

# Pnömatik Kasların Tanımı, Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensibi, Statik Modellemesi, Çeşitleri, Özellikleri ve Uygulama Alanları

Hasan Basri ULAS<sup>\*a</sup>

<sup>a,\*</sup> Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü, ANKARA 06500, TÜRKİYE

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 27.11.2018  
Kabul: 13.12.2018

### Anahtar Kelimeler:

Pnömatik Kas,  
modelleme, özellikleri

### \*Sorumlu Yazar:

e-posta:  
ulashasanbasri@yahoo  
.com

## ÖZET

Pnömatik kas, her iki ucunda bağlantı ucu bulunan esnek bir membran yapısından oluşan bir çeşit iş elemanıdır(aktüatör). Pnömatik kasların geleneksel iş elemanlarına göre pek çok avantajı olmakla birlikte, yüksek güç/ağırlık oranına sahip olması bu avantajlardan en önemlilerinden biridir. Çalışma prensibi olarak gaz basıncının etkisi ile, radyal yönde meydana gelen genişlemeye karşılık olarak, ekstenel yönde kısılma oluşur ve böylece, ekstenel yönde bir çekme kuvveti meydana gelir. Pnömatik kaslar üzerine yapılan çalışmaların gözden geçirildiği bu çalışmada, pnömatik kasların tanımı yapılarak, tarihsel gelişiminden bahsedilmiş, daha sonra çalışma prensibi anlatılmış ve statik denklemleri açıklanmaya çalışılmıştır. Müteakip bölümlerde çeşitlerine de değinilen pnömatik kasların avantaj ve dezavantajları da ayrıca incelenmiştir. Son olarak pnömatik kasların kullanım alanlarından bahsedilmiş ve biorobit, medikal, endüstriyel, havacılık vb. alanlara yönelik uygulama örnekleri verilerek sonuç bölümünde yapılan çalışma özetlenmiştir.

DOI: 10.30855/GJES.2018.04.03.010

# Definition of Pneumatic Muscles, Historical Development, Working Principle, Static Modeling, Types, Properties and Application Areas

## ARTICLE INFO

Received: 27.11.2018  
Accepted: 13.12.2018

### Keywords:

Pneumatic Muscle,  
modeling, properties

### \*Corresponding

#### Authors

e-mail:  
ulashasanbasri@yahoo  
.com.tr

## ABSTRACT

The pneumatic artificial muscle is a kind of actuator composed of a flexible membrane with fittings at both ends. While pneumatic muscles have many advantages over conventional actuators, having a high power / weight ratio is one of the most important of these advantages. As a working principle, with the effect of the gas pressure, in response to the expansion in the radial direction, an axial shortening occurs, so that a pulling force emerges in the axial direction. In this review study, pneumatic muscles were defined and their historical development was mentioned, then the working principle was explained and static equations were tried to be explained. In the following sections, the types of pneumatic muscles are also mentioned, their advantages and disadvantages are also examined. Finally, the use areas of pneumatic artificial muscles are mentioned and examples of application for biorobit, medical, industrial, aerospace and other fields are mentioned and the work done in the result section is summarized

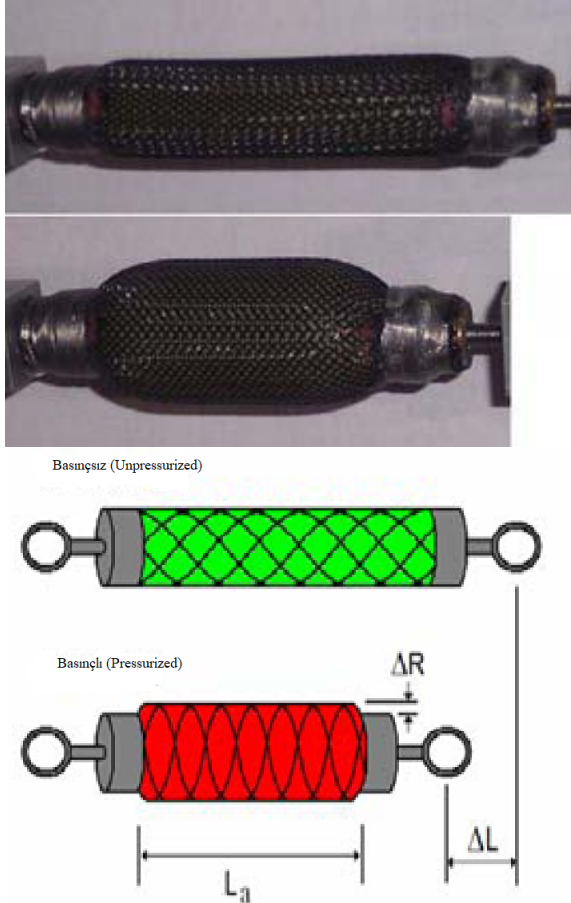
DOI: 10.30855/GJES.2018.04.03.010

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Pnömatik Kas, gaz basıncı etkisi ile kasılabilen ve lineer hareket eden bir eleman olarak tanımlanabilir. Araştırma konusu olarak, pnömatik kas her iki ucunda

bağlantı elemanı bulunan güçlendirilmiş kapalı ve esnek bir membran yapısından oluşur ve mekanik gücün yüke iletilmesini sağlar. Membran şişirildiğinde veya içerisindeki gaz emildiğinde, sırasıyla enlemesine genişler veya büzülür. Radyal

olarak gerçekleşen bu genişleme veya daralma sırasında, membran eksenel yönde kısalmır ve böylece yükün üzerine bir çekme kuvveti uygulanır. Burada oluşan kuvvet ve hareket lineer ve tek yönlüdür. İçerisine hava verilmesi neticesinde kasılarak kısılması pnömatik kasları körtüklerden ayıran özelliktir [1]. Şekil 1’de pnömatik kasların genel olarak görünümü ve çalışma prensibi gösterilmiştir [2].



Şekil 1. Pnömatik Kasların Görünüşü ve Çalışma Prensibi (Pneumatic muscles appearance and working principle)

Pnömatik kasların çalışmasında enerji kaynağı gazlardır ve pnömatik kasın içerisine verilerek veya içerisinden çekilerek gerçekleşen çalışma sırasında genellikle hava kullanılır. İçerisindeki ve çevresindeki basınç farkından dolayı pnömatik kasın çalışması sağlanır. Pnömatik kaslar genellikle yüksek basınçla çalışmasına rağmen düşük basınçla da çalışabilir, ancak yüksek basınç ile düşük basınçla göre çok daha fazla enerji iletebilir [1].

### 1.1. Tarihsel Gelişim (Historical development)

Bilinen ilk pnömatik kas geliştirme çalışmalarını Rus mucit Garasiev tarafından 1930’lu yılların başlarında yapılmıştır. Bu basit pnömatik kas genişlemeyen fiber yapıya halkalar ile çevrili kauçuk bir tüpten oluşmaktaydı. Fakat o dönem itibarıyla malzeme teknolojisinin yeterli olmaması nedeni ile kullanımı uygun değildi. Bugünkü ile çok benzer olan pileli (braided) tip pnömatik kasın orijinal örneği, kömür endüstrisinde dinamit yerine kullanılmak üzere Pierce tarafından önerilmiş ve 1936 yılında alınmış patenti alınmıştır. Boylamsal olarak kısalmaya dayalı pnömatik kas olgusu Pierce tarafından bulunmasına rağmen, ilk uygulama olarak, kaza anında pilotların emniyet kemerini gerdirmeye amacıyla kullanılması amaçlanarak De Haven tarafından 1949 yılında imal edilmiş ve patenti alınmıştır [3].

Morin 1947’de Fransa’da ve 1953’de ABD’de esnek membranın patentini almıştır. Gaylord 1958’de aynı prensiple çalışan fakat harici basınç kaynağı ile beslenen pnömatik kasın patentini almıştır. Bu tip pnömatik kaslar kapı açma ve endüstriyel lift uygulamalarında kullanılmıştır. Gaylord’un en önemli katkısı sistemin matematiksel analizini yapması ve üretilen etki kuvvetini ilk hesaplayan olmasıdır. Yeterli güç hesaplamasının kolay bir şekilde yapılabilir olması ile pnömatik kasların geliştirme çalışmaları yeniden başlamıştır. Düşük güçte elektrik ile çalışması uygun olmayan aşırı ağır, sert ve hacimli iş alanlarında pnömatik kaslar uygulanabilir. Havanın lineer olmayan karakteristikleri ve sıkıştırılabilir olmasından kaynaklı problemlerden dolayı pnömatik kaslarda konum kontrol sorunu halen devam etmektedir [3].

Pnömatik kaslar, bilimsel literatürde Pneumatic Artificial Muscles – PAMs, Air Muscle, Fluidic Muscle, Pneumatic Muscle Actuator, Fluid Actuator, Fluid-Driven Tension Actuator, Axially Contractible Actuator, Tension Actuator, Braided Pneumatic Muscle Actuator terminolojisi ile anılırlar [3].

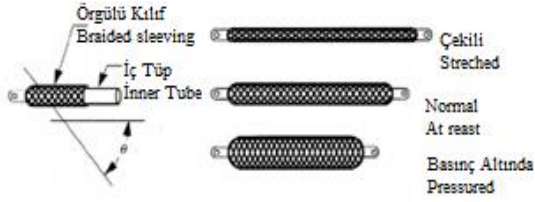
### 2. PNÖMATİK KAS ÇEŞİTLERİ (PNEUMATIC MUSCLE TYPES)

Daerden ve Lefeber’e göre pnömatik kaslar aşağıdaki gibi gruplanabilir;

- Örgülü (Braided muscles),
- Pileli (Pleated PAMs),
- Ağlı (Netted Muscles),
- Gömülü (Embedded Muscles).

## 2.1. Örgülü Kaslar (Braided muscles)

Örgülü pnömatik kaslar, etrafı örgülü bir kılıf ile çevrilmiş olan ve gaz sızdırmaz bir elastik tüp veya iç lastikten oluşur. Şekil 2’de örgülü tip pnömatik kasın bir çeşidi görülmektedir. Örgü lifleri pnömatik kasın boylamsal ekseninin etrafında helezonik olarak  $+θ$  ve  $-θ$  (örgü açısı) açılarında yerleştirilmiştir. Basınçlandırıldığı zaman elastik tüp, örgülü kılıfa doğru yanal bir basınç oluşturur. Böylece, örgü liflerinin tüp etrafında eğrilmesiyle meydana gelen gerginlik nedeniyle iç basınç dengelenir. Harici yükleri dengelemek için lif gerginliği örgünün uç noktalarında birleştirilmiştir. Örgülü pnömatik kaslar düşük basınçlarda çalışmadığı için, yükün iletilmesi amacıyla, elastik tüp ve örgülü kılıf arasında basınçlı birleştirme yapılması gereklidir [4].



Şekil 2. Örgülü tip pnömatik kas (McKibben Muscle) (Braided type pneumatic muscle)

Örgülü pnömatik kas basınçlı hava ile şişirildiğinde, genişler ve aynı zamanda aksel olarak boyunda kısalma meydana gelir. Bu kısalma bütün pnömatik kaslarda ortaya çıkar. Bu kısalmanın büyüklüğü, havanın basıncına ve pnömatik kasın içine akan havanın zamanına bağlıdır. Pnömatik kasların bu özellikleri insan kası ile benzerlik göstermektedir. Kas yükünün artmasıyla, kasın boyu kısalırken çekme kuvveti artar [3].

## 2.2. Pileli PAM (Pleated PAMs)

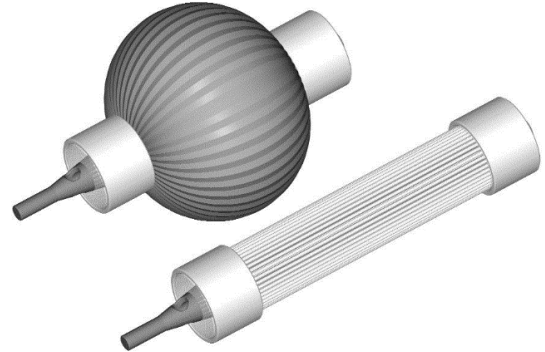
Bu tür pnömatik kaslar da basınçlı hava ile kısalan elemanlardır. Basınçlı hava etkisinde pnömatik kas şişer, kısalır ve aksel çekme kuvveti meydana gelir. Bu kuvvet, uygulanan basınca ve pnömatik kasın uzunluğuna bağlıdır [3].

Pileli pnömatik kas, Daerden tarafından yeniden düzenlenen tipte bir membran kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yeni tip membranın özelliği pnömatik kasa hava verilmesi durumunda herhangi bir malzeme gerilmesi olmayışıdır. Şekil 3’de pileli tip pnömatik kasın tamamen gerildiği ve şişirildiği şekli gösterilmektedir. Bu tip pnömatik kaslarda membran, araç filtrelerinde olduğu gibi, aksel yönde çok sayıda pileye sahiptir ve kas genişlediğinde bu pileler açılır. Bu süreçte sürtünme meydana gelmemektedir.

Dahası, paralel yöndeki membran gerilemeleri önemsenmeyecek derecede az tutulur ve artan pile sayısı ile azalır. Sonuç olarak, membranın genişlemesi için pratikte enerji ihtiyacı bulunmamaktadır. Sürtünmenin olmayışı sebebi ile de bu tasarımda histerezisin de olmadığı görülmektedir. Sadece şişirilirken membranın esnemesi için biraz enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu enerji çok küçük miktarda olup, genellikle 10 kPa’dan daha düşük seviyede bir eşik basıncına ihtiyaç duyulur [4].

## 2.3. Ağlı Kaslar (Netted Muscles)

Örgülü ve ağlı pnömatik kaslar arasındaki fark membran etrafındaki örülü ağın yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Ağlı pnömatik kasın örgüsü arasındaki boşluklar nispeten büyüktür, örgülü pnömatik kasın membranı ise daha sıkı bir örgüye sahiptir. Bu nedenle membran esneyen türden bir yapıya sahip ise daha düşük basınçlara dayanabilir demektir. Bu yüzden, bu tip pnömatik kasların membranları yeniden düzenlenen tipte olacaktır. Ağlı pnömatik kasların Yarlott, ROMAC (Robotic Muscle Actuator), Kukolj Muscle vb. çeşitleri vardır. Örnek olması açısından aşağıda Yarlott Muscle açıklanmıştır [4].



Şekil 3. Pileli tip pnömatik kas (Pleated type pneumatic muscle)

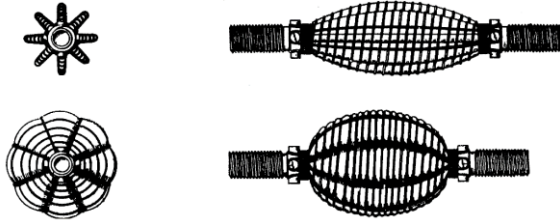
Yarlott tarafından ABD patentine sahip olan Pnömatik kas, elastomerik bir keseden oluşur. Bu kese pnömatik kas boyunca aksel olarak kordonlardan veya ipliklerden bir uçtan diğer uca kadar dairesel şekilde örülmüştür. Bu kese elastik genişlemeye karşı ipliklerle radyal olarak güçlendirilmiştir. Bu işlem şekil 3’de görüldüğü gibi, helisel şekilde sarılmış tek bir kordondan da yapılabilir. Yarlott tipi pnömatik kasın tam şişirilmiş hali küreye benzer bir şekil alır.

Uzatıldığında ise aksel iplikler düzelir ve şekil 4'deki ön görünümde olduğu gibi girintili çıkıntılı bir şekle dönüşür. Burada kabuk yüzeyi aşağı yukarı sabit kalır ve yüzeyin yeniden düzenlenmesi meydana gelir. Böylece kabuk gerilmesi azalır ve daha fazla pnömatik enerjinin mekanik güce dönüşmesi sağlanır. Eğer kabuk tamamen uzatılırsa, aksel iplikler tam olarak düzleşecek ve basınçlandırma ile yüksek gerilime sebep olacaktır. Görünüşe göre Yarlott bu tip pnömatik kası 1.7 kPa gibi düşük basınçlarda çalışan sistemler için tasarlamıştır.

#### 2.4. Gömülü Kaslar (Embedded Muscles)

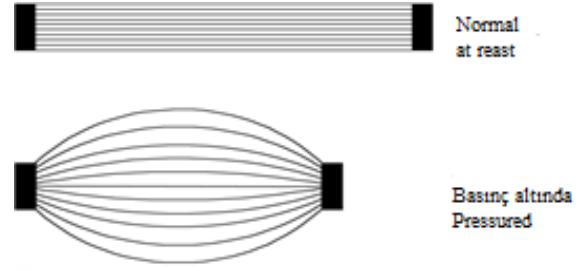
Bu tip pnömatik kaslarda yük taşıyan yapı membranın içerisine gömülü şekildedir. Gömülü tip kasların birçok tasarımı vardır ve bunların pek çoğu mucidinin ismi ile anılmaktadır. Bunlardan biri olan Baldwin Muscle aşağıda anlatılacaktır.

Baldwin tip pnömatik kas cam liflerin aksel yönde elastomerik membrana gömülü olduğu çok ince cerrahi kauçuk şeklinde bir yapıya sahiptir. Gömülü tip membranın lif doğrultusundaki elastisite modülü liflere dik doğrultudaki elastisite modülünden çok daha yüksektir. Şekil 5'de Baldwin tipi gömülü pnömatik kas gösterilmektedir.



Şekil 4. Yarlott tip pnömatik kas (Yarlott type pneumatic muscle)

Gömülü pnömatik kaslar, sürtünmenin olmayışı ve çok ince bir membran yapısı olması nedeniyle örgülü pnömatik kaslara göre daha az histerezise ve daha düşük eşik basıncına sahiptirler. Fakat radyal genişleme çok fazla olduğu için çalışma basıncı 10-100 kPa arasında tutulmalıdır. Baldwin (1969) bu düşük basınçlarda kuvvetin 1600 N'a kadar ulaştığını belirtmektedir. 100 kPa basınçta sürekli olarak 45 kg'lık yük ile indirme-kaldırma şeklinde yapılan ömür testlerinde Baldwin tipi pnömatik kasların çalışma ömrünün 10000-30000 çevrim (cycle) olduğu görülmektedir [4].



Şekil 5. Baldwin tip pnömatik kas (Baldwin type pneumatic muscle)

### 3. PNÖMATİK KASLARIN ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF PNEUMATIC MUSCLES)

1. Pnömatik kaslar oldukça yüksek kuvvet ve güç ağırlık ve hacim oranına sahiptir.
2. Pnömatik kaslar değişik değişik boyutlarda ve değişik güç aralıklarında üretilebilirler. Mevcut durumda, 100-4000 mm boyunda ve 10-70 mm çapında pnömatik kaslar üretilebilmektedir.
3. Maksimum kısılmanın elde edilebilmesi pnömatik kasın yapısına bağlıdır. Mevcut durumda nominal uzunluğunun %30-35 kadar bir kısılma gerçekleşmektedir.
4. Biyolojik kasın kesitinde meydana gelen gerilme kuvveti 30-40 N/cm<sup>2</sup> olmasına karşın bu değer pnömatik kaslarda 300 N/cm<sup>2</sup> değerine ulaşabilmektedir.
5. Pnömatik kasların su ve diğer sıvı ortamlarda kullanımı ile gaz ve buhar ortamlarında patlamaya karşı kullanımı güvenlidir.
6. Pnömatik kasların çok ilginç bir özelliği de kendi yumuşaklık ve sertliklerini kontrol edebilme imkanı veren antagonistik bağlantı kabiliyetlerinin olmasıdır. Bu kabiliyet yaygın olarak kullanılan geleneksel aktüatörlerde bulunmamaktadır. Bu özellik değişik uygulama alanlarında pnömatik kasların kullanılması açısından önemli avantaj sağlamaktadır.
7. Pnömatik kaslar oldukça esnek, elastik bağlantı ve üstün güvenlik potansiyeline sahip bir yapıdadır. Pnömatik kasların bu esnek ve yumuşak yapısı, biyolojik kaslar ile benzerlik gösterir.
8. Pnömatik kaslarda hidrolik veya pnömatik silindirlerin içerisindeki pistonların çalışması ile

meydana gelen “tutukluk (stick-slip)” etkisi de bulunmamaktadır [3].

Pnömatik kasların avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

#### **Avantajlar (Advantages):**

1. Oldukça yüksek maksimum kuvvet: Pnömatik kas ile üretilen kuvvet, aynı boyutlardaki pnömatik silindirin ürettiği kuvvetten on kat daha büyüktür.
2. Birim kuvvet başına düşen kütle miktarı çok düşüktür.
3. Benzer amaçlı kullanılan ürünlere oranla daha düşük maliyetlere sahiptirler.
4. Basınç ayarlama yoluyla kolay pozisyonlama ve orta konumda konumlandırabilme.
5. Birçok uygulamada daha düşük basınçlı hava tüketimi.
6. Hızlı ivmelenebilme sayesinde yüksek dinamik operasyonlarda kullanabilme.
7. Stick-slip karakteristiklerinin bulunmayışı.
8. Temiz oda ve kirli ortamlarda kullanılabilme özelliği.
9. Sessiz konumlandırma.
10. Değişik akışkanlar ile çalışabilme.
11. Yağlama ihtiyacı bulunmamaktadır [5].

#### **Dezavantajlar (Disadvantages):**

1. İhtiyaç duyulan stroğun sağlanabilmesi için kas boyutunun uzatılması gerekmektedir.
2. Çift etkili fonksiyon mümkün değildir.
3. Yükün yönlendirilmesi mümkün değildir.
4. Kauçuk malzemenin yaşlanması: servis ömrü malzemenin kısalma oranına ve ortam sıcaklığına bağlıdır.
5. Keskin kenarlı dış etkilere ve kaynak sıçramalarına karşı dayanıksızdırlar.
6. Aşırı yüklenme sonucu çatlak veya baloncuk oluşabilir [5].

## **4. PNÖMATİK KAS UYGULAMALARI (PNEUMATIC MUSCLE APPLICATIONS)**

### **4.1. Biorobotik Uygulamalar (Biorobotic Applications)**

Pnömatik kaslar şimdiye kadar çoğunlukla biorobotik uygulamalarda veya biomimetik robotlarda kullanılmıştır. Bu aktüatörlerin gerçek iskelet kaslarının karakteristiklerine benzemesi nedeniyle,

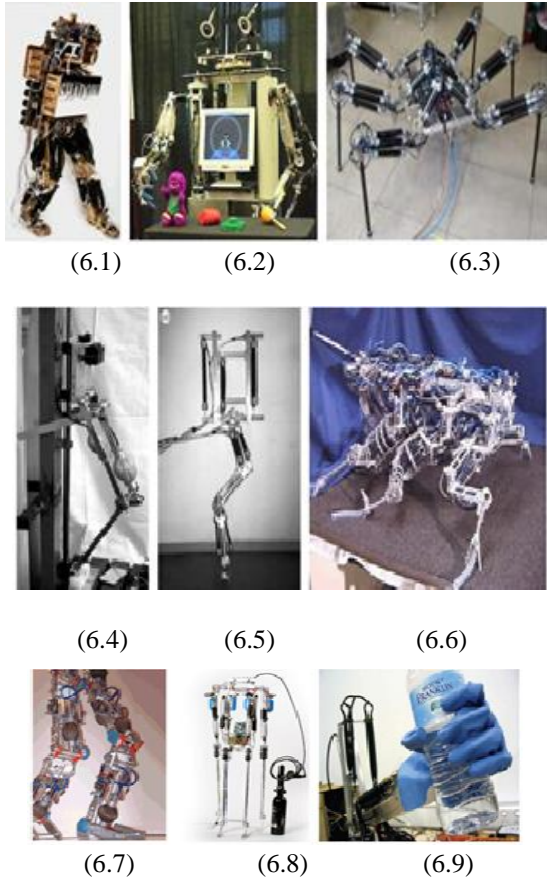
araştırmacılar organik kas, kemik, tendon ve deriye uygun olacak şekilde taklit ederek pnömatik kas üretmeye çalışmışlardır. Bu yaklaşım sayesinde hayvan ve insan morfolojisi ile fizyolojisini taklit ederek biyolojik olarak esinlenen robotların geliştirilmesi sağlanmıştır. Çeşitli biorobotik uygulamaları şekil 6’da görülmektedir [6].

Pnömatik kas uygulamalarının öncülerinden biri olan ve Shadow Robot Co. tarafından gerçek boyutlu olarak 1988 yılından itibaren geliştirilen “Shadow Biped Walker”dır (Şekil 6.1). Yirmi sekiz adet pnömatik kastan oluşan (herbir ayakta ondört adet) ve sekiz eklem noktasında etkiyen robot on iki serbestlik derecesine sahiptir. Intelligent Soft Arm Control veya ISAC (Şekil 6.2) olarak adlandırılan insansı robot, herbiri altı serbestlik derecesine sahip ve çoklu pnömatik kas sayesinde herbir eklem yerinde antagonistik davranış gösteren iki kola sahiptir. Altı bacaklı bir yapıya sahip böcek benzetimli ve “Airbug” (Şekil 6.3) olarak adlandırılan robotta pnömatik kaslar antagonistik kontrol konseptine dayalı olarak kullanılmıştır [6].

Bir küçük ve bir de büyük bacadan oluşan “Hopping robot” (Şekil 6.4), diz eklem hareketini yapabilmek için pileli pnömatik kas kullanılarak kalça ve gövde bir kılavuz mil boyunca kaymaktadır. Dört bacaklı olarak geliştirilen “PANTER” (Şekil 6.5) isimli robotun herbir bacağı pnömatik kaslardan meydana gelmiştir ve dört serbestlik derecesine sahiptir. Hamamböceğinden esinlenerek imal edilen “Ajax” (Şekil 6.6) isimli robotun bacakları pek çok pnömatik kas ile kontrol edilmektedir. İki ayaklı “Lucy” (Şekil 6.7) isimli yürüyen robot iki adet eklemli bacak ve gövdeden oluşmakta ve altı serbestlik derecesi için on iki adet pnömatik kasa sahiptir. Otonom pnömatik kas etkili iki ayaklı “Stumpy” isimli robot Şekil 6.8’de gösterilmektedir.

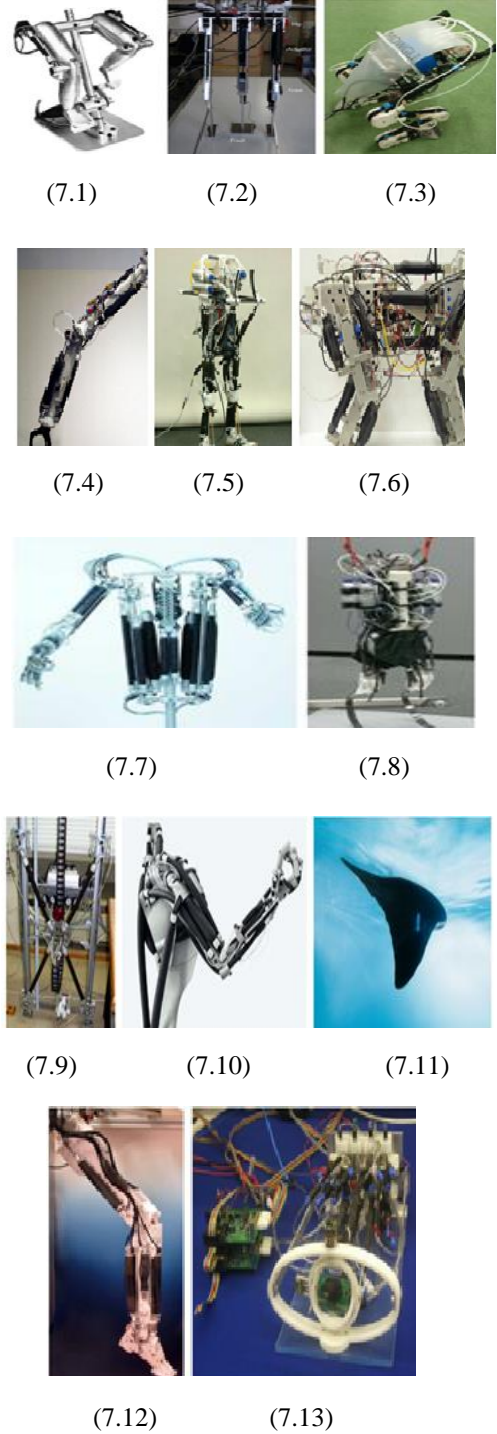
Şekil 7.1’de pnömatik kas etkili robotik el tasarımı gösterilmiş olup, temel olarak parmak, başparmak, ön kol ve dirsek hareketlerini yapabilmektedir. Şekil 7.1’de pnömatik kas deney düzeneği gösterilmekte olup, tek serbestlik dereceli ve ölçekli alt ekstremite (vücudun kalçadan ayağa kadar olan kısmı) sabit bir bisiklete monte edilmiş ve pnömatik kaslarla çalışmaktadır. Şekil 7.2’de lineer olmayan osilatör ağı ile kontrol edilen antagonistik pnömatik kas çiftleri ile çalışan üç bacaklı robot gösterilmektedir. Şekil 7.3’de pnömatik etkili iki ayaklı zıplayan ve alçalan “Mowgli” isimli robot görülmektedir. Mowgli’nin yapay kas-iskelet sistemli altı adet pnömatik kastan oluşmaktadır [6].

Şekil 7.4’de hibrit tahrik konseptinde üretilen çift serbestlik dereceli kol görülmektedir. Burada, küçük elektrikli aktüatörler ile desteklenen güvenli pnömatrik kaslar, insan kemiğinden esinlenerek üretilmiş robotik bağlantılar ve yakın zamanda tasarlanmış olan dağılık tip kompakt basınç regülatörleri kullanılmıştır. Şekil 7.5’de pnömatrik kas esas alınarak yapılmış olan iki ayaklı yapay kas-iskelet sistemi görülmektedir. Şekil 7.6’de antagonistik çiftler halinde pnömatrik kaslardan dört ayaklı olarak imal ve kontrol edilen kas-iskelet sistemi görülmektedir. Şekil 7.7’de pnömatrik kas ile çalıştırılan, boyutsal oranlar ve işlevsel olarak insana benzer şekilde geliştirilmiş olan gövde şeklindeki robot görülmektedir. Şekil 7.8’de iki ayak üzerinde koşmak için insan kas aktivitelerine uygun olarak imal edilmiş ve pnömatrik kaslar ile hareket ettirilen “pnömatrik robot atlet” görülmektedir [6].



Şekil 6. Pnömatrik Kasların Biorobotik uygulamaları: (6.1) Gölge iki ayaklı yürüteç (Shadow biped walker) (6.2) Isac, (6.3) Airbug, (6.4) Hopping robotu (robot), (6.5) Panter bacağı (leg) (6.6) Ajax,

(6.7) Lucy, (6.8) Stumpy, (6.9) Düşük maliyetli insansı el (Low cost humanoid hand)



Şekil 7. Pnömatrik Kasların Biorobotik uygulamaları: ( 7.1) Pnömatrik bisiklet (Pneumatic bicycle) (7.2) Üç bacaklı robot (Three-legged robot) (7.3) Mowgli, (7.4) Robotik kol (Robotic arm) (7.5) Bipedal robot, (7.6) Quadruped robot, (7.7) Pnömatrik gövde robotu, (7.8) Pnömatrik robot atlet, (7.9) Pnömatrik kol, (7.10) Pnömatrik kol, (7.11) Pnömatrik kol, (7.12) Pnömatrik kol, (7.13) Pnömatrik kol.

gövde (Pneumatic torso) (7.8) Pnömatik atlet robotu (Pneumatic athlete robot) (7.9) Pnömatik tırmanma robotu (Pneumatic climbing robot) (7.10) Airic's kolu (arm) (7.11) Aqua Ray, (7.12) Gölge robot bacağı (Shadow robot leg) (7.13) Robotic eye with pneumatic actuation (Pnömatik çalıştırma ile robotik göz)

Şekil 7.8'de dört adet pnömatik kas yardımı ile geliştirilerek kontrol edilen ve dikey olarak tırmanan bir robot görülmektedir. Şekil 7.10'da Festo AG & Co. üretimi robot kolu görülmektedir. Burada kemik yapısı, piezo teknolojisine dayalı çok küçük valfler kullanılarak otuz adet pnömatik kas sayesinde hareket etmektedir [6].

Ayrıca, şekil 7.11'de Festo AG & Co. üretimi uzaktan kontrollü üç adet antagonistik pnömatik kas çifti kullanılarak yapay tendonlar yardımı ile hareket eden iki kanat ve bir kuyruktan oluşan robot balık görülmektedir. Şekil 7.12'de Shadow Robot Co. tarafından geliştirilen pnömatik kas ile hareket eden protez bacak görülmektedir.

Şekil 7.13'de Bristol Robotics Laboratory'de geliştirilen göz küresini hareket ettiren sistemin pnömatik kaslar yardımı ile yapıldığı robotik göz görülmektedir.

Burada iki serbestlik derecesine sahip sistemin kontrolü dört adet pnömatik kas yardımı yapılmaktadır [6].

#### 4.2. Medikal Uygulamalar (Medical Applications)

Pnömatik kasların çeşitli avantajları arasında, nispeten hafif ağırlığı ve doğal uyumu sayesinde yüksek güç çıkışı sağlama kabiliyetine sahip olması ve böylece insan-robot etkileşiminin gerektirdiği güvenlik, basitlik ve hafiflik ihtiyaçlarını karşılamasıdır. Bu karakteristikler ve insan kası özelliklerine sahip olması, pnömatik kasları, dejeneratif kas hastalıkları, ekstremité bozukluğu veya nörolojik yaralanmalar neticesinde kinetik kabiliyetleri etkilenen hastaların tedavisinde kullanılan cihazlarda kullanımını umut verici yapmaktadır. Bu bölümde medikal uygulama odaklı pnömatik kaslar sunulacaktır. Bu uygulamaların pek çoğu Şekil 7'da gösterilmiştir [6].



(8.1)

(8.2)

(8.3)



(8.4)

(8.5)



(8.6)

(8.7)

(8.8)



(8.9)

(8.10)



(8.11)

(8.12)



(8.13)

(8.14)

Şekil 8. Pnömatik Kasların Medikal uygulamaları:  
(8.1) PAM-aktive edilmiş ön kol (actuated forearm)

(8.2) Kas kıyafeti (Muscle suit) (8.3) Ayak bileği ayağı ortezi (Powered-ankle foot orthosis) (8.4) Rupert, (8.5) Pnömatik kalça ortei (Pneumatic hip orthosis) (8.6) Pnömatik ayak ortezi (Pneumatic foot orthosis) (8.7) Haptic kol dış iskeleti (arm exoskeleton) (8.8) Üst vücut dış iskeleti (Upper body exoskeleton) (8.9) Üst vücut dış iskeleti (Upper body exoskeleton) (8.10) Alt vücut dış iskeleti (Lower body exoskeleton) (8.11) Pnömatik güç destek eldiveni (Pneumatic power assist glove) (8.12) Diz rehabilitasyon cihazı (Knee rehabilitation device) (8.13) Ev eğitimi için ortez (Orthosis for home training) (8.14) İyileşme için izokinetik ekipman egzersizleri (Isokinetic equipment for recovery exercises)

Şekil 8.1'de parmak ve ön kol hareketlerinin yapılmasını sağlayan pnömatik kas ile çalıştırılan ön kol protezi görülmektedir. Şekil 8.2'de felçli hastalar için destek sağlayan zırlı tip kas giysisi (muscle suit) görülmektedir. Bu kas giysisi metal çerçeve olmadan sadece sıkıştırılmış hava ile çalışan pnömatik kaslardan oluşmaktadır. Şekil 8.3'de bacak rehabilitasyonu için imal edilmiş ayak-ayak bileği ortezi görülmektedir. Burada yürümenin değişik evrelerinde tek noktadan destek sağlamak için pnömatik kaslar kullanılmıştır. Şekil 8.4'de dört adet pnömatik kas ile beş serbestlik derecesine sahip bir cihaz görülmektedir. Bu cihaz üst ekstremité bozukluğuna sahip hastaların klinik tedavisinde yardımcı tedavi aracı olarak kullanılmaktadır. Şekil 8.5'de fiziksel eksiklik olduğu durumlarda alt ekstremité hareketlerine yardımcı olmak üzere geliştirilen ve pnömatik kaslara sahip kalça ortezi görülmektedir [6].

Şekil 8.6'da yaralanma sonrası yürüme rehabilitasyonu sırasında hastalara yardımcı olmak için kullanılan ayak-ayak bileği ortezi görülmektedir. Şekil 8.7'de sanal ortamlarda eğitim ve rehabilitasyon için beş serbestlik dereceli pnömatik kas ile çalışan haptic kol iskeleti gösterilmiştir. Şekil 8.8, 8.9 ve 8.10'da üst ve alt ekstremitenin yönetimine izin veren pnömatik kas ile çalıştırılan dış iskelet görülmektedir [6].

Şekil 8.11'de kauçuk pnömatik kaslar ile çalıştırılan giyilebilir bir eldiven görülmektedir. Bu cihaz kavisli kauçuk pnömatik kaslar sayesinde, bükme hareketine ve parmakların kavrama kuvvetinin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 8.12'de pnömatik kas ile çalıştırılan diz rehabilitasyon cihazı görülmektedir. Şekil 8.13'de nörolojik bozukluğu olan hastalarda yoğun olarak ev merkezli yürüyüş

eğitimi için kullanılan motorlu ortezde pnömatik kasların kullanımı görülmektedir. Şekil 8.14'de pnömatik kas ile çalışan kalça ve diz egzersizleri için geliştirilen ekipman görülmektedir [6].



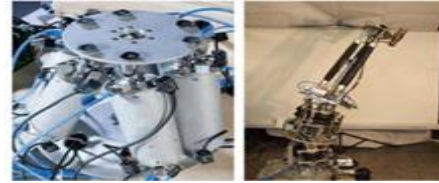
(9.1)

(9.2)



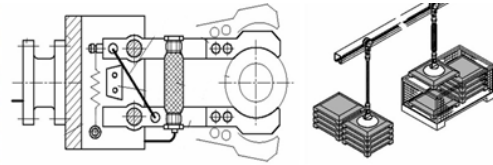
(9.3)

(9.4)



(9.5)

(9.6)



(9.7)

(9.8)

Şekil 9. Pnömatik Kasların Endüstriyel Medikal uygulamaları: (9.1) Pnömatik 3 SD Robot (Pneumatic 3-DOF robot) (9.2) PAM-aktif edilmik robot kol (actuated robot arm system) (9.3) 2 SD düzlemsel robotik manipülatör (2-DOF planar robotic manipulator) (9.4) Köprülerin modal parametrelerinde kullanılan PAM'lar (PAMs used in modal parameters of bridges) (9.5) Paralel-kinematik hexapod aleti (Parallel-kinematic hexapod tool) (9.6) Güvenli insan-robot etkileşimi için hibrit robot (Hybrid robot for safe human-robot interaction) (9.7) Endüstriyel tutucu (Industrial gripper) (9.8) Konumlama sistemi (Positioning system)

#### 4.3. Endüstriyel uygulamalar (Industrial applications)



Pnömatik kasların endüstriyel robotların yapımında kullanımı son yıllarda önemli ölçüde dikkat çekmektedir. Pnömatik kaslar düşük ve orta hızlarda yüksek tork üretebilirler, dişli sistemlerinde olduğu gibi yönlendirme olmadan kolaylıkla montaj edilebilirler ve hafif olma özelliklerinden dolayı taşınabilir mekanizmalarda aktüatör olarak kullanılabilirler. Ayrıca, pnömatik kaslar doğal uygunluk ve şoka dayanıklı olma özelliklerinden dolayı, özellikle güvenli insan-robot etkileşimi olan endüstriyel robotlarda ve endüstriyel mekanizmalarda hareketlendirici olarak uygun bir çözümdürler. Pnömatik kasların şekil 9'de bazı endüstriyel uygulamaları görülmektedir [6].

Şekil 9.1'de kauçuk pnömatik kaslardan üretilmiş olan tek serbestlik dereceli pnömatik eleman ve üç serbestlik dereceli robot kolu görülmektedir. Şekil 9.2'de pnömatik kas hareketlendiricili altı serbestlik derecesine sahip robot kol sistemi ve şekil 9.3'de pnömatik kas hareketlendiricili ağır yüklerin taşınmasında kullanılan iki serbestlik dereceli düzlemsel robot manipülatörü görülmektedir [6].

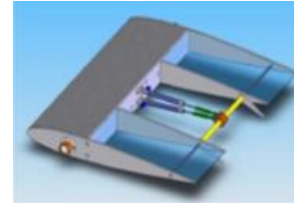
Şekil 9.4'de değişik şekillerdeki köprü benzeri yapılarda pnömatik kasların kullanımı görülmektedir. Şekil 9.5'de pnömatik kas ile çalışan paralel-kinematik altı ayaklı bir araç görülmektedir. Bu robot her biri basınç ve konum sensörüne sahip altı ayrı lineer aktüatörden (pnömatik kas) oluşmaktadır. Şekil 9.6'da güvenli insan-robot etkileşimi için geliştirilen, iki adet körük ve bir adet pnömatik kastan oluşan prototip hibrit robot görülmektedir [6].

Şekil 9.7'de pnömatik kasın endüstriyel uygulama alanlarından sıkıştırma örneği görülmektedir. Burada pnömatik kas sıkıştırma mekanizmasının çene kısmına uygun uzaklıktaki bölgeye yerleştirilerek sıkıştırma hareketi yönetilmektedir. Pnömatik kaslar şekil 9.8'de görüldüğü gibi basit konumlama sistemlerinde de kullanılabilir. Bu durumda el manivelası yardımı ile basınçlandırılarak veya basınç düşürülerek iş parçası kaldırılabilir veya indirilebilir [6].

#### 4.4. Havacılık ve Diğer Uygulamalar (Aviation and Other Applications)

Şekil 10.1'de kontrolü pnömatik kas ile yapılan bir kanatçık görülmektedir. Şekil 10.2'de altı ayaklı bir yapıya sahip, pnömatik kaslar sayesinde altı eksenle hareket edebilen ve pasif süspansiyon sistemine sahip sürüş ve uçuş simülatör koltuğu görülmektedir. Şekil 10.3'de Engineered Arts Limited (Penryn, Cornwall, U.K. 2010) tarafından eğitim, iletişim, etkileşim ve

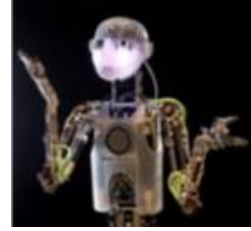
eğlence amaçlı olarak geliştirilen "RoboThespian" isimli robot görülmektedir [5].



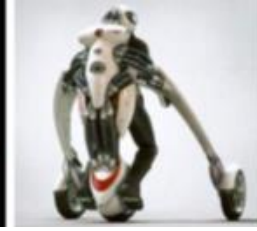
(10.1)



(10.2)



(10.3)



(10.4)

Şekil 10: Pnömatik Kasların Havacılık ve diğer uygulamaları: (10.1) PAM- aktif arka kenar kanadı (activated trailing edge flap) (10.2) FM hareket koltuğu (motion seat), (10.3) RoboThespian, (10.4) Deus Ex Machina

#### 5. STATİK MODEL (STATIC MODEL)

Pnömatik kas, içerisine uygulanan basınç sayesinde kısalarak pnömatik enerjinin mekanik enerjiye dönüşmesini sağlar. Karmaşık geometrik yapı göz ardı edilerek, teorik enerji korunumu yaklaşımı ile ortaya çıkan gerilim, basınç ve aktüatör uzunluğunun bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Gazın pnömatik kas içerisine verilirken elde edilen girdi işi ( $W_{in}$ ) eşitlik 1'de belirtildiği gibi bulunur [7].

$$dW_{in} = \int_{S_i} (P - P_0) dl_i \cdot ds_i = (P - P_0) \int_{S_i} dl_i \cdot ds_i = P' dV \quad (1)$$

Burada P mutlak gaz basıncını,  $P_0$  çevre basıncını (1 atm),  $P'$  bağıl basıncı ( $P - P_0$ ),  $S_i$  toplam iç yüzeyi,  $ds_i$  alan vektörünü,  $dl_i$  iç yüzey yer değiştirmesini ve  $dV$  hacim değişimini ifade etmektedir. Aktüatör hacminin değişimi ile elde edilen çıktı işi ( $W_{out}$ ) eşitlik 2'de gösterildiği bulunur [7].

$$dW_{out} = -FdL \quad (2)$$

Burada F eksenel gerilimi,  $dL$  ise eksenel yer değiştirmeyi ifade etmektedir. İdeal şartlar altında girdi ve çıktı işlerinin eşit olduğu varsayımıyla eşitlik 3, 4 ve 5 elde edilir [6].

$$dW_{out} = dW_{in} \quad (3)$$

$$-FdL=P'dV \quad (4)$$

$$F=-P' \frac{dV}{dL} \quad (5)$$

$dV/dL$  oranının hesaplanabilmesi için, şekil 10'da geometrik şekli verilen pnömatik kasın orta kısmı bir mükemmel silindir olarak modellenmiştir. Burada  $L$  silindirin uzunluğunu,  $\theta$  bir örgü ipliği ile silindirin dikey eksenindeki açısı,  $D$  silindir çapını,  $n$  bir örgü ipliğinin silindir boyunca dönüş sayısını ve  $b$  iplik uzunluğunu göstermektedir. Eşitlik 6 ve 7'de gösterildiği gibi  $L$  ve  $D$ ,  $n$  ve  $b$  sabit parametreleri ile birlikte  $\theta$ 'nın bir fonksiyonu olarak yazılabilir [7].

$$L=b\cos\theta \quad (6)$$

$$D=\frac{b\sin\theta}{n\pi} \quad (7)$$

Silindirin hacmi eşitlik 8 ile bulunur.

$$V=\frac{1}{4}\pi D^2 L=\frac{b^3}{4\pi n^2}\sin^2\theta\cos\theta \quad (8)$$

F eşitlik 5'den,  $P'$  ve  $\theta$ 'nın fonksiyonu olarak eşitlik 9 ve 10'da belirtilen şekilde yazılır.

$$F=-P' \frac{dV}{dL}=-P' \frac{dV/d\theta}{dL/d\theta}=\frac{P'b^2(3\cos^2\theta-1)}{4\pi n^2} \quad (9)$$

$$F=\frac{\pi D_0^2 P'}{4}(3\cos^2\theta-1) \quad (10)$$

Böylece  $F$  gerilimi basınç ile doğrusal orantılı ve örgü açısının bir fonksiyonu şeklinde yazılmıştır. Maksimum kısımla  $F=0$  iken  $\theta=54.7^\circ$  değerinde elde edilir [7].

Kabuk ve örgü kalınlığının ( $t_k$ ) da dikkate alınması durumunda silindir hacmi eşitlik 11 ile elde edilir [7].

$$V=\frac{1}{4}\pi(D-2t_k)^2 L \quad (11)$$

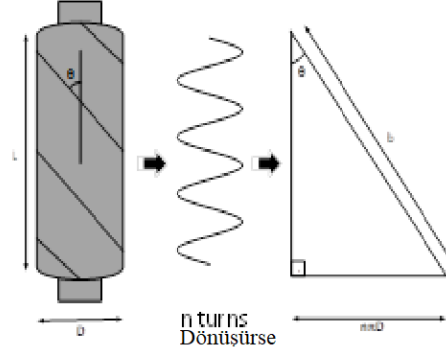
Eşitlik 11 eşitlik 4'de yerine konursa eşitlik 12 aşağıdaki gibi elde edilir [7].

$$F=-P' \frac{dV}{dL}=\frac{\pi D_0^2 P'}{4}(3\cos^2\theta-1)+\pi P' \left[ D_0 t_k \left( 2\sin\theta - \frac{1}{\sin\theta} \right) - t_k^2 \right] \quad (12)$$

## 6. SONUÇ (RESULT)

Bu makalede pnömatik kasların tanımı, tarihsel gelişimi, çeşitleri, özellikleri, uygulama alanları ve statik modellenmesinden bahsedilmiştir. Pnömatik kasın hava sızdırmaz membran yapısı sayesinde,

içerisine verilen basınçlı hava ile aksel olarak genişleyerek ve boylamsal olarak kısalarak çekme kuvveti meydana gelmektedir. Pnömatik kaslar, ilk olarak 1930'lu yılların başlarında icat edilmiş olmasına rağmen, o dönemlerde malzeme teknolojisinin yeteri kadar gelişmemiş olması nedeniyle yaygın olarak kullanımı daha sonra gerçekleşmiştir.



Şekil 11. Pnömatik Kas Geometrisi  
(Pneumatic Muscle Geometry)

Pnömatik kasların değişen kuvvet-uzunluk ilişkisi, daha yaygın olarak kullanılan pnömatik silindirlere ayıran bir özelliği olup, bu özellik değişen şekline bağlı olarak sanki değişen piston alanına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun önemli bir sonucu, pnömatik kasın pozisyonu ve basıncı arasındaki özgün bir dengenin olmasıdır. Bu tür aktüatörlerde pozisyon kontrolünde debi kontrolü yerine basınç kontrolü anahtar rol görevi üstlenmektedir. Bir diğer önemli farklılık ise ağırlıktır. Silindirlere tipik olarak alüminyum veya plastikten üretilirken, pnömatik kasların temel elementi çok hafif olan membrandan oluşmaktadır.

Düşük ağırlık, düşük ve orta hızlarda yüksek tork değerleri, direk olarak tek noktadan bağlanabilme, doğal uyumluluk, şoka karşı dayanım ve otonom hareket ihtiyacı olan uygulamalarda pnömatik kaslar kullanılmaktadır. Söz konusu özelliklerinden dolayı, biorobotik alanında yaygın olarak kullanılan pnömatik kaslar medikal, endüstriyel, havacılık vb. alanlarda da kullanılmaktadır.

## REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Daerden, Frank. "Conception and realization of pleated pneumatic artificial muscles and their use as compliant actuation elements." *Vrije Universiteit Brussel, Belgium* (1999).

[2] Kang, Bong-Soo, et al. "Dynamic modeling of McKibben pneumatic artificial muscles for antagonistic actuation." *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009.

[3] Mižáková, Jana, Ján Pitel, and Mária Tóthová. "Pneumatic artificial muscle as actuator in mechatronic system." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 460. Trans Tech Publications, 2014.

[4] Daerden, Frank, and Dirk Lefeber. "Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation." *European journal of mechanical and environmental engineering* 47.1 (2002): 11-21.

[5] Ravina, E. "Mechanical and thermal testing of fluidic muscles." *3rd European Conference on Mechanism Science, Cluj-Napoca, Romania, September*. 2010.

[6] Andrikopoulos, Georgios, Georgios Nikolakopoulos, and Stamatis Manesis. "A survey on applications of pneumatic artificial muscles." *Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on*. IEEE, 2011.

[7] Chou, Ching-Ping, and Blake Hannaford. "Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles." *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*. IEEE, 1994.

#### **Hasan Basri ULAS\***

Hasan Basri Ulas was born in Malatya, Turkey, on 06 April 1971. He graduated from the Machine Education Department in Gazi University, Ankara, Turkey, in 1994. In 1994, he attended the MSc programme at the Machine Education Department in Gazi University and graduated in 1996. In 2005, he acquired his Ph.D. degree in Machine Education department from Ankara Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Turkey. His current fields of research are control, identification, nonlinear systems and fluid power control