161	257
0,14	103	193	257	257
0,07	180	257	257	257

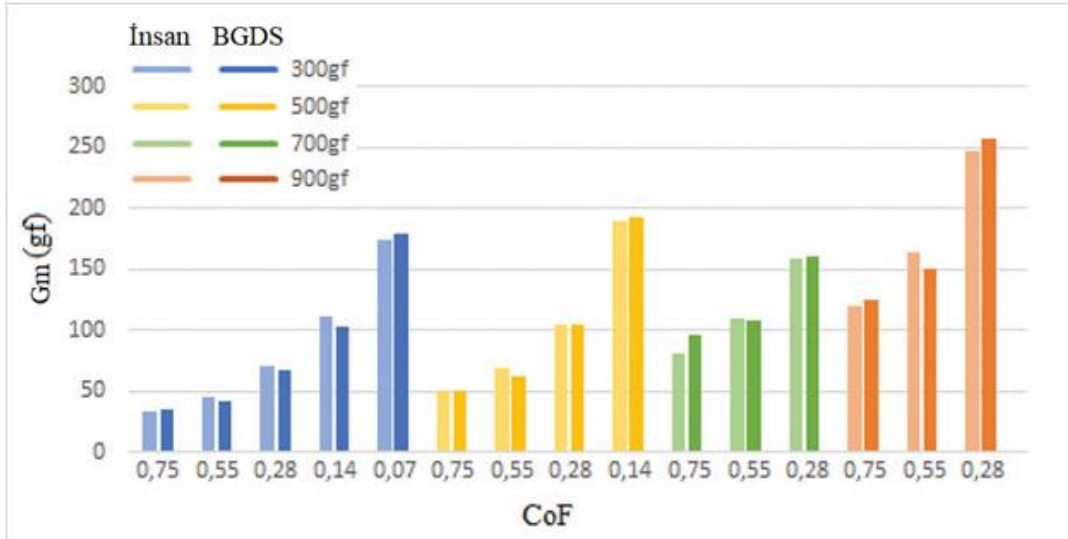
Çizelge 4.17. HKKD'deki nesne özellikleri için BGHS'den elde edilen %Gm verileri

%Gm	F _{tmax} (gf)			
	300	500	700	900
0,75	18	15	21	21
0,55	16	14	17	18
CoF 0,28	13	12	13	16
0,14	10	11	10	8
0,07	8	7	5	4

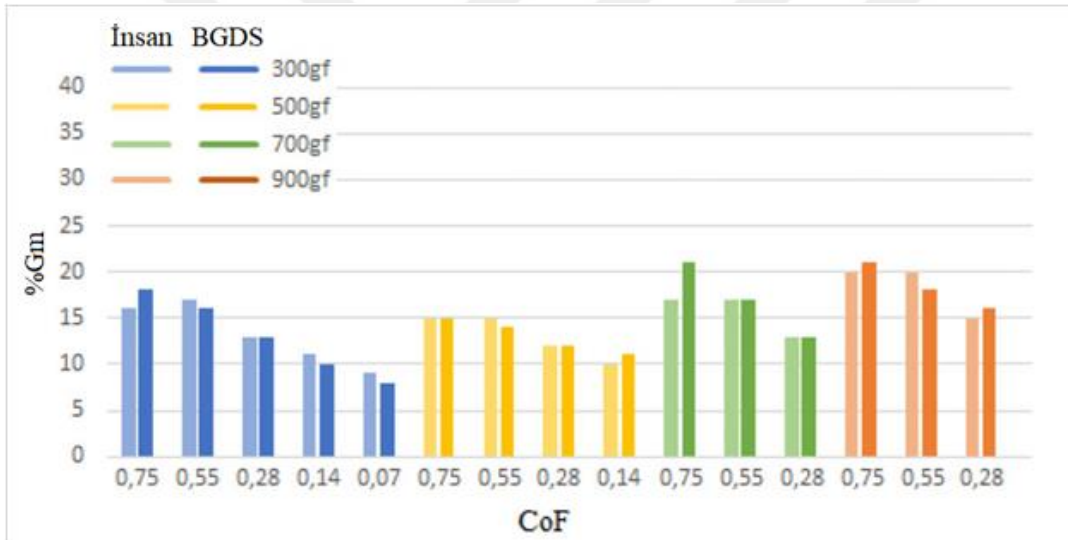
BGHS'nin performansına ait Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17'deki veriler ile insan performansına ait Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'deki optimum veriler, Çizelge 4.18'de gösterildiği gibi sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.18'de yapılan sayısal karşılaştırma, Şekil 4.20'de Gm için; Şekil 4.21'de ise %Gm için grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. BGHS ve insan performansının sayısal olarak karşılaştırılması

	F _{tmax}	300 gf					500 gf				700 gf			900 gf		
		CoF 0,75	0,55	0,28	0,14	0,07	0,75	0,55	0,28	0,14	0,75	0,55	0,28	0,75	0,55	0,28
Gm (gf)	İnsan	33	46	71	111	174	51	70	105	190	81	110	160	120	165	247
	BGHS	35	43	68	103	180	50	62	105	193	96	108	161	125	151	257
%Gm	İnsan	16	17	13	11	9	15	15	12	10	17	17	13	20	20	15
	BGHS	18	16	13	10	8	15	14	12	11	21	17	13	21	18	16



Şekil 4.20. BGHS ve insan Gm performanslarının grafiksel karşılaştırılması



Şekil 4.21. BGHS ve insan %Gm performanslarının grafiksel karşılaştırılması

Çizelge 4.18, Şekil 20 ve Şekil 21 incelendiğinde, BGHS'nin genel olarak HKKD'de elde edilen insan performansına ait optimum Gm ve %Gm verilerine yakın değerler ortaya koyduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmada tasarlanan BGHS'nin insan kavrama-kaldırma yeteneğine benzer bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir.

4.4. KKKS'nin Kavrama ve Kaldırma Performansı

Bu çalışmada tasarlanan KKKS'nin eyleyici ve deney nesnesi ile gerçek zamanlı kavrama ve kaldırma performansı testleri yapılmıştır. Kaldırma performansı, HKKD'de uygulanan yüzey materyalleri ve ağırlıklara ek olarak farklı ağırlıklar ve Bölüm 3.9'daki Çizelge 3.8'de verilen

farklı materyal çiftleri kullanılarak yapılmıştır. Kavrama performansı testi ise kaldırma performansı testlerinde uygulananlardan seçilen 5 farklı yüzey özelliği ve hiç uygulanmamış 5 farklı ağırlık değeri kullanılarak yapılmıştır.

4.4.1. KKKS'nin kaldırma performansı

10 farklı materyal çifti ve 29 farklı ağırlık değeri kullanılarak 5'er adet kaldırma performansı testi yapılmıştır. HKKD'de uygulanan yüzey materyalleri ve ağırlık değerleri için elde edilen kaldırma performansı verileri Çizelge 4.19'da verilmiştir. Çizelge 4.20'de ise farklı materyal çiftleri ve farklı ağırlık değerleri için elde edilen kaldırma performansı verileri görülmektedir. Böylelikle HKKD'de uygulananlar ve ek olarak belirlenen materyal çiftleri ve ağırlık değerleri için yapılan kaldırma performansına ait Gm ve %Gm performans verisi elde edilmiştir. Elde edilen Gm ve %Gm değerleri, yapılan 5'er adet testin sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Elde edilen Gm ve %Gm değerleri nesne kaldırıldığı andaki Gm ve %Gm değerleridir.

Çizelge 4.19. KKKS'nin HKKD'deki nesne özelliklerinde kaldırma performansı verileri

Materyal Çifti	CoF	Ft _{max} (gf)	Gm (gf)	%Gm
BOPP-PMMA	0,75	300	21	10
		500	12	3
		700	42	9
		900	96	16
BOPP-PP	0,55	300	21	7
		500	58	13
		700	33	5
		900	133	16
BOPP-A4	0,28	300	56	10
		500	77	9
		700	129	10
		900	198	12
BOPP-HDPE	0,14	300	81	8
		500	85	5
BOPP-PTFE	0,07	300	276	14

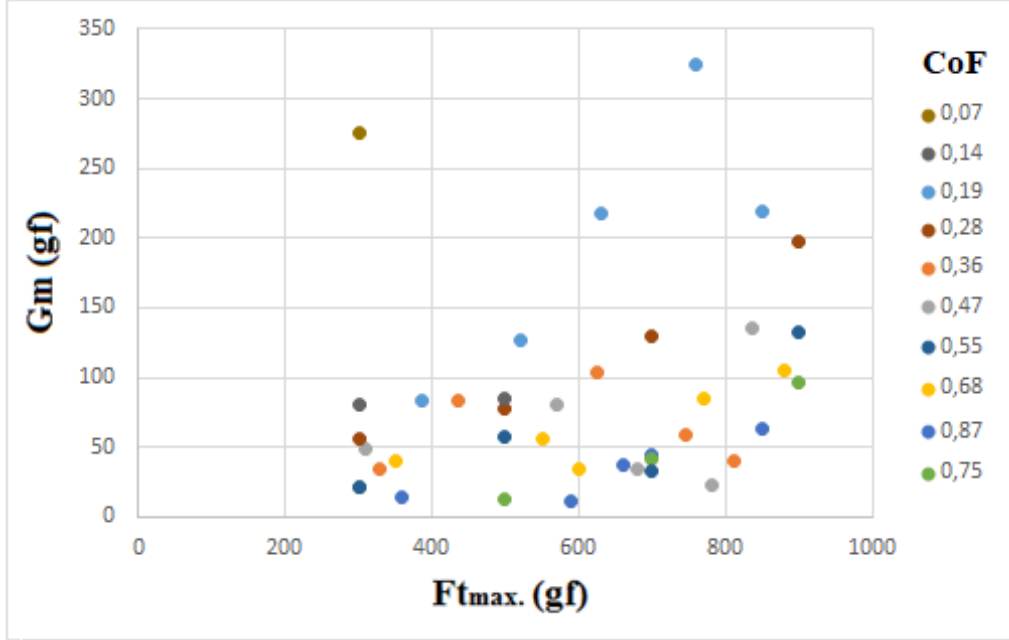
Çizelge 4.20. KKKS'nin farklı nesne özelliklerinde kaldırma performansı verileri

Materyal Çifti	CoF	Ft _{max} (gf)	Gm (gf)	%Gm
PE-PMMA	0,19	385	84	8
		520	127	9
		630	218	13
		760	324	16
		850	219	10
Asetat-Asetat	0,36	330	34	7
		435	84	14
		625	103	12
		745	59	6
		810	40	4
BOPP-Asetat	0,47	310	49	15
		570	81	13
		680	35	5
		780	23	3
		835	136	15
BOPP-CAM	0,68	350	40	16
		550	56	14
		600	34	8
		770	85	15
		880	105	16
LKS-Asetat	0,87	360	14	7
		590	11	3
		660	37	10
		700	44	11
		850	63	13

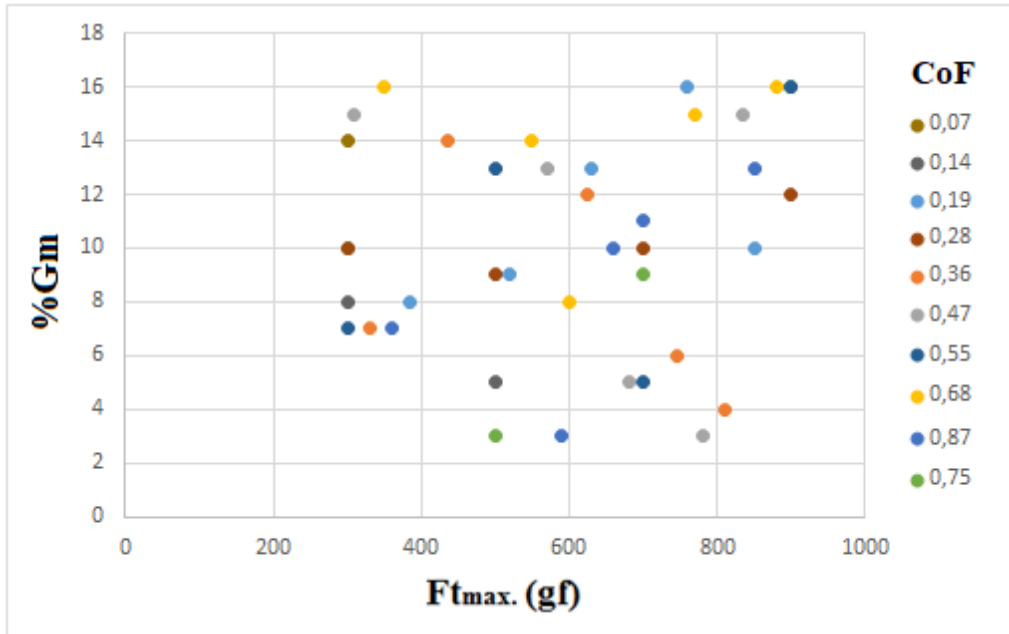
Çizelge 4.19'da ve Çizelge 4.20'de verilen kaldırma performansı verileri kullanılarak KKKS'nin Gm ve %Gm dağılım grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.22'de 0,07 ile 0,87 arasında 10 farklı materyal çifti ve 29 farklı ağırlık için yapılan kaldırma performansına ait Gm dağılım grafiği görülmektedir. Şekil 4.23'de ise %Gm dağılım grafiği verilmiştir.

Şekil 4.22'de elde edilen grafikte, en küçük Gm değeri 590 gf ağırlıkta, 0,87 CoF değerinde, 11 gf ölçülmüştür. En büyük Gm değeri ise 760 gf ağırlıkta, 0,19 CoF değerinde, 324 gf olarak ölçülmüştür. Grafik incelendiğinde, KKKS'nin görece düşük ağırlıklarda ve görece yüksek sürtünmeli yüzeylerde daha düşük Gm ile deney nesnesini kaldırdığı görülmektedir. Fakat ağırlık arttıkça veya yüzey kayganlığı arttıkça Gm de artmıştır. Yüzey kayganlığının ve ağırlığın her ikisinin de artması, Gm'nin daha hızlı artmasına neden olmuştur. Şekil 4.23'de elde edilen grafikte en düşük %Gm değeri %3 olarak hesaplanmıştır. En büyük %Gm değeri

ise %16 olarak hesaplanmıştır. Grafik incelendiğinde KKKS'nin, 0,07 ile 0,87 arasında 10 farklı CoF değerinde ve 300 gf ile 900 gf arasında 29 farklı ağırlıkta deney nesnesini %3 ile %16 arasında değişen %Gm değeri ile kaldırdığı görülmektedir.



Şekil 4.22. KKKS'nin kaldırma performansı Gm dağılım grafiği



Şekil 4.23. KKKS'nin kaldırma performans %Gm dağılım grafiği

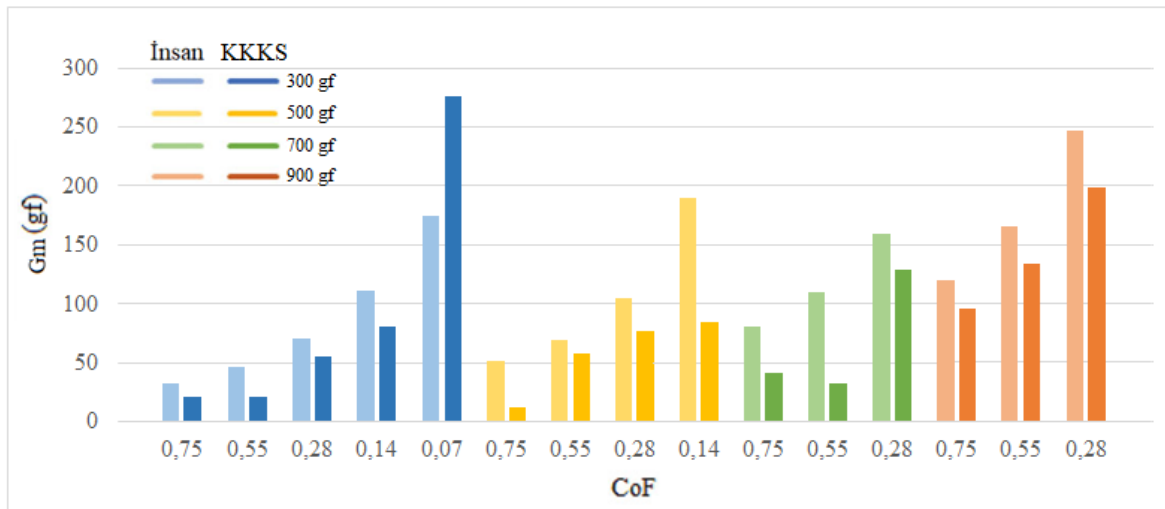
Bu tez çalışmasında tasarlanan KKKS'nin kaldırma performansı ile HKKD'den elde edilen insan performansı karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.21'de HKKD'de elde edilen insan

performansına ait Gm ve %Gm verileri ile KKKS'nin kaldırma performansına ait Gm ve %Gm verileri sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

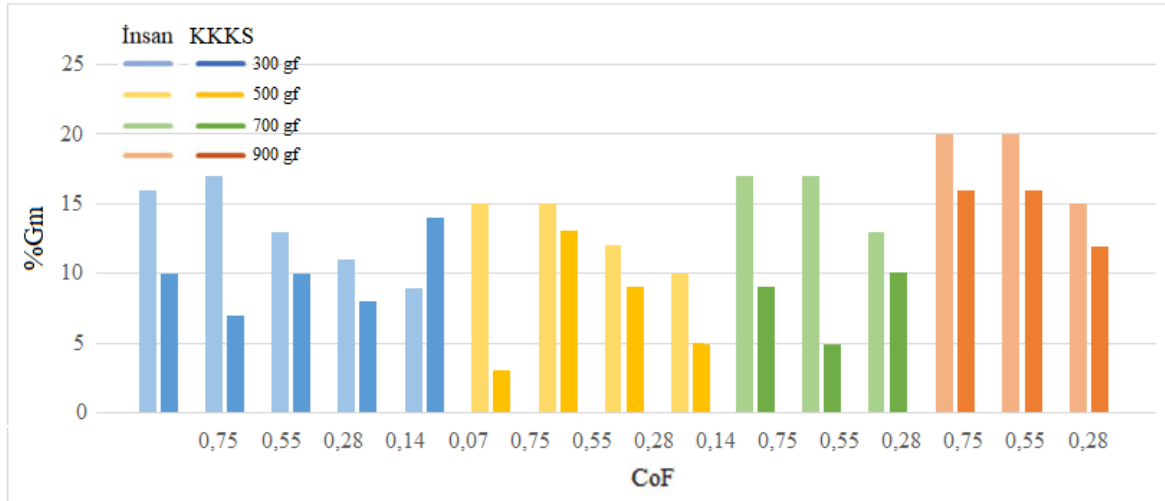
Çizelge 4.21. KKKS ve insan performansının sayısal olarak karşılaştırılması

Ftmax	300 gf					500 gf				700 gf			900 gf			
CoF	0,75	0,55	0,28	0,14	0,07	0,75	0,55	0,28	0,14	0,75	0,55	0,28	0,75	0,55	0,28	
Gm (gf)	İnsan	33	46	71	111	174	51	70	105	190	81	110	160	120	165	247
	KKKS	21	21	56	81	276	12	58	77	85	42	33	129	96	133	198
%Gm	İnsan	16	17	13	11	9	15	15	12	10	17	17	13	20	20	15
	KKKS	10	7	10	8	14	3	13	9	5	9	5	10	16	16	12

Çizelge 4.21'deki sayısal karşılaştırma incelendiğinde, KKKS'nin nesne kaldırıldığı andaki ortaya çıkan Gm ve %Gm verilerinin insan performansına ait verilerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu da kaldırma performansı açısından KKKS'nin HKKD'de elde edilen insan performansından daha iyi bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir. Sadece 0,07 CoF değerinde 300gf ağırlığında nesnenin kaldırılmasında HKKD'deki katılımcılar daha iyi performans ortaya koymuştur. KKKS'nin kaldırma performansının genel olarak daha iyi olması, bu tez çalışmasında önerilen yerel ağırlık yaklaşımı ile sağlanmıştır. Çizelge 4.21'deki sayısal karşılaştırma Şekil 4.24'de ve Şekil 4.25'de grafik olarak yapılmıştır. Şekil 4.24'de CoF değerlerine bağlı olarak insan ile KKKS'nin Gm performansı farklı ağırlıklar için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.25'de ise %Gm performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.24. İnsan ve KKKS'nin Gm performansının grafik olarak karşılaştırılması



Şekil 4.25. İnsan ve KKKS'nin %Gm performansının grafik olarak karşılaştırılması

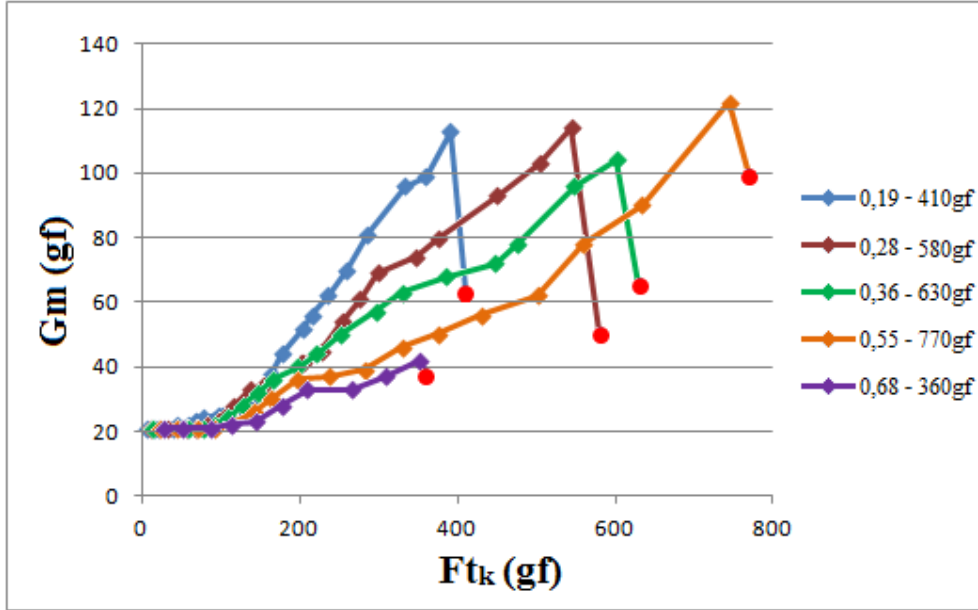
4.4.2. KKKS'nin kavrama performansı

Eyleyici ile yapılan kaldırma performansı testlerinde kullanılan materyal çiftlerinden 5 tanesi ve farklı ağırlık değerleri kullanılarak yapılan 5 adet test ile KKKS'nin kavrama performansı incelenmiştir. Yapılan kavrama performansı testinin ilk 5 ve son 4 değerinden oluşan 9 kayma noktasına ait örnek veriler Çizelge 4.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22. KKKS'nin kavrama performansından elde edilen örnek veriler

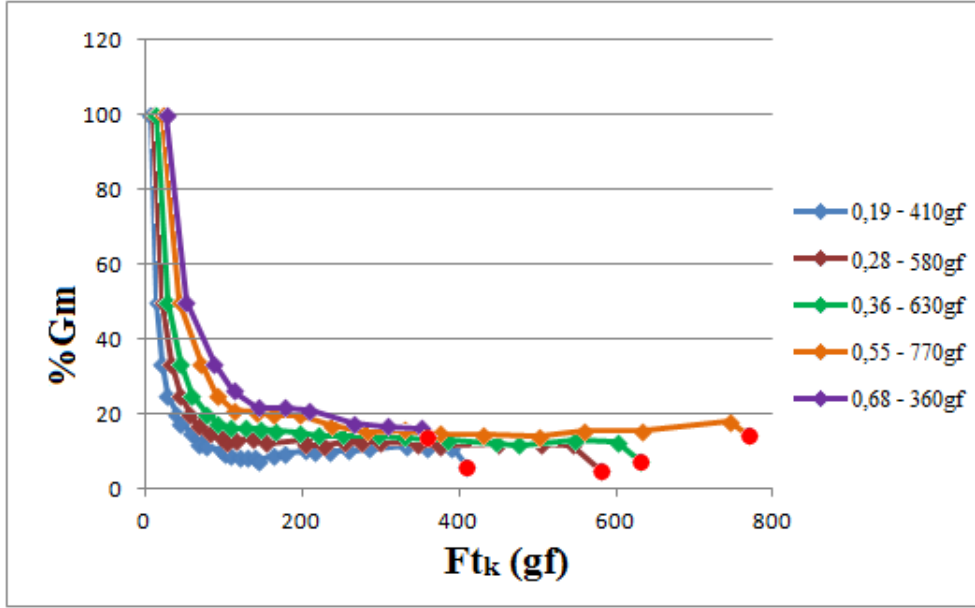
PE-PMMA ($\mu_{\text{sort}} = 0,19$)													
F_{tk} (gf)	7	15	21	29	40	.	.	.	286	334	360	391	410
F_{nk} (gf)	21	42	63	84	105	.	.	.	753	834	930	1029	1142
μ_{sk}	0,2	0,18	0,17	0,17	0,19	.	.	.	0,2	0,2	0,19	0,19	0,19
G_{mk} (gf)	21	21	21	21	21	.	.	.	81	96	99	113	63
%Gm	100	50	33	25	20	.	.	.	11	12	11	11	6
BOPP-A4 ($\mu_{\text{sort}} = 0,28$)													
F_{tk} (gf)	11	23	33	45	57	.	.	.	376	450	504	544	580
F_{nk} (gf)	21	42	63	84	105	.	.	.	696	776	869	972	1086
μ_{sk}	0,3	0,27	0,26	0,27	0,27	.	.	.	0,3	0,29	0,29	0,28	0,28
G_{mk} (gf)	21	21	21	21	21	.	.	.	80	93	103	114	50
%Gm	100	50	33	25	20	.	.	.	11	12	12	12	5
BOPP-PP ($\mu_{\text{sort}} = 0,55$)													
F_{tk} (gf)	22	44	71	92	113	.	.	.	501	560	634	745	770
F_{nk} (gf)	21	42	63	84	105	.	.	.	447	509	587	677	799
μ_{sk}	0,5	0,52	0,56	0,55	0,54	.	.	.	0,6	0,55	0,54	0,55	0,55
G_{mk} (gf)	21	21	21	21	22	.	.	.	62	78	90	122	99
%Gm	100	50	33	25	21	.	.	.	14	15	15	18	14

Çizelge 4.22’de her sütun, kayma noktalarına ait değerleri göstermektedir. Son sütunlardaki kalın yazı tipinde gösterilen değerler nesne kaldırıldığı andaki değerlerdir. 5 materyal çifti için yapılan testlerde kavrama süreçleri farklı kayma sayıları ile sonuçlanmıştır. Örnek olarak: PE-PMMA için 27 kayma; BOPP-CAM için 10 kayma meydana gelmiştir. Kayganlık arttıkça kavrama süreci boyunca oluşan kayma sayısı da artmaktadır. KKKS’nin kavrama performansı testlerinden elde edilen G_{m_k} değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.26. KKKS’nin kavrama performansının G_{m_k} değişim grafiği

Şekil 4.26’deki grafikte kırmızı daireler ile gösterilmiş veri noktaları, deney nesnesinin kaldırıldığı andaki hesaplanan G_m değerlerine ait veri noktalarını göstermektedir. Grafik çizgileri üzerindeki diğer veri noktaları ise her kayma noktası için hesaplanan G_{m_k} değerlerine ait veri noktalarıdır. Elde edilen grafik BGHS’nin kavrama performansı grafiğine benzer şekildedir. Görece düşük ağırlık değerlerinde sabit eğilimli olan G_{m_k} , belirli bir ağırlıktan sonra artarak devam etmiştir. Kaldırma noktaları için en düşük G_m değeri, 0,68 μ_{sort} değeri için 360 gf ağırlıkta 37 gf olarak kaydedilmiştir. En yüksek G_m değeri ise 0,55 μ_{sort} değeri için 770 gf ağırlıkta 99 gf olarak kaydedilmiştir. Grafik incelendiğinde, kaldırma noktalarına doğru G_m değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Deney nesnesi kaldırıldığında G_m ’nin azalması, bu tez çalışmasında ortaya koyulan yerel ağırlık yaklaşımının bir sonucudur. G_m ’nin nasıl azaldığı Bölüm 3’de sayısal bir örnekle açıklanmıştır. Şekil 4.27’de ise KKKS’nin kavrama performansı testlerinden elde edilen $\%G_{m_k}$ değerlerinin değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 4.27. KKKS'nin kavrama performansının %Gm_k değişim grafiği

Şekil 4.27'de elde edilen grafiğin BGHS'nin kavrama performansı grafiğine benzer şekilde olduğu görülmektedir. Görece düşük ağırlıklarda yüksek oranda başlayan Gm_k, ağırlığın artışıyla %20 seviyesinin altına hızla azalmıştır. Grafikte kırmızı daireler ile gösterilmiş veri noktaları, deney nesnesinin kaldırıldığı andaki hesaplanan %Gm değerlerine ait veri noktalarını göstermektedir. Grafik çizgileri üzerindeki diğer veri noktaları ise her kayma noktası için hesaplanan %Gm_k değerlerine ait veri noktalarıdır. Şekil 4.27'deki grafikte de bu tez çalışmasında ortaya konulan yerel ağırlık yaklaşımının sonucu olarak %Gm değerlerinin kaldırma noktalarına doğru düştüğü görülmektedir. Kaldırma noktaları için en düşük %Gm değeri 0,28 μ_{sort} değeri için 580 gf ağırlıkta %5 olarak kaydedilmiştir. En yüksek %Gm değeri ise %14 ile 770 gf ağırlıkta 0,55 μ_{sort} değeri için ve 360 gf ağırlıkta 0,65 μ_{sort} değeri için elde edilmiştir.

Doğal koşullarda bir insan ya da bir robot tarafından kavranacak nesnelere genellikle düzgün geometrik şekle sahip değildir. Bu nesnelere rijit olmaya da bilir. İnsan ya da robot tarafından bir nesne 3 boyutlu uzayda çok serbestlik derecesine sahip hareket kabiliyeti ile kavranıp kaldırılmaktadır. Ek olarak, kavranan ve kaldırılan nesneye açısal ve doğrusal birçok kuvvetin etkisi de mevcuttur. Tüm bu durumlar, parmaklara etkiyecek teğetsel kuvveti ve normal kuvveti etkileyebileceğinden dolayı uygulanması gereken Gm miktarını da etkileyebilir. Çünkü bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, Gm'nin nesne özelliklerinden etkilendiğini ortaya koymaktadır. Önceki bazı çalışmalarda da Gm'nin sabit bir parametre olmayıp nesne özelliklerinden etkilenen değişken bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, nesnenin homojen yüzeylere sahip, rijit, düzgün geometrik şekilli olduğu,

sadece yatay ve dikey yönde birbirine dik kuvvetlerin etki ettiği varsayılarak elde edilmiştir. HX711 sensör modülünün veri dönüştürme hızı bu çalışma için çok yavaş kalmıştır. Bu nedenle KKKS'nin nesne kavrama süreci görece kaygan yüzeyler için HKKD'deki insan performansına göre uzun sürmektedir. HKKD'de insanlar 0,07 CoF değerinde 300 gf ağırlığında deney nesnesini en fazla 10 s sürede kavrayıp kaldırırken, KKKS'nin aynı deney nesnesini kavrama süresi 1dk civarındadır. Fakat Eyleyici üzerindeki step motorlardan sabit adımlama hızı uygulanmıştır. Donanımsal değişiklikle veri dönüştürme hızı arttırılıp KKKS'nin kavrama süresi hızlandırılırsa dahi hız sabit olduğu için ivmenin etkisi olmayacağından sonuçların da çok değişmeyeceği düşünülmüştür.

Literatürdeki önceki çalışmalarda Gm'nin bir aralıkta değişken olduğu ifade edilse de sabit %Gm uygulama yaklaşımı kabul gören yaygın görüştür. Yapılan son çalışmalarda ise sabit olmayan ve nesne özelliklerine bağlı değişken Gm ve %Gm yaklaşımı ile etkin bir kavrama kuvveti kontrolünün ortaya koyulabileceği vurgulanmıştır. Önceki bazı çalışmalarda %Gm'nin %15 ile %100 arasında, bazı çalışmalarda ise %10 ile %40 arasında değiştiği belirtilmiştir. Fakat literatürde %Gm genellikle sabit %20 olarak kabul edilmiştir.

Bu tez çalışmasında insanlarla değişen nesne özelliklerine bağlı olarak HKKD yapılmıştır. HKKD ile elde edilen optimum verilere göre insanların değişen nesne özelliklerine bağlı olarak %9 ile %20 arasında %Gm uyguladıkları ortaya koyulmuştur. Literatürde insanların nesnelere kavrayıp kaldırırken Coulomb sürtünme yasası ile hesaplanan minimum kavrama kuvveti üzerine fazladan kuvvet uyguladıkları ortaya koyulmuştur. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar da literatürde güvenlik marjı olarak ifade edilen fazladan kuvvetin insanlar tarafından uygulandığını ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, nesne ağırlığı ve/veya yüzey kayganlığı arttığında Gm'nin de arttığı görülmektedir. Fakat yüzey kayganlığındaki artış, Gm'yi daha fazla arttırmaktadır. Gm, yüzey kayganlığındaki değişimden daha fazla etkilenmektedir. Bununla birlikte deneylerden elde edilen sonuçlar nesne ağırlığı sabit olmak üzere daha kaygan yüzeylere sahip nesnelere daha düşük %Gm ile kaldırıldığını ortaya koymuştur. Ağırlık sabit olmak üzere kayganlık arttıkça %Gm düşmektedir.

HKDD'den elde edilen veriler kullanılarak BGHS tasarlanmıştır. BGHS'nin HKKD'de uygulanan nesne özellikleri için yapılan performans testlerinde %8 ile %21 arasında %Gm elde edilmiştir. BGHS'nin entegre edilmesi ile KKKS tasarlanmıştır. KKKS'nin HKKD'de uygulanan nesne özellikleri için eyleyici ile yapılan gerçek zamanlı performans testlerinde %3 ile %16 aralığında %Gm performansı elde edilmiştir. KKKS'den elde edilen daha iyi

performans, bu çalışmada önerilen yerel ağırlık yaklaşımın bir sonucudur. Yerel ağırlık yaklaşımı ile BGHS'nin hesapladığı değerler daha optimize edilmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, önerilen bulanık mantık tabanlı Gm odaklı kontrol metodunun ve yerel ağırlık yaklaşımının bir robot elin hassas kavrama görevinde kavrama kuvvetinin kontrolü için kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının amacı, hassas kavrama görevinde özellikleri bilinmeyen bir nesnenin bir robot el tarafından kalıcı deformasyona uğratmadan ve düşürmeden kavranıp kaldırılmasını için kavrama kuvvetinin kontrolünü sağlamaktır. Bir nesneyi kalıcı deformasyona uğratmadan ve düşürmeden hassas şekilde kavrayıp kaldırmak, robotlardan beklenebilecek önemli bir insan yeteneğidir. Fakat becerinin ve hassasiyetin önemli olduğu bir hassas kavrama görevi, statik ve dinamik açıdan kuvvet kontrolünü içeren karmaşık bir problemdir. Özellikleri bilinmeyen bir nesnenin kavranıp kaldırılması, problemin karmaşıklığına belirsizlik de eklemektedir. Bu durumda kavrama kuvvetinin kontrolü belirsizlik içeren karmaşık bir problem haline gelmektedir. Nesne kavramaya yönelik belirsizlik içeren karmaşık problemin çözümünde esnek hesaplama yöntemlerinden bulanık mantık yöntemine başvurulmuştur. İnsanlar özelliklerini bilmedikleri nesnelere hassas şekilde kavrayıp kaldırabilmektedir. Nesne kavramaya yönelik insan yetenekleri, tasarlanacak olan bulanık mantık denetleyicinin veri tabanı olarak değerlendirilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar ve bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, insanların bir nesneyi kavrayıp kaldırırken, Coulomb sürtünme yasası ile hesaplanabilen minimum kavrama kuvveti üzerine fazladan kuvvet uyguladıklarını göstermiştir. Literatürde bu ek kuvvet genellikle “Güvenlik marjı” olarak ifade edilmiştir. Bu tez çalışmasında güvenlik marjını optimize ederek hassas kavrama için kavrama kuvvetinin kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Bu amaca yönelik olarak insanlarla hassas kavrama-kaldırma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden insanların değişen yüzey özelliklerine bağlı olarak nesnelere hassas şekilde kavrayıp kaldırırken uyguladıkları optimum güvenlik marjı verileri elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre insanlar farklı yüzey özelliklerinde ve farklı ağırlıklarda nesnelere kavrayıp kaldırırken %9 ile %20 arasında değişen oranlarda güvenlik marjı uygulamışlardır. Bu veriler kullanılarak bir bulanık mantık denetleyici olan bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi tasarlanmıştır. Hassas kavrama-kaldırma deneylerinde kullanılan yüzey özellikleri ve ağırlıklarda bulanık güvenlik marjı hesaplama sisteminin performans testleri yapılmıştır. Performans testlerinden elde edilen sonuçlara göre bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi %8 ile %21 arasında değişen oranlarda güvenlik marjı hesaplamıştır. Yapılan performans karşılaştırması sonucunda bulanık güvenlik marjı hesaplama sisteminin insan performansına benzer sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında bir robot elin baş ve işaret parmağını temsil eden 2 eksenli eyleyici tasarlanıp üretilmiştir. Bulanık güvenlik marjı hesaplama sistemi, eyleyici, kontrol birimi, sürücüler, deney nesnesi ve diğer yazılım ve donanım ögeleri birleştirilerek kavrama kuvveti kontrol sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemde bulanık güvenlik marjı hesaplama sisteminin çıktısını nesnenin kaldırılma durumu için daha optimize eden yerel ağırlık yaklaşımı önerilmiştir. Yerel ağırlık yaklaşımına göre kavrama sürecindeki her kayma olayında ölçülen teğetsel kuvvet (Yerel ağırlık), nesnenin toplam ağırlığı olarak kabul edilmektedir. Böylelikle nesne kaldırıldığında daha düşük güvenlik marjı ve güvenlik marjı oranı elde edilmektedir. Tasarlanan bulanık mantık tabanlı kavrama kuvveti kontrol sisteminin hassas kavrama-kaldırma deneylerinde kullanılan nesne özelliklerinde ve farklı nesne özelliklerinde performansı test edilmiştir. Eyleyici ile yapılan gerçek zamanlı performans testlerinde %3 ile %16 arasında değişen oranlarda güvenlik marjı uygulayarak deney nesnesi kaldırılmıştır.

Hassas kavrama-kaldırma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre kavranacak nesnenin ağırlığı arttıkça kaldırmak için uygulanacak güvenlik marjı da artmaktadır. Aynı şekilde yüzey kayganlığı arttıkça nesneyi kaldırmak için uygulanan güvenlik marjı da artmaktadır. Fakat yüzey kayganlığındaki artışın güvenlik marjını daha fazla arttırdığı görülmüştür. Güvenlik marjı ağırlıktaki değişime göre yüzey kayganlığındaki değişiminden daha fazla etkilenmektedir. Ayrıca deneylerden elde edilen sonuçlar, aynı ağırlıktaki daha kaygan yüzeylere sahip nesnelerin daha sürtünmeli yüzeylere sahip nesnelere göre daha düşük güvenlik marjı yüzde oranı ile kaldırıldığını ortaya koymuştur. Ağırlık sabit olmak üzere kayganlık arttıkça güvenlik marjı yüzde oranı düşmektedir.

Bu tez çalışmasında bir robot elin hassas kavrama görevinde özellikleri bilinmeyen bir nesnenin kalıcı deformasyona uğratmadan ve düşürmeden kavranıp kaldırılması için güvenlik marjını optimize ederek kavrama kuvvetinin kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmada, yerel ağırlık yaklaşımı ile birlikte bulanık mantık tabanlı, güvenlik marjı odaklı kavrama kuvveti kontrol metodu önerilmiştir. Yapılan performans testleri, tasarlanan bulanık mantık tabanlı kavrama kuvveti kontrol sisteminin farklı ağırlık ve yüzey özelliklerinde nesnelere hassas şekilde başarıyla kavrayıp kaldırdığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar bu tez çalışmasında sunulan metot ve yaklaşımın bir robot elin hassas kavrama görevinde kavrama kuvvetinin kontrolü için kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Gelecek çalışmalarda insanlarla yapılan hassas kavrama-kaldırma deneyleri, nesnenin geometrik şekli ve kombine kuvvet etkileri de değerlendirilerek yapılabilir. Böylelikle güvenlik

marjının değişen fiziksel koşullara ve nesne koşullarına bağlı değişimi ile ilgili daha kapsamlı veriler elde edilerek kavrama kuvveti kontrolünün etkinliği arttırılabilir. Ayrıca bu tez çalışmasında sunulan metot ve yaklaşımın, biomimetic parmak ucu sensörlerin kullanıldığı ve sürekli yerel kaymaların değerlendirildiği Stick-Slip kayma modeli gibi modeller üzerinde uygulama çalışması yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. Cutkosky, M. R. (1989). On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 5(3), 269-279.
2. Mavrakis, N., Ghalamzan, E. A. M., and Stolkin, R. (2017, September). Safe robotic grasping: Minimum impact-force grasp selection. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 4034-4041). IEEE.
3. Islek, C., and Ozdemir, E. (2021). Design of a fuzzy safety margin derivation system for grip force control of robotic hand in precision grasp task. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(3), 17298814211018055.
4. Mazid, A. M., and Ali, A. S. (2008, November). Grasping force estimation detecting slip by tactile sensor adopting machine learning techniques. In *TENCON 2008-2008 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1-6). IEEE.
5. Su, Z., Hausman, K., Chebotar, Y., Molchanov, A., Loeb, G. E., Sukhatme, G. S., and Schaal, S. (2015, November). Force estimation and slip detection/classification for grip control using a biomimetic tactile sensor. In *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)* (pp. 297-303). IEEE.
6. Barrea, A., Bulens, D. C., Lefèvre, P., and Thonnard, J. L. (2016). Simple and reliable method to estimate the fingertip static coefficient of friction in precision grip. *IEEE transactions on haptics*, 9(4), 492-498.
7. Morita, N., Nogami, H., Higurashi, E., and Sawada, R. (2018). Grasping Force Control for a Robotic Hand by Slip Detection Using Developed Micro Laser Doppler Velocimeter. *Sensors*, 18(2), 326.
8. Bicchi, A., Salisbury, J. K., and Brock, D. L. (1993). Contact sensing from force measurements. *The International Journal of Robotics Research*, 12(3), 249-262.
9. Okamura, A. M., Smaby, N., and Cutkosky, M. R. (2000). An overview of dexterous manipulation. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings* (Cat. No. 00CH37065) (Vol. 1, pp. 255-262). IEEE.
10. Pettersson-Gull, P., and Johansson, J. (2018). Intelligent robotic gripper with adaptive grasp technique, Thesis for the Degree of Master of Science, *Mälardalen University School of Innovation Design and Engineering*, Västerås, Sweden. Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-40573>.
11. Westling, G., and Johansson, R. S. (1984). Factors influencing the force control during precision grip. *Experimental brain research*, 53(2), 277-284.
12. Edin, B. B., Westling, G., and Johansson, R. S. (1992). Independent control of human finger-tip forces at individual digits during precision lifting. *The Journal of physiology*, 450(1), 547-564.

13. Fu, Q., and Santello, M. (2018). Improving fine control of grasping force during hand–object interactions for a soft synergy-inspired myoelectric prosthetic hand. *Frontiers in neurorobotics*, 11, 71.
14. Gaut, I. (2020). Evaluation of object attributes to study speed-accuracy trade-off of gloves using ISO 9241-411 standard. Thesis for the Degree of Master of Science, *West Virginia University, Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources*, Morgantown, West Virginia. Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/evaluation-object-attributes-study-speed-accuracy/docview/2512751256/se-2?accountid=190929>.
15. Kossowsky, H., Farajian, M., Milstein, A., and Nisky, I. (2021). The effect of variability in stiffness on perception and grip force adjustment. In *IEEE Transactions on Haptics*, 10.1109/TOH.2021.3052136.
16. İşlek, C., ve Özdemir, E. (2021). Hassas Kavrama Görevinde Robot Elin Kavrama Kuvvetinin Bulanık Kontrolü için Güvenlik Marjı Veri Tabanının Elde Edilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 321-327.
17. Hadjiosif, A. M., and Smith, M. A. (2015). Flexible control of safety margins for action based on environmental variability. *Journal of Neuroscience*, 35(24), 9106-9121.
18. Tremblay, M. R., and Cutkosky, M. R. (1993, May). Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task. In *1993 Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 429-434). IEEE.
19. Wettels, N., Parnandi, A. R., Moon, J. H., Loeb, G. E., and Sukhatme, G. S. (2009). Grip control using biomimetic tactile sensing systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(6), 718-723.
20. Bergmann Tiest, W. M., and Kappers, A. M. (2019). The influence of visual and haptic material information on early grasping force. *Royal Society open science*, 6(3), 181563.
21. Johansson, R. S., and Flanagan, J. R. (2008). 6.05-Tactile sensory control of object manipulation in humans. *The Senses: A Comprehensive Reference, Academic Press, New York, NY*, 67-86.
22. Wiertelwski, M., Endo, S., Wing, A. M., and Hayward, V. (2013, April). Slip-induced vibration influences the grip reflex: A pilot study. In *2013 World Haptics Conference (WHC)* (pp. 627-632), IEEE.
23. Gibo, T. L., Bastian, A. J., and Okamura, A. M. (2013). Grip force control during virtual object interaction: effect of force feedback, accuracy demands, and training. *IEEE transactions on haptics*, 7(1), 37-47.
24. Farajian, M., Leib, R., Kossowsky, H., Zaidenberg, T., Mussa-Ivaldi, F. A., & Nisky, I. (2020). Stretching the skin immediately enhances perceived stiffness and gradually enhances the predictive control of grip force. *Elife*, 9, e52653.
25. Grover, F. M. (2018). *Intermittency between grip force and load force*. (Doctoral dissertation, University of Cincinnati). Retrieved from http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ucin1522334274008361.

26. Wang, X., Xiao, Y., Zhao, Y., and Fan, X. (2017). Grasping force optimization algorithm of soft multi-fingered hand based on safety margin detection. *jiqiren/Robot*, 39, 844-852.
27. Cutkosky, M. R., and Howe, R. D. (1990). Human grasp choice and robotic grasp analysis. In *Dextrous robot hands* (pp. 5-31). Springer, New York, NY.
28. Johansson, R. S., and Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental brain research*, 56(3), 550-564.
29. Howe, R. D., Kao, I., and Cutkosky, M. R. (1988, April). The sliding of robot fingers under combined torsion and shear loading. In *Proceedings, 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 103-105), IEEE.
30. Tremblay, M. R., Packard, W. J., and Cutkosky, M. R. (1992, July). Utilizing sensed incipient slip signals for grasp force control. *Japan-USA Symposium on Flexible Automation* (pp. 1-6), San Francisco, CA.
31. Maeno, T., Kawai, T., and Kobayashi, K. (1998, October). Analysis and design of a tactile sensor detecting strain distribution inside an elastic finger. In *Proceedings, 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No. 98CH36190)* (Vol. 3, pp. 1658-1663). IEEE.
32. Dubey, V. N., Crowder, R. M., and Chappell, P. H. (1999). Optimal object grasp using tactile sensors and fuzzy logic. *Robotica*, 17(6), 685-693.
33. Glossas, N. I., & Aspragathos, N. A. (2001). Fuzzy logic grasp control using tactile sensors. *Mechatronics*, 11(7), 899-920.
34. Domínguez-López, J. A., Damper, R. I., Crowder, R. M., and Harris, C. J. (2003). Optimal object grasping using fuzzy logic.
35. Maeno, T., Kawamura, T., and Cheng, S. C. (2004). Friction estimation by pressing an elastic finger-shaped sensor against a surface. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(2), 222-228.
36. Ikeda, A., Kurita, Y., Ueda, J., Matsumoto, Y., and Ogasawara, T. (2004, September). Grip force control for an elastic finger using vision-based incipient slip feedback. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No. 04CH37566)* (Vol. 1, pp. 810-815). IEEE.
37. Koda, Y., and Maeno, T. (2006, October). Grasping force control in master-slave system with partial slip sensor. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 4641-4646). IEEE.
38. Sugaiwa, T., Fujii, G., Iwata, H., and Sugano, S. (2010, December). A methodology for setting grasping force for picking up an object with unknown weight, friction, and stiffness. In *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (pp. 288-293). IEEE.

39. O'Toole, M., Bouazza-Marouf, K., Kerr, D., and Vloeberghs, M. (2010). Robust contact force controller for slip prevention in a robotic gripper. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 224(3), 275-288.
40. Ho, V. A., and Hirai, S. (2011). Understanding slip perception of soft fingertips by modeling and simulating stick-slip phenomenon. In *Robotics: Science and Systems*.
41. De Maria, G., Natale, C., and Pirozzi, S. (2013, May) Slipping control through tactile sensing feedback. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3523-3528). IEEE.
42. Tsuji, T., Baba, K., Tahara, K., Harada, K., Morooka, K. I., and Kurazume, R. (2014, December). Grasp stability analysis for elastic fingertips by using potential energy. In *2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration* (pp. 453-458). IEEE.
43. Lin, H., Guo, F., Wang, F., and Jia, Y. B. (2015). Picking up a soft 3D object by “feeling” the grip. *The International Journal of Robotics Research*, 34(11), 1361-1384, 2015.
44. Yuan, W., Li, R., Srinivasan, M. A., and Adelson, E. H. (2015, May). Measurement of shear and slip with a GelSight tactile sensor. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 304-311). IEEE.
45. Fakhari, A., Keshmiri, M., and Kao, I. (2016). Development of realistic pressure distribution and friction limit surface for soft-finger contact interface of robotic hands. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 82(1), 39-50.
46. Zadeh, L. A. (1994). Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. *Communications of the ACM*, 37(3), 77-85.
47. Altaş, İ. H. (1999). Bulanık mantık: Bulanık denetim. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 64, 76-81.
48. Kelekçi, E. (2016). Tip-2 bulanık mantık editörünün geliştirilmesi ve esnek eklemli robot kolunun denetimi, Yüksek Lisans tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (423761).
49. Tewari, A. (2002). Modern control design. NY: *John Wiley and sons*, 283-308.
50. Kolter, J. Z., Plagemann, C., Jackson, D. T., Ng, A. Y., and Thrun, S. (2010, May). A probabilistic approach to mixed open-loop and closed-loop control, with application to extreme autonomous driving. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 839-845). IEEE.
51. Bilgiç, H.H. (2018). Esnek sistemlerin kontrolü için yapay zekâ teknikleri ile girdi şekillendirici tasarımı, Doktora Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (520037).
52. Rodriguez, R. M., Martinez, L., and Herrera, F. (2012). Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 20(1), 109-119.

53. Kocabaş, A. (2017). Design and optimization of a fuzzy logic based maximum power point tracker for pv panel, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (467940).
54. Tüysüz, M. (2018). Hibrit güç sistemlerinde maksimum güç noktası takibi için bulanık denetleyicinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (522602).
55. Pehlivan, İ. (2001). Bulanık mantık kontrolörler ile klasik PID kontrolörlerin karşılaştırılması ve bir bulanık mantık kontrolör tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (105505).
56. Kıyak, E., ve Kahvecioğlu, A. (2003). Bulanık mantık ve uçuş kontrol problemine uygulanması. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 1(2), 63-72.
57. Ayyıldız, E. (2018). Çelik lifli betonların malzeme karışım oranlarını ve beton basınç dayanımlarını bulanık mantık kullanarak modelleme, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâziğ. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (492737).
58. Reisi, A. R., Moradi, M. H., and Jamasb, S. (2013). Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 19, 433-443.
59. Tari, E. (2010). Ölü zamanlı sistemlerde üyelik fonksiyonlarının taban aralığının ayarlanmasına dayalı bulanık kontrolör tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (292102).
60. Sinecen, M. (2002). Klima sistem kontrolünün bulanık mantık ile modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (128224).
61. Mamdani, E. H., and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
62. Şen, Z. (2009). Bulanık mantık ilkeleri ve modelleme: (Mühendislik ve sosyal bilimler). *Su Vakfı Yayını*, ISBN: 978-975-6455-42-5, 361 s, İstanbul.
63. Ünal, C. (2009). Bulanık mantık uygulamasıyla konfeksiyonda işin personelin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (255798).
64. Murat, Y. Ş., ve Şekerler, A. (2009). Trafik kaza verilerinin kümelenme analizi yöntemi ile modellenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 4759(4777), 311.
65. Cebeci, Z., Yıldız, F., ve Kayaalp, G. T. (2015). K-ortalamlar kümelemesinde optimum K değeri seçilmesi. 2. *Ulusal Yönetim Bilişim Sistemleri Kongresi. Erzurum*, 8-10.
66. Dhanachandra, N., Mangle, K., and Chanu, Y. J. (2015). Image segmentation using K-means clustering algorithm and subtractive clustering algorithm. *Procedia Computer Science*, 54, 764-771.

67. Arora, P., and Varshney, S. (2016). Analysis of k-means and k-medoids algorithm for big data. *Procedia Computer Science*, 78, 507-512.
68. Erişti, H., ve Tümen, V. (2012). K-means kümeleme yaklaşımı kullanarak elektrik dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin zamansal değişimlerinin incelenmesi. *ELECO Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 29.
69. Shen, S., and Meng, Z. (2012, October). Optimization of initial centroids for k-means algorithm based on small world network. In *International Conference on Intelligent Information Processing*, Springer, Berlin, Heidelberg, (pp. 87-96).
70. Baswade, A. M., and Nalwade, P. S. (2013). Selection of initial centroids for k-means algorithm. *IJCSMC*, 2(7), 161-164.



DİZİN

A

A4 kağıdı · 39
 araba · 25, 26
 Arduino · 32, 36, 37, 39, 40, 68, 82,
 83, 86, 87
 asetat · 85

B

bulanık küme · 53, 54, 55, 59, 65,
 69, 71, 77
 bulanık mantık · 6, 9, 11, 19, 22,
 52, 63, 121, 122
 bulanıklaştırma · 59, 60

Ç

çıkarma birimi · 61

D

denetim · 19, 20, 21, 42, 58, 61,
 64, 67, 81, 83, 98, 101, 121
 durulaştırma · 58, 60, 63, 64, 79

E

eyleyici · 5, 6, 19, 22, 23, 27, 34,
 35, 38, 46, 50, 81, 83, 84, 85,
 86, 89, 104, 113, 114, 116, 117

F

frekans · 9

G

güvenlik marjı · 7, 8, 11, 15

K

kaplin · 24
 kontrol sistemi · 20, 21
 K-Ortalamalar · 73, 74
 kümeleme · 73, 74, 122

L

latex · 27, 35, 85

M

MATLAB · 39, 40, 42, 43, 44, 45,
 46, 47, 48, 49, 50, 68, 70, 71,
 72, 75, 76, 78, 79, 80, 81, 90,
 101, 103
 mil · 24, 25, 26, 29

N

normal kuvvet · 2, 3, 4, 7, 10, 11,
 14, 15, 18, 30, 36, 49, 51

P

pleksiglas · 27, 83
 polietilen · 37, 85
 polipropilen · 35, 37
 pulse · 44, 45, 49, 50, 51

R

ray · 25, 26
 robot · 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12,
 13, 14, 18, 19, 40, 51, 81, 85,
 88, 113, 114, 115, 116, 117,
 119, 121

S

sensör · 8, 9, 10, 11, 12, 13, 32, 33,
 45, 83, 84, 89, 113, 117
 somun · 24, 25, 26
 statik sürtünme · 1, 10, 11, 14, 16,
 18, 36
 step motor · 23, 26, 28, 29, 43, 44,
 49, 84
 Stick-Slip · 9, 10, 11, 16, 117
 sürtünme kuvveti · 14
 sürücü · 22, 27, 28, 44, 45, 48, 49,
 51

T

teflon · 37
 teğetsel kuvvet · 7, 9, 10, 11, 16,
 30, 31, 36

Ü

üyelik fonksiyonu · 55, 56, 57, 59,
 63, 69, 71

Y

yapay zekâ · 6, 121
 yük hücresi · 30



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

