



## **Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolü**

### **Fuzzy Logic Based Decision Support System for Force Control of Robot Hand**

**Çağlar Conker<sup>1\*</sup> , Ashlhan Karaca<sup>2</sup> **

<sup>1</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hatay

<sup>2</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [caglar.conker@iste.edu.tr](mailto:caglar.conker@iste.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 23.10.2018

DOI:10.21205/deufmd.2019216210

Kabul Tarihi / Accepted: 22.01.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

Atıf şekli/How to cite: CONKER, Ç., KARACA, A. (2019). Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolü. DEUFMD, 21(62), 433-447.

#### **Öz**

Son yıllarda gelişen teknoloji ile robotlar üzerine yapılan çalışmaların ciddi oranda arttığı gözlenmektedir. Robotik sistemlerde robot el konusu, farklı ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kullanım alanlarına yönelik olarak gelişmeye en açık çalışma alanlarından birisidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, robot el uygulamalarında karşılaşılan en büyük sorunun nesnelere kavranma kuvvetinin kontrolü olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple robot elin nesnelere zarar vermeden kavrama işlemini gerçekleştirebilmesi için kavrama kuvvetinin kontrol sorunu çözümlenmelidir. Sunulan çalışmada nesnelere uygulanan kuvvetin kontrol probleminin çözümü için yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık önerilmiştir. Önerilen yöntemde, robot el kavrama kuvvetini kullanıcının gönderdiği sinyal doğrultusunda belirlemektedir. Sistemin avuç içerisinde ve parmaklarının iç kısımlarında bulunan sensörler vasıtasıyla nesnelere uygulanan kuvvet ölçülmekte ve bu sensör ölçümleri kuvvet geri beslemesi olarak kullanılmaktadır. Ölçülen sensör verileri ve kullanıcı sinyali bulanık mantık kontrolör(karar destek sistemi) ile denetlenerek nesnenin kontrol sistemi tarafından belirlenen kuvvette stabil bir şekilde kavranması sağlanmaktadır. Geliştirilen kontrol yapısı oluşturulan sistemde uygulanmış ve kullanıcıdan gönderilen komut doğrultusunda hassas ve kararlı kavrama yapabildiği sunulan çalışma ile gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bulanık mantık, Karar destek sistemi, Robot el, Akıllı sistem, Robotik sistemler

#### **Abstract**

In recent years, it is observed that the studies on robotic systems have increased tremendously. In the field of robotic systems, the robotic hand based research is one of the most popular fields due to wide range of application areas. It can be observed from a literature review of robot hand applications is that one of the main research topic in the area is on control of gripping force of the objects. Hence, the force feedback problem appears to be a challenge to be overcome where the objective is to perform the grasping operation without damaging the objects being hold. In this study, Fuzzy Logic based artificial intelligence techniques has been proposed as a solution of the problem of force control problem mentioned. In proposed method, the robot hand determines the grip force by the direction of the signal sent by the user. The force applied to the objects is measured by the sensors. These sensor measurements are then used as force feedback. The

measured sensor data and the user input signals are controlled by a fuzzy logic control system (decision support system) to ensure that the object is grasped in a stable manner. The developed control structure is implemented and it proven that the user is able to grasp sensitively and decisively by the direction of the control command sent by the user.

**Keywords:** Fuzzy logic, Decision support system, Robot hand, Smart systems, Robotic systems

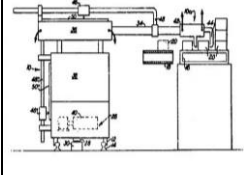

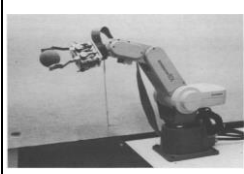
## 1. Giriş




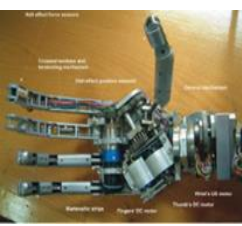
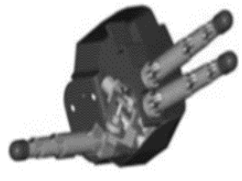

Günümüzde robotik sistemlerin kullanımıyla birlikte, üretimde oluşabilecek insan hata payı ve kaza oranının düşürülmesi sağlanmaktadır. Endüstriyel yapıdaki robotların geliştirilmesinde, insansı robotlar üzerine yoğunlaşılması takiben üretimde: kalite, verimlilik ve robotların kontrol hassasiyeti her geçen gün artmaktadır. Bu doğrultuda robot manipülatörlerin insan eli yapısına olan benzerliklerinin arttığı ve bu konu üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı gözlemlenmektedir[1]. Yapılan çalışmalar, elektronik/mekanik tasarımların iyileştirilmesini, hassas hareket ve kuvvet kontrollerinin yapılmasını veya mevcut yapıların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Robot manipülatörler; üretimden araştırmaya, askeri alandan protez olarak kullanıma kadar çok geniş kullanım alanına sahiptir [1]. Bu nedenle farklı ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kullanım alanlarına yönelik gelişmeye en açık çalışma konularından birisidir. Robot manipülatörler üzerine geçmişten bugüne birçok çalışma yapılmış ve araştırma, geliştirme çalışmaları artarak devam etmiştir. İncelenen ve önemli olduğu düşünülen çalışmaların bir kısmı kronolojik sırayla Tablo 1’de sunulmaktadır.

Manipülatörlerin nesneye uyguladıkları kuvvetin hassas kontrol edilememesi sebebiyle kavranan nesnenin zarar görmesi, çözülmesi gereken önemli bir problemdir. Tablo 1’e bakıldığında robot ellerde kuvvet kontrolüne ve nesnelere en uygun biçimde kavranmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca robot ellerin kontrolünün hassaslaştırılmasına yönelik çalışmalara devam edilmektedir. Robot manipülatörler çok girdili ve çok çıktılı yapıya sahip sistemlerdir. Bu tip sistemlerin doğrusal bir modeli oluşturularak kontrol edilmesi oldukça güçtür[2,3]. Robot manipülatörlerden biri olan robot el ile nesnelere dokunmak, tutmak, nesnelere deforme olmasını gözardı ederek kavrama işlemini gerçekleştirmek ve bu hareket formları oluşturulurken kuvvet sensörlerinden alınan geri bildirimler de kullanılarak hareket profillerinin oluşturulması

ya da matematiksel modellemeler kullanılarak bu çok girdili sistemlerin kontrolü oldukça karmaşık bir konudur[3,4,5]. Tabloda bulunan literatür çalışmaları incelendiğinde; robot ellerin nesnelere kavraması sırasında hareket ve nesnelere uyguladıkları kuvvetin kontrolü; matematiksel çözümlerle yanı sıra, PID, PD, PI, makine öğrenmesi, empedans kontrol gibi kontrol yöntemleri kullanılarak veya farklı kontrol algoritmalarıyla sağlanmıştır. Robot el için doğrusal model oluşturmanın güç olması sebebiyle mevcut olan sistemlerdeki kuvvet geri besleme sorununa yönelik önerilen çözüm yolları karmaşık ve kontrol stratejisinin geliştirilmesi zordur[2,6]. Sunulan çalışmada, kuvvet geri besleme sorununun olabildiğince basit ve hassas bir şekilde çözüme kavuşturulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda sunulan çalışmada kuvvet kontrolünde matematiksel ifadeleri, dilsel ifadelerle temsil etmesi ve sezgisel uygulamalarda iyi sonuçlar vermesi sebebiyle yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık kullanılarak, bulanık mantık temelli bir kontrolcü geliştirilmiştir. Bulanık mantık kontrol sisteminin robot eli kontrolü sırasında değerlendirilmede kullanacağı referans değer kullanıcı tarafından bir potansiyometre aracılığıyla gönderilmektedir. Bu sayede geliştirilen kontrol sistemi ile kullanıcı temelli hassas kuvvet kontrolü yapılabilmektedir. Kontrol sistemi robot elde test edilmiş ve kullanıcının istediği kavrama kuvvetinin kontrolü sağlanmıştır. Robot elin her bir parmağı, kullanıcı tarafından gönderilen tek bir kontrol sinyaline göre nesneye uyguladığı kuvveti birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol etmektedir. Bu sayede robot elin parmakları kavranan nesnenin şekline göre adaptif bir şekilde hareket edebilmektedir. Sağlanan kuvvet ve hareket kontrolü vasıtasıyla robot elde oluşabilecek kontrol yetersizliği sonucu nesnelere zarar görmesi önlenilecektir. Geliştirilen kontrol sistemi karmaşıklığından uzak, geniş uygulama alanına ve hassas sonuçlar verebilen bir yapıya sahiptir.

**Tablo 1.** Literatür tablosu

	<b>Çalışmanın içeriği</b>	<b>Çalışmanın görseli</b>	<b>Mekanik özellikleri</b>
1949 Argonne Milli Laboratuvar [7]	Yapılan çalışma ile laboratuvar ortamında radyoaktif malzemeleri işlemek için mekanik manipülatör geliştirilmiştir. İlk uzaktan kontrollü robotik el, efendi-köle tipindedir. Efendi manipülatöre kullanıcı tarafından bir dizi hareket verilmekte, köle olan manipülatör ise bu hareketleri mümkün olduğu kadar hızlı takip etmektedir.		Çubuk mekanizmaları ile, yarı üniversal eklemler ve pençe benzeri el yardımıyla kavrama sağlanmaktadır.
1954 G.Devol [8]	Geliştirilen cihaz; bir dizi hareket adımlarından oluşan işlemleri (belirli bir konumda bulunan bir nesneyi kavrayıp, belirlenen başka konuma bırakmak gibi) program içerisindeki komutlar tarafından gerçekleştirmektedir. Bu cihaz; tarihte geliştirilen ilk programlanabilir elektromekanik manipülatör olarak kabul edilmektedir.		-
1959 G.Devol ve J.F. Engelberger[9]	Bu çalışmada bir manipülatörün, bilgisayar ile uyumlu çalışması sağlanmıştır. Bunun sonucunda birçok farklı görev otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile ilk endüstriyel robotlara öncülük edilmiştir .		-
1978 S. Hirose ve Y. Umetsami [10]	Mekanik yapısı sayesinde nesneyi şekline göre adaptif şekilde kavrayabilen yumuşak tutucu geliştirilmiştir. Bir motor ile kontrol edilen bu prototip bağlantı kasnakları vasıtasıyla kuvvetleri dağıtmaktadır. Üniform basınç ile her şekildeki nesneyi tutabilmektedir.		Her bir mafsalsı bir serbestlik derecesine sahip sistemin bağlantı kasnakları ile güç iletimi sağlanmaktadır.
1990 G.Bekey ve arkadaşları [11]	Yapılan çalışmada; kavramadan önce hedef nesnenin konumu, yönü ve geometrisi görüş sisteminden alınan veriler ile birleştirilmektedir. Kontrol algoritması; görev bilgisi ile istenilen kavrama modunu üretir ve hedef kuvvete gelinceye kadar parmaklar kapatılır. Bu sayede insan eline benzer adaptif kavrama sağlanmaktadır.		5 parmaklı belgrade el, dört motorlu bir tutucudur. Her parmak çifti 1 serbestlik derecesine ve başparmağı 2 serbestlik derecesine sahiptir.
1992 J.Yan ve arkadaşları [12]	Bu çalışma da sensörlerden gelen veriler geri beslemede kullanılarak robot kol ve elin; pozisyon ve kuvvet uyum kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sistemiyle; robot kolun kinematik denklemleri ile kolun pozisyon uyum planlaması ve elin kuvvet uyum planlaması sağlanmıştır.		2 serbestlik derecesine sahip 2 parmaklı tutucu tasarlanmıştır.
1998 Y.Lin ve arkadaşları[13]	Tasarlanan 17 serbestlik derecesine sahip elin her bir eklemi ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Uygulanan algoritma ile simülasyonda çokgen ve silindirik şeklindeki nesnelerin en uygun pozisyon için temas noktaları seçilmesi sağlanmıştır.		5 parmaklı elin başparmak ve işaret parmağı 4'er, diğer parmakları 3'er serbestlik derecesine sahiptir.

2000 N. Fukaya ve arkadaşları [14]	Yapılan çalışmada geliştirilen elin bütün parmakları aynı kuvveti uygulayabilmekte ve 6 temel tutma işlevini yerine getirebilmektedir. Tasarımın kavrama deneyleri sonucunda insan elinin kavrama biçimlerinden çok küçük sapmalar gözlemlenmiştir.		Tasarlanan el; 5 parmaklı ve 20 serbestlik derecesine sahiptir. Elde hareket iletimi tendonlarla sağlanmaktadır.
2001 J. Butterfaß ve arkadaşları [15]	Manipülâtör harici bir bilgisayar ile seri haberleşme yaparak kontrol edilmektedir. Sensörlerden gelen veriler ve bilgisayardan gelen veriler doğrultusunda nesneye uygun kavrama sağlayabilmektedir. Parmakların kartezyen empedans kontrolü yapılmıştır. Empedans kontrolünde hatayı düşürmek için PI kontrol uygulanmıştır.		13 serbestlik derecesine sahip 4 parmaklı robotik elin, hareket iletimi eklemlerde bulunan dişliler ile sağlanmaktadır.
2002 H. Kawasaki ve arkadaşları [16]	Manipülâtör bilgisayar tabanlı robot el kumandası ile kontrol edilmiştir. Eklem, bağlantı pozisyonu ve temas kuvveti ile hibrit bir kontrol sistemi sağlanmıştır. Temas olmadığı durumda PID kontrol eklem pozisyon kontrolüne uygulanmış ve temas durumunda pozisyon ve kuvvetin hibrit kontrolü gerçekleştirilmiştir.		Tasarlanan elin toplam 20 eklemi ve 16 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Güç iletimi dişliler ile sağlanmaktadır.
2004 J.L. Pons ve arkadaşları [17]	Yapılan çalışma ile kullanıcı; parmak hareketlerini EMG sensörü ile kontrol etmektedir. PID kontrolle konum ve kuvvet sensörlerinden gelen verileri işleyip parmağın uyguladığı tork ayarlanmaktadır. Başparmakta bulunan genova mekanizması ile 2 eksenli mafsallın hareketlerinin yönlendirilmesi bir motorla yapılmaktadır. Ayrıca önerilen empedans kontrol yaklaşımı, parmakların sanal yaylar gibi hareket etmesini sağlamaktadır.		10 serbestlik derecesine sahip 5 parmaklı el tasarımı yapılmıştır. Başparmakta genova mekanizması kullanılmıştır. 4. ve 5. Parmaklar manuel olarak bükülebilmektedir.
2007 L.Zollo ve arkadaşları [18]	Parmakların eklem açısı, tendon gerginliği ve motor hareketi PD kontrolcü ile sağlanmıştır. Yapay elin mekanik tasarımını, el kontrol sisteminin tasarımı ile uyumlu hale getirmek ve insan elinin kinematik ve dinamik yapısına benzer el tasarımı yapılabilmesi için biyomekatronik yaklaşımla elin tasarımının ve kontrol sisteminin optimizasyonu üzerinde durulmuştur.		3 parmaklı elin, baş parmağı 4 diğer parmakları 3 serbestlik derecesine sahiptir. Parmaklardaki bütün eklemler mafsallar ile birbirine bağlıdır.
2007 H.Liu ve arkadaşları [19]	Çalışmada 5 aşamalı modüler kontrol sistemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Kontrol sistemi; düşük seviyeli kontrol aşaması, parmaktaki dataların işlemesi, eldeki dataların işlemesi, yüksek seviyeli kontrol ve dış kumanda aşamasından oluşmaktadır. Sistem test edildiğinde kendi kendine kavramada ve tele-operasyon denemelerinde kontrol mimarisi elin kontrolünde başarı göstermiştir.		Parmakları 3'er, avuç içi 1 serbestlik derecesine sahip olan 4 parmaklı el toplam 13 serbestlik derecesine sahiptir. Parmakların hareket iletimi konik dişlilerle sağlanmaktadır.

2010 O.B. Kroemer [20]	Yapılan çalışmada çeşitli makine öğrenmesi metotları kullanılarak kavrama işlemi için hiyerarşik yapıda aşamalı hibrit denetleme sunulmuştur. Yüksek seviye kontrolör; obje kavramalarında takviyeli öğrenme kullanarak nereden kavrayacağına karar verirken, düşük seviyeli kontrolörde taklit öğrenme ve görme temelli reaktif kontrolör sayesinde uygun kavrayış hareketlerini seçmektedir. Oluşturulan sistem ile yeni bir nesnenin kavranması hızlı bir şekilde öğrenilebilmektedir.		Bu çalışmada tasarım yapılmamıştır. 7 serbestlik derecesine sahip Mitsubishi kol ve Barrett el kullanılmıştır.
2013 M.C. Teng ve arkadaşları [21]	Çalışmada ters kinematik çözümleme ile kontrol algoritması uygulanmıştır. İstenen hareketi gerçekleştirmek için ters kinematik çözümleme ve referans konum kullanılarak robot manipülatör kontrol edilmektedir. Nesnenin görsel özelliklerinin tanınması ve hareket kontrolü sağlanarak nesne manipülasyonu gerçekleştirilmektedir.		Bu tasarım; elin 4 ve kolun 6 olmak üzere toplam 10 serbestlik derecesine sahiptir. Parmaklara güç iletimi tendonlar ile yapılmaktadır.
2016 W. Chen ve C. Xiong [22]	Çalışmada adaptif kavrama için konum ve kuvvet değişimine dayanan yeni bir yöntem sunulmuştur. Hareket kuvvetlerinin gelişimi incelenerek bir analiz yöntemi geliştirilmiş, geliştirilen analiz yöntemiyle kavranan farklı nesnelere güvenli ve adaptif kavrama sağlanmıştır.		Testlerde kullanılan elin kuvvet iletimi tendonlarla sağlanmaktadır. El 5 parmak ve 16 ekleme sahiptir.
2017 L.Zaidi ve arkadaşları [23]	Bu çalışmada deforme olan cisimleri kavrayabilmek için model tabanlı bir strateji geliştirilmiştir. Deforme olan nesne kavranmaya başladığında fark edilerek, nesne-parmak deforme hesabı yapılmaktadır. Böylece kuvvet kontrolü ile nesneye zarar vermeden kavrama sağlanabilmektedir.		Bu çalışmada tasarım yapılmamıştır. Hazır Kuka LWR4 ve Shadow el kullanılmıştır.
2018 S. Xu ve arkadaşları [24]	Yapılan çalışmada; farklı robot platformlarına uyarlanabilir bir robot el tasarlanmıştır. Parmak ucunun pozisyonunu elde etmek için bir kinematik model oluşturulmuş ve robot elinin hareket yörüngesi ve kavrama alanı çözülmüştür. Sisteme farklı robot platformlarında farklı görevler verilmiştir. Sistem yapılan deneylerde yaklaşık 10 farklı kavrama görevini gerçekleştirebilmiş, farklı robot platformlarında uyumlu bir şekilde çalışabilmiştir.		Tasarımı yapılan el 5 parmaklı ve baş parmağı 4 diğer parmakları 3'er olmak üzere toplam 16 serbestlik derecesine sahiptir. Motorlardan parmaklara hareket ve güç iletimi tendonlarla sağlanmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

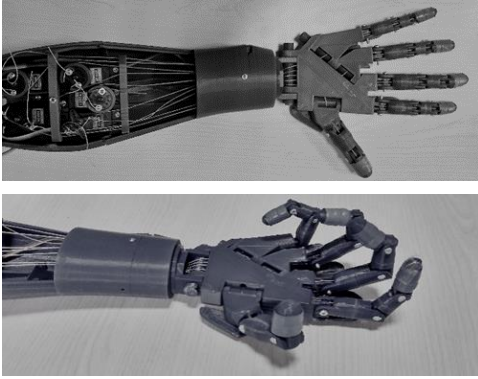
Bu bölümde robot elin mekanik yapısı, sensör verilerinin işlenmesi ve sistemin elektronik ve elektromekanik donanım yapısı sunulmaktadır.

### 2.1. Robot elin mekanik yapısı

Çalışmada 5 parmaklı robot el kullanılmıştır. 17 serbestlik derecesine sahip robot elin; baş, işaret ve orta parmakları 3'er serbestlik derecesine sahiptir. Yüzük ve serçe parmakları ise avuç içinde kısmen hareket yapabilmelerini sağlayan eklemlerle 4'er serbestlik derecesine sahiptir. Parmaklara hareket iletimi tendonlarla sağlanmaktadır. Tendon kullanımı ile parmak eklemlerinin nesneye göre adaptif şekil alması

sağlanmıştır. Tendonların hareketini sağlayan eyleyiciler ön kolda yer almaktadır. Ayrıca bilek tek serbestlik derecesine sahiptir ve hareket iletimi dişlilerle sağlanmaktadır. Elin boyutu ve yapısı, insan eli ile benzer yapıdadır.

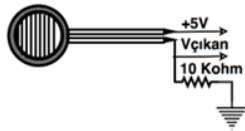
Elin üretimi için 3 boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılmıştır. El Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) malzeme ile basılmıştır. ABS kullanımı ile ucuz ve hafif bir el prototipi elde edilmiştir [25]. Basımı ve montajı yapılan el Şekil 1'de sunulmaktadır. Basımı yapılan ve deneylerde kullanılan robot el 2012 yılında Gael Langevin tarafından tasarlanmış ve açık kaynak tasarım olarak paylaşılmıştır [26].



Şekil 1. Deneysel olarak kullanılan robot el

## 2.2 Kuvvet sensörü

FSR (kuvvete duyarlı direnç) kuvvet sensörü; aktif yüzeyine uygulanan kuvvetin artması ile dirençte azalma gösteren polimer kalın film elektronik bileşendir[27]. Sistemde İnterlink Elektronik'in FSR 402 isimli kuvvet sensörü kullanılmıştır. Kuvvet sensörü üzerine 600 grama kadar ağırlık konularak kuvvet-gerilim değişimi test edilmiştir. Kuvvet sensörüne uygulanan kuvvet miktarına göre üzerinden geçen gerilim miktarı, mikrodenetleyici ile ölçülmüştür. Sensörde üretilen değerler 0-5000 mili volt aralığındadır. Ancak mikrodenetleyici 10 bitlik analog-dijital dönüştürücüye sahip olduğu için 0-5000 mili volt aralığıyla orantılı 0-1023 aralığında sayısal değerler elde edilmektedir. Sensör ve direnç yardımıyla gerilim bölücü devre oluşturulmuş olup, oluşturulan devre ile kuvvet ölçümü yapılmıştır. Sensörün üzerine gelen kuvvete göre, direnç değişimi Denklem 1'de verilen matematiksel ifade ile hesaplanmıştır, devre ise Şekil 2'de sunulmuştur. Elde edilen kuvvete göre direnç değişiminin grafiği Şekil 3'te sunulmuştur.



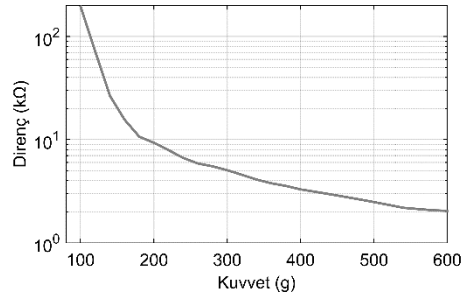
Şekil 2. Gerilim bölücü devre

$$R1 = R2 \times (V_{giren} - V_{çikan}) \div V_{çikan} \quad (1)$$

Denklem 1'de: R1; kuvvet sensörü direnç değeri, R2 devrede kullanılan 2. direnç değeri(10 kΩ), Vgiren; sensöre verilen gerilim

miktarı(5V), Vçikan; sensörden çıkan gerilim miktarıdır.

Şekil 3'te kuvvet sensörü üzerine kuvvet uygulandığında başlangıçta direnç değişiminin çok yüksek olduğu daha sonra direnç değişiminin azalarak, direncinin düştüğü görülmektedir. Şekil 3'te sunulan grafikte direnç değişimi logaritmik olarak, kuvvet değişim miktarı ise lineer olarak verilmiştir.

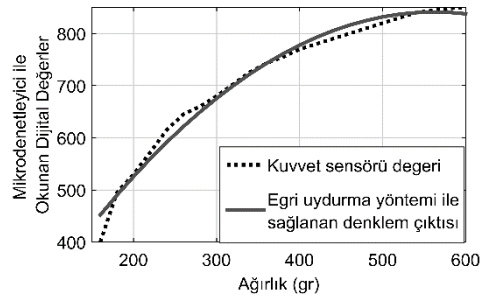


Şekil 3. Kuvvet-direnç değişim grafiği

Kuvvet sensörüne yapılan test sonuçları mikrodenetleyici tarafından okunmuş ve elde edilen sayısal değerler eğri uydurma yöntemi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen kuvvet egrisinin denklemi Denklem 2'de verilmiştir. Eğri uydurma yönteminde denklem elde edilirken sensörün başlangıçta duyarsız olduğu değerler ihmal edilmiştir. Eğri uydurma yöntemi çıktısı ile ölçüm sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. Elde edilen denklemin, kuvvet sensörü değerlerinin değişimi ile tutarlılığa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

$$P = (-0.0024 \times x^2) + (2.7008 \times x) + 81 \quad (2)$$

Denklem 2'de: x; ağırlık miktarıdır(gr).

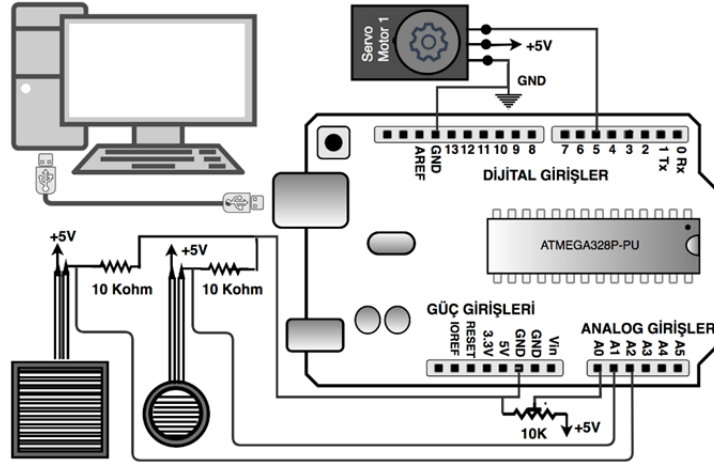


Şekil 4. Eğri uydurma yöntemi ile elde edilen grafik

### 2.3. Robot elin elektronik ve elektromekanik donanım yapısı

Robot elin parmaklarını hareket ettirebilmek için parmaklarda bulunan misinaların sürülmesi, eyleyiciler ile sağlanmıştır. Eyleyici olarak her bir parmak için bir adet olmak üzere toplam 5 adet servo motor kullanılmıştır. Servo motorlar; 180 derece hareket kabiliyeti, kontrol kolaylığı ve konum hassasiyetinden dolayı tercih edilmiştir. Sistemde Tower Pro marka MG996R isimli servo motor kullanılmıştır. Robot elin objeleri kavrama esnasında objeye uygulanan kuvvetin ölçülebilmesi için parmak falanklarına ve avuç içine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir. Kuvvet sensörünün özellikleri bölüm 2.2'de tartışılmıştır. Kullanıcıdan komut

gönderimi için ise 1 adet potansiyometre kullanılmıştır ve kullanıcı potansiyometre ile mikrodenetleyiciye farklı komut sinyalleri gönderebilmektedir. Robot elde sensörlerden gelen verilerin işlenmesi, servo motorların kontrol işlemleri, bilgisayar ile haberleşmenin gerçekleştirilmesi için mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikrodenetleyici olarak arduino uno tercih edilmiştir. Robot elin 1 parmağının elektronik ve elektromekanik sistemlerinin mikrodenetleyici ile bağlantısı Şekil 5'te gösterilmektedir. Robot elin hareket ve kuvvet kontrolü oluşturulan kontrolcü sistem üzerinden, bilgisayar ve mikrodenetleyicinin seri haberleşmesi ile kontrol edilmektedir.



Şekil 5. Robot elin 1 parmağının, mikrodenetleyici tabanlı kontrol sisteminin elektronik donanım yapısı

### 2.4. Bulanık mantık kontrol yapısı

Sistem MIMO (çok girdili ve çok çıktılı) yapıya sahiptir. Bu tip bir sistem için doğrusal bir model oluşturularak kontrolünü gerçekleştirmek oldukça zordur. Ayrıca robot el ile nesnelere dokunmak, tutmak ve deforme olmasını göz ardı ederek kavramak gibi farklı hareketler yapılması ve bu hareket formları oluşturulurken kuvvet sensörlerinden alınan geri bildirimler de kullanılarak hareket profilleri için uygun girdinin oluşturulması oldukça karmaşık ve uzmanlık gerektiren bir konudur. 1965 yılında Zadeh tarafından geliştirilen bulanık mantık yöntemi ile kontrol sisteminin tasarımı bu problem için oldukça etkin bir çözüm yoludur. Bulanık mantık, probleme ait matematiksel olarak muğlaklığı temsil etmek ve biçimsel yapıya kavuşturulmuş araçlar sağlamak için tasarlanmıştır[28].

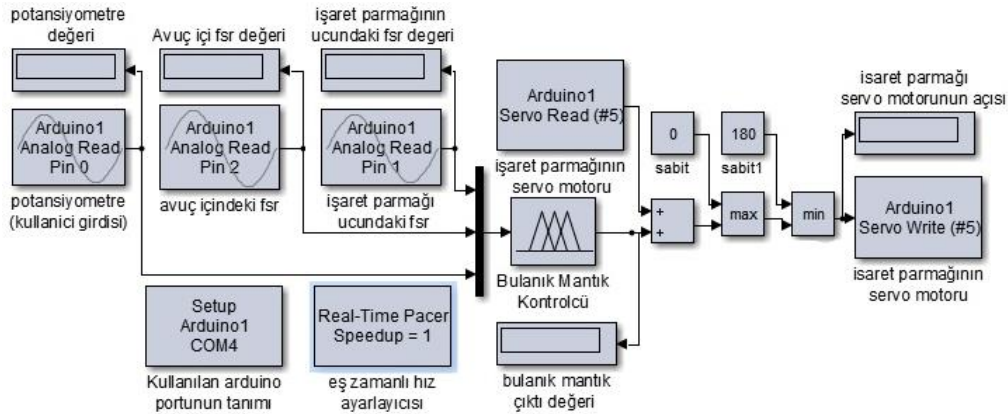
Bulanık mantık; sisteme özel, belirli uygulamalar için oldukça iyi performans sağlamaktadır [29]. Bu sebeple sistem kontrolünde bulanık mantık tabanlı kontrolcü kullanılmıştır. Tasarlanan kullanıcı temelli, bulanık mantık karar destek sistemi; kullanıcı komutu ve kuvvet geri bildirimini ile kendi kendine kavrama işlemine karar verebilen, adaptif bir kavrama yeteneğine sahiptir. Geliştirilen sistemde; robot el nesneyi kavramaya başladığında kuvvet sensörü verileri mikrodenetleyiciye gönderilmektedir, ayrıca kullanıcıdan da bir kontrol işareti alınmaktadır. Gelen veriler doğrultusunda bilgiler bulanık mantık kontrolör ile değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonucunda servo motorlara hareket komutu verilerek nesnenin uygun kuvvette kavranması sağlanmaktadır.

## 2.5. Kuvvet kontrolü için uygulanan bulanık mantık karar yapısı

Robot el sisteminin hareket kontrolü servo motorlarla yapılmakta olup, kavrayıcı uzuvlara kuvvet sensörleri yerleştirilerek, tutulan nesneye uygulanan kuvvetin ölçülmesi ve geri besleme yapılabilmesi sağlanmaktadır. Kullanıcı tarafından farklı kavrama komutlarının gönderilebilmesi için ise potansiyometre kullanılmıştır. Potansiyometreden gönderilen sinyal doğrultusunda sistem kavrama kuvvetini belirlemektedir. Her parmak için bulanık mantık kullanılarak, potansiyometre ve kuvvet sensörü verileri ile kuvvet geri beslemeli

kontrolcü geliştirilmiştir. Şekil 6'da işaret parmağı için oluşturulan bulanık kontrolcü sisteminin blok diyagramı sunulmaktadır.

Bu sistemde robot el üzerinde bulunan kuvvet sensör verileri ile kullanıcıdan gelen komut doğrultusunda parmakların açılması veya kapanması için servo motorlara uygun PWM (dalga genişlik modülü) sinyali gönderilerek açı kontrolü yapılmaktadır. Gönderilecek olan PWM sinyaline bulanık mantık kontrolör ile karar verilmektedir. Bu sayede kullanıcı temelli, kuvvet geri beslemesiyle parmaklarını kuvvete göre nesneye uyarlayan akıllı bir sistem geliştirilmiştir.



Şekil 6. Geliştirilen kontrol sisteminin blok diyagramı

## 2.6. Tasarlanan bulanık mantık kontrolörünün özellikleri ve yapısı

Tasarlanan bulanık mantık kontrolör her bir parmak için 2 sensör ve 1 kullanıcı sinyali olmak üzere 3 girdiye göre karar vermekte olup 1 çıktı üretmektedir. Sistemde kuvvet kontrolünün sağlanması için konum kontrolü yapılmaktadır. Tablo 2 ve Tablo 3'te Bulanık mantık kontrolör için oluşturulan dilsel kural tabloları verilmektedir. Dilsel kural tablosu kullanıcı temelli oluşturulmuş ve 125 kural tanımı yapılmıştır. Tablolara bakıldığında sistem durumu önce kuvvet sensöründen gelen verilere göre karar almakta, ardından kullanıcıdan gelen veri ile gerekli kontrol sinyalini göndermektedir.

Okunan sensör değerleri bulanık mantık kural tablosunda: az, az-orta, orta, çok-orta ve çok olmak üzere 5 girdi üyelik kümesinde tanımlanmıştır. Tablo 2'de sunulan kural tablosunda: parmak ucundaki sensör ve avuç

içerisindeki sensör üyelik kümesi değerlerine göre sırasıyla D1; az ve az, az ve az-orta durumunu D2; az ve orta, az-orta ve az-orta, az-orta ve orta, çok-orta ve az durumunu, D3; az-orta ve çok-orta, orta ve orta, çok ve az durumunu, D4: çok ve az-orta, çok-orta ve orta, orta ve çok, çok-orta ve çok-orta durumunu, D5: çok ve çok-orta, çok ve çok durumunu temsil etmektedir. Tablo 3'te sunulan girdilere göre çıktı üyelik kümeleri dilsel olarak: NB; negatif-büyük, NO; negatif orta, NK; negatif-küçük, S; sıfır, PK; pozitif-küçük, PO; pozitif-orta, PB; pozitif-büyük şeklinde tanımlanmıştır.



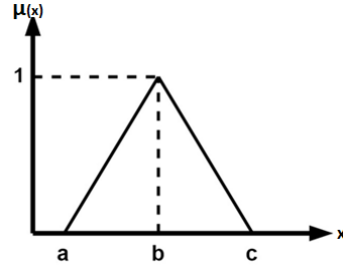
**Tablo 2.** Kural tablosu 1

Parmak Ucundaki FSR Sensörü	Avuç İçindeki FSR Sensörü					
		Az	Az-Orta	Orta	Çok-Orta	Çok
	Az	D1	D1	D2	D2	D3
	Az-Orta	D1	D2	D2	D3	D4
	Orta	D2	D2	D3	D4	D4
	Çok-Orta	D2	D3	D4	D4	D5
	Çok	D3	D4	D4	D5	D5

**Tablo 3.** Kural tablosu 2

1. Kural Tablosu Sonucu	Kullanıcıdan Gelen Komut					
		Bırak	Hafif-Tut	Tut	Hafif-Sık	Sık
	D1	NK	PK	PO	PB	PB
	D2	NK	S	PK	PO	PB
	D3	NO	NK	S	PK	PO
	D4	NB	NO	NK	S	PK
	D5	NB	NB	NO	NK	S

Bulanık mantık kontrol sisteminde Mamdani bulanık çıkarım sistemi (FIS) tanımlanmıştır. FIS sistemi 3 girdi ve 1 çıktı üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır. FIS sisteminin üyelik fonksiyonları Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonu olarak üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonu, karar vericilerin kullanımı ve hesaplaması için kolay olması sebebiyle tercih edilmiştir[30]. Ayrıca girdi ve çıktılar üzerinde hesaplama basitliği nedeniyle üçgen, bulanık küme olarak kabul edilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonu Şekil 7'de gösterilmekte ve Denklem 3'te matematiksel olarak ifade edilmektedir [31].

**Şekil 7.** Üçgen üyelik fonksiyonu

$$\mu_A(x) = \begin{cases} a \leq x < b & \rightarrow \frac{(x-a)}{(b-a)} \\ b \leq x \leq c & \rightarrow \frac{(c-x)}{(c-b)} \\ x < a \text{ veya } x > c & \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

Denklem 3'te  $\mu_A$  üyelik derecesi, **a** başlangıç sınır değeri, **c** bitiş sınır değeri ve **b** en çok üyelik derecesine sahip olunan noktadır.

Kuvvet sensörü üzerine 0-600 g aralığında kuvvet uygulanarak test edilmiştir. Bu test sonucunda 0-600 g kuvvet aralığına karşılık mikrodenetleyici tarafından 0-850 aralığında sayısal değerler elde edilmiştir. Elde edilen sayısal değerler bulanık mantık girdi üyelik kümelerinin parametrelerinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Bu parametreler ve kuvvet karşılıkları Tablo 4'te sunulmuştur. Kullanıcı tarafından gönderilen kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi parametreleri Tablo 5'te, bulanık mantık çıktı üyelik kümesi parametreleri Tablo 6'da sunulmuştur. Tablo 5'te bulunan kullanıcı kontrol sinyali girdi üyelik kümesi parametreleri bir potansiyometreden elde edilen dijital değerler doğrultusunda tanımlanmıştır. Potansiyometreden 0 ile 1023 arasında lineer bir şekilde değişen dijital değerler elde edilmekte ve tablo 5'te bulunan parametrelerin tanımlanmasında, elde edilen bu dijital değer aralığı, eşit değer aralıklarıyla kullanılmıştır.

**Tablo 4.** Parmaktaki ve avuç içindeki FSR'nin girdi üyelik kümesi parametreleri

Parmaktaki ve Avuç İçindeki FSR'nin Girdi Üyelik Küme İsimleri	Okunan Dijital Değerlere Karşılık Gelen Kuvvet (g)	Okunan Dijital Değere Göre Üyelik Kümesi Parametreleri
Az	[0 0 150]	[0 0 360]
Az-Orta	[0 150 300]	[0 360 680]
Orta	[150 300 450]	[360 795] 680
Çok-Orta	[300 450 600]	[680 850] 795
Çok	[450 600 600]	[795 850] 850

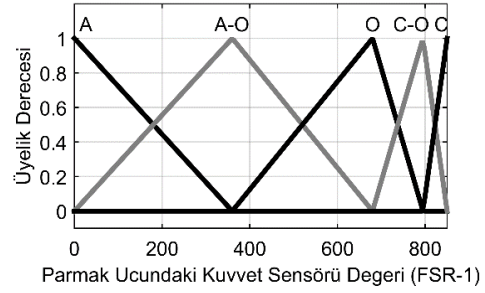
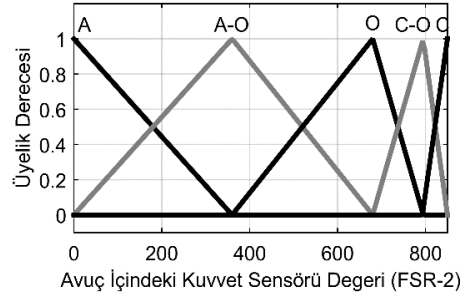
**Tablo 5.** Kullanıcı kontrol sinyalinin girdi üyelik kümesi parametreleri

Kontrol Sinyalinin Girdi Üyelik Küme İsimleri	Tanımlanan Girdi Üyelik Küme Parametreleri
Bırak	[0 0 256]
Hafif Tut	[0 256 512]
Tut	[256 512 768]
Hafif Sık	[512 768 1023]
Sık	[768 1023 1023]

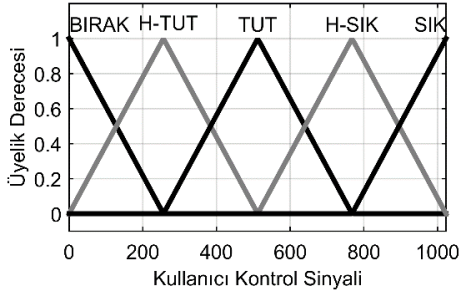
**Tablo 6.** Servo motorun çıktı üyelik kümesi parametreleri

Servo Motorun Çıktı Üyelik Küme İsimleri	Tanımlanan Çıktı Üyelik Küme Parametreleri
Negatif Büyük (NB)	[-6 -6 -4]
Negatif Orta (NO)	[-6 -4 -2]
Negatif Küçük (NK)	[-4 -2 0]
Sıfır (S)	[-2 0 2]
Pozitif Küçük (PK)	[0 2 4]
Pozitif Orta (PO)	[2 4 6]
Pozitif Büyük (PB)	[4 6 6]

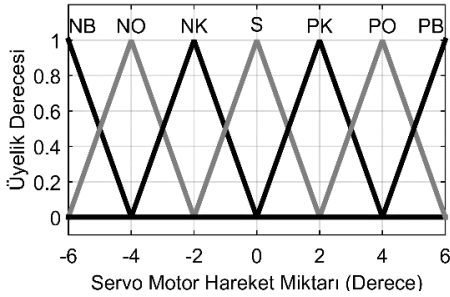
Kuvvete göre kuvvet sensörlerinin girdi üyelik fonksiyonu parametreleri 150 gramlık aralıklarla belirlenmiştir. Şekil 8 ve 9'da gösterilen girdi üyelik fonksiyonlarının sınırları robot el üzerinde kullanılan kuvvet sensörleri tarafından ölçülen ve mikrodenetleyici tarafından elde edilen dijital değerler doğrultusunda tanımlanmıştır. Ancak kuvvete göre kuvvet sensöründen elde edilen dijital değerlerin lineer olmaması sebebiyle üyelik fonksiyonlarının parametre aralıkları eşit değildir.

**Şekil 8.** Parmak ucundaki kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu**Şekil 9.** Avuç içindeki kuvvet sensörünün üyelik fonksiyonu

Şekil 10'da kullanıcıdan gelen kontrol sinyalinin girdi üyelik fonksiyonu gösterilmektedir. Kontrol sistemi kullanıcı temelli bir sistem olup, kullanıcının hatası minimize edilmek istenmektedir. Şekil 11'de ise sistemin çıktısının üyelik fonksiyonu gösterilmektedir. Sistemin çıktısında kuvvet kontrolü için servo motorun kaç derece açı ile dönmesi gerektiğine karar verilmektedir.

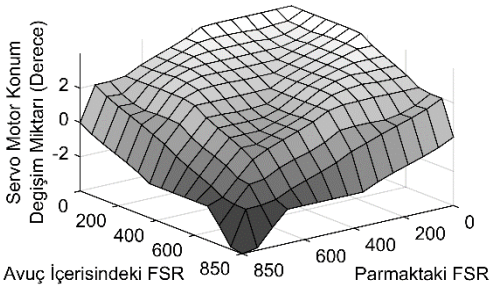


Şekil 10. Kullanıcıdan gelen kontrol sinyalinin üyelik fonksiyonu

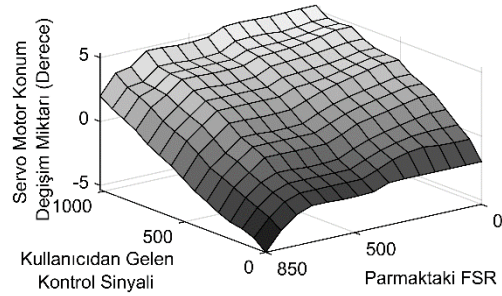


Şekil 11. Servo motorun hareket miktarı üyelik fonksiyonu

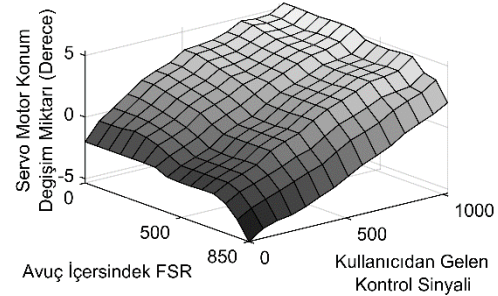
Girdi üyelik fonksiyonları ile çıkış üyelik fonksiyonu ağırlık merkezi yöntemi ile hesaplanmıştır ve uygulanacak olan konum değişim miktarı elde edilmiştir. Servo motor için elde edilen konum değişim miktarının yüzey grafikleri: Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 12. Avuç içerisindeki ve parmaktaki kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği



Şekil 13. Kullanıcıdan gelen kontrol sinyali, parmaktaki kuvvet sensörünün değeri ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği



Şekil 14. Avuç içerisindeki kuvvet sensörünün değeri, kullanıcıdan gelen kontrol sinyali ve servo motor konum değişim miktarının bulanık mantık yüzey grafiği

### 3. Bulgular

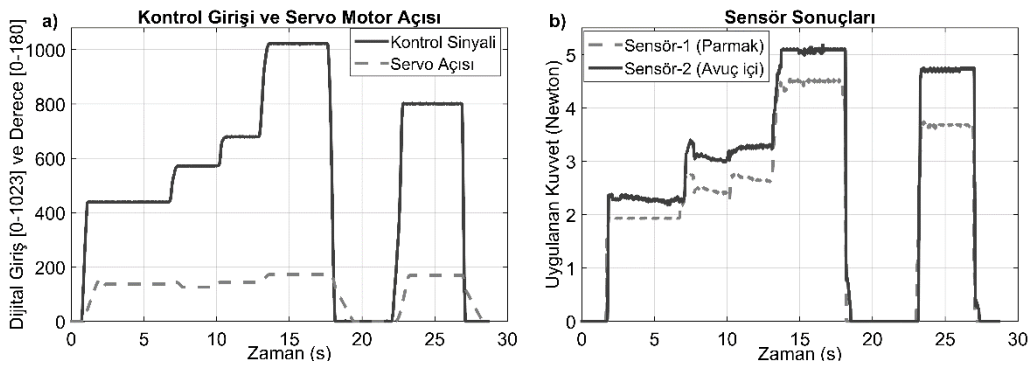
Geliştirilen kontrol sistemi kullanıcı temelli oluşturulmuş olup, kullanıcıdan gönderilen sinyal doğrultusunda kavrama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Nesnenin kavranmasında; bırak, hafif-tut, tut, hafif-sık ve sık komutları tanımlanmış ve uygulanmıştır. Hafif-tut komutunda nesneye düşük kuvvet uygulanarak nesnenin kavranması istenilmektedir, tut komutunda ise nesneye zarar vermeden, stabil bir kavrama sağlanması amaçlanmaktadır. Hafif sık komutunda nesneye tut komutuna göre daha fazla kuvvet uygulanarak nesnenin kavranmasının sağlanması, sık komutunda ise nesneye yüksek kuvvet uygulayarak nesnenin kavranması istenmektedir. Bırak komutunda ise robot elin parmaklarının açılarak nesnenin bırakılması amaçlanmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda, bir karar destek sistemi tasarlanmış ve robot

elin nesnelere kavramasında hassas kuvvet kontrolü sağlanmıştır.

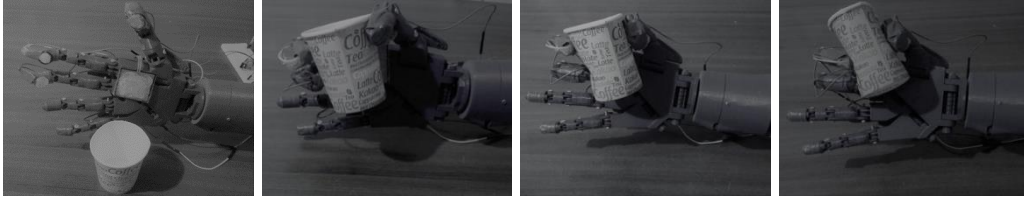
Tasarlanan karar destek sistemi ile robot el kontrol edilmiş ve farklı kavrama komutlarında nesneye uygulanan kuvvet değişiminin gözlemlenebilmesi için nesne olarak karton bir bardak kullanılmıştır. Deney sonucunda robot elin bir parmağı için elde edilen grafikler Şekil 15'te sunulmuştur. Sistemde uygulanan kontrol sinyali ile parmağı hareket ettiren servo motorun konumu Şekil 15a'da parmak ucu ve avuç içi sensörlerinden alınan ölçüm sonuçları ise Şekil 15b'de sunulmaktadır. Şekil 15'te, 0 ile 18 (s) zaman aralığında, robot ele bırak, tut, hafif sık ve sık kavrama komutları gönderilmiştir. Bu komutlar doğrultusunda, robot el karton bardağı farklı kuvvet aralıklarında kavramıştır. Bu kavrama işlemleri sonucunda elde edilen görseller Şekil 16'da sunulmaktadır. Başlangıçta Şekil 16a 'da robot ele bırak komutu uygulanmaktadır. Bu sebeple robot el açıktır. Şekil 16b 'de robot el tut komutunu uygulamakta ve karton bardak zarar görmeden kavranmıştır. Şekil 16c 'de robot ele hafif sık komutu gönderilmiş, robot el nesneyi tut komutuna göre daha yüksek kuvvetle kavramış ve bu sebeple karton bardak deforme olmuştur. Şekil 16d'de ise robot ele sık komutu gönderilmiştir. Sık komutu doğrultusunda nesne daha yüksek kuvvetle kavranmış ve hafif sık komutundaki duruma göre daha fazla deforme olmuştur. Grafik ve şekillerde de görüldüğü üzere kontrol sistemi kullanıcı

komutu doğrultusunda farklı kavrama komutlarını başarı ile yerine getirebilmektedir.

Kontrol sistemi; avuç içerisine yerleştirilen nesnenin üzerine uygulanacak kuvveti, parmakların konumunu değiştirerek belirlemektedir. Robot eli başlangıçta aktif hale getirecek ve hafif tut, tut, hafif sık, sık, bırak komutlarını gönderecek kullanıcı kontrol sinyali bir potansiyometre ile üretilmektedir. Kullanıcı bu potansiyometre üzerinden üretilen analog sinyal yardımıyla robot elin nesnelere kavraması sırasında uygulayacağı kuvvet miktarını tanımlamaktadır. Oluşturulan bulanık mantık kontrol yapısı; potansiyometreden 0-1023 aralığında okunan dijital sinyali değerlendirme aşamasında kullanmaktadır. Böylece robot elin nesneyi kavrama esnasında uygulaması gereken kuvvetin belirlenmesi için kontrolcüye bilgi sağlamaktadır. Bu bilgi ile uygulanacak kuvvet; az, az-orta, orta, çok-orta veya çok olarak belirlenmektedir. Ölçüm sonuçları ile kuvvet sensörleri için bulanık mantık üyelik kümelerinde tanımlanan parametre sınırları bölüm 2.6'da Tablo 4'te sunulmuştur. Parmakların nesne ile temas anında ölçülen kuvvet değeri bulanık mantıkla oluşturulan karar destek sistemi tarafından değerlendirilmektedir. Kontrol sinyalinin durumuna göre kuvvet ölçüm sonucu istenilen değere geldiğinde servo motor durdurularak nesneye uygulanan kuvvetin sabit kalması sağlanmaktadır.



Şekil 15. Robot elin tek parmağı için üretilen kontrol sinyali ile ölçüm sonuçları



**Şekil 16a.** Robot ele bırak komutunun uygulanması

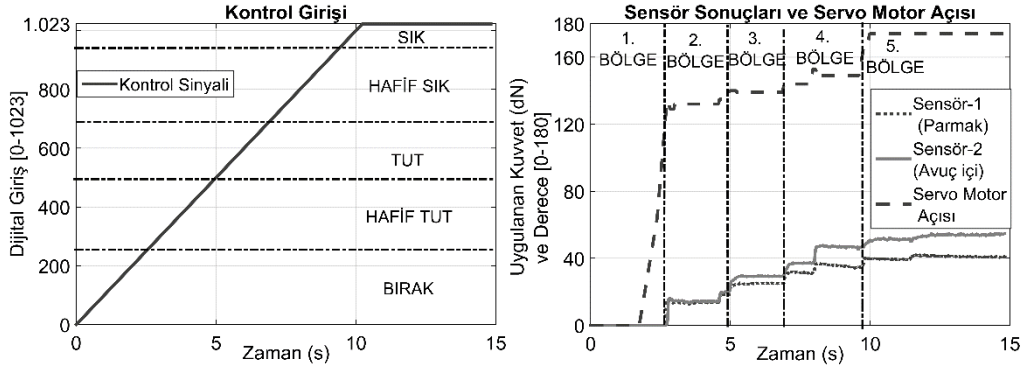
**Şekil 16b.** Robot ele tut komutunun uygulanması

**Şekil 16c.** Robot ele hafif sık komutunun uygulanması

**Şekil 16d.** Robot ele sık komutunun uygulanması

Farklı kontrol sinyali değerlerindeki durumları gösterebilmek için robot ele, kontrol sinyali olarak rampa girdisi uygulanmıştır. Rampa girdisinin değeri, elde edilen servo motor konumu ve ölçülen sensör sonuçları Şekil 17'de sunulmuştur. Rampa girdisinin değeri referans değer olup, bu değer ile nesneye uygulanacak kuvvet miktarına karar verilmektedir. Sistem çalıştırılıp rampa girdisi uygulandığında; başlangıçta bulanık mantık kontrolör bırak komutunu değerlendirmiştir. 1. bölgede servo motor sıfır derece konumunda ve sensörlerden gelen veriler sıfır olduğu için sistem önce yanıtız kalmıştır. Rampa girdisinin değeri artmaya başlayıp hafif-tut komutu devreye girdiğinde; servo motora uygun sinyal gönderilerek parmak kapanmaya başlamıştır. Nesne kavranırken devamlı bulanık mantık kontrolör sensör verilerini ve rampa girdisini değerlendirmiştir. Şekil 17'de 2. bölgede görüldüğü üzere; hafif-tut komutu doğrultusunda nesnenin, bulanık mantık kontrolör tarafından elde edilen uygun kuvvet aralıklarında sabit kuvvetle kavranması sağlanmıştır. Bu sayede nesneye daha fazla kuvvet uygulanması engellenmiştir. Rampa girdisinin değeri artıp tut komutu devreye girdiğinde ise: Şekil 17'de 3. Bölgede tut komutu doğrultusunda bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen kuvvet aralıklarında nesnenin stabil bir şekilde kavrandığı görülmektedir. Rampa girdisi hafif sık komutunu gönderdiğinde: nesnenin bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen uygun kuvvet aralığında kavranması için servo motora bulanık mantık kontrolör tarafından hesaplanan kontrol sinyali gönderilmiştir. Ve Şekil 17'de 4. bölgede görüldüğü gibi, nesnenin tut komutuna

göre daha yüksek kuvvete kavranması sağlanmıştır. Rampa girdisinin değeri artıp sık komutu devreye girdiğinde ise; motora gönderilen sinyal doğrultusunda servo motorun torku artmış ve nesne daha yüksek kuvvetle kavranmaya başlamıştır. Sık komutu doğrultusunda uygulanan kuvvet miktarı ve servo motorun konum değişimi Şekil 17'de 5. bölgede gösterilmektedir. 17'de görüldüğü üzere rampa girdisinin değeri değiştikçe sistemin kavrama kuvvetinin değeri değişmektedir. Bulanık mantık kontrolör sistemi devamlı değerlendirerek servo motora gönderilecek sinyale karar vermektedir. Bu sinyal yardımıyla parmakların konumu ve nesneye uyguladıkları kuvvet miktarları değişmektedir. Oluşturulan sistemde: bulanık mantık temelli kontrol sistemi yardımıyla robot el, gerekli hassasiyette nesnelere kavramaktadır. İnsanlar nesnelere kavramak için başlangıçta parmaklarının konumunu hızlı bir şekilde değiştirerek, nesneye teması sağlamaktadır. Daha sonra duyu organlarından gelen verilere göre, parmaklara daha yavaş ve küçük hareketler yaptırılarak nesnelere uygun kuvvette, stabil bir şekilde kavranmaktadır. Robot elin parmakları açık durumdayken, kavrama komutlarından biri devreye girdiğinde parmaklar nesneye dokunana kadar bulanık mantık kontrolör servo motorun konumunu hızlı bir şekilde değiştirmesini sağlamak ve parmaklar kapanmaktadır. Nesneye temas anından sonra ise bulanık mantık kontrolör servo motorun daha küçük miktarda konum değiştirmesini sağlayarak ya da mevcut konumunu sabit tutarak nesnenin kavranma kuvveti kontrol edilmektedir.



Şekil 17. Rampa girdisi ve sistem cevabı

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Sunulan çalışmada: 3 boyutlu yazıcı ile 5 parmaklı robot elin basımı yapılmıştır. Basımı ve montajı yapılan elin üzerine kuvvet sensörleri yerleştirilmiştir. Gerekli mekanik ve elektromekanik sistemlerinde el içerisine yerleştirilmesi ve elektronik donanımın bağlantılarının yapılması ile sistemin mekanik ve donanımsal yapısı tamamlanmıştır. Sistemde kullanılan kuvvet sensörleri üzerine ağırlık konularak dijital değerler elde edilmiş ve eğri uydurma yöntemi ile sensörün ağırlık-okunan dijital değer değişiminin denklemi elde edilmiştir. Oluşturulan sistemi kontrol etmek için bulanık mantık kullanılarak kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan kapalı kontrol sistemi her bir parmak için 2 sensör ve 1 kullanıcı sinyali olmak üzere 3 girdiye göre karar vermekte olup 1 çıktı üretmektedir. Bütün parmaklar için oluşturulan kontrol sistemi yapısı aynı olup, bu çalışmada robot elin bir parmağının kontrolü için oluşturulan yapı tanıtılmış ve deney sonuçları sunulmuştur.

Manipulatörler nesnelere kavrarken nesneye uyguladıkları kuvveti hassas bir şekilde kontrol etmeleri gerekmektedir. Aksi takdirde nesnelere

zarar verilebilir. Kuvvet kontrolünün sağlanması, yaygın olarak kuvvet geri beslemesi ile çözümlenmektedir. Mevcut sistemlerin bir kısmı incelenmiş ve kuvvet geri beslemesine yönelik önerilen çözüm yollarının karmaşık ve çok fazla işlem gerektirdiği görülmüştür. Sunulan çalışmada kuvvet geri beslemesi ile bulanık mantık kontrolcü tasarlanmıştır ve önerilen kontrol yapısıyla özellikle hassas nesnelere kavranmasında karşılaşılan kuvvet belirsizlik probleminin çözülmesi amaçlanmıştır. Bulanık mantık kontrolcü ile lineer olmayan sensör verileri işlenerek, basit ve geniş uygulama alanına sahip bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcü, kullanıcı sinyali doğrultusunda nesnelere kavrama kuvvetine karar vermektedir. Nesnenin robot elden düşmeyeceği kadar çok, deforme olmayacağı kadar az kuvvet hesaplanarak robot ele hassas ve kararlı kavrama özelliği kazandırılabilir. Ayrıca elin kullanıcı sinyali ile nesneye yüksek, orta ya da düşük kuvvet uygulayarak kavrama yapabildiği sağlanmaktadır. Elde edilen kuvvet kontrolü sayesinde robot elde oluşabilecek kontrol yetersizliği sonucu nesnenin zarar görmesi önenebilecektir.

#### Kaynakça

- [1] MICHALEC, R 2011. Modeling and control of multifingered dextrous manipulation for humanoid robot hands. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, PhD Thesis, 588s, Paris .
- [2] Boughdiri, R., Nasser, H., Bezine, H., M'Sirdi, N. K., Alimi, A. M., Naamane, A. 2012. Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task, *Procedia Engineering*, Vol. 41, p. 923-931. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.264
- [3] Katibeha, F., Eghtesadb, M., Bazargan-Laric, Y. 2016. Dynamic modeling and control of a 4 DOF robotic finger using adaptive-robust and adaptive-neural controllers, *International Journal of Robotics*, Vol. 4, No. 4, p. 51-61.
- [4] Lin, L. R., Huang, H. P. 1996. Integrating fuzzy control of the dexterous National Taiwan University (NTU) hand., *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1(3), p. 216-229. DOI: 10.1109/3516.537044
- [5] Yang, Y., Zhang, W., Xu, X., Hu, H., Hu, J. 2017. LIPSA hand: a novel underactuated hand with linearly parallel and self-adaptive grasp, In *Mechanism and Machine Science*, 10<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 16-18 August, Wuhan, China, 739-751.

- [6] Khakpour, H., Birglen, L. 2013. Numerical analysis of the grasp configuration of a planar 3-DOF linkage-driven underactuated finger, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 8(2), p. 021010-1 ,021010-8 . DOI: 10.1115/1.4007359
- [7] Argonne National Laboratory. 1949. Reactors: Modern-Day Alchemy Argonne National Laboratory. <http://www.ne.anl.gov/About/modern-day-alchemy>. (Erişim Tarihi:14.03. 2017).
- [8] Devol, J. G. C. 1961 . U.S. Patent No. 2,988,237. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [9] Devol, G. 1959. Robotic Industries Association “A Tribute To Joseph Engelberger”. <http://www.robotics.org/joseph-engelberger/about.cfm> ( Erişim Tarihi: 14 Mart 2017).
- [10] Hirose, S., Umetani, Y. 1978 . The development of soft gripper for the versatile robot hand, *Mechanism and machine theory*, Cilt. 13(3), s. 351-359. DOI: 10.1016/0094-114X(78)90059-9
- [11] Bekey, G. A., Tomovic, R., Zeljkovic, I. 1990. Control architecture for the Belgrade/USC hand. In *Dextrous robot hands*. Springer, New York, NY. 136-149s.
- [12] Yan, J., El-Baradie, M. A., Hashmi, M. S. J. 1992. The development of a robotic compliance control system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Cilt. 32(4), s. 477-486. DOI: 10.1016/0890-6955(92)90039-j
- [13] Lin, L. R., Huang, H. P. 1998. NTU hand: A new design of dexterous hands, *Journal of Mechanical Design*, Cilt. 120(2), s. 282-292. DOI: 10.1115/1.2826970
- [14] Fukaya, N., Toyama, S., Asfour, T., Dillmann, R. 2000. Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)*. Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference, 30 Oct-5 Nov. ,Japan, Vol. 3, pp. 1754-1759.
- [15] Butterfaß, J., Grebenstein, M., Liu, H., Hirzinger, G. 2001. DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand. In *Robotics and Automation, 2001*. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Vol. 1, 21-26 May, South Korea, pp. 109-114.
- [16] Kawasaki, H., Komatsu, T., Uchiyama, K. 2002. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Cilt. 7(3), s. 296-303. DOI: 10.1109/TMECH.2002.802720
- [17] Pons, J. L., Rocon, E., Ceres, R., Reynaerts, D., Saro, B., Levin, S., Van Moorleghe, W. 2004. The MANUS-HAND dextrous robotics upper limb prosthesis: mechanical and manipulation aspects, *Autonomous Robots*, Cilt. 16(2), s. 143-163. DOI: 10.1023/B:AURO.0000016862.38337.f1
- [18] Zollo, L., Roccella, S., Guglielmelli, E., Carrozza, M. C., Dario, P. 2007. Biomechatronic design and control of an anthropomorphic artificial hand for prosthetic and robotic applications, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Cilt. 12(4), s.418-429. DOI: 10.1109/TMECH.2007.901936
- [19] Liu, H., Meusel, P., Seitz, N., Willberg, B., Hirzinger, G., Jin, M. H., Xie, Z. W. 2007. The modular multisensory DLR-HIT-Hand, *Mechanism and Machine Theory*, Cilt. 42(5), s. 612-625. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.013
- [20] Kroemer, O. B., Detry, R., Piater, J., Peters, J. 2010. Combining active learning and reactive control for robot grasping, *Robotics and Autonomous Systems*, Cilt. 58(9), s.1105-1116. DOI: 10.1016/j.robot.2010.06.001
- [21] Teng, M. C., Tsai, Y. J., Hsiao, C. C. 2013. Mechanical Design and Kinematic Analysis of a 10 DOF Robot Manipulator, *IFAC Proceedings Volumes*, Cilt. 46(5), s.301-306. DOI: 10.3182/20130410-3-CN-2034.00022
- [22] Chen, W., Xiong, C. 2016. On adaptive grasp with underactuated anthropomorphic hands, *Journal of Bionic Engineering*, Cilt. 13(1), s. 59-72. DOI: 10.1016/S1672-6529(14)60160-8
- [23] Zaidi, L., Corrales, J. A., Bouzgarrou, B. C., Mezouar, Y., Sabourin, L. 2017. Model-based strategy for grasping 3D deformable objects using a multi-fingered robotic hand, *Robotics and Autonomous Systems*, Cilt. 95, s. 196-206. DOI: 10.1016/j.robot.2017.06.011
- [24] Xu, S., Xu, Y., Xu, X. 2018. Structural design and kinematics analysis of SHU-hand II humanoid robotic hand. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 16-17 June, China, Vol. 394, No. 4, p. 042068.
- [25] Uraz, C., Macit, Ş. 2018. Electroless Cu Plating on ABS Plastic by Using Environmentally Friendly Chemicals, *Journal of Science and Engineering*, Cilt. 20(59), s. 369-375. DOI: 10.21205/deufmd.2018205930
- [26] Langevin, G. 2012. Inmoov Open Source 3D printed life-size robot. <http://inmoov.fr/hand-and-forarm/> (Erişim Tarihi: 19.03.2018).
- [27] FSR 402 Data Sheet. 2010. <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf> (Erişim Tarihi: 03.06.2018).
- [28] Türkbey, O. 2003. Çok Amaçlı Makina Sıralama Problemi İçin Bir Bulanık Güçlü Metod, *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen Ve Mühendislik Dergisi*, Cilt. 5, s.81-98.
- [29] Kubat, C. 2014. MATLAB: Yapay Zeka ve Mühendislik Uygulamaları. Pusula yayınları
- [30] Kaftan, İ., Balkan, E., Şalk, M. 2013. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Ve Jeofizikte Kullanım Alanları: Sismoloji Örneği, *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen Ve Mühendislik Dergisi*, Cilt. 15(2), s.15-29.
- [31] Kaufmann, A., Gupta, M. M. 1988. *Fuzzy mathematical models in engineering and management science*, Elsevier Science Inc.

