



PNÖMATİK İŞ ELEMANLARI VE TUTUCULARIN DÜNDEN BUGÜNE GELİŞİMİ VE SERVO KONTROL İLE ENTEGRASYONU

*THE HISTORIC DEVELOPMENT OF PNEUMATIC ACTUATORS AND GRIPPERS AND THEIR INTEGRATION WITH
SERVO CONTROL*

Mehmet Kasablar

ÖZET

Pnömatik iş elemanları ve tutucular, sistemlerde iş parçasını tutmak, taşımak, kaldırmak, sıkıştırmak vb gibi birçok amaçla kullanılan elemanlardır. Otomotiv, gıda, paketlenme ve ambalaj, seramik, ağaç işleme vb gibi endüstrinin hemen hemen her alanında kullanılan bu iş elemanları sanayi devrimleri ile sürekli gelişerek her zaman ihtiyaçları karşılamaya çalışmıştır. 19. yy'da basınçlı havanın endüstride uygulanması başlayarak 20.yy'da modern pnömatik silindireler ile sistemlerde yaygınlaşması sağlanmıştır. 21.yy günümüz teknolojisinde artık kalite, süreklilik, hassasiyet, ve haberleşme ile birden fazla sistemlerin birbiri ile entegre çalışması beklenmektedir. Bu beklentiler sanayiye otonom sistemlerin olduğu endüstri 4.0 dönemine götürmüştür.

Hava sıkışabilen, sıcaklıkla genleşebilen karakteristik özelliğe sahip olduğu için iş elemanlarında konumlama hassasiyetini bazen karşılayamamaktadır. Bu sebeple iş elemanı ve tutucularda konumlama hassasiyetini, hız, kuvvet kontrolünü sağlamak amacı ile servo-step motor kontrollü elektrikli sistemler geliştirilmiştir. Elektrikli silindir ve tutucular entegre haberleşme modüllerine sahip ekipmanlar olduğundan sistemlerin birbirleri ile kontrolleri ve sekron çalışmalarını sağlamıştır.

Ayrıca elektrikli tutucu sistemleri için arge sürecinden sonra üniversiteler ile birlikte yapılan özel yazılım, matematiksel model, analiz programları ve test yöntemleri ile sistemin sağlanması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pnömatiğin gelişimi, iş elemanları, pnömatik silindir, tutucu, elektrikli silindir, elektrikli tutucu, endüstri 4.0

ABSTRACT

Pneumatic actuators and grippers are used for many purposes such as gripping, holding, handling, lifting, pressing etc.. in systems. These work equipments which are used in almost every kind of industry such as automotive, food, packaging, ceramics, wood processing etc. tried to meet all demands while being developed by industrial revolutions. That's widely using provided on 20th century on systems with pneumatic cylinders after pressurized air usage starts on 19century.

Now, more than one systems each other integrated are expected to work with quality, precision and communication at 21th century's current technology. These expectations brought the industry to industry 4.0 age which autonomous systems take place.

Air sometimes cannot provide positioning accuracy at work equipments because of its compaction, heat expansion nature. With that reason, servo-step motor driven electric systems were developed to control positioning accuracy, speed, force of actuators and grippers.

Electric actuators and grippers, being equipments having integrated communication modules made systems work synchronised each other.

Additionally, after research and development phase of electric grippers, systems proofing were made by special software, mathematical models, analysis programs and test methods with collaboration of universities

Key Words: Development of pneumatic systems, work equipments, pneumatic cylinder, gripper, industry 4.0

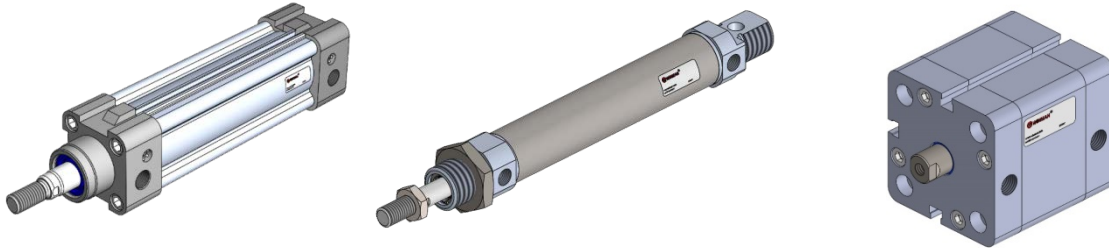
1. GİRİŞ

Pnömatik sistemler, basınçlı havanın davranışını inceleyen bilim dalıdır. Pnömatik sistemlerin ilk kullanımı MÖ.2500 yıllarına dayanırken, 19.yüzyılın ortasında havalı el aletleri, matkaplarda kullanılmış ve 20 yüzyılda günümüz teknolojisinde hala kullanılan modern pnömatik ekipmanlar ile gelişimini sürdürmüştür. Endüstrinin hemen hemen her alanında kullanılan pnömatik iş elemanları, sistemlerde itme, çekme, kaldırma, indirme, presleme, sıkıştırma, döndürme gibi birçok hareketin yapılmasını sağlamaktadır.

2.PNÖMATİK İŞ ELEMANLARI ve HAREKETİN KONTROLÜ

2.1. Pnömatik İş Elemanları

Modern endüstride pnömatik iş elemanları ihtiyaçlara göre, gelişen malzeme teknolojisine göre, küreselleşen Dünya pazarındaki rekabet şartlarına göre sürekli gelişim içerisinde olup zamanla belirli sınıflara göre çeşitlenmiştir. Pnömatik iş elemanları çalışma şekline göre, bağlantı şekline göre, gövde yapılarına göre vb kriterlere göre sınıflandırılır.



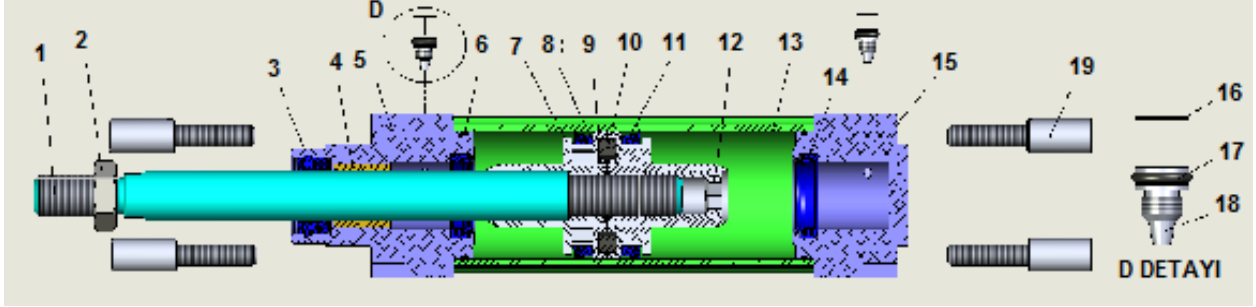
Şekil 1. Genel pnömatik silindirler

Genel olarak pnömatik iş elemanlarını şu şekilde gruplandırabiliriz.[1]

1. Doğrusal iş elemanları; Basınçlı havayı doğrusal harekete çeviren elemanlar pnömatik silindir olarak adlandırılır. Ölçü standartlarına göre, fonksiyonlarına göre, malzeme cinslerine göre birçok modeli vardır. En genel hali ile şu şekilde sınıflandırabiliriz.
 - 1.1. Ölçü standartlarına göre: ISO, CETOP, JIS
 - 1.2. Fonksiyonlarına göre; Tek etkili, çift etkili, tandem, pozisyoner, dönmez milli, durdurucu, mil kitlemeli
 - 1.3. Malzeme yapısına göre; Çelik, alüminyum, paslanmaz, alaşımlı polimer, plastik
 - 1.4. Gövde tiplerine göre; Profil, kompakt, kalem, milsiz, yataklamalı, oval
2. Döner iş elemanları; Basınçlı havayı dairesel harekete çeviren elemanlardır. Pnömatik motor veya aktüatör olarak sistemlerde kullanılır.
3. Özel iş elemanları; Hem dönme hem dairesel hareketi birlikte veya sıralı yapan iş elemanlarıdır. Pnömatik klemp, pnömatik tutucu

2.2. Pnömatik Silindirlerde Hareket Kontrolü

En genel yapısı ile pnömatik silindirlerin iç yapısını şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. ISO 15552:2004 profil gövdeli silindirin iç yapısı

Tablo 1. ISO 15552:2004 normunda pnömatik silindirde bulunan malzemeler [1]:

1- Silindir Mili	5-Ön Kapak	9- Yatak. halkası	13- Silindir Borusu	17- Yast. O-ringi
2- Mil Somunu	6- Kapak O-ring	10- Manyetik halka	14- Yast. Keçesi	18- Yast. Civatası
3- Boğaz Keçesi	7- Piston	11- Piston Keçesi	15- Arka Kapak	19- Kapak Civatası
4-Yataklama Burcu	8- Piston Keçesi	12- P.Mil Somunu	16- Yast. Pulu	

Pnömatik silindirlerde hareket basınçlı havanın piston alanına etkisi ile gerçekleşmektedir. Basınçlı hava arka odaya etki ettiğinde silindir itme yönünde hareket ederken, ön odaya etki ettiğinde silindir çekme yönünde hareket etmektedir. Pistonda bulunan keçeler ön arka oda arasında sızdırmazlık sağlarken, boğaz keçesi dış ortam ile sızdırmazlığını sağlamaktadır. Ayrıca yastıklama özelliği bulunan silindirlerde strok sonlarında çarpma etkisini absorbe etme özelliği kesit daralması ile sağlanmaktadır. Yastıklama özelliği bulunmayan silindir modellerinde, iç yapısında bulunan durdurucular yada keçenin damperleme özelliği ile durdurma işleminde sağlanmaktadır. Silindirlerdeki keçeler ve diğer elemanların kendi içlerinde esneme miktarları hareketin kontrolünü ve konumlama hassasiyetini etkilemektedir.

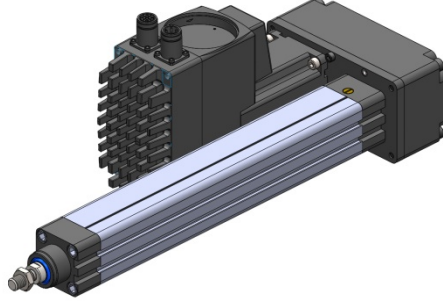
Basınçlı hava karakteristik özelliği ile değişiklik gösteren bir enerjidir. Bulunduğu ortamın sıcaklığına, basınç değerine ve hacmine göre genişleşip sıkışabilmektedir. Bu sebeple hem havanın karakteristik özellikleri hem de yukarıda bahsettiğimiz silindirin keçelerinden ve yapılarından dolayı hareketin kontrolü ve hassasiyeti zorlaşır.

Silindirlerin hız kontrolü, hız ayar valfleri ile kontrol edilebilir fakat havanın karakteristik özelliği sebebi ile bu sürekliliğini korumayabilir. Ayrıca konum kontrolleri üzerine harici bağlanan manyetik sensörlerden sağlanıp sisteme iletilir.

3.PNÖMATİK İŞ ELEMANLARINDAN ELEKTRİKLİ İŞ ELEMANLARINA GEÇİŞ

Gelişen günümüz teknolojisinde sistemlerden süreklilik, hassasiyet, izlenebilirlik, verimlilik beklenen en önemli özellikler haline gelmiştir. Arıca sistemlerin birbiri ile haberleşmesi olası hataların ortadan kaldırılması üretim sistemlerinin işletme tarafından tek merkezden izlenerek yönetilmeleri endüstri 4.0 ile daha da ön plana çıkarak karanlık fabrikalar oluşmaya başlamıştır.

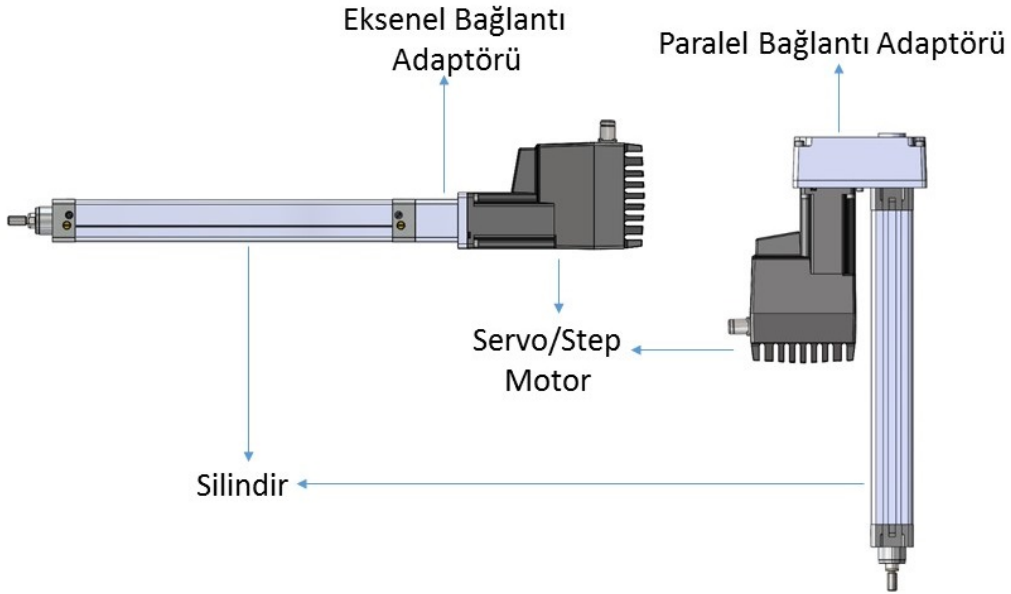
Elektrikli silindirler de gelişen bu teknoloji içerisinde yüksek konumlama hassasiyeti ile birden fazla hız ve konum bilgisini aynı iş elemanından sağlayan sistemlerdir.



Şekil 3. Elektrikli silindir [5]

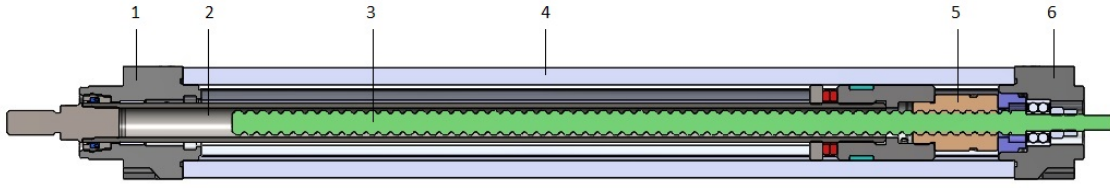
3.1. Elektrikli Silindirin Yapısı

Elektrikli silindir yapısı temel olarak 3 ana elemandan oluşmaktadır. Silindir kısmı ayrıca değerlendirilebileceği gibi genellikle motor entegre şekilde karşılaşılmaktadır.[2]



Şekil 4. Elektrikli silindir temel elemanları [5]

Silindir motordan aldığı dairesel hareketi doğrusal harekete çevirerek iş yapan elemandır. Silindirin mekanik yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Kullanılan mekanik ürünlere bağlı olarak silindirin maksimum yük kapasitesi, konumlama hassasiyeti, maksimum hızı, maksimum strok uzunluğu değişkenlik göstermektedir. [3]



Şekil 5. Elektrikli silindirin iç yapısı

- 1- Ön Kapak
- 2- Piston Mili
- 3- Vidalı Mil
- 4- Piston Gövdesi
- 5- Vidalı Mil Somunu
- 6- Arka Kapak

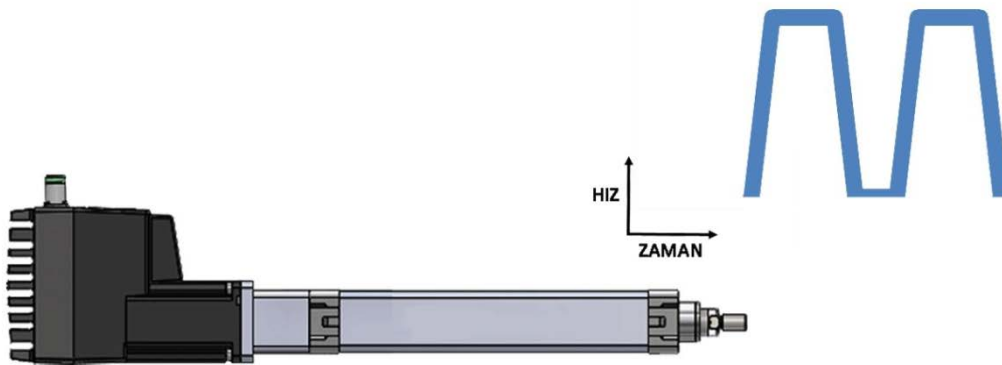
3.2. Elektrikli Silindir İle Konum Kontrolü

Elektrikli silindirler ile birden fazla pozisyonda hassas konumlama yapmak mümkündür. Elektrikli silindirin konumlama hassasiyeti, kullanılan vidalı milin ve konum okuyucu elemanın hassasiyetine bağlıdır. Silindir, motorun her bir tur dönüşü için vidalı milin adımı kadar yol alır. Hareket kesildiği anda silindir konumlanmış olur. Vidalı mile verilecek olan hareketin kontrolü ile silindir istenen pozisyonda konumlandırılabilir.

Elektrikli silindirlerde bilyalı vidalı mil kullanılması ile 0,02 mm konumlama hassasiyetlerine ulaşılabilirken trapez mil kullanımı ile bu değer 0,1 mm mertebelerinde kalmaktadır. Konum okuyucu elemanın (enkoder, lineer cetvel vb.) seçimi istenen konumlama hassasiyeti değerlerine uygun olmalıdır.[2]

Servo motor entegre edilmiş bir elektrikli silindir ile harici elemana ihtiyaç duyulmadan konum bilgisi okunabilir. Bu bilgi işlenip değerlendirilebilir. Şekil 6'da elektrikli silindir ile konum kontrolü gösterilmektedir. Silindir ilk pozisyonunda belirli bir süre bekledikten sonra ikinci pozisyonunda konumlanıyor. Pozisyon sayısı iki ile sınırlı değildir, arttırılabilir.

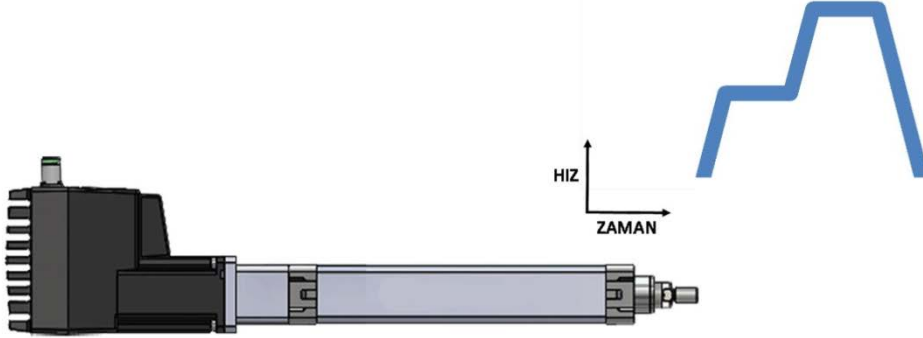
Elektrikli silindirlerin üzerinde dâhili konum okuyucu eleman bulunmayan motorlar ile kullanılması durumunda konum kontrolü yapabilmek için harici ekipmanlara ihtiyaç duyulur. Harici ekipmandan alınan konum bilgisi ile silindirin hareketi kontrol edilerek konumlandırma yapılabilir. [2]



Şekil 6. Elektrikli silindir ile konum kontrolü [5]

3.3. Elektrikli Silindir İle Hız Kontrolü

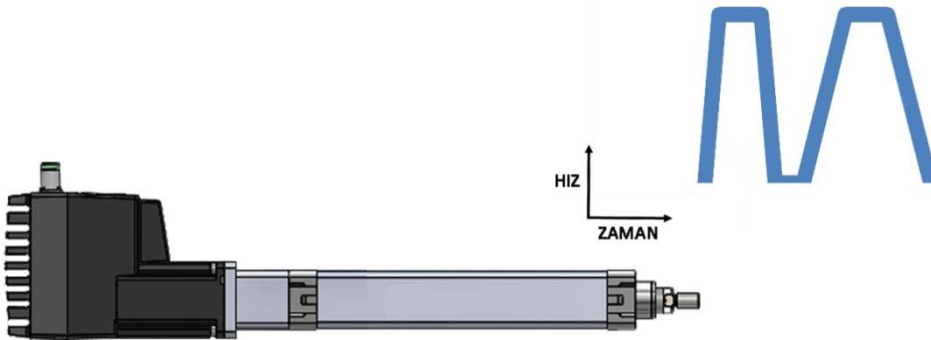
Elektrikli silindirin hızı kullanılan vidalı milin adımına ve motorun devrine bağlıdır. Hız, vidalı milin devir sayısı değiştirilerek kontrol edilebilir. Hareket esnasında motorun devri değiştirilerek hız değiştirilebilir. Uygulamaya bağlı olarak hızlanmalar ayarlanarak zaman kayıpları ortadan kaldırılabilir. Şekil 7'da elektrikli silindir ile hız kontrolü gösterilmektedir. Silindir ilk pozisyonuna ulaşmak için daha düşük hızda ilerlerken belirle süre sonra ikinci pozisyonuna ulaşmak için daha yüksek hızda hareket ediyor. [2]



Şekil 7. Elektrikli silindir ile hız kontrolü [5]

3.4. Elektrikli Silindir İle İvme Kontrolü

Elektrikli silindire entegre edilmiş motorun hızlanma ve yavaşlama değerleri değiştirilerek silindirin ivme kontrolü yapılabilir. Bu sayede silindirin ağır yükler altında riskli kalkış ve duruşlar yapması engellenir. Hızlı çevrim süreleri gerektiren uygulamalarda da hızlı kalkış ve duruşların ayarlanması ile istenen çevrim sürelerine ulaşılabilir. Şekil 8'da elektrikli silindir ile ivme kontrolü gösterilmektedir. Silindir belirli bir hıza farklı ivme değerleri ile ulaşıyor. [2]



Şekil 8. Elektrikli silindir ile ivme kontrolü [5]

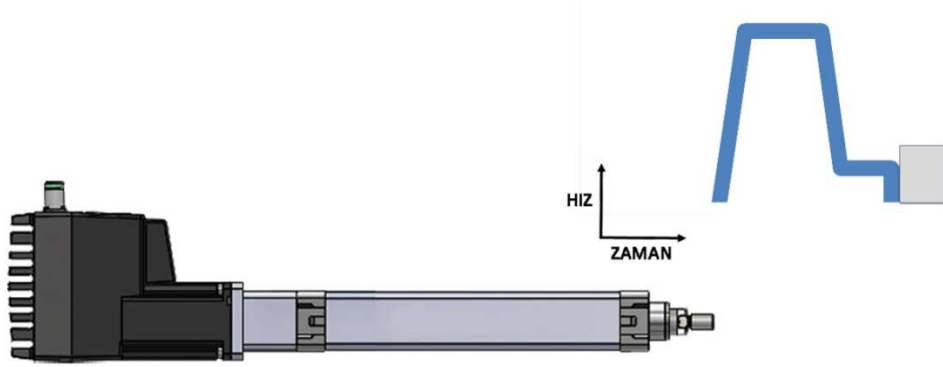
3.5. Elektrikli Silindir İle Kuvvet Kontrolü

Elektrikli silindirin uygulayacağı kuvvet, kullanılan motor gücü ve silindirin mekanik yapısına bağlıdır. Motor gücü kontrol edilerek silindirin kuvveti kontrol edilebilir. Günümüzde elektrikli silindirler ile 300 kN kuvvetler elde edilmektedir.

Servo motor entegre edilmiş elektrikli silindirde motorun tork modu kullanılarak kuvvet kontrol edilebilir. Silindir belirli bir kuvvet ile sınırlandırılabilir, belirli bir kuvvet altında sabit kalabilir. Kuvvet ve konum bilgileri okunabilir. Bu bilgiler işlenip değerlendirilebilir. Kuvvet bilgisinde istenen hassasiyete bağlı

olarak kuvvet sensörü kullanılması gerekebilir. Elektrikli silindirde tork modu bulunmayan motor kullanımda yine kuvvet sensörü kullanılarak bu bilgi elde edilebilir.

Şekil 9 'de elektrikli silindir ile kuvvet kontrolü gösterilmektedir. Silindir ilk pozisyonuna kadar yüksek hızda ilerliyor, ikinci pozisyonuna yavaş hızda geliyor ve parçaya temas belirli bir kuvvete ulaşıncaya kadar sabit kalıyor.



Şekil 9. Elektrikli silindir ile kuvvet kontrolü

4.YATAKLAMALI SİLİNDİRLERİN GELİŞİMİ

Silindirlere kaldırma, sıkıştırma, taşıma gibi çalışmalarda kullanıldığında silindirin miline yanıl kuvvetler etki etmektedir. Bu yanıl kuvvetler altında silindirlerin mili eğilmeye yada burkulmaya maruz kalmaktadır. Silindirler hareketi sağlayan elemanlardır. Kullanıldığı sistemlerde yanıl yükler altında çalışma olacaksa, yükü silindirin miline taşıtmak yerine bir yataklama elemanı kullanılması hem silindirin hem de sistemin ömrünün uzamasını sağlayacaktır.

Bu ihtiyaçlar doğrultusunda silindirlere de yataklamalı modellerin gelişimi sağlanmıştır.

4.1.Silindirlerde Yataklama Çeşitleri

Yataklama elemanları burçlu yada rulmanlı olarak kullanım şekline göre tercih edilebilir.

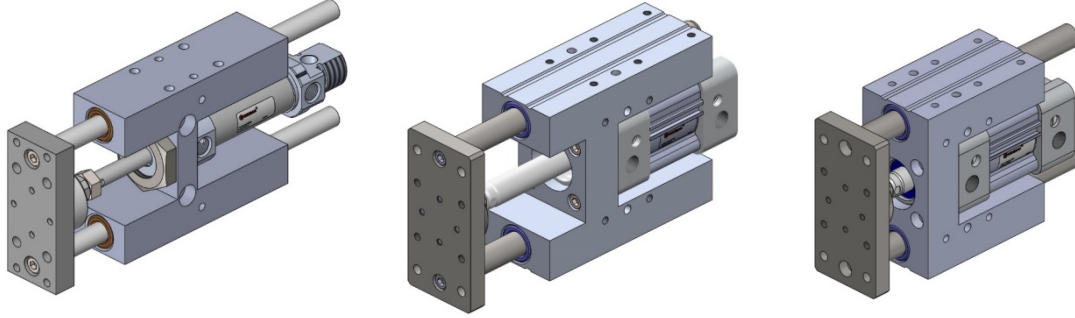
Şekil 10'da gösterildiği gibi başlıca iki tip yataklama türü vardır. Rulmanlı tip yataklama elemanlarıyla daha düşük sürtünme ve daha hassas hareket elde edilir. Bushing olarak da adlandırılan yataklama elemanlarında çalışma hassasiyetleri rulmanlı tiplere göre daha düşükken sürtünme kayıpları da yüksektir. Rulmanlı tipler milin çalışma doğrultusuna dik olarak gelen kuvvetlerin olduğu sistemlerde tercih edilmez. Aksi taktirde sertleştirilmiş bilyalar krom kaplı mil üzerindeki krom tabakasını darbelerden dolayı çizerek sağlıklı bir çalışma çıktısı verecektir.



Şekil 10. Yataklama Çeşitleri

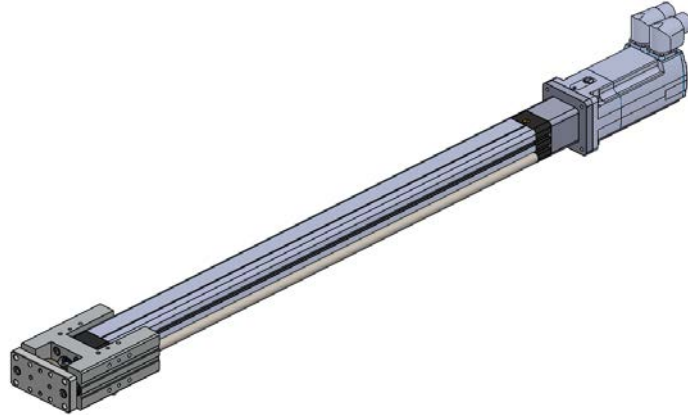
4.2.ISO Serisi Silindirlerde Yataklama

ISO 15552 serisi profil gövdeli ve ISO 6432 serisi silindirlere H yataklama veya U yataklamalar kullanılıp özellikle uzun stroklu ve doğrusal hareket yapan silindirlerde yataklama sağlanmış olur.[1]



Şekil 11. ISO Serisi pnömatik silindirlerde yataklama

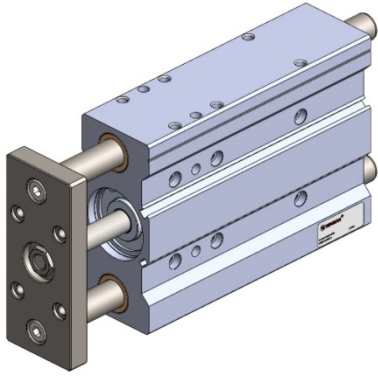
Elektrikli silindirlerde pnömatik silindirlerin kullanıldığı yerlere uyumlu olması adına ISO serisi bağlantılar dikkate alınarak üretilmiştir. Bu vesile ile mevcutta pnömatik silindir çalışan sistemlerden hassas konumlama, hız- kuvvet kontrol, haberleşme beklentilerinde herhangi bir tasarımda farklılık yapmadan yerine kullanılması sağlanmıştır.



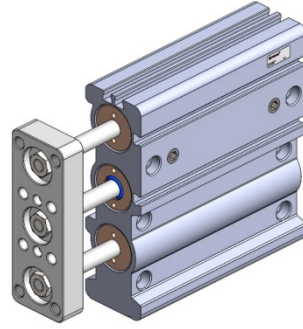
Şekil 12. ISO Serisi elektrikli silindirlerde yataklama

4.2.Kendinden Yataklamalı Pnömatik Silindirler

H veya U yataklama kullanılan harici sistemler gövde yapıları gereğinde oldukça ağır ve büyüktür. Sistemler de daha kompakt bir yapı olan kendinden yataklı silindirler zamanla özellikle kısa strok olan çalışma yerlerinde tercih edilebilir olmuştur. [1]



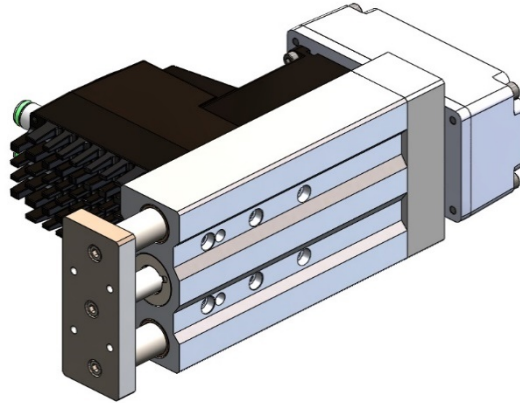
Şekil 13. Kendinden yataklı pnömatik silindir



Şekil 14. Kendinden yataklı ÜÇLÜ pnömatik silindir

4.2.1. Kendinden Yataklamalı Elektrikli Silindirler

Kendinden yataklı silindirlerde gelişen teknolojiye uyum sağlayarak elektrikli modellerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.



Şekil 15. Kendinden yataklı elektrikli silindir

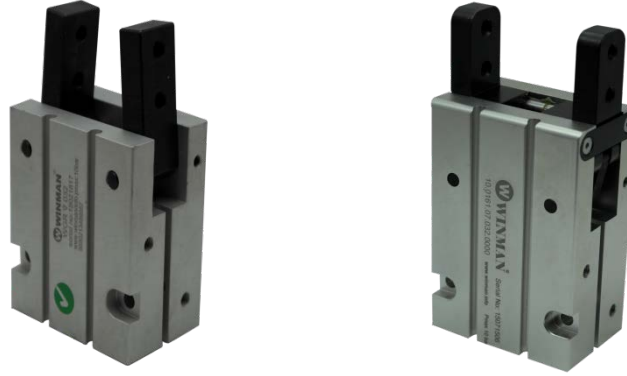
Elektrikli silindirler bölümünde detaylı olarak belirtmiş olduğumuz silindir kısmındaki sistemin temel yapısı, hız kontrolü, konum kontrolü, ivme ve tork kontrolleri kendinden yataklı elektrikli silindirler içinde geçerlidir. ISO serisi elektrikli silindirlerin çalışma şekline bağlı kalıp sisteme yataklama özelliğini de ilave ederek yanal yükler altında çalışma imkanı sunmaktadır.

5. TUTUCU SİSTEMLERİNİN GELİŞİMİ

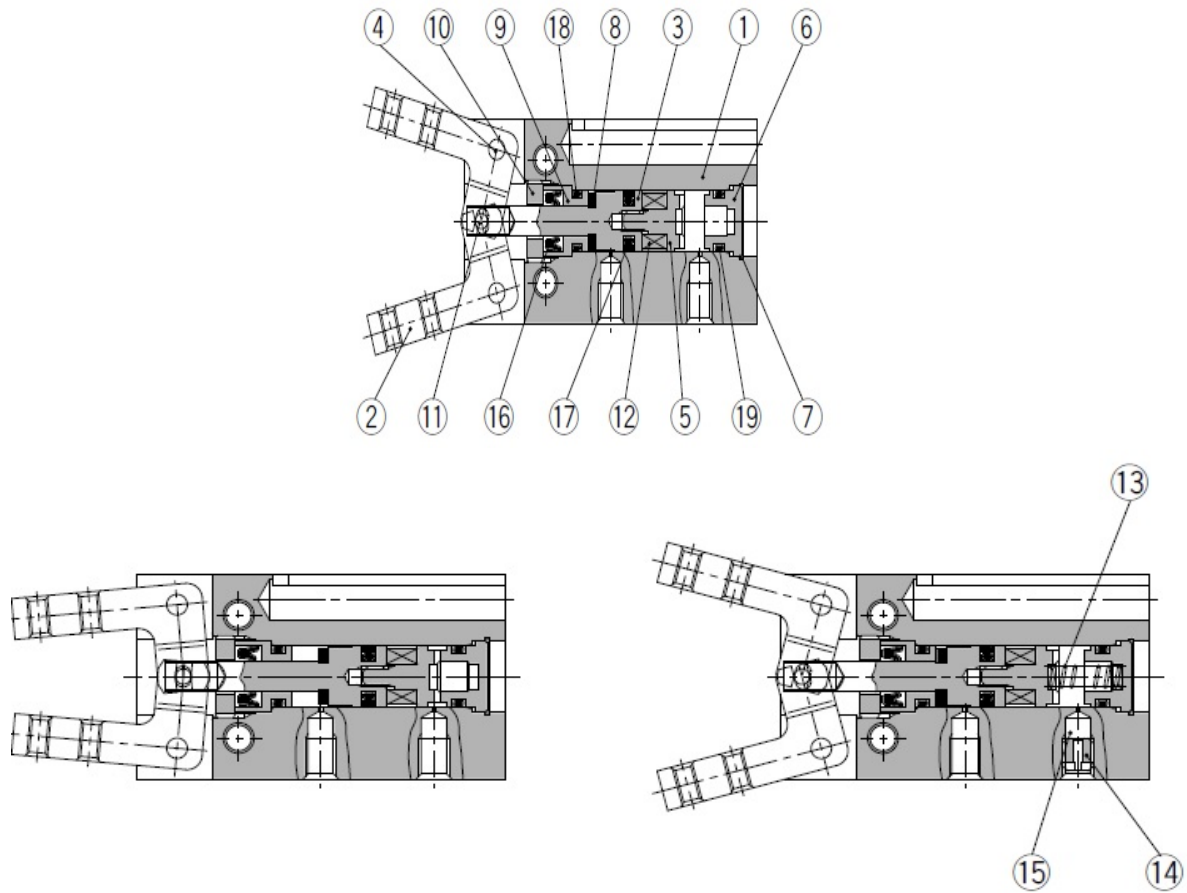
Parçaları kavrayarak tutan mekanizmalar tutucu olarak isimlendirilmektedir. Yapılacak işin büyüklüğüne ve uygulama şekline bağlı olarak geniş bir çeşitlilik kazanmaktadır. Tutuculara istenilen bağlantı şekline göre (noktasal, çizgisel, yüzeysel) farklı ayaklar bağlanarak en uygun bağlantı şekli sağlanabilir veya uygunsa ilk haliyle de kullanılabilir

5.1 Pnömatik Tutucular

Paralel ve açılı tutucu mekanizmalarının temel çalışma prensibi; sıkıştırılmış hava ile çalışan bir silindir ve silindirin pistonuna bağlı elemanlar vasıtasıyla kuvvetin farklı elemanlara aktarılması şeklindedir. Şekil 17'de pnömatik tutucuların genel iç yapısı gösterilmiştir.[1]



Şekil 16. Pnömatik açılı tutucu ve paralel tutucu



Şekil 17. Pnömatik açılı tutucu genel iç yapısı

[1]

Tablo 2. Pnömatik açılı tutucu genel parça listesi [1]

No	Ürün Tanımı	No	Ürün Tanımı
1	Gövde	10	Tutucu kilit
2	Kol (parmak)	11	Merkezleme pimi
3	Piston	12	Manyetik halka
4	Kol mekanizması	13	Yay (tek etkili model için)
5	Mıknatıs tutucu	14	Egsoz deliği
6	Keçe taşıyıcı	15	Egsoz filtresi
7	Segman	16	Boğaz Keçesi
8	Tampon	17	Piston Keçesi
9	Tutucu	18-19	O-ring

5.1 Elektrikli tutucular

Doğrusal hareket elektrikli silindirler ile hassas bir şekilde yapılırken bu sistemlerin içerisinde kullanılan robotlarında en önemli iş elemanı tutuculardır. Robotların yaptığı tutma, kaldırma, montaj, kaynak, ölçme işlemlerindeki hassasiyet, kollarında bulunan tutucuların hassasiyeti ile doğrudan ilişkilidir.

Genel yapısı elektrikli silindirler ile aynı olan elektrikli tutucu sistemlerinde; vidalı mil - somun sistemi bağlı olduğu motordan aldığı dairesel hareketi doğrusal harekete çevirerek yine uç kısmında özel mafsal yapıları mekanizması ile açma kapama hareketinin oluşmasını sağlamaktadır.[4]

**Şekil 18.** Elektrikli açılı ve paralel tutucular

Elektrikli tutucunun kollarının açma kapama hızı, vidalı milin hatvesi ile ilişkili olup kullanılan servo veya step motorun devri ile kontrolü sağlanmaktadır.

Elektrikli tutucuların iş elemanlarını tutmasındaki kuvvet hassasiyeti de yine vidalı mil çapı ile ilişkili olup servo veya step motorun tork değerine göre anlık olarak sürekli değişebilmektedir.

5.1.1 Elektrikli Tutucularda Arge Süreci ve deneysel çalışmaları

Elektrikli tutucuların arge sürecinde pazarın ihtiyaçları dikkate alınarak yapılan patent ve teknik araştırmalar neticesinde ortaya bir fizibilite çalışması koyulmuştur. Fizibilite çalışmasında ürünün teknik şartnamesi hazırlanarak sürecin tasarım ve prototip üretimine geçilmiştir. Ortaya çıkan ürünün deneme çalışmaları yapılarak kavramsal hesaplamalar ile nihai ürünün ortaya çıkma sürecinde üniversiteler ile iş birliğine girilmiştir. Kocaeli üniversitesinden değerli akademisyenler ile birlikte iki farklı deneysel proje gerçekleştirilmiştir.

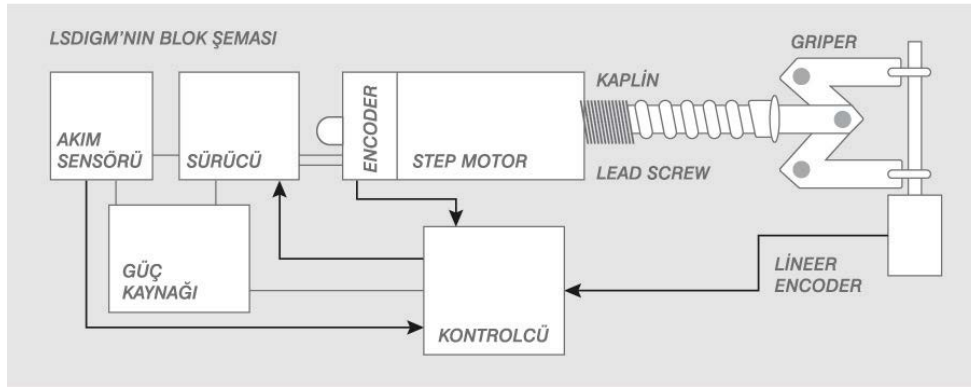
Bu projelerin amacı "Elektrikli Vidalı Mil Endüstriyel Tutucu Mekanizmasının (LSDIGM) konum ve güç performansını incelemektir.[5]

Otomasyon endüstrisinde ve fabrikalarda çeşitli talepleri karşılama potansiyeli olan bir Elektrikli LSDIGM'nin tasarlanması ve geliştirilmesinden oluşmaktadır. Hem paralel hem de açısız elektrikli tutucu mekanizmalarının performansları, konumlarına ve güç verimliliklerine göre karşılaştırılmıştır.

Bu Elektrikli LSDIGM'lerin pozisyon verimliliği, giriş ve çıkış kodlayıcıları arasındaki hatalardan elde edilen Pozisyon Kök Ortalama Kare Hatası'ndan (PRMSE) hesaplanır. Sırasıyla, sistemin girişindeki dönme hareketini ve sistem çıkışındaki doğrusal hareketi ölçmek için motorun artımlı bir kodlayıcısı ve bir yük doğrusal kodlayıcı kullanıldı. PRMSE, ölçülen iki konum arasındaki farktan elde edilir. Deney düzeneğinde, sırasıyla sistem girişindeki akımı ve sistem çıkışındaki sertliği ölçmek için bir akım sensörü ve bir yay kullanılmıştır. LSDIGM'lerin girişindeki elektrik gücü ve LSDIGM'lerin çıkışındaki mekanik güç sırasıyla akım ve yay kuvveti kullanılarak hesaplanmıştır. Son olarak, bu elektrikli LSDIGM'lerin güç verimliliği incelenmiş ve farklı hız koşullarında karşılaştırılmıştır.

5.1.2 LSDIGM Modeli

Öncelikle sistemin çalışma modeli belirlenmiştir. Şekil 19'da gösterilmiştir. Elektrikli tutucu için [5,6] 'da bir matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel model iki harekete dayanır: motor açısına angle hareket açısı ve yük hareketine d hareket mesafesi. θ açısı, bir vidalı mil somun mekanizması ile d mesafesine bağlanır. Ortaya çıkan açısız hareket ve doğrusal hareket, ilgili iki kuvvet üretir, sistemin girişine uygulanan bir burulma kuvveti F_t ve sistemin çıkışına uygulanan doğrusal bir kuvvet F_1



Şekil 19. LSDIGM blok diyagramı

Burada farklı tipteki step motorlarla elektrikli kavramanın farklı hareketlerini kontrol etmek için VC ++ programlama dili olan bir MFC (Microsoft Foundation Class) programı geliştirilmiştir. MFC programı C ++ programlama dili tarafından oluşturulmuştur. VC ++, Gofoltech (Endüstriyel PC) aracılığıyla MFC'leri uygular. Step motor, Gofoltech (Endüstriyel PC) çıkış portu aracılığıyla bu yazılımı kullanarak gerçek zamanlı olarak programlanabilir ve kontrol edilebilir. Tutucu hareketini gerçekleştirmek için önerilen yöntem, step motorun dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürmek için bir vidalı mil somun sistemi kullanır.

5.1.2 Elektrikli Tutucunun Matematiksel Modeli

Yüke nedeni ile tutucu parmaklarında T_G adı verilen bir kısaç torku (Nm) oluşur. Kısaç torku denklem (1) 'de verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, dönme aktivatörleri için hareket doğrusaldan rotasyona dönüştürülmelidir. Motorun hızını hesaplamak için, tutucu parmağından gelen doğrusal hız, (2) denklemini kullanılarak dönüş hızına dönüştürülebilir.

$$T_G = \frac{F_G \times l \times S}{2\pi \times \eta} \quad (1)$$

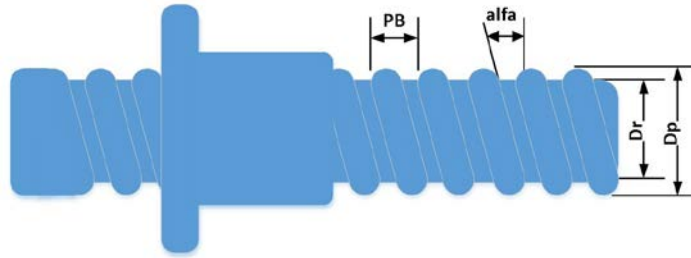
Burada F_G uygulanan Kuvvet /Yük (N), η Verim, S emniyet faktörü, l vidalı mil (m) [7].

$$r = \frac{60 \times v}{l} \quad (2)$$

Burada r dönme hızı(devir/dakika), v doğrusal hız m/s^2 [7].

5.1.3 Vidalı Mil Sisteminin Matematiksel Modeli

Tork genel denklemi (3) vidalı mil sisteminin dinamik denklemlerini elde etmek için kullanılır. Tork τ , vidalı mil üzerinde iki farklı kuvvetin oluşturduğu değerdir. Bunlar sürtünme kuvvetlerinin neden olduğu tork f_r ve mile uygulanan dış kuvvetlerin torkudur.[8] τ_{ls_l} ve τ_{ls_r} vidalı mili indirmek ve yükseltmek için kullanılan torklardır. Bunlar aşağıdaki (8) ve (9) eşitliklerinde verilmiştir.



Şekil 20. Vidalı milin modeli

$$\tau = \frac{F_s L}{2\pi v} \quad (3)$$

$$D_m = D_p - \left(\frac{P_B}{2}\right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{L}{D_m} \quad (5)$$

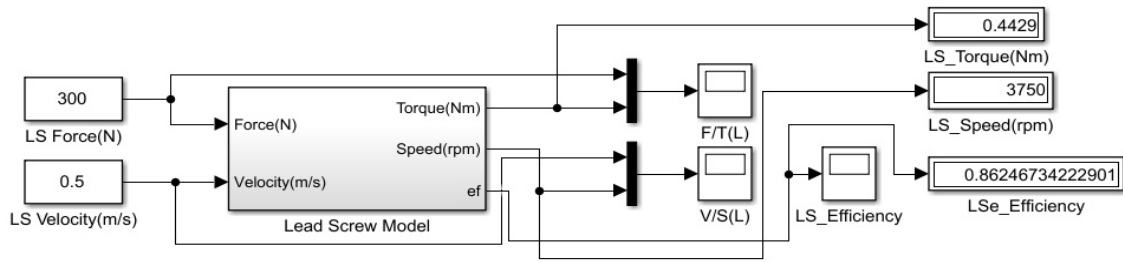
$$L = n_s P_B \quad (6)$$

$$F_s = F_A + mg(\sin\theta + \mu\cos\theta) = F_A + f_r \quad (7)$$

$$\tau_{ls_r} = \frac{(F_A + f_r) D_m}{2} \left(\frac{L + \mu\pi D_m}{\pi D_m - \mu L} \right) \left(\frac{1}{\eta} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{ls_l} = \frac{(F_A + f_r) D_m}{2} \left(\frac{\mu\pi D_m - L}{\pi D_m + \mu L} \right) \left(\frac{1}{\eta} \right) \quad (9)$$

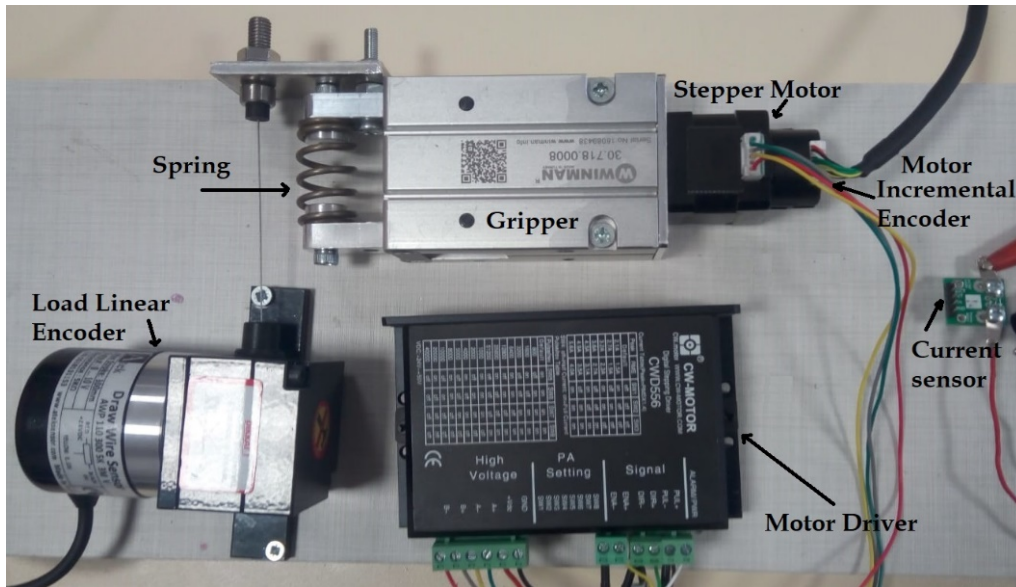
Burada F_s hareket yönünün kuvveti, F_0 ön yükleme ($\sim 0.3 F$), F_A dış kuvvetler, θ eğim açısı, D_p vidalı mil adımının üst çapı, D_r vidalı mil adımının dip çapı, P_B adım aralığı, L vidalı milin dişi, n_s başlangıç sayısı, μ kayma yüzeyinin sürtünme katsayısı (0.05 ~ 0.2), μ_0 vidalı mil somunun iç sürtünme katsayısı (0.1 ~ 0.3), η verimlilik (0.85 ~ 0.95), vidalı mil diş açısı (standart 30 derece) [9,10].



Şekil 21. Vidalı milin simulink modeli

5.1.4 Analiz ve Sonuçlar

Kuvveti analiz etmek ve ölçmek için çeşitli yöntemler vardır, yay sistemin dinamik davranışını analiz etmek için kullanılmıştır. Sistemi analiz etmek ve verileri ölçmek için kullanılan iki sensör, motorun artımlı kodlayıcısı ve yükün doğrusal kodlayıcısıdır, Motor artımlı kodlayıcı 0.17578125 (derece / darbe) darbe çıkışı verir ve yük doğrusal kodlayıcı 0.5 (mV / mm), 0-20 mm aralığında bu, voltaj kazancı 20 olan bir amplifikatör ile güçlendirilir, örneklenir ve 0-5 V voltaj aralığına sahip 10 bit analog-dijital dönüştürücüye uygulanır. 1 (Dijital değer / mm). Elektriksel LSDIGM'nin Deneysel kurulumu Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 22. LSDIGM'nin deneysel kurulumu

$$c_p = 1.0058e + 03 \text{ and } c_v = 1.427428571$$

$$D_L(\text{mm}) = (V_L - o_v) * (c_v) = 1.427428571 * V_L - 779.7638571 \quad (10)$$

$$D_M(\text{mm}) = (P_M - o_p) * (c_p^{-1}) = 9.942287859 * 10^{-4} * P_M + 62.41924891 \quad (11)$$

$$C_s(\text{Amper}) = 3.394777266 * 10^{-2} * V_c - 17.92554531 \quad (12)$$

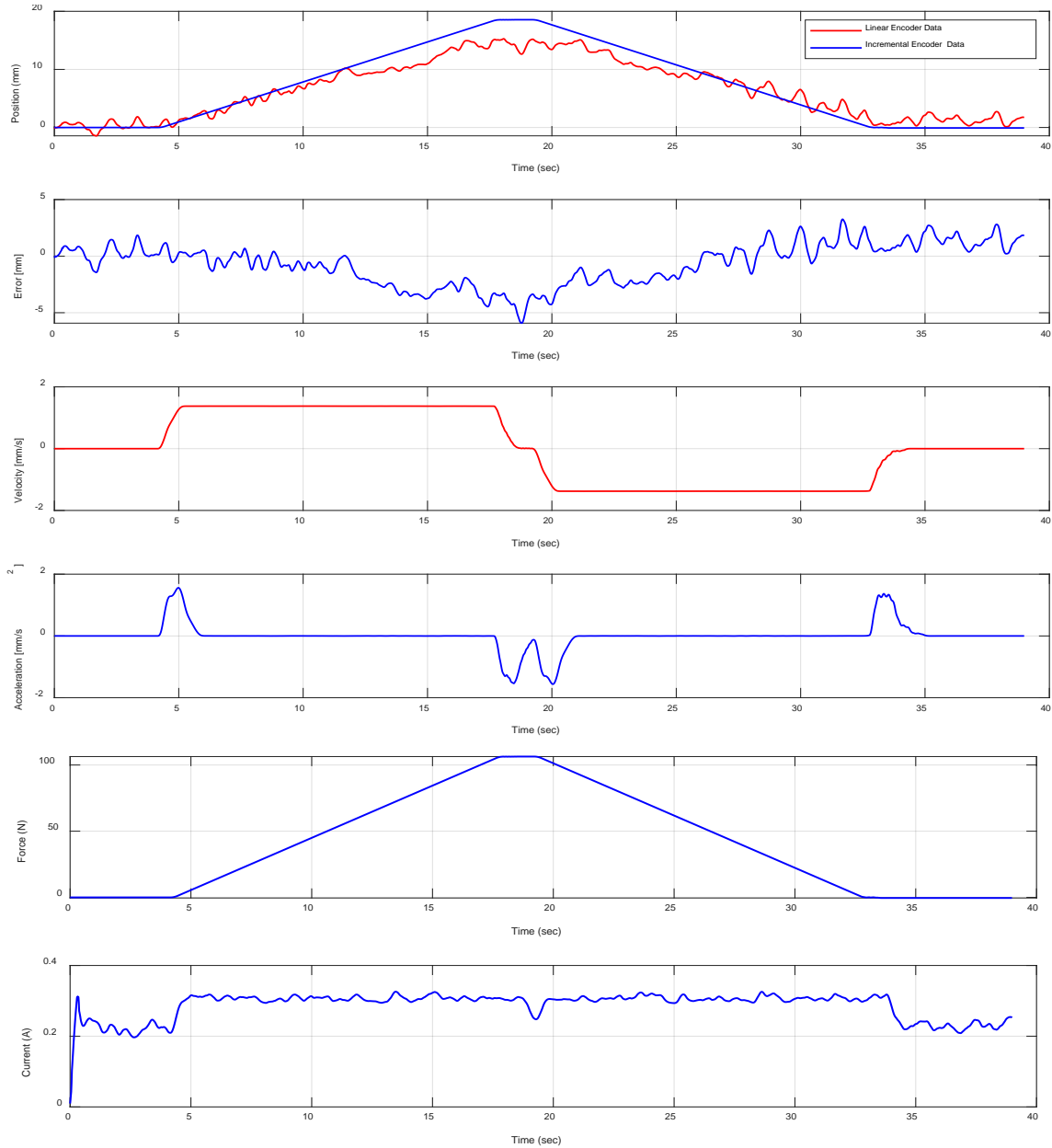
Burada C_s akım sensörünün denklemi, V_c akım sensörünün sayısallaştırma voltajı (ADC voltaj değeri) çıkışı, D_L Yük mesafesi (mm), D_M Motorun doğrusal hareket mesafesi (mm), V_L yük lineer enkoderin (dijital değer) çıkışını sayısallaştırma voltajı (ADC voltaj değeri) çıkışı, P_M motor artımlı enkoderin (darbe) darbe sayısıdır, c_v lineer enkoder voltajının katsayısıdır, c_p artımlı enkoder darbesinin katsayısıdır, o_v voltaj ofseti, o_p nabız ofseti. Örneğin, paralel Kıskaç Yayı sistem analizi Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Yayların teknik özelliği

Yay tipi	Sertlik ($K_s = N/mm$)	Serbest boyu (mm)	Tam sıkıştırma (mm)	Toplam sarma
A	5.735	42	25	7
B	11.764	42	25	7
C	13.823	42	25	7

Tablo 4. Hız profili

Hız modu	hız	hız (mm/s)
Düşük hız	5 % Max	1.5
Orta hız	20 % Max	6
Yüksek hız	65 % Max	19.5
Çok yüksek hız	80 % Max	25.5

**Şekil 23.** Düşük hız durumunda paralel tutucunun A yay modelindeki hareket grafiği

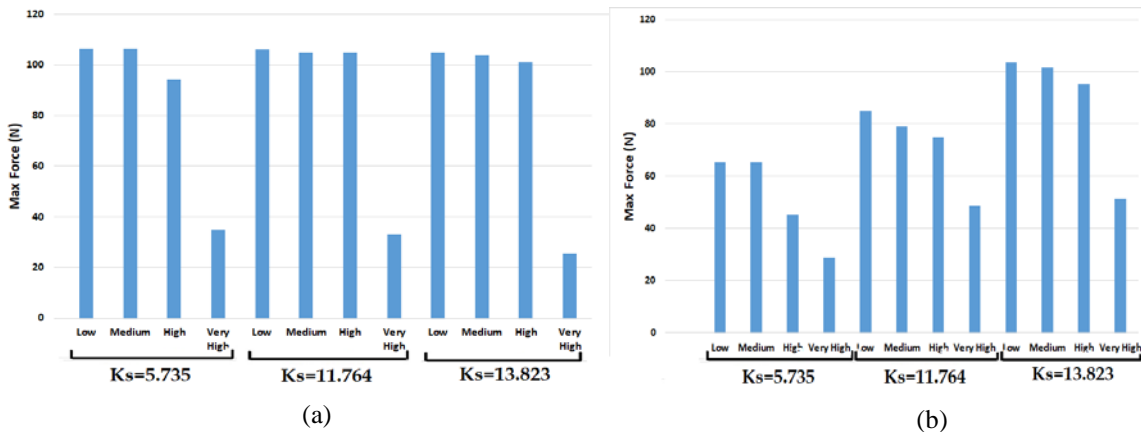
Sadece düşük hızda bir Paralel Tutucu A Tipi Yayı hareket profili şekil 5'te sunulmuştur. B ve C tipi orta, yüksek ve çok yüksek hızların sonuçları Paralel ve açılmalı tutucu için yaylar ayrıca tablo 3 ve 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Step motor sürücü modeli CWD556 ile paralel tutucu yay analizi

Yay Sertliği (N/mm)	Hız şekli	Max doğrusal hareket (mm)	Max Kuvvet (N)	Zaman (s)	Max Akım (A)	Max Hız (mm/s)	Max İvme (mm/s ²)
A 5.735	Düşük	18.54	106.4	28.869	0.3155	1.376	1.547
	Orta	18.55	106.4	8.79	0.3150	5.892	6.598
	Hızlı	16.26	94.34	3.735	0.3399	18.88	22.24
	Çok hızlı	6.085	34.9	4.26	0.3106	9.991	19.75
B 11.764	Düşük	9.09	106	13.49	0.7168	1.375	1.523
	Orta	8.934	105.1	9.675	0.3161	5.889	6.336
	Hızlı	8.934	105.1	4.59	0.3228	12.34	18.22
	Çok hızlı	2.827	33.26	6.21	0.3088	5.179	9.689
C 13.823	Düşük	8.013	105	14.45	0.3129	1.376	1.553
	Orta	8.0	104	7.755	0.3045	5.887	6.667
	Hızlı	7.864	101.1	3.38	0.3203	11.12	17.82
	Çok hızlı	1.935	25.39	69.08	0.2786	3.25	4.675

Tablo 5. Step motor sürücü modeli CWD556 ile açılmalı tutucu yay analizi

Yay Sertliği (N/mm)	Hız şekli	Max doğrusal hareket (mm)	Max Kuvvet (N)	Zaman (s)	Max Akım (A)	Max Hız (mm/s)	Max İvme (mm/s ²)
A 5.735	Düşük	11.4	65.36	17.525	0.4862	1.378	1.561
	Orta	11.4	65.36	8.04	0.3203	5.887	6.682
	Hızlı	7.28	45.1	4.275	0.3176	11.74	17.94
	Çok hızlı	5.047	28.94	2.565	0.2941	8.848	16.75
B 11.764	Düşük	6.966	84.86	14.355	0.3765	1.375	1.528
	Orta	6.611	79.27	3.51	0.3105	5.883	7.712
	Hızlı	6.362	74.84	2.37	0.322	9.028	15.96
	Çok hızlı	4.137	48.67	44.087	0.3099	13.24	53.43
C 13.823	Düşük	7.504	103.7	20.7	0.3033	1.371	1.495
	Orta	7.144	101.7	5.13	0.3094	5.886	6.586
	Hızlı	6.847	95.21	3.386	0.3281	9.763	17.16
	Çok hızlı	3.714	51.32	2.40	0.3071	6.264	11.45



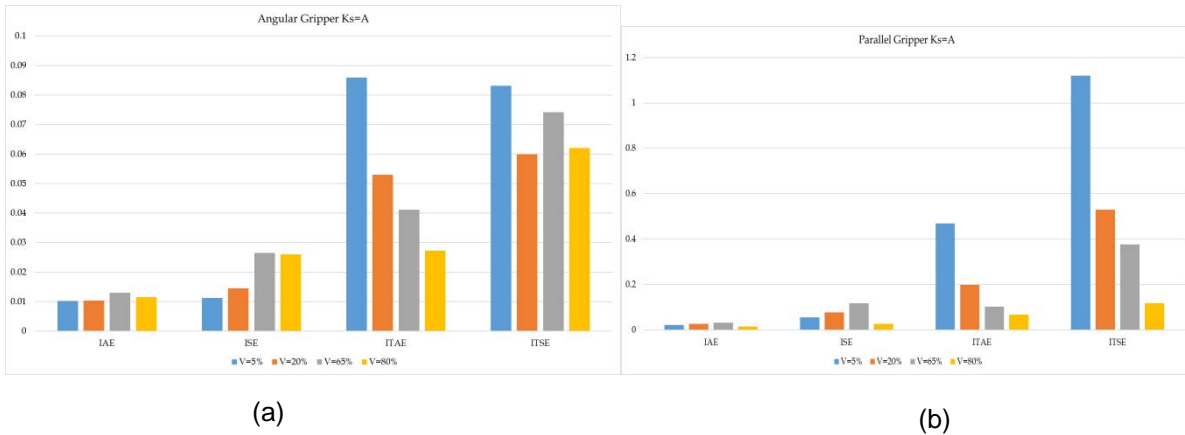
Şekil 24. Paralel (a) ve açılmalı (b) tutucuların yay kuvvet analizi

Tablo 5'de, farklı sertlik katsayısı değerlerine sahip üç yay için kuvvet analizi sunulmuştur. Konum mekanik hatalarının performansını değerlendirmek için, step motorun konumu ile yükün konum ölçülen sinyali arasındaki RMSE, aşağıdaki denkleme (13) dayanarak hesaplanır. Tablo 5'te RMSE, tüm kare hatalarının ortalamasını görebilirsiniz.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2} \quad (13)$$

Tablo 6. Farklı hız durumları için tip (A-Ks = 5.735) Yay ile elde edilen RMSE'ler

Ks=A	Paralel tutucu				Açılı tutucu			
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	IAE	ISE	ITAE	ITSE
V=5%	0.0228	0.0557	0.4700	1.1205	0.0103	0.0113	0.0859	0.0831
V=20%	0.0272	0.0784	0.1998	0.5306	0.0105	0.0146	0.0529	0.0600
V=65%	0.0324	0.1177	0.1028	0.3774	0.0130	0.0266	0.0412	0.0742
V=80%	0.0164	0.0280	0.0685	0.1177	0.0115	0.0260	0.0273	0.0621



Şekil 25. Farklı hız durumları için tip (A-Ks = 5.735) Yay ile elde edilen RMSE'ler
(a) Açılı tutucu, (b) paralel tutucu

Bu analizde, elektrikli tutucu hareketlerini gerçekleştirmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Çağdaş yöntemler tutucu hareketlerini gerçekleştirmek için motorları kullanır. Bu amaçla, yay kuvveti analizine dayanan bir Elektrik vidalı mil Endüstriyel Tutucu Mekanizması (LSDIGM) geliştirilmiştir. LSDIGM makalede ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Deney düzeneği birçok farklı yay ve hız profilleri için test edilmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar, önerilen elektrikli tutucunun muadilleri kadar çok kullanışlı ve esnek olduğunu göstermektedir. Önerilen yöntem, step motorun çalışma özelliğinden kaynaklanan çok az miktarda konum hatasına sahip olsa da, benzerlerinden nispeten daha basit ve daha ucuzdur. Bu nedenle, küçük konum hatalarının önemli olmadığı bazı uygulamalar için tercih edilebilir. Tablo 3 ve 4 gerçek zamanlı olarak LSDIGM'de verilen tutucu hız ve kuvvet parametresine karşılık gelir. Bununla birlikte, bu parametre bazı tutucu uygulamaları için uygun olmayabilir. Bu durumda, sisteme uygun adım motoru eklenmelidir.



SONUÇ

Sürekli gelişim hızı her geçen gün katlanarak artarken hayatımızın her alanı bu süreç içerisinde etkilenmekte ve varım demek için sürekli yenilik içerisinde olmak gerekmektedir.

Endüstrinin her alanında da gelişmeler olmakta ve sistemler artık birbirleri ile haberleşebilen, karanlık fabrikalar olarak adlandırılan, içerisinde robotların üretimi ele aldığı otonom döneme gelmiştir. İş elemanları enerji verimliliği, hassasiyet, verimlilik üzerine kendilerini sürekli geliştirmektedir.

Basınçlı hava oldukça pahalı bir enerji türüdür. Elektrikli iş elemanları başlangıçta yatırım maliyetleri pnömatik iş elemanlarına göre kıyaslandığında yüksek olsa da kısa sürede kendilerini amorti edebilir hale gelmektedir. Aynı koşullarda, yükte ve hızda 2000 saatlik bir testin ardından elektrikli silindirin, pnömatik silindire göre enerji tüketimi bakımından 11 kat daha verimli olduğu test edilmiştir. Ayrıca konumlama hassasiyeti, hız ve kuvvet değerlerinin anlık değişim gösterebilmesi sistemlerin tek bir merkezden izlenerek yönetilmesini sağlamaktadır.

Bu sebeple elektrikli iş elemanları ve tutucular endüstri 4.0 döneminde gelişimlerini sürekli arttırarak endüstrinin her alanında aranan ekipmanlar olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] HID-TEK WINMAN Pnömatik Silindir Kataloğu 2015-08
- [2] HID-TEK WINMAN Otomasyon Kataloğu 2015-08
- [3] HİD-TEK Elektrikli silindir sunumu 2017 Tahsin CÖBEK
- [4] KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ Mühendislik fakültesi – HİD-TEK Arge Merkezi İş Birliği
- [5] HID-TEK WINMAN Arge Merkezi Eğitim Notları

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Kasablar

1988 Bursa doğumludur. Osmangazi Hasan Ali Yücel Lisesi mezunu olup Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2009' te bitirmiştir. 2011 yılından itibaren HİD-TEK MAK. SAN. LTD. ŞTİ firmasında hidrolik, pnömatik, vakum, otomasyon sistemler konusunda proje ve pazarlama mühendisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve 1 çocuk sahibidir.