



## Esnek Robotların Tasarım, Kontrol ve İmalat Çalışmaları

### Design, Control and Manufacturing Studies of Soft Robots

Seda Yetkin<sup>\*1</sup> , Gonca Ozmen Koca<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Bitlis Eren Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 13000 Bitlis, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 23000 Elazığ, TÜRKİYE

**Başvuru/Received:** 18/03/2020

**Kabul / Accepted:** 02/11/2020

**Çevrimiçi Basım / Published Online:** 18/01/2021

**Son Versiyon/Final Version:** 18/01/2021

#### Öz

Son dönemlerde teknolojinin gelişimine paralel olarak robotik sistemlerle ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Robotik sistemlerin amacı insanların yaşamını kolaylaştırmaktır. Bu amacı gerçekleştirebilmek için robotik sistemler oluşturulurken daha çok hayvanlar ve insanların günlük hareketlerinden esinlenmişlerdir.

Bu çalışmada, giderek önem kazanan ve robotiğin yeni bir alanı olan esnek robotların tasarımı, imalatı ve araştırma faaliyetleri üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar incelenerek bir derleme yapılmıştır. İncelemeler sonucunda esnek robotları; sürünerek hareket edebilen, yüzebilen, rehabilitasyon amaçlı kullanılan ve tutucu olarak kullanılan esnek robotlar olarak sınıflandırılmıştır. Bu derleme makalesinde esnek robotlarda kullanılan farklı teknikler ve farklı kontrol sistemleri, farklı güç aktarım yöntemleri ve üretimi esnasında gerekli olan malzeme özellikleri anlatılmaktadır. Ayrıca farklı esnek robotların imalatı ile ilgili çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda deneysel olarak gerçekleştirilen esnek robotlarda kullanılan donanım elemanları, kontrol edinme şekilleri ve kontrol sistemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

#### Anahtar Kelimeler

*“Robotik, esnek robotlar, kontrol sistem, pnömatik sistem”*

#### Abstract

Lately, studies on robotic systems have gained speed in parallel with the development of technology. The purpose of robotic systems is to make people's lives easier. In order to realize this purpose, While creating robotic systems, they are mostly inspired by the daily movements of humans and animals.

In this study, a review is made by examining the recent studies on the design, manufacture and research activities of soft robots, which are becoming increasingly important and a new area of robotics. Soft robots as a result of the studies; They are classified as soft robots that can move by crawling, swim, are used for rehabilitation purposes and are used as grippers. In this review article, information is given about the different control systems used in soft robots, different power transmission methods, different techniques and material properties required during the production of soft robots. In addition, article on manufacturing different soft robots have been extensively study. As a result of these examinations, the hardware elements, control methods and control systems used in experimentally performed flexible robots are explained in detail.

#### Key Words

*“Robotics, soft robots, control system, pneumatic system”*

## 1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte yapay zeka uygulamaları, kontrol ve akıllı sistemler büyük önem kazanmıştır. Bu sistemlerin büyük bir kısmını robotlar oluşturmaktadır. Günümüzde robotlar; evlerde, hastanelerde, fabrikalarda vb. farklı kullanım alanları ile karşımıza çıkmaktadır (Yetkin, 2016; Wallin et al. 2018). Robotlar sayesinde insanların işleri daha da kolaylaşmıştır. Robotiğin yeni bir alanı olan esnek robotların tasarımı, imalatı ve araştırma faaliyetleri üzerine yapılan çalışmaların son dönemlerde giderek önem kazandığı görülmektedir. Bunun nedeni esnek robotlarda kullanılan yumuşak ve genişleyebilen malzemelerdir. Bu malzemeler, çalışma ortamında çarpışmadan kaynaklı oluşacak olan herhangi bir sarsıntıyı absorbe edebileceklerdir. Böylece esnek robotlar sarsıntıların azalmasını sağlayacak ve esnek robotların kırılması engellenecektir. Fakat genellikle mühendisler, esnek olmayan malzemelerden oluşan katı robotlar imal etmektedirler. Bunun nedeni ise kolayca modellenebilir olmasıdır. Esnek robotlar, katı robotlarla karşılaştırıldığında esnek olması gibi çok çekici özelliklere sahip olmalarına rağmen, kolay deforme olabilmeleri, kolayca modellenememeleri ve doğrusal olmayan sistemler için eğitilebilir modeller geliştirmenin zorluğundan kaynaklı dezavantajları bulunmaktadır.

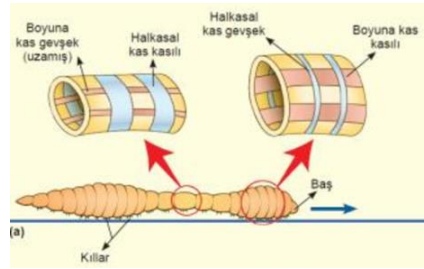
Biyoloji, esnek robotların tasarımı, imalatı ve kontrolü için mühendislere önemli bir ilham kaynağı oluşturmaktadır. Çevredeki canlılar göz önünde bulundurularak esnek robotlar üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Kim et al., 2013; Lee et al., 2017). Yapılan çalışmalara bakıldığında esnek robotlar; sürünerek hareket edebilen esnek robotlar Cao et al. (2016), yüzen esnek robotlar Marchese et al. (2014), rehabilitasyon ve biyomedikal cihazlar için kullanılan esnek robotlar Yüzgeç vd. (2016), tutucu olarak kullanılan esnek robotlar Guo et al. (2017), olarak sınıflandırılabilir.

Bu çalışma 6 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde sürünerek hareket eden, yüzebilen, rehabilitasyon amaçlı kullanılan ve tutucu olarak kullanılan esnek robotlar ile yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir. İkinci bölümde esnek robotlarla ilgili literatür çalışmalarında yer alan kontrol sistemleri, kontrol edilme şekilleri ve malzeme seçimi anlatılmıştır. Üçüncü bölümde literatür çalışmalarında kullanılan donanım elemanları verilmiştir. Dördüncü, beşinci ve altıncı bölümde ise sırasıyla sonuçlar, öneriler ve kaynaklar sunulmuştur.

### 1.1. Sürünerek Hareket Eden Esnek Robotlar

Bu bölümde iki konu üzerinde durulmuştur. Bu konulardan birincisi; esnek robotların kullanım alanlarından biri olan sürünerek hareket edebilen esnek robotların ilham kaynakları olan yuvarlak, yassı ve halkalı solucanların hidrostatik hareketleridir. İkincisi ise; sürünerek hareket eden robotlar üzerine yapılan çalışmalardır.

Yuvarlak, yassı ve halkalı solucanlar gibi bazı omurgasız hayvanlar hidrostatik iskelet yapısına sahiptir. Hidrostatik iskelet yapısına sahip hayvanlar vücut sıvısı ve bu sıvıyı hareket ettirerek basınç oluşturan kaslardan meydana gelir. Solucanların bağırsaklarında 100-200 arasında halka (segment) ve kas tabakası bulunmaktadır (URL-1; URL-2). Şekil 1'de görüldüğü gibi bir toprak solucanı halka ve boyuna uzanmış şekilde bulunan iki farklı kas yapısına sahiptir.

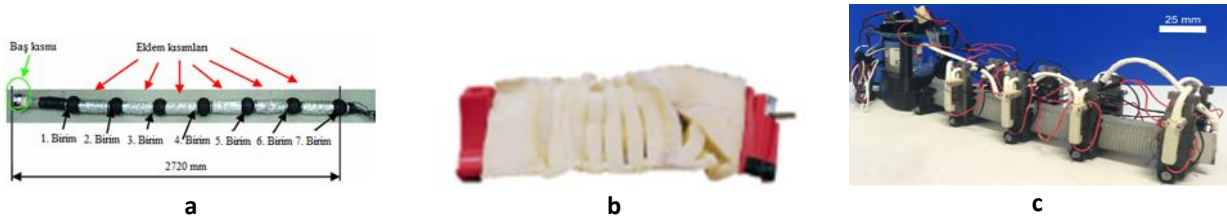


Şekil 1. Toprak solucanın iskelet yapısı (URL-3)

Toprak solucanı, Şekil 1'de gösterilen her iki kası da kullanarak baştan kuyruğa doğru ilerleyen ritmik kasılma dalgalarını oluşturmaktadır. Halka şeklindeki kaslar kasılarak vücut akışkanına basınç yapar ve solucan uzamaya başlar. Solucanın ön ucundaki kıllar yardımıyla zemine tutunduktan sonra solucanda bulunan diğer boyuna kaslar kasılır; vücudun arka kısmı öne doğru çekilerek vücut kalınlaşır. Böylece yassı solucan, hidrostatik hareketini sağlamış olur (URL-3). Hidrostatik hareket yaparak ilerleyen solucanlardan esinlenilerek Tomita ve arkadaşları, şebeke su borularında meydana gelen kazaları önlemek ve boruların iç-durum kontrolünü sağlamak için peristalsis sürünen bir robot yapmışlardır (Tomita et al., 2015). Şekil 2'de gösterildiği gibi Peristalsis robot, 6 kısımdan oluşmuştur. 5 eklem ve denetimin yapıldığı bir baş bölümü bulunmaktadır. Peristalsis robot, içerisine havanın gönderilip-boşaltılması ile ve sahip olduğu yapay kaslar yardımıyla hareketini sağlamış olur. Havayı sağlamak için kompresör ve havayı gönderip-boşaltmak için selenoid valf kullanılmıştır.

Sürünerek hareket eden omurgasız hayvanlardan biri ise tırtıllardır. Donatelli ve arkadaşları, tırtıllardan esinlenerek yapmış oldukları esnek bir robot olan SquMA Bot'u tanıtmışlardır (Donatelli et al., 2017). Şekil 2'de gösterilen SquMA Bot robotun gövdesinde esnek viskoelastik bir köpük olan Smooth-On FlexFoam malzemesini kullanmışlardır.

Sürünerek hareket edebilen omurgalı hayvanlardan biri ise yılanlardır yılanlardan esinlenerek Luo ve arkadaşları, yılanımsı bir esnek robot (SRS) tasarlamışlardır (Luo et al., 2015). Şekil 2'de gösterilen SRS robotun gövdesindeki her bir büküm yerine valf ve pasif tekerlek tutucuları yerleştirmişlerdir. Pasif tekerlekler, vücudun teğet ve normal yönleri arasında gerekli olan izotropik olmayan sürtünmeyi sağlamıştır.



Şekil 2. (a) Peristalsis sürünen robot (Tomita et al., 2015); (b) SquMA Bot esnek robot (Donatelli et al., 2017); (c) Yılanımsı esnek robot (Luo et al., 2015).

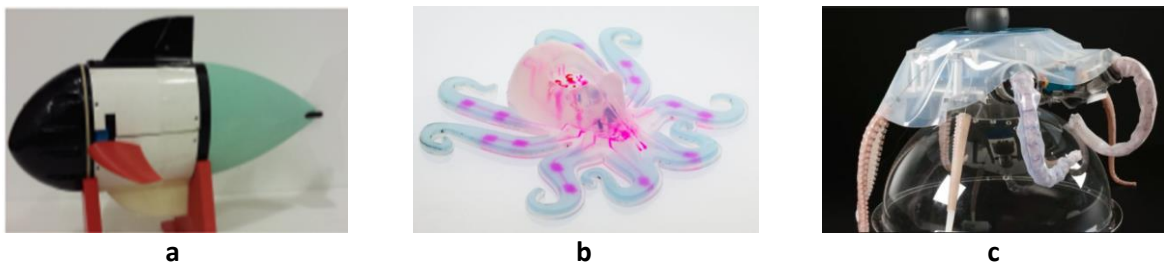
### 1.2. Yüzebilen Esnek Robotlar

Bu bölümde, su içerisinde yaşayabilen canlılardan esinlenerek yapılmış esnek robot çalışmaları hakkında detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir.

Sualtı robotları, deniz endüstrisinde ve deniz operasyonlarında yasaklı bölgelerde daha zorlayıcı görevleri üstlenmektedir. Bu durum sualtı robotlarının uzaktan kontrolü ve otonom olarak kontrol edilmesi sorunlarını ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunları ortadan kaldırmak için manevra yeteneğine sahip ve esnek olan sualtı robotları geliştirilmiştir.

Son yıllarda sualtı robotlarının tasarımını gerçekleştirmek için sualtı canlılarının yüzmeye stratejileri, fizyolojik yapıları ve hidrodinamikleri incelenmektedir. Bu incelemelere bakıldığında en çok balıklardan ilham alınarak yapılan biomimetrik robot balıklarının tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir (Koca vd., 2018; Yetkin vd. 2017; Ay vd. 2017; Ay vd. 2018 ). Sualtı canlılarından esinlenilerek gerçekleştirilen robot balıkların gövdesi esnek yapıdan yapılırsa robot balıklar daha hızlı hareket etme özelliğine sahip olabilirler. Marchese ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Marchese (2014), bir balığın ince anatomik şeklini taklit eden gömülü kanalları içeren bir gövde gerçekleştirilmiştir. Katzschman ve arkadaşları ise çalışmalarında, hidrolik olarak çalıştırılan, 3 boyutlu olarak yüzebilen, otonom ve esnek gövdeli bir robot balık tasarlamışlardır (Katzschman et al., 2016). Şekil 3'de gösterilen robot balığın gövdesi pnomatik güç yerine hidrolik güç altında uzayabilmektedir.

Biyolojik sınıflandırmalara bakıldığında ise kalamar, ahtapot ve mürekkep balığı türleri esnekçilerin üyelerinden biri olan kafadanbacaklılar (cephalopoda) sınıfına aittir. Esnek gövdeli olmaları ve suda hareket edebilmeleri sebebiyle bilimsel olarak birbirine yakınlıkları bulunmaktadır. Fakat daha alt sınıflarına bakıldığında kalamar ve mürekkep balığı 10 kollular olarak adlandırıldığı, ahtapotun ise 8 kollular olarak adlandırıldığı bilinmektedir (Şen, 2006; Haimovici et al., 2009). Harvard Üniversitesindeki araştırmacılar (URL-4), kendi kendine hareket edebilen ve hareketini sağlamak için gerekli olan güç kaynağını elektrik yerine kimyasal reaksiyondan alan OCTOBOT adı verilen ahtapot şeklinde bir robot tasarlamışlardır. Şekil 3'de gösterilen OCTOBOT' un silikon gövdesinin içerisindeki hidrojen peroksit kimyasal malzemesinin dolaşımına bağlı olarak hareket sağlanmıştır. Hill ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (URL-5; URL-6), gerçek bir ahtapotun uzuvlarında bulunan boyuna ve enine kaslara benzemesi için şekil hafızalı alaşım (SMA) yaylar kullanılarak bir prototip kol inşa edilmiştir. Şekil 3'de gösterilen SMA yaylara farklı akım değerleri gönderilmesi ile uzama, kısalma ve bükülme hareketini gerçekleştirmiştir.



Şekil 3. (a) Esnek gövdeli robot balık (Katzschman et al., 2016); (b) OCTOBOT ahtapot robot (URL-4); (c) Ahtapot robot (URL-5)

### 1.3. Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robotlar

İnsanlarda meydana gelen hareket bozuklukları zamanla insanın yaşam kalitesini düşürür ve belirli bir süre sonra hareket kabiliyetinin yok olmasına neden olur. Özellikle insan kişisel ihtiyaçlarını karşılayabilmek için üst ekstremiteye ihtiyaç duyar. Üst ekstremitenin fonksiyonelliğinin kaybedilmesi yaşlılarda sıklıkla görülmenin yanı sıra kazalarla da meydana gelebilmektedir. Üst ekstremitenin fonksiyonelliğini geri kazanabilmek için birçok fizyoterapi yöntemi kullanılmaktadır. Teknolojideki gelişmelerle birlikte fizyoterapi ve rehabilitasyon alanının da meydana gelen gelişmeler robotik cihazların rehabilitasyonda kullanım alanlarını arttırmıştır (Chan et al., 2017; Yüzgeç et al., 2016).

Rehabilitasyon ve fizyoterapi alanlarında son dönemlerde esnek robotlar yapılmaya başlanmıştır. Bu bölümde bu alanda yapılan literatür sunulmuştur. Polygerinos et al. (2015a) çalışmasında, el doku rahatsızlığı (patolojisi) olan bireyler için yeni geliştirilen bir yardımcı esnek robot eldiveninin daha fazla geliştirilmesi, tanımlanması ve ilk değerlendirilmesi sunulmuştur. Tasarlanan

esnek robot eldiven, 500 gram ağırlığında ve 75 mm çapında bir silindiri kavrayabilmektedir. Polygerinos et al. (2015b) çalışmasında ise fonksiyonel kavrama hastalığı olan bireyler için el rehabilitasyonunu güçlendirmek üzere fiber takviyeli esnek bir robotik eldiven tasarlamışlardır. Bu robotik eldiven basınçlı akışkan altında eğilen, burulan ve yörüngede uzayan elyaf takviyeli elastomerik odalardan oluşan esnek aktüatörler kullanılmıştır. Biodesign Lab'da yürütülen bir araştırma projesinde ise tamamlanmamış bir omurilik hasarı olan hastalara kısmi el kontrolünü eski haline getirmeyi amaçlayan esnek robotik eldiven tasarlanmıştır (URL-7). Robotik eldiven içindeki her parmağın arkasına esnek aktüatörler yerleştirilmiş ve böylece kullanıcının nesnelere sıkıca kavraması sağlanmıştır. Yi et al. (2018) çalışmalarında, kullanıcı tarafından giyilebilen, 50 gramın altında ağırlığı olan ve düşük basınç ile yüksek kuvvet üreten esnek bir eldiven tasarlamışlardır. Bartlett ve arkadaşları da çalışmalarında yoğun egzersiz rejimleriyle hastalara terapi teknikleri ile el bileğini geliştirmeyi amaçlayan giyilebilir robotik bir eldiven tasarlamışlardır (Bartlett et al., 2015). Yap et al. (2017) çalışmalarında, el rahatsızlığı olan hastalara, rehabilitasyon egzersizleri yaptırmak ve günlük yaşam aktivitelerine kolaylaştırmak için kumaşa dayalı çift yönlü bir esnek robot eldiven sunulmuştur. Diğer bir çalışmada ise eldivenin aktifleştirilmesi veya devre dışı bırakılması için kullanıcı niyetinin tespit edilmesi için yüzey elektromiyografi ve radyo frekansı tanımlama tekniklerini kullanılmıştır (Yap et al., 2016). Deimel and Brock (2016), son derece uyumlu, zayıf, sağlam ve dingin bir antropomorfik el olan RBO El 2'yi sunmuşlardır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda rehabilitasyon amaçlı esnek robot el tasarımları Şekil 4'de gösterilmiştir.



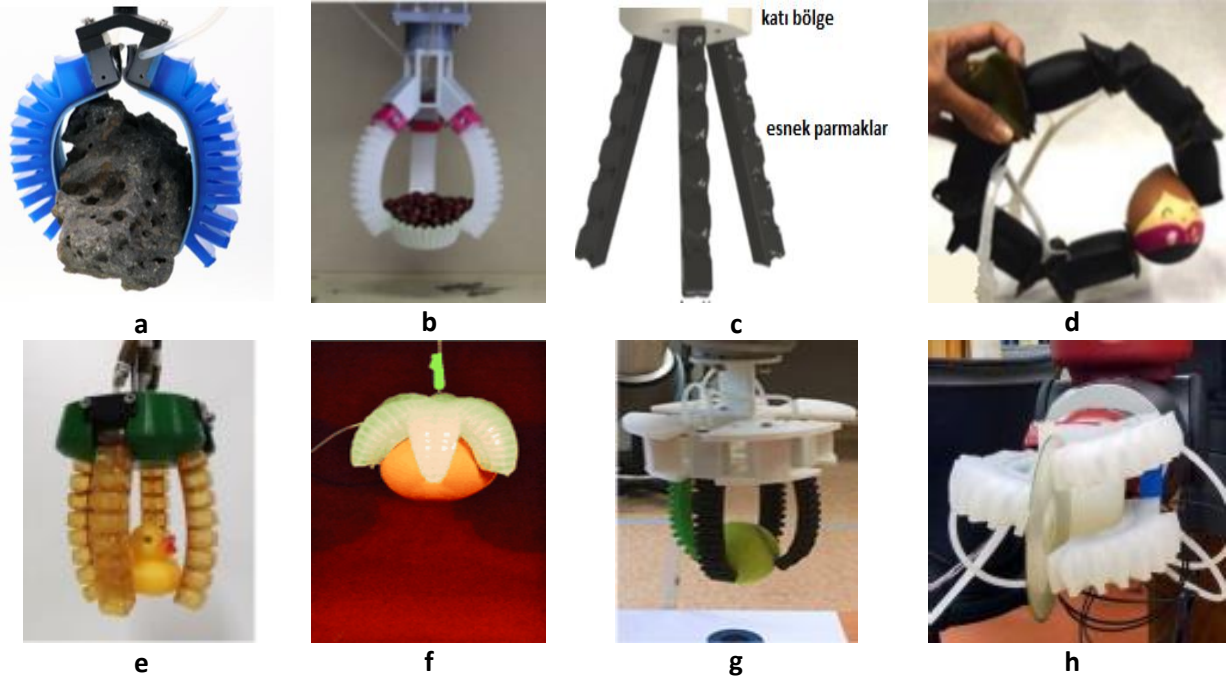
**Şekil 4.** (a) Esnek robotik eldiven (Polygerinos et al., 2015a); (b) Fiber takviyeli (Polygerinos et al., 2015b); (c) Esnek robotik eldiven (URL-7); (d) Esnek eldiven ve çift yönlü doğrusal esnek aktüatör (Yi et al., 2018); (e) Giyilebilir robotik bir eldiven tasarlamışlardır (Bartlett et al., 2015); (f) Esnek termoplastik poliüretan kaplı eldiven (Yap et al., 2017); (g) Elektro-pnömatik esnek eldiven (Yap et al., 2016); (h) DielsAlder polimerler el (Zhu et al., 2017); (i) RBO El 2 (Deimel and Brock, 2016).

#### 1.4. Tutucu Olarak Kullanılan Esnek Robotlar

İnsanların günlük yaşantılarında bir eşyayı bir yerden alıp başka bir yere taşımak ve bu işi sürekli olarak yapma gereksinimlerini karşılamak amacıyla tutucu teknolojileri üzerine birçok çalışma geliştirilmiştir (Shintake et al., 2018; Wang et al., 2018). Bu bölümde tutucu teknolojisinin yeni bir alanı olan esnek tutucular üzerine yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Guo et al. (2017), kısıkaçların sebep olduğu yumuşak doku zedelenmelerini en aza indirmek için yeni bir esnek tutucu tasarlamış ve üretmişlerdir. Bu esnek tutucu; 0.8 mm çapına sahip iki küçük çubuktan, esnek hava ile şişebilen bir aktüatörden ve 3 boyutlu geri çekilebilir kabuktan meydana gelmiştir. Glick et al. (2018), hem mevcut olan tutucuların özelliklerini geliştirmişler hem de yeni bir aktüatör tasarlamışlardır. Aktüatörler, sıvımsı elastomer aktüatörler ve gecko sürünenlerinin yapışkanlık özellikleri incelenerek ikisinin kombinasyonu sonucunda oluşturulmuştur. Zhu et al. (2017), eğim sensörü ile kontrol edilen esnek bir tutucunun tasarımı ve imalatı anlatmışlardır. Tutucu 3 eş parmandan oluşmuş ve bu parmaklar bir kilitleme mekanizması ile bir



robot kola bağlanmıştır. Zhang et al. (2017), üç parmaktan oluşan, hareketini pnomatik olarak sağlayan bir esnek tutucu imal etmişlerdir. Her bir tutucu parmak, Veroclear ile TangoBlack malzemelerin karışımından oluşan kompozit bir yapıya sahiptir. Khin et al. (2017) çalışmasında, kumaş tabanlı döner aktüatörler (FRA) ve kirişlerin bir araya getirilmesiyle esnek pnomatik yapıya sahip C şeklinde bir tutucu oluşturulmuştur. Terryn et al. (2017), ısıya dayanıklı kovalent bağları içeren DielsAlder polimerleri kullanarak esnek bir tutucu, esnek bir el ve yapay kasları geliştirmişlerdir. Ilievski et al. (2011) tutucuyu harekete geçirmek için balon gibi şişirilen elastomerlerde kanalların gömülü pnömatrik ağlarını (PneuNets) kullanmışlardır. Low et al. (2017), 3 boyutlu esnek kumaşlı haptik bir tutucu tasarlamışlardır. Homberg ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, nesnelere güçlü bir şekilde kavrayan ve tanımlayan esnek bir el sunmuşlardır (Homberg et al., 2015; URL-8). İncelenen çalışmalar sonucunda tutucu olarak kullanılan esnek robot el tasarımları Şekil 5’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.** (a) Gecko Tutucusu (Glick et al., 2018); (b) 3 Parmaklı Esnek Tutucu (Zhu et al., 2017); (c) Kompozit Tutucu (Zhang et al., 2017). (d) C Şekilli Tutucu (Khin et al., 2017); (e) DielsAlder Polimerlerli Tutucu (Terryn et al., 2017); (f) PneuNets Tutucu (Ilievski et al., 2011); (g) Haptik Tutucu (Low et al., 2017); (h) Baxter Tutucu (Homberg et al., 2015).

## 2. Materyal ve Metot

Esnek robotlar, esnek olarak hareketliliğini gerçekleştirme bilmesi için yumuşak malzeme özelliklerinden, özellikle de elastiklikten yararlanmaktadır. Elastiklik özelliği nedeniyle, robotların gövdesinin ve işlevlerinin çalışma ortamlarına uygun olmasını sağlayan kontrolün dikkate alınması gerekir. Bu kontrolü sağlama için, robotlara uygun kontrol sistemlerin seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca esnek robotların ayırt edici en önemli özelliklerinden biride robotların yapımında kullanılan gövdeye uygun şekilde güç aktarımını sağlayan güç kaynaklarının seçilmesidir.

Bu bölümde bir esnek robotun üretimi sırasında gerçekleştirilen kontrol sistemleri, kontrol edilme şekilleri ve malzeme seçimi ile ilgili önemli konular hakkında detaylı incelemeler sunulmuştur.

### 2.1. Esnek Robotların Kontrol Sistemleri

Robotların kontrol sistemleri geri beslemeli ve geri beslemesiz olmak üzere iki temel sınıfa ayrılabilirler. Kontrol edilecek sistemde algılayıcılar bulunuyorsa ve bu algılayıcılardan gelen bilgi kontrol sistemine girdi olarak uygulanıyorsa bu tip sistemlere geri beslemeli sistem denir (Bicakci, 2012). Geri beslemesiz kontrol sisteminde ise kontrol sistem ile kontrollü değişken arasında doğrudan bir bağlantı bulunmamaktadır. Esnek robotların kontrol yöntemlerine bakıldığında son yıllardaki çalışmalarda geri beslemeli Oransal kontrol, Oransal-Türevsel, Oransal-Türevsel-İntegral kontrol ve Kayma Kipli kontrol yapıları kullanılmıştır.

#### 2.1.1. Oransal (p) kontrol

Oransal kontrol en çok kullanılan doğrusal geri beslemeli kontrol sistemlerinden bir tanesidir (Bicakci, 2012). Oransal kontrol yardımıyla esnek robotlarda akışkanların kontrolü sağlanmıştır. Oransal kontrolcü, çıkışına hatanın belirli bir “Kazanç” değeri ile çarpımı kadar etki göstermektedir (URL-9). Amacı ise sabit durum hatasını azaltmaktır. Kazanç değeri arttıkça kararlı durum hatası azalmaktadır.

### 2.1.2. Oransal-türevsel (pd) kontrol

PD kontrolörünün kullanılmasının amacı, sistem müdahalesinin gelecekteki hatasını tahmin etme yeteneğine sahip olduğundan, kontrolü iyileştirerek sistemin stabilitesini arttırmaktır. D modu, hata çıkışındaki ani değişikliklerden kaynaklanan kontrol çıkışında meydana gelen ani değişikliklerin önlenmesi için çıkış değişkeninin değişimi ile orantılı olacak şekilde tasarlanmıştır (Temel, 2013).

### 2.1.3. Oransal-türevsel-integral (pid) kontrol

PID kontrol ünitesi, kararlı durum hatası sıfır, hızlı tepki (kısa yükselme süresi), salınım ve daha yüksek kararlılık dahil olmak üzere optimum kontrol dinamiğine sahiptir. PI kontrolörüne ek olarak bir türev kazanç bileşeninin kullanılmasının gerekliliği, sistemin çıkış yanıtında meydana gelen aşma ve salınımların ortadan kaldırılması içindir (Temel, 2013).

### 2.1.4. Kayma kipli (kkk) kontrol

Doğrusal olmayan veya değişen parametrelere sahip sistemlerin kontrolü için kullanılan en iyi kontrol yöntemlerinden birisi de Kayma Kipli Kontrolüdür. Modellenmemiş dinamikler ve bozucu girişlerin etkili olduğu durumlarda bu yöntem dayanıklı bir kontrol yöntemi sağlar. KKK yönteminin asıl amacı sistem kaçınıcı dereceden olursa olsun sistemin davranışını birinci dereceye indirgeyerek kontrol girişini belirlemek ve sistemin birinci derece gibi davranmasını sağlamaktır. Böylece, bu kontrol yöntemi sayesinde modellenmemiş parametrelerin ve bozucu girişlerin etkisinin görüldüğü durumlarda bile kararlı bir kontrol elde edilmiş olur (Koca, 2010).

## 2.2. Esnek Robotların Kontrol Edilme Şekilleri

Esnek robotların hareketleri katı cisimlerin kontrolünden farklı olarak altı serbestlik derecesiyle tanımlanabilmektedir (x, y ve z ekseninde üç dönüş ve üç çeviri). Esnek malzemeler elastik, büküleme, kırılma ve gerilme vb. yapılarla sahiptir (Yi, 2018). Esnek bir robotun gövdesinin hareket ettirilebilmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Esnek robotların ayırt edici en önemli özellikleri robotların yapımında kullanılan aktüatörler ve gövdeye uygun şekilde güç aktarımını sağlayan güç kaynaklarıdır. Güç aktarım şekillerine bakıldığında 4 ana grupta incelenmiştir (URL-10). Bu aktarım şekilleri aşağıda kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır.

### 2.2.1. Hidrolik sistemler

Günümüzde "hidrolik" sıvı akışkanlar aracılığıyla kuvvetlerin ve hareketlerin iletilmesini sağlayan sistemlerdir. Elektrik motorunun tahrik ettiği hidrolik pompa ile akışkanın belirli bir basınçta ve debide basılmasını sağlar. Bu hidrolik enerji ile doğrusal, dairesel ve açılma hareketi üretilmesine neden olur. Esnek robotlar ile yapılan çalışmalar incelendiğinde güç aktarımları hidrolik sistemler ile sağlanmış olanlar olduğu da görülmüştür (URL-10). Daha çok akışkan olarak yaşam kaynağımız olan su ile yapıldıkları göze çarpmaktadır.

### 2.2.2. Pnömatik sistemler

Sıkıştırılmış hava ile çalışan sistemlere pnömatik sistemler denir. Genellikle ortamda bulunan havayı alarak mekanik enerjiye çeviren sistemlerdir. Pnömatik enerjiyi kullanarak enerjinin açılma, dairesel ve doğrusal bir şekilde hareket etmesini sağlamaktadırlar. Pnömatik sistemler için kullanılacak olan hava basıncı genellikle kompresör yardımı ile elde edilmektedir. Esnek robotların bir zorluğu ise robotu harekete geçirmek için taşınabilir bir güç kaynağı bulabilmektir. Pnömatik sistemler için mevcut akışkanın güç kaynakları esnek değildir ve genellikle büyük ve hantaldır. Basınçları sağlamak için kompresörler veya pompalar ve sıkıştırılmış hava silindirleri kullanılır. Minyatür kompresörler, elektrik enerjisini verimsiz kullanırlar ve silindirler uzun ömürlü olmazlar. Kimyasal olarak çalıştırılan portatif basınç kaynağı bir hidrojen peroksit monopropellant kullanılarak basınçlı gaz üretir (Yi, 2018).

Pnömatik sistemler de, elektrik kontrolörleri gibi esnek ve hafif elektrik güç kaynakları gerektirirler. Bundan dolayı grafen, organik polimer, gömülü iletken kumaş bazlı bataryalar kullanılmaktadır.

### 2.2.3. Elektriksel sistemler

Genellikle elektriği kullanarak mekanik enerjiye çeviren sistemlerdir. Elektrik enerjisini alarak enerjiyi açılma, dairesel ve doğrusal bir şekilde hareket ettirmeyi sağlamaktadırlar. Rijit robot teknolojisinde en çok kullanılan kontrol edilme şekillerinden biridir (Koca, 2018). Bu teknolojiye en çok kullanılan servo motorlar ve fırçasız DC motorlar bunlara örnek verilebilir.

### 2.2.4. Kimyasal sistemler

Son dönemlerde yeni bir araştırma alanı olan kimyasal tepkiler robotik alanında gerçekleştirilen çalışmalara hızla girmiştir. Kimyasal enerji moleküldeki atomların tepkimesi sonucu açığa çıkan enerjidir. Kimyasal enerjinin mekanik enerjiye dönüşmesi esnek robotlarda yapılan çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır (Rus, 2015).

## 2.3. Malzeme Seçimi

Son yıllarda dünya çapında birçok malzeme ile birçok farklı çalışma alanları ile karşılaşmaktadır (Cengiz, Mamiş 2015; Cengiz, 2018 ). Esnek robot ile yapılan çalışmalarda bakıldığında aktüatör olarak daha çok fiber takviyeli aktüatörlerin kullanıldığı görülmektedir. Fiber takviyeli aktüatörlerin temel tasarımına bakıldığında uzayabilir olmayan takviyeler ile sarılmış bir elastomer iç lastikten oluşmaktadır. Çekme kuvveti altında çok yüksek oranda uzayabilen, kuvvet kaldırıldığında ise başlangıç uzunluğuna geri dönebilen çapraz bağlanmış kauçuğumsu polimerlere Elastomer malzemeler denir (URL-11).

Fiber takviyeli aktüatörün iç lastiği bir balon gibi davranır; hava her yöne doğru genişlemeye başlar. İç lastik, uzamayan takviyeler ile sarıldığında radyal olarak genişlemesi engellenir ve hava verildiğinde sadece eksel yönde ilerlemesi sağlanır. Fiber takviyeli aktüatöre uzamayan bir malzeme tabakası eklenirse aktüatörün o tabaka bölgesinde genişlemesi engellenir. Diğer tabaka genişlemeye devam ettirilirse uzamayan tabaka etrafında bükülme hareketi sağlanmış olur (URL-12). Fiber takviyeli aktüatör tasarlanırken;

- İçi boş yarım silindir şeklinde elastomer malzemeden oluşan iç lastik bölgesinin kalıbı oluşturulur.
- Hava verildiğinde gerilmeyi azaltan fiberglas malzemeden oluşan gerilme sınırlayıcı tabaka yerleştirilir.
- Radyal gerilmeleri sınırlayarak uzamayı sağlayan Kevlar ipliği ile sarımı yapılan takviyeler gerçekleştirilir.
- Son olarak ise Kevlar ipliğinin sabitlenmesi için dış deri tabakası oluşturulur.

Aktüatörün iç lastik bölgesini oluşturulurken kullanılacak malzemeler Wacker Chemie AG firması tarafından üretilen Elastosil M4601 silikon veya Smooth-On Inc. firması tarafından üretilen Dragon Skin 30 dur. Takviyeleri yerinde tutmak için uygulanan dış deri tabakası için Ecoflex 20 veya Dragon Skin 20 gibi daha düşük sertlikteki malzemeler kullanılır.

**Tablo 1.** Malzemeler ve Özellikleri

| Malzemeler      | Özellikler   | Kullanım amacı                          |
|-----------------|--|---|
| Elastosil M4601 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Çok iyi bir akışkan</li> <li>• Isıl uygulamalarda önemli ölçüde büzülebilen oda sıcaklığında büzülmeyen</li> <li>• Yırtılmaya dayanıklı</li> <li>• Yaygın döküm reçinelerine, özellikle poliüretanlara karşı mükemmel dirençli</li> <li>• A ve B olmak üzere 2 bileşenli malzemedir</li> <li>• A bileşenin rengi beyaz, yoğunluğu 1,14 g / cm<sup>3</sup> ve viskozitesi 15000 mPa s.</li> <li>• B bileşenin rengi kırmızımsı kahverengi, yoğunluğu 1,01 g / cm<sup>3</sup> ve viskozitesi 800 mPa s (URL-13).</li> </ul> | Aktüatörün iç lastik bölgesi            |
| Dragon Skin 30  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Platin katalizli sıvı silikondur</li> <li>• Çalışma sıcaklığı -21°C ve +205°C arasındadır</li> <li>• A ve B olmak üzere 2 bileşenli malzemelerdir ve renkleri yarısaydamdır.</li> <li>• Karışım sonucundaki yoğunluğu 1.08 g / cm<sup>3</sup> (URL-14).</li> </ul>  | Aktüatörün iç lastik bölgesi            |
| Ecoflex 20      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Platin katalizli sıvı silikondur</li> <li>• Çalışma sıcaklığı --53°C ve 232°C arasındadır</li> <li>• 2 bileşenlidir ve renkleri yarısaydamdır.</li> <li>• Karışım sonucundaki yoğunluğu 1.07 g / cm<sup>3</sup> (URL-15).</li> </ul>  | Aktüatörün dış deri tabakası            |
| Dragon Skin 20  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Platin katalizli sıvı silikondur</li> <li>• Çalışma sıcaklığı -53°C ve 232°C arasındadır</li> <li>• 2 bileşenlidir ve renkleri yarısaydamdır.</li> <li>• Karışım sonucundaki yoğunluğu 1.08 g / cm<sup>3</sup> (URL-14).</li> </ul>   | Aktüatörün dış deri tabakası            |
| Fiberglas       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Çeliğe karşı 4 kat fazla çekme dayanımına sahiptir.</li> <li>• Küflenmez veya paslanmaz</li> <li>• Dış etkenlerden etkilenmez (korozyon gibi)</li> <li>• Sıcaktan veya soğuktan etkilenmez</li> <li>• Şekil değişikliğine uğramaz ve su geçirmez.</li> <li>• İstenilen ebatta, şekilde ve renkte üretimi yapılabilmektedir</li> <li>• Darbelere dayanıklıdır (URL-16).</li> </ul>   | Aktüatörün gerilme sınırlayıcı tabakası |

**Tablo 1 (devamı). Malzemeler ve Özellikleri**

| Malzemeler | Özellikler  | Kullanım amacı                          |
|------------|---|---|
| Tyvek      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Nefes alan su yalıtım örtüsüdür</li> <li>Yüksek mukavemetli %100 HDPE (High Density Polyethylene)</li> <li>Isıl bağlı mikro gözenekli yapılıdır</li> <li>Daimi buhar geçirgen yapılıdır (Sd=0,02m.)</li> <li>Yüksek su yalıtım özelliği (1.5m.s.s.)</li> <li>Yüksek ısı dayanımındadır (-73°C/+100°C) (URL-17).</li> </ul> | Aktüatörün gerilme sınırlayıcı tabakası |
| Kevlar     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Eşit ağırlık bazında çelikten beş kat daha güçlü olan bir elyafır (URL-18).</li> </ul>   | Aktüatörün gerilme sınırlayıcı tabakası |

Tablo 1’de fiber takviyeli aktüatörlerde kullanılan Elastosil M4601, Dragon Skin 30, Ecoflex 20, Dragon Skin 20, Fiberglas, Tyvek ve Kevlar ip malzemelerin özellikleri verilmiştir.

### 3. Bulgular

Esnek robotlar ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde en önemli kriterlerin tasarımda kullanılan donanım elemanları ve esnek malzemelerinin seçimi olduğu sonucuna varılmıştır. Esnek robotlar, seçilen malzemeler ile tasarlanırken daha çok kalıp oluşturularak modellenme gerçekleştirilir. Bu kalıplar 3 boyutlu yazıcılar tarafından imal edilmiştir. Tablo 2’de verildiği üzere incelenen makalelerin hangi tür esnek robot olduğu ve onlara ait kullanılan donanım elemanları, kontrol edilme şekilleri ve kontrol sistemleri belirtilmiştir. Ayrıca hava ve su ile kontrol edilen çalışmalarda basınçlı hava üretmek için kompresörler kullanılmıştır. Oluşturulan havanın istenilen basınçta sisteme verilmesi için basınç sensörleri ile ölçüm yapılmıştır. Gerekli olan basınçlı havayı yönlendirmek için daha çok selonoid valfler tercih edilmiştir. Selonid valfleri, basınç sensörlerini, motorları ve kompresörleri kontrol etmek için ise Arduino, FPGA gibi farklı tip kontrol kartları tercih edilmiştir. Ayrıca esnek robotlarda güç aktarım şekli elektrik olan motorlar da kullanılabilir. Motorlar ile yapılan esnek robot çalışmalarında daha çok servo motor ve fırçalı DC motor kullanılmıştır.

**Tablo 2. Esnek Robotlarda Kullanılan Elemanlar ve Kontrol Sistemleri**

| Esnek robot türleri                          | Kullanılan elemanları  | donanım | Kontrol edinme şekilleri | Kontrol sistemleri                                  | İlgili literatür   |
|--|--|---------|--------------------------|---|--------------------|
| Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robot | Fiber takviyeli elastomer aktüatörler, Basınç sensörleri (150PGAA5), Basınç valfleri, Arduino Mega (2560), Lityum polimer pil (14.8V). |         | Su ile kontrol           | Kayar kipli kontrol (KKK)                           | Polygerinos, 2015. |
| Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robot | 3 boyutlu yazıcıda basılmış termoplastik poliüretan (TPU) malzeme, Basınç sensörü, Arduino Uno, Esnek ağızlı valfler.                  |         | Hava ile kontrol         | Oransal kontrol (P)                                 | Yi, 2018.          |
| Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robot | 3 Boyutlu yazıcıda basılmış sert (Ahşap) malzeme, Eğim sensörü, Arduino Uno.   |         | Servo motor ile kontrol  | -----   | Chan, 2016.        |
| Tutucu Olarak Kullanılan Esnek Robot         | 3 Boyutlu yazıcıda basılmış VeroClear plastik malzeme, Selonoid valf, Hava pompası, Arduino Mega.                                      |         | Hava ile kontrol         | -----   | Guo, 2017.         |
| Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robot | Termoplastik poliüretan (TPU) malzeme, Basınç sensörü, Arduino Mega, Selonoid valf, Hava pompası.                                      |         | Hava ile kontrol         | Oransal-İntegral-Türevsel denetleyici kontrol (PID) | Yap, 2017.         |



**Tablo 2 (devamı).** Esnek Robotlarda Kullanılan Elemanlar ve Kontrol Sistemleri

| Esnek türleri                                | robot  | Kullanılan elemanları   | donanım                             | Kontrol şekilleri       | edinme | Kontrol sistemleri                | İlgili literatür |
|--|--------|---|-------------------------------------|-------------------------|--------|-----------------------------------|------------------|
| Sürünerek Hareket Esnek Robot                | Eden   | Smooth-On poliüretan, LLC 44 RPM Dişli motor, myRio FPGA, DuPont Kevlar.  | FlexFoam malzeme, fırçalı DC motor, | DC motor ile kontrol    |        | -----                             | Donatelli, 2017. |
| Tutucu Kullanılan Esnek Robot                | Olarak | Dragon Skin silikon kauçuk eğim sensörü.  | adında malzeme,                     | Hava ile kontrol        |        | -----                             | Zhu, 2017.       |
| Tutucu Kullanılan Esnek Robot                | Olarak | Ninjaflex termoplastik malzemeler, valf, Basınç sensörü.  | filement ve poliüretan Selonoid     | Hava ile kontrol        |        | Oransal-türevsel denetleyici (PD) | Deimel, 2017.    |
| Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robot |        | Ninjaflex filement, Arduino, Teller.  |                                     | Servo motor ile kontrol |        | -----                             | Chan, 2017.      |
| Tutucu Kullanılan Esnek Robot                | Olarak | Dragonskin (10-20) ve Ecoflex (00-10) malzemeler, Esnek sensör (BendShort 2.0), Arduino micro, Lineer motor.  |                                     | Hava ile kontrol        |        | -----                             | Homberg, 2015.   |
| Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robot |        | Sıvı elastomer (DragonSkin10, Smooth-On) malzemeler, Ağırlık sensörü (Load cell), Basınç sensörü (MPX5500DP), Selonoid valf (X-Valve, Parker), Hava pompası (D737-23-01), Arduino Mega. |                                     | Hava ile kontrol        |        | Darbe genişli modülasyon (PWM)    | Yap, 2016.       |
| Rehabilitasyon Amaçlı Kullanılan Esnek Robot |        | PneuFlex malzeme, Basınç sensörü, Selonoid valf, Hava boruları.   |                                     | Hava ile kontrol        |        | -----                             | Deimel, 2015.    |

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Giderek önem kazanan ve robotiğin yeni bir alanı olan esnek robotların tasarımı, imalatı ve araştırma faaliyetleri üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. İncelemeler sonucunda esnek robotlar ile ilgili bir derleme çalışması yapılmıştır. Çalışmalara bakıldığında esnek robotların kullanım alanları sürünerek hareket edebilen, yüzebilen, rehabilitasyon amaçlı ve tutucular olarak gruplandırılmıştır. Sürünerek hareket edebilen esnek robotlar yuvarlak, yassı, halkalı solucanlar ve tırtıl gibi omurgasız hayvanların yanı sıra yılan gibi omurgalı hayvanların hareketlerinden esinlenilerek gerçekleştirildiği görülmüştür. Yüzerek hareket eden esnek robotlar da daha çok balıklar ve kafadanbacaklılar grubuna giren ahtapot dan yararlanılmıştır. Rehabilitasyon amaçlı esnek robotlar daha çok fonksiyonel kavrama hastalığı olan bireyler için el rehabilitasyonunu güçlendirmek üzere insanların el ve bilek hareketleri ilham alınmıştır. Esnek tutucularda ise insanların el ve bilek hareketlerinin yanı sıra gecko gibi sürüngeçenlerin yapışkanlığından da yararlanılmıştır.

Esnek robotlar ile yapılan çalışmalar incelendiğinde güç aktarımlarının daha çok hidrolik (Su), pnömatik (Hava), kimyasal ve elektrik (Motor) ile sağlandığı görülmüştür. Esnek robotların hareketliliğini sağlayan aktüatörlerin iç lastik bölgesinde daha çok Elastosil M4601 silikon veya Dragon Skin 30 malzemelerinden biri kullanıldığı görülmüştür. Aktüatörün dış deri tabakası için ise daha düşük sertlikteki malzemelerden olan Ecoflex 20 veya Dragon Skin 20 kullanılmıştır.

Esnek robotlar tasarlanırken öncelikle esnek malzemenin dökümü için bir kalıp hazırlandığı görülmüştür. Bu kalıplar 3 boyutlu yazıcılar tarafından üretilmiştir. Kalıpları oluşturulan tasarımlara Smooth-On FlexFoam poliüretan, Termoplastik poliüretan,

Dragonskin (10-20) ve Ecoflex (00-10) silikon malzemeleri gibi farklı çeşit esnek malzemeler dökülmüştür. Daha sonra hava ile kontrol edinme şekillerinde vakum pompası veya kompresör, sayesinde robotun kanallarına hava verilerek robotların hareketi sağlanmıştır. Basınç sensörleri, kanallara verilecek olan basınçları ayarlamıştır. Robotların istenilen hareketi sağlaması için uygun kanallara hava akışını yönlendiren selonid valfler kullanılmıştır. Esnek robotların kullanıcının istediğini kontrollü bir şekilde yapabilmesi için bütün devre elemanlarını kontrol eden Arduino, FPGA gibi farklı tip kontrol kartları tercih edilmiştir. Ayrıca hidrolik sistemli esnek robotların hareketinin sağlanması için gerekli akışkanı depolayan bir tank ve bu tanktan akışkanı kanallara gönderen bir pompa kullanılmıştır. Akışkan valfleri sayesinde akışkanların yönlendirilmesi sağlanmıştır.

Esnek robotlar sayesinde insanların işleri daha da kolaylaşmıştır. Bunun nedeni ise esnek robotların diğer robotlara göre daha esnek bir şekilde hareketliliğinin sağlanması ve geliştirilen yöntemler sayesinde sarsıntılar azalmasına neden olmuştur. Ayrıca güvensiz ortamlarda ve tekrarlı işlerde esnek robotlar çokça kullanılmaya başlanmıştır.

## 5. Öneriler

İleriki çalışmalarda rehabilitasyon amaçlı kullanılan esnek bir el tasarlanarak bütün parmakların hava ile kontrolü sağlanacaktır. Yapılmış olan esnek robotların ANSYS paket programında zamana bağlı akış analizi yapılabilir. Daha farklı malzemelerin karışımı ile olan yeni bir kimyasal madde kullanılarak esnek parmaklar yapılabilir. Yapılmış olan esnek parmak farklı kontrol yöntemleri ile kontrol edilebilir.

## Referanslar

Ay, M., Korkmaz, D., Ozmen, K. G., Bal, C., Akpolat, Z. H. & Bingol, M. C., (2018). Mechatronic Design and Manufacturing of the Intelligent Robotic Fish for Bio-Inspired Swimming Modes, *Electronics*, 7, 118.

Ay, M., Ozmen, K. G., Yetkin, S., Bal, C. & Akpolat, Z. H. (2017). Farklı Kuyruk Modellerine Sahip Bir Robot Balığın FSI Analizi, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 12(1), 78-89.

Bartlett, N. W., Lyau, V., Raiford, W. A., Holland, D., Gafford, J. B., Ellis, T. D. & Walsh, C. (2015). A Soft Robotic Orthosis for Wrist Rehabilitation, *The Design of Medical Devices*, 9, 1-3.

Bicakci, S. (2012). Sanal Elemanlar Yardımı İle Üst Seviye Robot Kontrol Sistemi Tasarımı, *Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 31-39.

Cao, Y., Liub, Y., Chena, Y., Zhua, L., Yana, Y. & Chenc, X. (2016). A Novel Slithering Locomotion Mechanism For A Snake Like Soft Robot, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 99, 304–320.

Cengiz M.S., Mamis M.S. (2015). Geçmişten Günümüze Stirling Motorlar için Literatür Çalışması. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1 (6), 10-19

Cengiz M.S., Mamis M.S, & Yurcu Y. (2018). Providing Electrical Power Increase By Stimulating temperature Difference at Low Temperatures in Stirling Motors. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(1), 87-97

Cengiz M.S., Mamis M.S, (2016). Analysis Of Electrical Efficiency In Stirling Engine For Temperature Increase. *International Workshop on Special Topics on Polymeric Composites*, FEBRUARY 24-26, 2016, pp. 68-73.

Chan, Y. H., Tse, Z. & Ren, H. (2017). Design Evolution and Pilot Study for a Kirigami-inspired Flexible and Soft Anthropomorphic Robotic Hand, *International Conference on Advanced Robotics*, China, 432 - 437.

Deimel, R. & Brock, O. (2016). A novel type of compliant and under actuated robotic hand for dexterous grasping, *The International Journal of Robotics Research*, 35(1–3), 161–185.

Donatelli, C. N., Serlin, Z. T., Jones, E. P., Scibelli, A. E., Cohen, A., Musca, J. M., Levy, S. R., Buckingham, D., White, R. & Trimmer, B. A. (2017). Soft Foam Robot with Caterpillar-Inspired Gait Regimes for Terrestrial Locomotion, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, Canada, 476 - 481.

Glick, P., Suresh, S. A., Ruffatto, D., Cutkosky, M., Tolley, M. T. & Parness, A. (2018). A Soft Robotic Gripper With Gecko-Inspired Adhesive, *IEEE Robotics And Automation Letters*, 3, 903 - 910.

Guo, J., Sun, Y., Liang, X., Low, J. H., Wong, Y. R., Tay, V. S. C. & Yeow, C. H. (2017). Design and fabrication of a pneumatic soft robotic gripper for delicate surgical manipulation, *International Conference on Mechatronics and Automation*, IEEE, Japan, 1069-1074.

Haimovici, M., Santos, R. A., & Fischer, L. G. (2009). Class Cephalopoda. In: Rios, E. de C. 2009. *Compendium of Brazilian Sea Shells*. Rio Grande, RS: Evangraf, 610-649.

- Homberg, B. S., Katschmann, R. K., Dogar, M. R. & Rus, D., (2015). Haptic Identification of Objects using a Modular Soft Robotic Gripper, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 1698-1705.
- Ilievski, F., Mazzeo, A. D., Shepherd, R. F., Chen, X. & Whitesides, G. M. (2011). Soft Robotics for Chemists, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 50, 1890–1895.
- Katschmann, R. K., Marchese, A. D. & Rus, D. (2016). Hydraulic Autonomous Soft Robotic Fish for 3D Swimming”, International Symposium on Experimental Robotics, Essaouira, 1-15.
- Khin, P. M., Yap, H. K., Ang, M. H. & Yeow, C. H. (2017). Fabric-based Actuator Modules for Building Soft Pneumatic Structures with High Payload-to-Weight Ratio, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Canada, 2744 - 2750.
- Kim, S., Laschi, C. & Trimmer, B.(2013). Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics, *Trends Biotechnol*, 31(5), 287–294.
- Koca, O. G., Bal, C., Korkmaz, D., Bingol, M. C., Ay, M., Akpolat, Z. H. & Yetkin, S. (2018). Three-Dimensional Modeling of a Robotic Fish Based on Real Carp Locomotion, *Appl. Sci.*, 8, 180.
- Koca, Ö., G., (2010). Dört kol mekanizmalı mekatronik bir sistemin akıllı yöntemlerle kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 24-32.
- Lee, C., Kim, M., Kim, Y. J., Hong, N., Ryu, S., Kim, H. J. & Kim, S. (2017). Soft Robot Review, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(1), 3-15.
- Luo, M., Pan, Y., Skorina, E. H., Tao, W., Chen, F., Ozel S. & Onal, C. D. (2015). Slithering Towards Autonomy: A Self-Contained Soft Robotic Snake Platform With Integrated Curvature Sensing, *Bioinspiration & Biomimetic*, 10 055001.
- Low, J. H., Lee, W. W., Khin, P. M., Thakor, N. V., Kukreja, S. L., Ren, H. L. & Yeow, C. H. (2017). Hybrid Tele-Manipulation System Using a Sensorized 3-D-Printed Soft Robotic Gripper and a Soft Fabric-Based Haptic Glove, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2, 880–887.
- Marchese, D. A., Onal, D. A. & Rus, D. (2014). Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators, *Soft Robotics*, 1, 75–87.
- Polygerinos, P., Galloway, K. C., Sanan, S., Herman, W. & Walsh, C. J. (2015). EMG Controlled Soft Robotic Glove For Assistance During Activities of Daily Living, International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), IEEE, Singapore, 55–60.
- Polygerinos, P., Wang, Z., Galloway, K. C., Wood, R. J. & Walsh, C. J. (2015). Soft Robotic Glove For Combined Assistance and At-Home Rehabilitation, *Robotics and Autonomous Systems*, 73, 135–143.
- Rus, Daniela & Michael T. Tolley. (2015). Design, Fabrication and Control of Soft Robots, *Nature international journal of science*, 521. 467–475.
- Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D. & Shea, H. (2018). Soft Robotic Grippers, *Advanced Materials*, 30, 1707035(1-33).
- Şen, H., (2006). Ahtapot (*Octopus vulgaris* Cuvier, 1797) Yetiştiriciliği, *E.Ü. Su Ürünleri Dergisi*, 23, 207–213.
- Temel, S., Yağlı, S., & Gören, S. (2013). P, PD, PI, PID Controllers, Report, Middle East Technical University Electrical and Electronics Engineering Department, 1 Eylül 2018.
- Terryn, S., Brancart, J., Lefeber, D., Assche, G. V. & Vanderborght, B. (2017). Self-healing soft pneumatic robots, *Science Robotics*, 2(9), eaan4268.
- Tomita, T., Tanaka, T. & Nakamura, T. (2015). Development of a peristaltic crawling robot for long-distance sewer pipe inspection with consideration of complex pipe line, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, Germany, 2742-2747.
- URL-1,Yılmaz. G. L., Halkalı Solucan Regenwurm Oligochaeta, [http://www.schule-mehrsprachig.at/uploads/tx\\_inmemttm/Halkal%C4%B1.pdf](http://www.schule-mehrsprachig.at/uploads/tx_inmemttm/Halkal%C4%B1.pdf), 6 Şubat 2018.
- URL-2,Biyologlar Halkalı Solucanlar, <http://biyologlar.com/halkali-solucanlar>, 6 Şubat 2018.
- URL-3,Hidrostatik Hareket Nedir?, <https://www.nedir.com/hidrostatik-iskelet>, 8 Şubat 2018.

- URL-4, Sklar, J., Meet the World's First Completely Soft Robot <https://www.technologyreview.com/s/603046/meet-the-worlds-first-completely-soft-robot/>, 26 Mart 2018.
- URL-5, Hill, J., 2016. Robot Octopus Points the Way to Soft Robotics With Eight Wiggly Arms, <https://spectrum.ieee.org/robotics/robotics-hardware/robot-octopus-points-the-way-to-soft-robotics-with-eight-wiggly-arms>, 17 Ağustos 2018.
- URL-6, Octopus-Inspired Robots Can Grasp, Crawl, and Swim. <https://www.youtube.com/watch?v=L7FEJJsVHRQ>, 17 Ağustos 2018.
- URL-7, Soft robotic glove puts control in the grasp of hand-impaired patients, <https://wyss.harvard.edu/soft-robotic-glove-puts-control-in-the-grasp-of-hand-impaired-patients/>, 17 Ağustos 2018.
- URL-8, A Modular Soft Robotic Gripper, <https://www.youtube.com/watch?v=Y5kZO8SSxVw>, 1 Eylül 2018.
- URL-9, Gören, A. Kontrol Sistemleri, <http://kisi.deu.edu.tr/aytac.goren/MAK3026/h5.pdf>, 1 Eylül 2018.
- URL-10, Sklar, J., Meet the World's First Completely Soft Robot <https://www.technologyreview.com/s/603046/meet-the-worlds-first-completely-soft-robot/> 26 Mart 2018.
- URL-11, Evcin, A., Polimer malzemeler, <http://blog.aku.edu.tr/evcin/files/2017/05/10-polimer-uygulamalar%C4%B1-polimer-borular.pdf>, 28 Nisan 2018.
- URL-12, Fiber-Reinforced Actuators, <https://softroboticstoolkit.com/book/fiber-reinforced-bending-actuators>, 28 Nisan 2018.
- URL-13, Technical data sheet for ELASTOSIL® M 4601 A/B, <https://www.amcsupplies.com.au/manuals/M4601-TDS.pdf>, 28 Ağustos 2018.
- URL-14, Dragon Skin Series Addition Cure Silicone Rubber Compounds, [https://www.smooth-on.com/tb/files/DRAGON\\_SKIN\\_SERIES\\_TB.pdf](https://www.smooth-on.com/tb/files/DRAGON_SKIN_SERIES_TB.pdf), 28 Ağustos 2018.
- URL-15, Ecoflex Series Super-Soft, Addition Cure Silicone Rubbers, [https://www.smooth-on.com/tb/files/ECOFLEX\\_SERIES\\_TB.pdf](https://www.smooth-on.com/tb/files/ECOFLEX_SERIES_TB.pdf), 28 Ağustos 2018.
- URL-16, Cam Elyafı (Fiberglas), <http://www.fibercamelyaf.com/cam%20elyaf%20urunler.html>, 28 Ağustos 2018.
- URL-17, Tyvek solid, <http://www.dupont.com.tr/urunler-ve-hizmetler/construction-materials/tyvek-building-envelope/brands/tyvek-breather-membrane/products/tyvek-solid.html>, 2 Eylül 2018.
- URL-18, Kevlar Elyafı, <http://www.dupont.com.tr/urunler-ve-hizmetler/elyaflar-kumaslar-ve-dokunmamis-malzemeler/iplikler/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html>, 1 Eylül 2018.
- Wang, H., Totaro, M. & Beccai, L. (2018). Toward Perceptive Soft Robots: Progress and Challenges, *Advanced Materials*, 1800541 (1-17).
- Yap, H. K., Ang, B. W. K., Lim, J. H., Goh, J. C. H. & Yeow, C. H. (2016). A Fabric-Regulated Soft Robotic Glove with User Intent Detection using EMG and RFID for Hand Assistive Application, *International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Sweden*, 3537-3542.
- Yap, H. K., Khin, P. M., Koh, T. Z., Sun, Y., Liang, X., Lim, J. H. & Yeow, C. H. (2017). A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Hand Impaired Patients, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2, 1383 - 1390.
- Yetkin, S. (2016). Application of Two-Dimensional Path Planning Algorithms For The Robot Fish, *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ*, 1-8.
- Yetkin, S., Özmen, K. G., Ay, M., Akpolat, Z. H. & Bal, C. (2017). FSI Analysis of Carangiform Three Dimensional Multi-Link Biomimetic Robotic Fish, *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 17(2), 825-833.
- Yi, J., Chen, X. & Wang, Z. (2018). A Three-Dimensional-Printed Soft Robotic Glove With Enhanced Ergonomics and Force Capability, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3, 242-248.
- Yüzgeç, U., Büyüktepe, H. E. & Karakuzu, C. (2016). Kablosuz Eldiven Sistemi ile Kontrol Edilen Robot Kol Tasarımı, *Türkiye bilişim vakfı bilgisayar bilimleri ve mühendisliği dergisi*, 9, 35-42.

Zhang, H., Wang, M. Y., Chen, F., Wang, Y., Kumar, A. S. & Fuh, J. Y. H. (2017). Design and development of a soft gripper with topology optimization, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Canada, 6239 - 6244.

Zhu, M., Wang, Z., Hirai, S. & Kawamura, S. (2017). Design and Fabrication of a Soft-bodied Gripper with Integrated Curvature Sensors, 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, New Zealand.