

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSKAVATÖR TELEOPERASYON SİSTEMİ VE KUVVET
GERİ BESLEMESİ KAZANIMLARI

AHMETCAN ÖNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2015

**EKSKAVATÖR TELEOPERASYON SİSTEMİ VE KUVVET
GERİ BESLEMESİ KAZANIMLARI**

**EXCAVATOR TELEOPERATION SYSTEM AND FORCE
FEEDBACK GAINS**

AHMETCAN ÖNAL

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
MAKİNA Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2015

“Ekskavatör Teleoperasyon Sistemi ve Kuvvet Geri Beslemesi Kazanımları ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 09/02/2015 tarihinde, **MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Tahir YAVUZ

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Andaç Töre ŞAMİLOĞLU

Üye : Doç.Dr. Mustafa DOĞAN

ONAY

..../02/2015

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Anneannem'e...

TEŐEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, emekleri ve sevgileri tarif edilemez aileme ve başıma gelen en güzel şey, Zeynep'e en içten saygı ve sevgilerimle teşekkürlerimi,

Bugüne kadarki desteklerinden dolayı dostlarıma en içten teşekkürlerimi,

Bu konuda çalışmaya başlamamı teşvik eden ve çalışma boyunca desteğini esirgemeyen sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Andaç Töre ŐAMILOĐLU'na teşekkürlerimi,

Yardımlarından dolayı tez savunma jüri başkanım sayın Prof.Dr. Tahir YAVUZ'a ve jüri üyem sayın Doç.Dr. Mustafa DOĞAN'a teşekkürlerimi,

sunarım.

Bu çalışma kapsamında T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Teknogışirm Sermayesi Desteđinden(Proje No: 149TGSD.2011) ve TÜBİTAK TEYDEB 1507 Desteđinden(Proje No: 7121027) faydalanılmıştır. Ar-Ge alanındaki geri ödemesiz hibe destekleriyle ülkemizde faaliyet gösteren firmalara desteklerinden dolayı T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ve TÜBİTAK'a kendim ve ülkem adına teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

EKSKAVATÖR TELEOPERASYON SİSTEMİ VE KUVVET GERİ BESLEMESİ KAZANIMLARI

Ahmetcan ÖNAL

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Kopya kol, operatörlerin ekskavatörleri ekskavatör uzuv konumlarını önceden tahmin ederek kullanabilmeleri için gerçek ekskavatörün insan kolu hareket bölgesine uyacak şekilde ölçeklendirilmiş bir kopyasıdır. Operatörün önünde bulunan 2 kol ile ekskavatörü kontrol etmesi yerine kopya kolu istediği pozisyona götürmesi ekskavatör kova konumunu belirlemesinde yeterli olacaktır. Bu sayede operatör ekskavatör hareketini öngörebilecektir. Kopya kol ekskavatör kullanımını güvenli hale getirebileceği gibi kolaylaştıracaktır. Bu sayede yetiştirilmesi ve çalıştırılması pahalı olan vasıflı operatör ihtiyacı ortadan kalkacaktır. Kopya kol üzerinde ve ekskavatör sistemi üzerinde pozisyon algılamak için manyetik rotatif pozisyon algılayıcı kullanılarak açılı algılayıcı sistemler geliştirilmiştir. Sistem entegrasyonunun kolay olması ve her sisteme uygulanabilirliği açısından ekskavatör sistemi üzerinde kullanılacak kablosuz açılı algılayıcı sistem geliştirilmiştir. Operatör karşısına bir engel çıktığını sadece görerek algılayabilmektedir. Sisteme kopya kol üzerinden bir kuvvet geri beslemesi eklendiğinde operatörler göremedikleri ortamlardaki (kova yerin altındayken vb.) engelleri kopya kol yardımıyla algılayabilecek ve sistemi zorlamayacaktır. Bu sayede daha hassas işlemler (doğal gaz, su, elektrik hatları çevresindeki kazılar vb.) daha az tehlike riskiyle gerçekleştirebilecektir. Sistemde kopya kol ve ekskavatör arasındaki haberleşme kablosuz olarak gerçekleştirilmektedir. Bu sayede operatör operasyon sahasından uzaklaştırılacaktır. Tehlikeli operasyonlarda(Nükleer santraller, kimyasal ortamlar, su altı inşaatları vb.) operatör operasyon sahasından uzakta olacağından yaralanma ve ölümlerin önüne geçilebilecektir. Geliştirilen sistem silahlı kuvvetlerin mayın temizleme, siper kazma gibi istihkam faaliyetlerinde de kullanılabilir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Kuvvet geri beslemesi, otomatik ekskavatör sistemi, kopya/model kol, haptik sistemler, insan makina etkileşimi, kinematik analiz, teleoperasyon, mekatronik.

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Andaç Töre ŞAMİLOĞLU, Başkent Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

EXCAVATOR TELEOPERATION SYSTEM AND FORCE FEEDBACK GAINS

Ahmetcan ÖNAL

Başkent University Institute of Science and Technology

Department of Mechanical Engineering

Copy arm is a scaled copy of an excavator to fit human arm movement zone to be able to control the excavator by anticipating movements of the excavator parts. Bringing copy arm to desired position instead of controlling via 2 joysticks will be enough to determine the bucket position. Thus, the operator will be able to predict the movement of an excavator. The use of copy arm on controlling the excavator will facilitate controlling the excavator and will make it safe. Therefore, the need for skilled operators will be eliminated. To detect position of copy arm and the excavator, the angle sensor systems have been developed using magnetic rotary position sensors. To ease the system integration and increase applicability of all systems, wireless angle sensor system has been developed to transmit the excavator position. Operator can only detect obstacles visually. When force feedback is integrated to this system, operators will be able to detect not seen obstacles via copy-arm and the system will not be forced. Therefore, more accurate operations can be performed. Using wireless communication between the excavator and the copy arm, operators will stay far from the operation field. Due to wireless communication (teleoperation), injuries and deaths of operators will be prevented in dangerous mission fields (Nuclear power plants, chemical environments, underwater construction, etc.). The developed system would be utilized in demining, shelter excavating operations of military forces.

Keywords: Force feedback, excavator automation, copy-arm, model-arm, haptic systems, human machine interaction, kinematic analysis, teleoperation, mechatronics.

Advisor: Andaç Töre ŞAMİLOĞLU, PhD. Asst. Prof. in Mechanical Engineering, Başkent University, Mechanical Engineering Department.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Ekskavatör Çalışma Prensipleri.....	1
1.2 Literatür Araştırması.....	2
1.3 Amaç.....	12
2. AÇI ALGILAYICILAR.....	14
2.1 Giriş.....	14
2.2 Manyetik Mutlak Enkoderler.....	14
3. KOPYA KOL YARDIMI İLE EKSKAVATÖR KONTROLÜ.....	18
3.1 Giriş.....	18
3.2 Kopya Kol.....	19
3.2.1 Kopya kol uzuv göreceli açı algılayıcıları.....	20
3.3 Mini Ekskavatör.....	22
3.3.1 Mini ekskavatör pozisyon analizi.....	23
3.3.2 Mini ekskavatör kuvvet analizi.....	27
3.3.3 Ekskavatör uzuv göreceli açı algılayıcıları.....	36
3.3.4 Hidrolik elemanlar.....	40
4. KOPYA KOL KUMANDA SİSTEMİNDE KUVVET GERİ BESLEMESİ.....	45
4.1 Giriş.....	45
4.2 Kuvvet Geri Beslemesi Eklenmiş Kopya Kol.....	45
4.3 Kontrolcü Sistemi.....	47
4.3.1 Kopya kol kontrolcü elektronik devre kartı.....	55
4.3.2 Ekskavatör kontrolcü elektronik devre kartı.....	57
4.3.3 Kontrolcü mikroişlemci yazılımları.....	59
5. SONUÇ.....	61
KAYNAKLAR LİSTESİ.....	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 (a) Ekskavatör Sisteminin Hidrolik Kontrol Açıklamaları, (b) Ekskavatörlerdeki Valflerin Şematik Gösterimi.....	1
Şekil 1.2 Ekskavatör Sisteminin Hidrolik Kontrol Açıklamaları.....	2
Şekil 1.3 Lee ve arkadaşlarının Çalışmalarındaki Manyetik Pozisyon Algılayıcısı [3].....	4
Şekil 1.4 Dönüşsel Manyetik Pozisyon Sensörünün Yapısı[4].....	5
Şekil 1.5 Bum ve Kol Göreceli Açısını Algılayacak Sensörün Yerleşimi[5].	6
Şekil 1.6 IHC Firmasının Göreceli Pozisyon Sensörü[6].....	6
Şekil 1.7 Kim ve Arkadaşlarının Çalışmalarındaki Sistem Açıklaması [7].....	7
Şekil 1.8 Kim ve Arkadaşlarının Çalışmalarındaki Sistem Eksen Ve Sensör Açıklamaları [7].....	8
Şekil 1.9 Mouri ve Arkadaşlarının Çalışmalarındaki Bilateral Kontrol Blok Diyagramı [8].....	9
Şekil 1.10 Hayn ve Schwarzmann'ın Çalışmalarında Bahsettikleri Hidrolik Ekskavatörler İçin Sezgisel Operasyonel Konsept[9].....	10
Şekil 1.11 Hayashi ve Tamura'nın Çalışmasındaki İnsansız İnşaat Sistemi [10].....	10
Şekil 1.12 Kontz ve Book'un Çalışmasında Basınç Düzenleyicinin Etkisi [11].....	11
Şekil 1.13 PI Denetleyicili Doğru Akım Motorunun Hız Kontrol Blok Diyagramı [12]	11
Şekil 2.1 AMS Firmasının Ürettiği Manyetik Rotatif Pozisyon Sensörü AS5145B.....	15
Şekil 2.2 AS5145B Çalışma Açıklamaları.....	16
Şekil 2.3 AS5145B Bacak Bağlantıları.....	16
Şekil 2.4 Örnek Açık Algılayıcısı(AS5145B) Elektronik Kartı ve Bilgisayar Ortamında Tasarımı.....	17
Şekil 3.1 Ekskavatör Otomatik Kontrol Sisteminin Çalışma Prensipleri.....	18
Şekil 3.2 Denetleyici Sistem Blok Diyagramı.....	19

Şekil 3.3	CAT® Firmasının Ürettiği 324E Modeli.....	19
Şekil 3.4	Çalışma Kapsamında Üretilen Kopya Kol.....	20
Şekil 3.5	Kopya Kol Açılış Algılayıcı Konumları.....	21
Şekil 3.6	Kopya Kol Açılış Algılayıcı Örneği.....	21
Şekil 3.7	Çalışma Kapsamında Üretilen Mini Ekskavatör.....	22
Şekil 3.8	Ekskavatör Sisteminin Şematik Gösterimi.....	23
Şekil 3.9	Bum Hidrolik Silindir Strok Değerleri MATLAB Çıktısı.....	26
Şekil 3.10	Kol Hidrolik Silindir Strok Değerleri MATLAB Çıktısı.....	26
Şekil 3.11	Kova Hidrolik Silindir Strok Değerleri MATLAB Çıktısı.....	27
Şekil 3.12	J-K Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	28
Şekil 3.13	K-H Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	28
Şekil 3.14	H-I Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	29
Şekil 3.15	G-H Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	30
Şekil 3.16	H Noktası Serbest Cisim Diyagramı.....	30
Şekil 3.17	E-J Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	31
Şekil 3.18	E-D Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	32
Şekil 3.19	A ₀ -F Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	33
Şekil 3.20	B ₀ -B Elemanı Serbest Cisim Diyagramı.....	33
Şekil 3.21	Bum Hidrolik Silindir Kuvvet Değerleri MATLAB Çıktısı.....	35
Şekil 3.22	Kol Hidrolik Silindir Kuvvet Değerleri MATLAB Çıktısı.....	35
Şekil 3.23	Kova Hidrolik Silindir Kuvvet Değerleri MATLAB Çıktısı.....	36
Şekil 3.24	Ekskavatör Uzun Göreceli Açılış Algılayıcı Örneği.....	37
Şekil 3.25	Ekskavatör Uzun Göreceli Açılış Algılayıcı Örneği (Demonte).....	37
Şekil 3.26	Ekskavatör Açılış Algılayıcı Konumları.....	38
Şekil 3.27	Pozisyon Analizi Parametreleri Açıklamaları.....	38
Şekil 3.28	Pozisyon Analizi Yönteminde Kullanılan Dik Üçgen.....	39
Şekil 3.29	Dört Çubuk Mekanizmasının MATLAB Programı Kullanılarak Çözümü.....	40
Şekil 3.30	Doğru Akım Motoru ve Hidrolik Pompa.....	41
Şekil 3.31	4/3 Kapalı Merkez Hidrolik Valf Şematik Gösterimi.....	41
Şekil 3.32	Valf Bloğu.....	42
Şekil 3.33	Hidrolik Motor ve Redüktör.....	44
Şekil 3.34	Hidrolik Silindir Örneği.....	44

Şekil 4.1	Kuvvet Geri Beslemeli Kopya Kol Bilgisayar Ortamında 3 Boyutlu Tasarımı.....	45
Şekil 4.2	Kuvvet Geri Beslemeli Kopya Kol Kol Ekleme.....	46
Şekil 4.3	Çalışma Kapsamında Üretilen Kuvvet Geri Beslemeli Kopya Kol	47
Şekil 4.4	Kopya Kol Kumanda Sisteminde Kuvvet Geri Beslemesi Çalışma Prensipleri.....	48
Şekil 4.5	Kopya Kol Kumanda Sisteminde Kuvvet Geri Beslemesi Blok Diyagramı.....	49
Şekil 4.6	Haptik Efendi/Köle Kontrol Diyagramı.....	50
Şekil 4.7	DC Motor Modeli [13].....	51
Şekil 4.8	ACS712 Entegresi.....	52
Şekil 4.9	PID Denetleyici Blok Diyagramı.....	53
Şekil 4.10	PID Denetleyici Uygulanan Sistem Cevabı.....	54
Şekil 4.11	PID Denetleyici Uygulanan Sistem Cevabı.....	55
Şekil 4.12	Optikbağlayıcı Şematik Gösterimi.....	56
Şekil 4.13	NRF24L01 Kullanan Kablosuz Haberleşme Modülü.....	56
Şekil 4.14	Kopya Kol Kontrolcü Elektronik Devre Kartı Tasarımı Örneği.....	57
Şekil 4.15	DC Motor Sürücü Devre Kartı Tasarımı Örneği.....	57
Şekil 4.16	Ekskavatör Kontrolcü Elektronik Devre Kartı Tasarım Örneği.....	58
Şekil 4.17	IRFZ44N HEXFET Power MOSFET Şematik Gösterimi.....	58
Şekil 4.18	Kontrolcü Yazılımları Akış Diyagramı.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

θ_{Bum}	Boom(bum)'un yere göre göreceli açısı
θ_{Kol}	Arm(kol)'ın boom'a göre göreceli açısı
θ_{Kova}	Bucket(kova)'ın arm'a göre göreceli açısı
$\theta_{Dönüş}$	Swing(kendi ekseni etrafında dönme) açısı
θ_{1X}	X elemanının yere göre olan açısı
$F_{m,n}^x$	m elemanından n elemanına uygulanan kuvvetin X ekseni bileşeni
$F_{m,n}^y$	m elemanından n elemanına uygulanan kuvvetin Y ekseni bileşeni
M_P	P noktasındaki moment
Q	Debi (litre/dakika)
V_{iletim}	İletim hacmi (litre/devir)
n	Devir sayısı (devir/dakika)
V_{itme}	Silindir itme hacmi (litre)
$V_{çekme}$	Silindir çekme hacmi (litre)
$L_{silindir}$	Strok (mm)
$r_{silindir}$	Silindir yarı çapı (mm)
r_{mil}	Mil yarı çapı (mm)
P	Basınç (bar)
\mathbb{P}	Güç (kW)
F_{itme}	Silindir itme kuvveti (N)
$F_{çekme}$	Silindir çekme kuvveti (N)
T_{mil}	Motor mili çıkış torku (Nm)
I_{Motor}	Motordan geçen akım (Amper)
k_{mt}	Doğru akım motoru tork sabiti
P	Oransal denetleyici
I	İntegral denetleyici
D	Türevsel denetleyici
K_i	İntegral denetleyici katsayısı
K_p	Oransal denetleyici katsayısı
K_d	Türevsel denetleyici katsayısı
e	Hata
I_{ref}	Referans akım

I_{act}	Gerçek akım
L_a	Motor indüktansı
R_a	Motor direnci
i_a	Motor akımı
U_a	Motor üzerindeki gerilim
E_c	Zıt elektromotor kuvveti
T_e	Elektromekanik tork
ω_m	Motor hızı

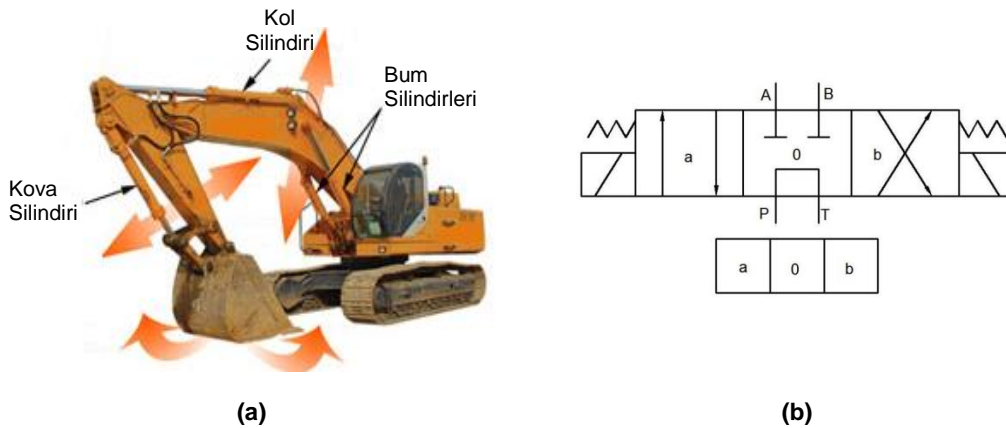
LED	Light Emitting Diode
PWM	Pulse Width Modulation
SPI	Serial Peripheral Interface
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu

1. GİRİŞ

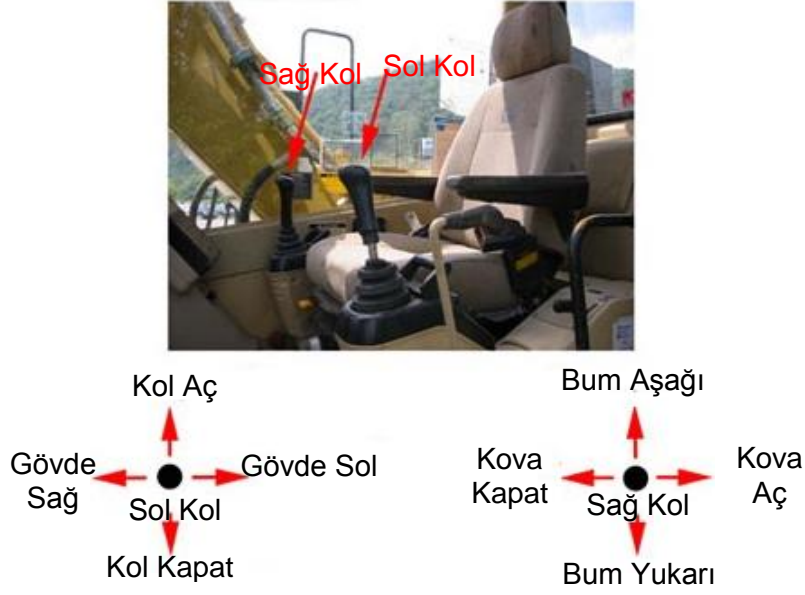
1.1 Ekskavatör Çalışma Prensipleri

Ekskavatör sistemlerinde 3 ana parça (Kol-Arm, bum-boom, kova-bucket) bulunmaktadır (Şekil 1.1a). Bu 3 ana parçanın göreceli açısal konumları sistemdeki 3 serbestlik derecesini temsil etmektedirler. Bu serbestlikler 3 adet hidrolik silindir ile kontrol edilmektedir. Hidrolik silindirlerin göreceli konumlandırılmalarıyla elde edilen kol, bum ve kova göreceli hareketleri operatör tarafından belirlenerek istenilen kazma, delme, yükleme vb. işler başarılmaktadır. Operatörlerin her bir serbestlik için kontrol ettiği bir valf sistemi bulunmaktadır. Bu valfler 3 konumlu (a-uzama, b-kısalma, 0-kapalı) valflerdir (Şekil 1.1b). Operatörün her bir silindir için ilgili valfin 3 konumunu belirlemesi, böylece toplamda 3 silindir için $3 \times 3 \times 3 = 27$ farklı kombinasyondan birisini seçmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak kontrol edilmesi gereken 4. serbestlik ise ekskavatör gövdesinin yere dik olan eksen etrafındaki dönme hareketidir (swing motion). Bu hareket de diğerleri gibi hidrolik valflerin kontrolüyle sağlanmaktadır.

Şekil 1.2'de bir ekskavatörün hidrolik kontrollerinin fonksiyon açıklamaları görülebilir. Operatörün seri bir hareket için 4 valfin 3er konumunu eşzamanlı olarak belirlemesi gerekmektedir ki bu kolay bir görev değildir. Ayrıca bum ve kolun hareketi sırasında kovanın global koordinatlardaki açısı da değişmektedir ki hassas görevlerde operatörün bu açığı sabit tutması gerekebilir. Bu da oldukça zor bir görevdir.



Şekil 1.1 (a) Ekskavatör Sisteminin Hidrolik Kontrol Açıklamaları, (b) Ekskavatörlerdeki Valflerin Şematik Gösterimi



Şekil 1.2 Ekskavatör Sisteminin Hidrolik Kontrol Açıklamaları

1.2 Literatür Araştırması

Bu çalışmaya başlarken öncelikle literatürde benzer çalışmalar araştırılmış ve incelenmiştir. Araştırma açı algılayıcıları, kumanda sistemleri ve kuvvet geri beslemesi kullanılan sistemler ve denetleyici yöntemleri olarak 3 ana başlık altında yapılmıştır.

Ekskavatör kopya kol kumanda sisteminde araştırılması gereken ilk konu, uzuv göreceli açıları kullanılacağından temassız açı algılama yöntemleridir.

Bieilczyk [2], açı algılamada minyatür Hall etkisi pozisyon sensörleri kullanımı üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, gelecek çalışmaları olan yapay insan eli manipülatöründe kullanmak için bir sensör araştırmıştır. Öncelikle açı algılama yöntemlerini optik, potansiyele dayalı, endüktif ve kapasitif olarak sıralamıştır. Optik yöntemde, optik açı algılayıcısı bir ışık kaynağı ve bir fotodedektör içermektedir. Bu yöntem temassız bir yöntemdir ve bundan dolayı uzun ömürlüdür. Ancak kire ve toza çok hassas olması bir dezavantajdır. Potansiyometrik yöntemde, potansiyometrik sensör açı değişimine oranla doğrusal bir çıktı verir. Yazar sensörün basit yapıda olması ve pozisyon değişimine yüksek duyarlılığını avantaj, mekanik olması ve küçültmedeki zorlukları da dezavantaj olarak yorumlamıştır.

¹İng. Force feedback

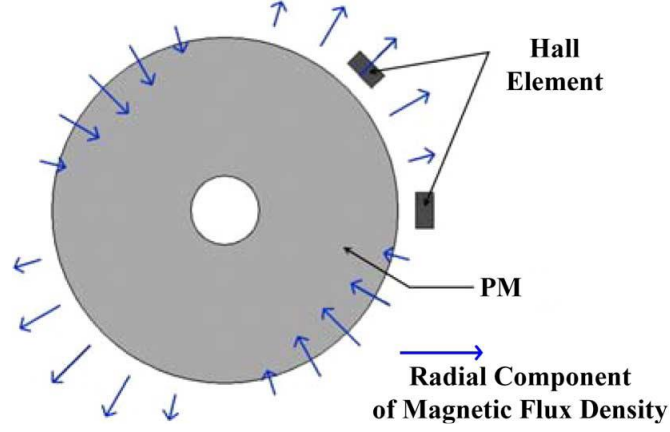
Endüktif yöntemde, endüktif sensörler manyetik alandaki değişimi algılar ve buna karşılık açı bilgisi üretir. Yazar bu sensörleri fiziksel bir temas gerektirmedikleri için uzun ömürlü bulmuştur. Kapasitif yöntemde, kapasitif sensörler temas etmeden bir transformatör yardımıyla kapasitif değişimi algılar. Bu sensörler şaft açısına oranla 4mA-20mA aralığında bir akım sinyali üretir. Yazar bu sensörlerin ana dezavantajını 0-270 derece olan dar ölçüm aralığı olarak belirtmiştir. Yazar buradan yola çıkarak çalışmasında manyetik sensör kullanmaya karar vermiştir. Manyetik sensörleri kullanma nedenini küçük boyutlara sahip olmaları, temassız ölçüm yapmaları, şok ve titreşime karşı olan direnci, geniş sıcaklık aralığı ve çözünürlüğü ve değişime olan duyarlılığı olarak sıralamıştır.

Lee ve arkadaşları [3] çalışmalarında manyetik alan yönü algılayarak temassız 360 derece açı ölçümü yapmada yeni bir yöntem geliştirdiklerini sunmuşlardır. Analog potansiyometrelerin duyarlılığı, ucuzluğu ve kullanım kolaylığı sebebiyle açı algılamada kullanımının yaygın olduğunu belirten yazarlar, endüstriyel uygulamalardaki otomasyon talebindeki hızlı büyümeyle beraber kesin sonuç veren temassız açıölçer enkoderlere ilginin artacağını öne sürmüşlerdir. Yazarlar çalışmalarında x ve y eksenlerine birer doğrusal Hall sensör yerleştirerek mıknatıs sayesinde oluşan manyetik alandan sinüs ve kosinüs sinyalleri alarak dönüş açısını referans konuma göre bulmuşlardır(Şekil 1.3). Hall etkisi sensörleri ölçülecek manyetik alanın x ve y eksenleri yönünde dik yerleştiren yazarlar bu sayede dönüş açısının sinüs ve kosinüs değerlerini elde ettiklerini ve böylece tam turda (360 derece) ölü açı olmadan sürekli bir şekilde açı algılayabildiklerini belirtmişlerdir. Doğruluk testlerini sensörlerini bir adım motoruna(stepper motor) bağlayarak test eden yazarlar, adım motorunun açısal değerine göre sensörlerinin doğru açı değerlerini verdiği sağlamışlardır. Yazarlar, bu yöntemin sistem kalibrasyonu için de kullanılabileceğini belirtmişlerdir.



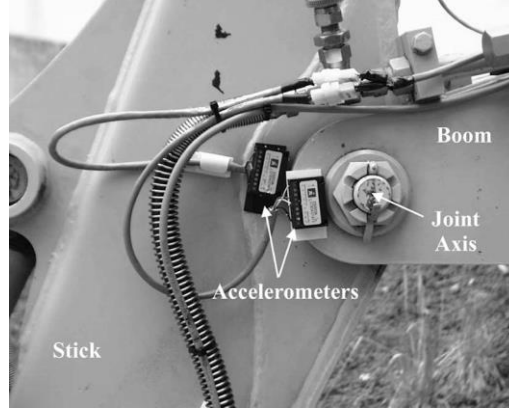
Şekil 1.3 Lee ve Arkadaşlarının Çalışmalarındaki Manyetik Pozisyon Algılayıcısı
[3]

Jeong ve arkadaşlarının [4] çalışmaları bir dönüşsel manyetik pozisyon sensörü üzerinedir. Yazarlar, fabrikalarda veya ofislerdeki otomasyon ekipmanlarının servo motorlarının hassas kontrolü için dönüşsel sensör sistemlerine olan ihtiyacın artmasından dolayı sensörsüz kontrol yöntemleri üzerine çalışıldığını belirtmişlerdir. Servo motor konum algılamasında genelde optik enkoderlerin tercih edildiğini fakat bu enkoderlerin kirli çalışma ortamına dayanıksızlığı ve güvenilir olmayışından dolayı çok kutuplu manyetik tamburlu manyetik enkoderler üzerine çalışmalar yapıldığını belirten yazarlar servo motorlardaki manyetize sistemin yüksek hassasiyet gerektirdiği ve manyetizasyon süresinin uzunluğunu dezavantaj olarak sıralamışlardır. Bundan dolayı yazarlar çalışmalarında sinüzoidal manyetize edilmiş kalıcı mıknatısa sahip bir dönüşsel manyetik pozisyon sensörü öne sürmüşlerdir. Bu çalışmada 4 kutuplu bir kalıcı mıknatıs ve manyetik akı yoğunluğunu algılayacak 2 sabit Hall elemanı kullanmışlardır(Şekil 1.4). Burada dönüş pozisyonunu hesaplayabilmek için 2 Hall elemanı arasındaki faz farkının elektriksel açı olarak $\pi/2$ olması gerektiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda simülasyon ve deney sonuçlarının birbirine yakın olduğunu belirten yazarlar, bu sistemin 2 sinüzoidal sinyal ile pozisyon algılayabildiğini kanıtlamışlardır.



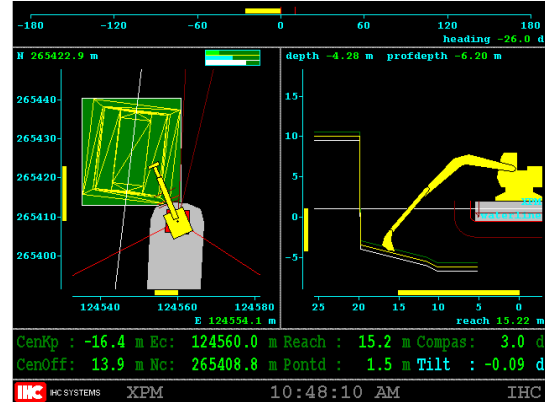
Şekil 1.4 Dönüşsel Manyetik Pozisyon Sensörünün Yapısı [4]

Ghassemi ve arkadaşları [5] çalışmalarında geliştirdikleri robotik uygulamalar için endirekt, temassız ve dinamik açı algılayıcı metodolojisini sunmuşlardır. Yazarlar çalışmalarında 2 adet ivmeölçeri aralarındaki açı ölçülecek uzuvlar üzerine eklemeye yakın bir şekilde yerleştirmişler ve ivmeölçerlerin çıktılarını işleyerek eklem açısını elde etmişlerdir. Potansiyometre, enkoder vb. sensörlerin dış yalıtım gerektirmesi ve sensörün bir uzva yerleştirilmesi bundan dolayı diğer uzuvla olan bağlantıyı fazladan bir eklemle yaratması gibi montaj zorluklarından ve bu sistemlerin kolay aşınabileceğinden veya kolaylıkla çalışma alanındaki başka bir nesneye çarpıp zarar görebileceğinden bahsetmişlerdir. Temassız tam tur ivmeölçer tabanlı açı sensörünün yukarıdaki problemleri ortadan kaldıracak alternatif bir çözüm olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu sensör 2 ivme ölçer arasındaki göreceli açıyı ölçer. Bağlı oldukları mikroişlemci sayesinde de ivme ölçerlerin çıktıları yorumlanarak açı bilgisi elde edilmiştir. Dışına yaptıkları sağlam muhafaza sayesinde de diğer sensörler gibi çevredeki olumsuz koşullardan etkilenmeyeceğini savunmuşlardır. Sistem testlerini Takeuchi firmasının ürettiği standart bir mini ekskavatör olan TB035 üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında sadece boom(bum) ve arm(kol) arasındaki göreceli açı algılaması üzerine çalışmışlardır(Şekil 1.5). Kalibrasyonlarını statik ve çapraz olarak 2'ye ayıran yazarlar dinamik açı ölçümü uygulamalarında çapraz kalibrasyon ardından yapılan ölçümlerde daha az hata(1.73°) ile karşılaştıklarını ve çapraz kalibrasyonun dinamik durumda daha gürbüz(robust) olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 1.5 Bum ve Kol Göreceli Açısını Algılayacak Sensörün Yerleşimi [5]

IHC Systems firması [6] ekskavatör uzuvlarının pozisyonlarını algılama ve toplama üzerine ticari bir ürün geliştirmiştir. Uzuvların göreceli hareketlerinin algılanmasında kullandıkları dönüş hareketi algılayıcıları ve bu verilerin işlendiği bilgisayar yazılımı Şekil 1.6'da görülmektedir. Bu çalışmada algılayıcılar direkt olarak şaft üzerine monte edilmiştir.

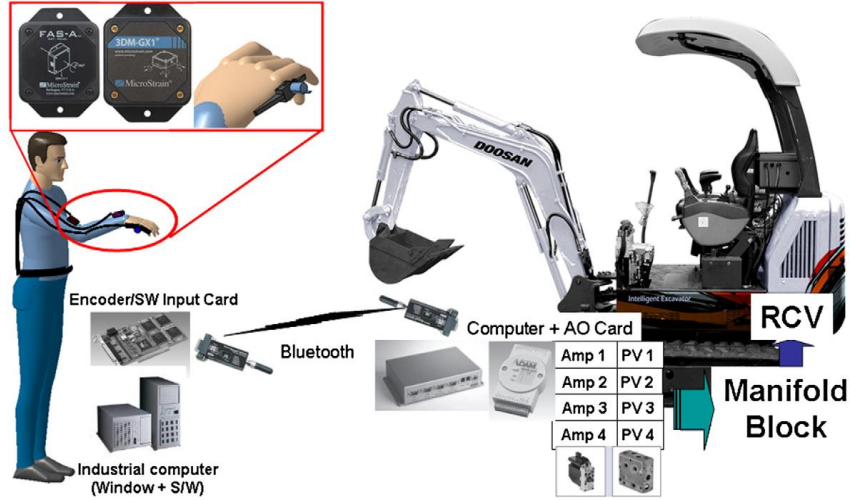


Şekil 1.6 IHC Firmasının Göreceli Pozisyon Sensörü [6]

Araştırılması gereken ikinci konu ise, kumanda sistemleri ve kuvvet geri beslemesi kullanılan sistemlerdir.

Kim ve arkadaşları [7] çalışmalarında küçük bir ekskavatör için geliştirilen tele-operasyon(elektronik uzaktan kontrol) sistemini anlatmışlardır. Çalışmalarında insan kolunu kumanda kolu olarak kullanmışlardır. İnsan bileğinin konumu bir IMU(atalet ölçer) kullanılarak ekskavatörün swing(eksen etrafındaki dönüş), boom(bum) ve arm(kol) referans konumları belirlenmektedir. Üst kola takılan bir eğim ölçer yardımıyla 360 derece aralığında sürekli olarak açı bilgisi elde

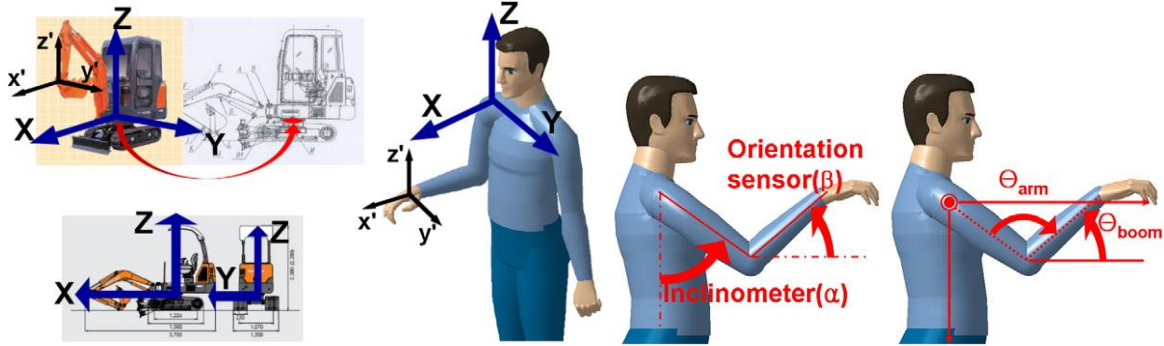
edilmektedir. Ele takılan bir enkoder yardımıyla serçe parmak ve avuç içi arasındaki açı elde edilerek bucket(kova) referans açısı belirlenmiştir(Şekil 1.7).



Şekil 1.7 Kim ve Arkadaşlarının Çalışmalarındaki Sistem Açıklaması [7]

Ekskavatör üzerinde modifiye edilmiş valflerle silindir komutlarını ve yağ akış hızı belirlenmektedir. Operatörün, elini sürekli yukarıda tutmaktan yorulacağı düşünüldüğü için sistem sürekli çalışır vaziyette değildir. Operatör kolunu kullanacağı zaman sistemi açmakta diğer zamanlar kapatmaktadır. Swing operatörün kolunun x eksenini dönüş açısı ile gerçekleştirilmektedir. Swing modunun kapalı olduğu durumlarda ise y eksenini dönüş açısı ile bum, üst kol ve alt kol arasındaki açı ile de kol kontrol edilmektedir(Şekil 1.8). Verilerin bluetooth teknolojisiyle transfer edildiği bu sistemde ekskavatör uzaktan sadece insan kolunun hareketinin kopyalanması mantığına dayanarak hareket etmektedir. Yazarlar, makalede OpenGL programı kullanarak sistemin çalışma performansını test etmiş ve 50mm hata ile görevi gerçekleştirebilmişlerdir. Ancak gerçek ekskavatör üzerinde gerçekleştirdikleri deneyde hata 80mm olarak ölçülmüştür. Bunun sebebinin ortam sıcaklığının hidrolik silindirlerin üzerindeki etkisi olarak açıklamışlardır. İnsan kolu ve ekskavatör kolu birbirinden farklı eklem yapılarına sahip olduğundan operatörün ekskavatör hareketlerini öngörmesi çok zordur. Yazarlar profesyonel bir operatör ile gerçekleştirdikleri deneylerde aynı operasyonu standart kullanım ve kendi sistemleri olarak denediklerinde standart kullanımda 13 saniyede gerçekleşen hareketin kendi sistemlerinde 15 saniyede gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bu sistemde kuvvet geri beslemesi olmadığı için zorlu şartlarda

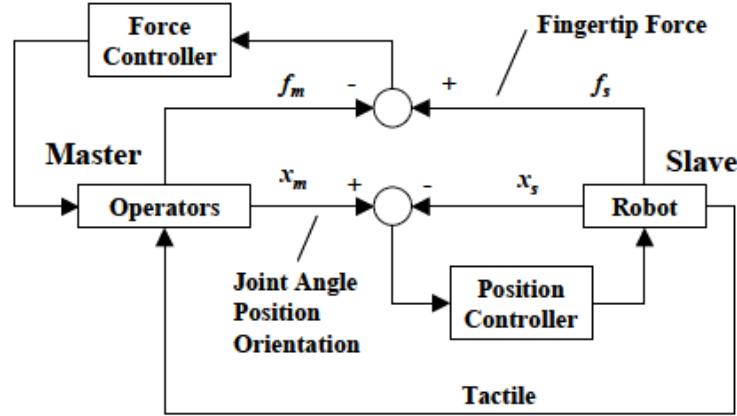
çalışan bir ekskavatör sisteminde operatör hareketleri ve ekskavatör hareketlerinin birbirine yakın olmayacağı sonucuna varmışlardır.



Şekil 1.8 Kim ve Arkadaşlarının Çalışmalarındaki Sistem Eksen Ve Sensör Açıklamaları [7]

Mouri ve arkadaşları [8] çalışmalarında robot insan eli ve bilateral(çift yönlü) efendi/köle¹ sistemindeki geliştirmeleri anlatmışlardır. Efendi/köle sisteminde, operatör efendi robot köledir. Operatör parmak açısı, el pozisyonu ve oryantasyonu ile robot el komutlarını üretmektedir. Robot el üzerindeki kuvvet algılayıcılar sayesinde operatöre kuvvet geri beslemesi yapılmaktadır. Sistem kontrol blok diyagramı Şekil 1.9'daki gibidir. Sistemde operatör el konumu 3 boyutlu ölçüm cihazı olan Northern Digital firmasının ürettiği OPTRAK ile el oryantasyonu ise 3 boyutlu oryantasyon takibi yapan InterSense firmasının ürettiği InertiaCube² kullanılarak elde edilmiştir. Operatör elindeki kuvvet ise parmaklara bağlanan bir telin servomotorun ters yönlü hareketi ile çekilerek sağlanmaktadır. Parmakların açısı ve kuvvet geri beslemesi Virtual Technologies firmasının ürettiği Cyber Glove ile elde edilmiştir. Robot elde ise hareket eklemlerdeki servo motorlar ile açı bilgisi ise manyetik enkoderler ile elde edilmektedir. Efendi ve köle arasındaki iletişim aradaki bir bilgisayar ile sağlanmaktadır. Robot üzerindeki dokunsal(tactile) sensörlerden elde edilen veri aradaki bilgisayarda işlenerek TCP/IP üzerinden operatörün giydiği eldivene aktarılmaktadır. Yazarlar yaptıkları testler sonucunda sadece insan eli taklidinde değil nesnelere tutup taşımada da başarılı olduklarını belirtmişlerdir.

¹İng. Master / Slave



Şekil 1.9 Mouri ve Arkadaşlarının Çalışmalarındaki Bilateral Kontrol Blok Diyagramı [8]

Literatürde görülen en önemli çalışma sunulan çalışmaya yakınlığından dolayı Hayn ve Schwarzmann'ın çalışmasıdır[9]. Çalışmada hidrolik ekskavatörler için haptik bir sistemden bahseden yazarlar sistem komutlarını üretirken sıradan ekskavatörlerdeki joystickler yerine aynı serbestlik derecesine sahip SensAble Phantom Omni adında bir model kumanda kullanmışlardır. Yazarlar çalışmada bu yöntemin gerek pozisyon kontrolündeki gerek operasyon hassaslığındaki faydalarından bahsetmişlerdir. Ekskavatör uzuv pozisyonlarını açı bilgisi yerine silindir uzunluk bilgisinden almışlardır. Kumanda kolunda ise her ekleme motorların akımını kontrol etmişler ve ekleme açı bilgilerini çıktı olarak almışlardır. Sağ el ile bum(boom), kol(arm), kova(bucket) pozisyon kontrolü gerçekleştirilirken sol el ile de eksen etrafındaki dönüş(swing) hareketi gerçekleştirilmiştir(Şekil 1.10). Öngörülen problemleri

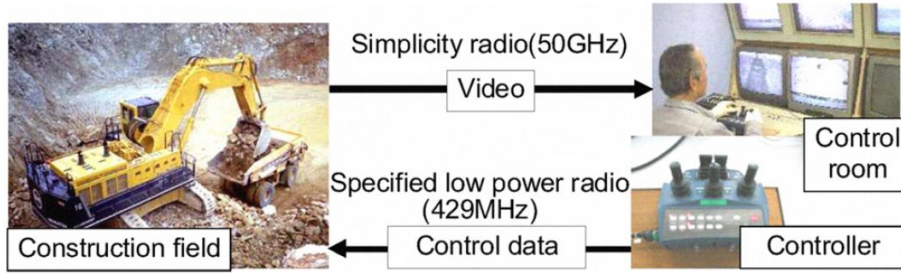
- Operatörün kumanda kolunu bıraktığında ekskavatörün kontrol dışı kalıp kovanın yere çarpması
- Test ekskavatöründe kuvvet sensörleri olmaması

olarak sıralayan yazarlar bundan dolayı pozisyon kontrolü gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir. Ekskavatör bir engele takıldığında kumanda kolunun da hareket etmemesini sağlamışlardır. Kısaca her iki sistem de birbirlerine pozisyon geri beslemesi yapmakta ve birbirinin aynası efendi/köle sisteminde çalışmaktadır.



Şekil 1.10 Hayn ve Schwarzmann'ın Çalışmalarında Bahsettikleri Hidrolik Ekskavatörler İçin Sezgisel Operasyonel Konsept [9]

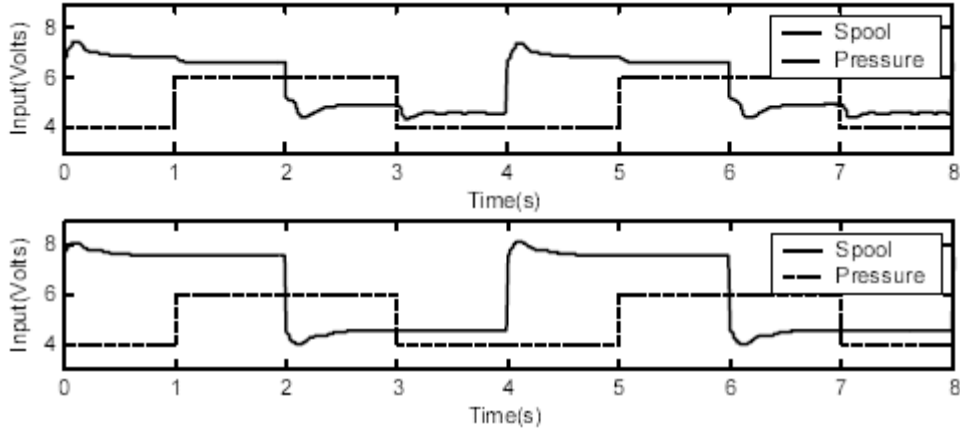
Hayashi ve Tamura [10], bir çeşit dokunma hissinin operatöre verildiği uzaktan kontrollü bir ekskavatör otomasyon sistemi üzerine çalışmışlardır (Şekil 1.11). Bu sistem de kovanın yere yaklaşımı ölçülmekte ve belirlenen mesafelerde operatörün kullandığı kollara (joystick) titreşim verilmektedir. Tam anlamıyla bir kuvvet geri beslemesi söz konusu değildir.



Şekil 1.11 Hayashi ve Tamura'nın Çalışmasındaki İnsansız İnşaat Sistemi [10]

Kontz ve Book [11], çalışmalarında bir bekho(backhoe) yükleyicinin koordine hareketi için akış kontrolü ve haptik geri besleme üzerine çalışmışlardır. Yazarlar, geleneksel insan-makine etkileşimli hidrolik mobil sistemlere haptik arayüzün eklenmesiyle birçok özellikte gelişim olacağını öne sürmüşlerdir. Koordine hareket kullanımı ve tek el ile kontrol kullanımının ters kinematik yaparak operatörün zihinsel yükünü azaltacağını söylemektedirler. Çalışmalarında test düzeneğinde köle olarak bir bekho yükleyici, efendi olarak ise SensAble Technologies firmasının ürettiği PHANTOM kullanılmıştır. Sisteme elektronik basınç kontrolü sağlayabilmek için sisteme elektro-oransal bir basınç tahliye valfi eklenmiştir. Debi sabit deplasmanlı bir pompa ile sağlanmaktadır. Sisteme elektro-hidrolik valfler ve bir dizi sensör eklenerek sistemde geri beslemeli bir kontrol elde edilmiş ve sistem monitörize

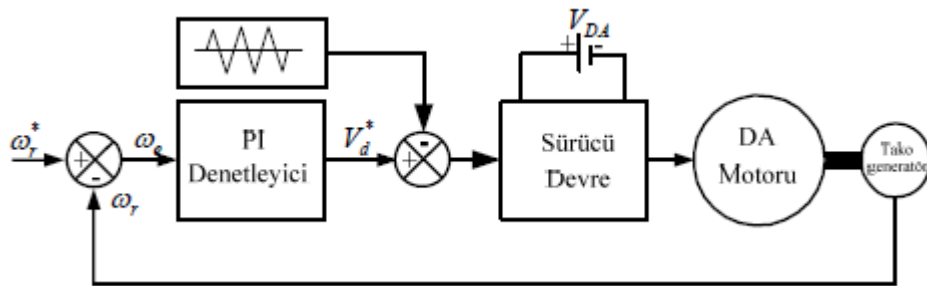
edilmiştir. Sisteme bir basınç düzenleyici ekleyerek sistem cevabının değişimi gözlenmiştir(Şekil 1.12). Basınç düzenleyici, basınç değişiminde valf pistonu ve basıncında görülebilir bir değişim olmamasını sağlamaktadır.



Şekil 1.12 Kontz ve Book'un Çalışmasında Basınç Düzenleyicinin Etkisi [11]

Araştırılması gereken üçüncü konu ise denetleyici yöntemleridir.

Demirbaş [12] çalışmasında internet tabanlı PI denetleyicili bir doğru akım motoru deney seti üzerine çalışmıştır. Yazar çalışmasında laboratuvar ortamındaki bir sunucuya bağlı bulunan deney düzeneğini uzaktaki başka bir bilgisayar ile kontrol etmiş ve PI denetleyici katsayı değerlerini değiştirerek sistem cevabını gözlemiştir. Deney düzeneğinde kapalı döngü bir sistemle motor hız kontrolü gerçekleştirerek çıkış büyüklüğünü istenilen referans değere uydurmaya çalışmıştır(Şekil 1.13). Burada referans hız değerinden doğru akım motorunun çıkış miline bağlı takometrenin ölçtüğü gerçek hız değeri çıkartılarak hata değeri oluşturulmaktadır. Burada PI denetleyicisi kapalı döngü bir sistemle birleştirildiğinde hata yok olana kadar kontrol etkisinin değişimine neden olmaktadır. Yazar PI denetleyicinin, kalıcı durum hatasının olmaması, kolay uygulanabilirliği ve katsayıların doğru ayarlandığında hızlı cevap vermesinden dolayı tercih edildiğini belirtmiştir.



Şekil 1.13 PI Denetleyicili Doğru Akım Motorunun Hız Kontrol Blok Diyagramı [12]

1.3 Amaç

Otomatik kontrol sistemleri, mikrokontrolcü ve yazılım teknolojilerinin gelişmesi ve maliyetlerinin düşmesi nedeniyle son yıllarda birçok alanda uygulanma şansı bulmakta olan sistemlerdir. İnsanların denetimindeki makinelerin kullanımı sırasında doğabilecek olan birçok aksaklık (kullanım hatası, düşük hassaslık, kazalar vb.) çeşitli tam otomatik ve yarı otomatik kontrol sistemlerinin bu makinelere entegrasyonu ile önlenmektedir [7;9;11].

Bu çalışmada sisteme bir kopya kol ile kontrol imkanı eklenebilmesi için öncelikle ekskavatör ve kopya kol pozisyonlarının algılanması gerekmektedir. Yapılan literatür araştırması sonucunda potansiyometrelerin yerine enkoderlerin kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür[2]. Kullanılacak enkoderin ekskavatör çalışma sahasının tozlu ve kirli bir ortam olmasından dolayı kire, toza dayanıklı[2], temassız enkoderlerin mekanik enkoderlere göre daha uzun ömürlü olmasından dolayı temassız olması gerekmektedir[5]. Pozisyon değişimine olan hassaslığı ve temassız oluşundan dolayı manyetik enkoderlerin kullanılmasına karar verilmiştir[3;4].

Geçmiş çalışmalarda ekskavatörler için yarı otomatik bir kontrol sistemi geliştirilmiştir[1]. Bu otomatik kontrol sistemi sayesinde

- Kullanım kolaylığı
- Hassas konumlandırma yeteneği
- İnsan faktöründen doğacak hataların azaltılması
- Vasıflı operatör ihtiyacının azaltılması
- Hatalardan doğan insan yaralanmaları ve ölümlerinin engellenmesi
- Hatalardan doğan bakım ve onarım maliyetlerin azaltılması
- Operatör yetiştirmek için gereken zaman ve eğitim maliyetlerinin azaltılması

hedeflenmiştir.

Kuvvet geri beslemesi¹ algılayıcı ve kontrol sistemlerinin gelişmesiyle birlikte tıp, sanayi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bunun amacı kuvvet geri beslemesinin operatöre daha hassas operasyonları gerçekleştirme imkanı sağlamasıdır. Kuvvet geri beslemesi olmadığı takdirde ekskavatör hareket etmediği halde kopya kol

hareket edebilir ve bu da ekskavatöre zarar verebileceği gibi ekskavatör çalışma sahasına ve orada bulunan insanlara da zarar verebilir.

Ekskavatör sistemine kuvvet geri beslemesi eklenmesi

- Daha hassas kullanım imkanı sayesinde hassas operasyonlarda (mayın temizleme, arama ve kurtarma görevleri, su altı inşaatları, yer altı inşaatları, vb.) ekskavatörlerin kullanılabilmesini
- Sistemin aşırı zorlanmasından dolayı doğan bakım onarım maliyetlerinin önüne geçilmesini
- Sistemin aşırı zorlanmasından dolayı manipülatörün çevresine verdiği zararların önüne geçilmesini

sağlayacaktır.

Literatürde karşılaşılan benzer haptik kumanda kollarıyla ekskavatör kontrollerinde ticari haptik kumanda kollarının kullanıldığı görülmüştür[9;11]. Bu cihazlar oldukça pahalı cihazlardır. Bu çalışmalarda kullanılan kumanda kolları standart olup spesifik cihazlara göre üretilmediğinden ekskavatör uzuv ölçüleriyle orantılı değildir. Bundan dolayı operatörün bu cihazları kullanarak ekskavatörü kontrol ederken hareketi tam anlamıyla ön görmesi mümkün değildir. Bu sebeplerden dolayı çalışma kapsamında sisteme özel bir kopya kol üretilmiştir.

2. AÇI ALGILAYICILAR

2.1 Giriş

Robotik kol sistemlerinde uzuv pozisyon algılayıcıları olarak potansiyometreler ve mutlak değer enkoderler¹ kullanılmaktadır. Çözünürlük değeri, kullanım ömrü ve mutlak konumsal bilgi açısından bu çalışmada potansiyometreler yerine enkoderlerin kullanılması uygun görülmüştür[2].

Mutlak değer enkoder her pozisyon için tek ve benzersiz bir kod üretir bundan dolayı güç kapalı iken dahi mil konumu değişmiş olsa da güç tekrar verildiğinde mutlak değer enkoderleri bir sıfırlama noktası aramaz ve kaldığı yerden çalışmaya devam ederler. Mutlak değer enkoderleri farklı çalışma sistemlerine sahiplerdir. Bunlardan bazıları

- Mekanik mutlak enkoderler
- Optik mutlak enkoderler
- Manyetik mutlak enkoderler
- Kapasitif mutlak enkoderler

olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada manyetik mutlak enkoderler kullanılmıştır.

2.2 Manyetik Mutlak Enkoderler

Piyasada farklı model ve markalarda manyetik mutlak değer enkoderleri mevcuttur. Fakat bu çalışmada açı algılayıcılarının sisteme entegrasyonunun kolaylığı açısından sistemlere özel açı algılayıcıları geliştirilmiştir. Açı algılayıcılarda manyetik pozisyon sensörü olarak AMS firmasının ürettiği manyetik rotatif pozisyon sensörleri² kullanılmıştır(Şekil 2.1).

¹İng. Absolute encoders

²İng. Magnetic rotary position sensors



Şekil 2.1 AMS Firmasının Ürettiği Manyetik Rotatif Pozisyon Sensörü AS5145B

Bu sensörlerin tercih edilmesindeki başlıca özellikler

- Tam turdaki rotasyonel pozisyonu yüksek çözünürlükte ve temassız olarak vermesi
- Kullanıcı tanımlı sıfır noktası
- Geniş sıcaklık aralığına sahip olması - 40°C +150°C
- Küçük bir pakete sahip olması

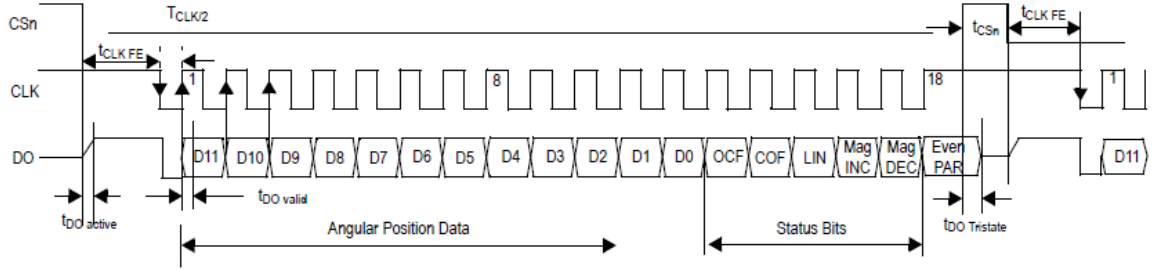
olarak sıralanabilir.

Bu sensör üzerine eş merkezli ve yüzeyleri arasında 0.5 mm – 1.5 mm aralığında bir mesafe kalacak şekilde yerleştirilen 6 mm çapında ve 2.5mm kalınlığında bir çapsal mıknatıs sayesinde artımsal çıktı verir. Bu alınan değer bir mikroişlemci vasıtasıyla yorumlanıp açı değerine dönüştürülmektedir.

AS5145B, haberleşme yöntemi olarak seri haberleşme kullanıldığında 18bit veri gönderir. İlk 12 bit açı değeridir. Bu da 12 bit çözünürlüğe sahip olduğunu gösterir. Bu değer açısal olarak 0.0879° çözünürlüğe karşılık gelmektedir. Kalan son 6 bit ise sistem bilgilerini (Manyetik alan durumu vb.) içerir(Şekil 2.2).

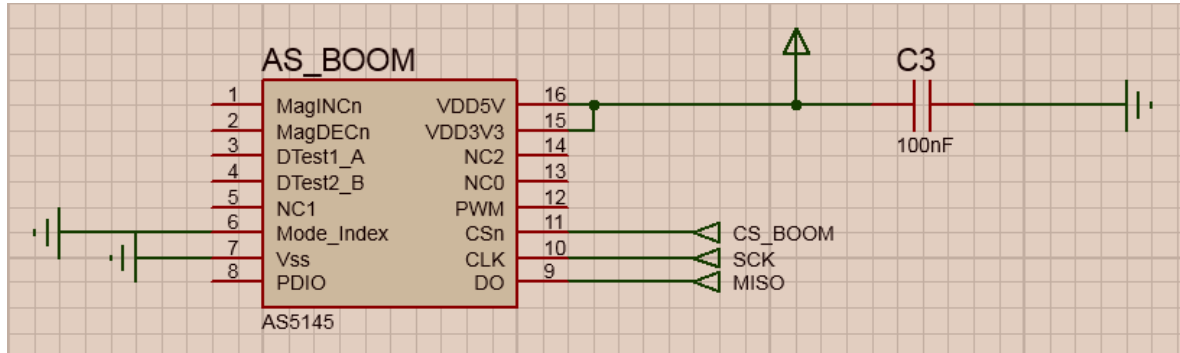
Bir sistemde birden fazla sensör kullanmak mümkündür. Bilgisine ihtiyaç duyulan sensörün çip seçme(CS: ChipSelect) bacağına t_{CSn} süresi boyunca tam darbe(High Pulse) verildiğinde ilgili sensör yanıt verir. Bundan dolayı her sensöre ayrı ayrı saat

girdisi(CLK: Clock input) ve veri çıkışı(DO: Data Output) bacakları bağlantısı yapmaya gerek yoktur. Sistem boyunca veri çıkışı ve saat girdisi bacakları mikroişlemciye tek bir çıkıştan sağlanabilir.



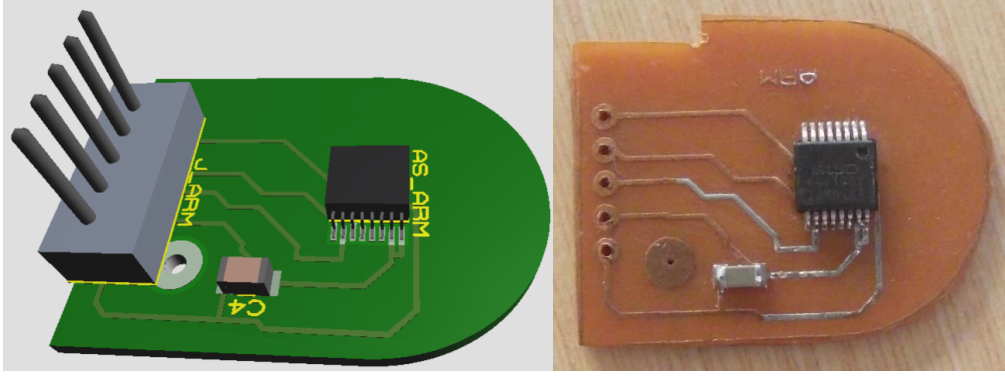
Şekil 2.2 AS5145B Çalışma Açıklamaları

Elektronik devre kartlarının bilgisayar ortamındaki simülasyonu PROTEUS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3'te AS5145B bacak bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 2.3 AS5145B Bacak Bağlantıları

Kopya kol üzerindeki açılı algılayıcı kartlarının eklemler üzerinde bulunmasından dolayı boyutlarının küçük olması adına bu kartlara güç, veri çıkışı, saat ve çip seçme bağlantıları mikroişlemciden kablolarla getirilmiştir. Şekil 2.4'te kopya kol için üretilen bir algılayıcı kartının bilgisayar ortamında tasarımını ve üretilmiş halini görülmektedir.



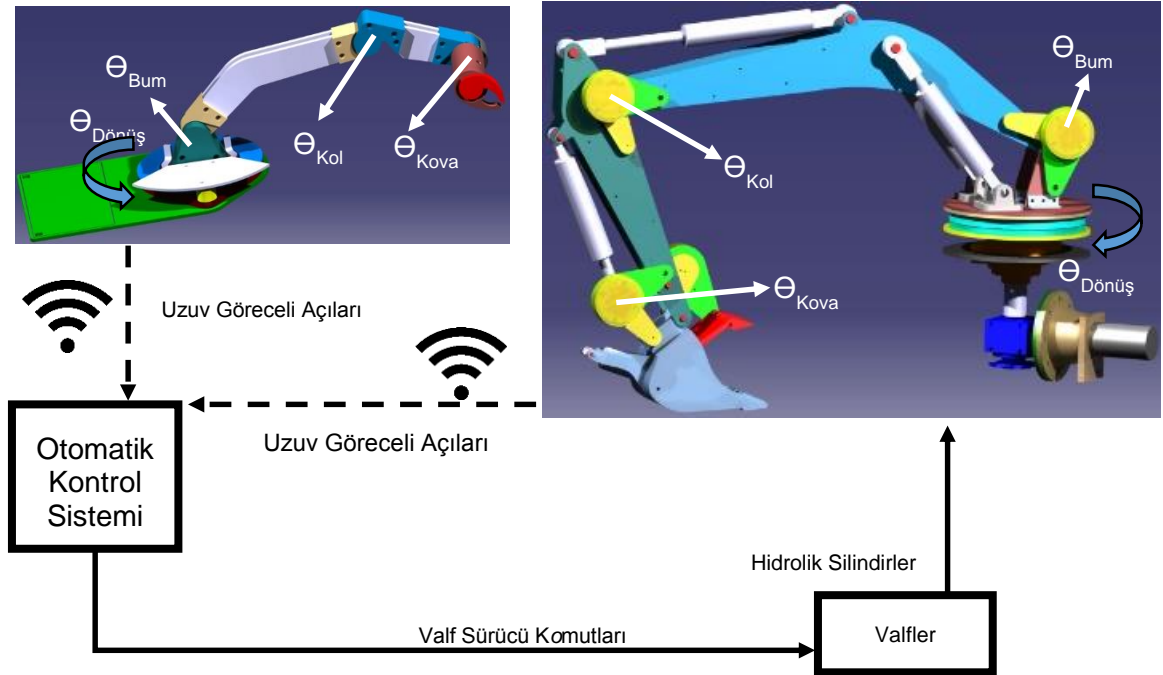
Şekil 2.4 Örnek Açık Algılayıcısı(AS5145B) Elektronik Kartı ve Bilgisayar Ortamında Tasarımı

3. KOPYA KOL YARDIMI İLE EKSKAVATÖR KONTROLÜ

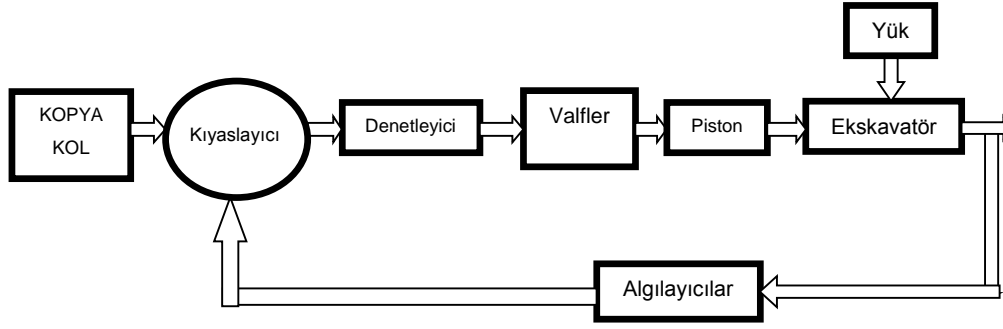
3.1 Giriş

Operatörün hidrolik sistem valf konumlarını doğrudan kontrol etmesi yerine temsili bir ekskavatör kolunu (kopya kol) hareket ettirmesi, 4 serbestlik derecesinin (gövde, bum, kol, kova) kontrol edilmesinde yeterli olmaktadır. Bu kopya kolun hareketlerini referans olarak kullanan kontrolcü sistemi, ekskavatör üzerindeki sensörlerden geri beslenen uzuv göreceli açıları kullanarak, hidrolik valflerin konumlarını kontrol etmektedir. Sistem çalışma prensiplerinin şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.

Kopya koldan kablosuz olarak alınan göreceli eklem açısı değerleri otomatik kontrol sistemine beslenmektedir. Otomatik kontrol sistemi hidrolik silindirlerin manipülasyonu sonucu oluşan hareketin ardından uzuv açıları ölçen algılayıcılardan kablosuz olarak elde ettiği geri besleme bilgilerini kullanarak doğru valf konum değerlerini belirlemektedir. Bu sayede operatörün yapması gereken tek şey kopya kolu gerekli görev için doğru şekilde hareket ettirmek olacaktır. Ekskavatör denetleyici sisteminin blok diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Ekskavatör Otomatik Kontrol Sisteminin Çalışma Prensipleri



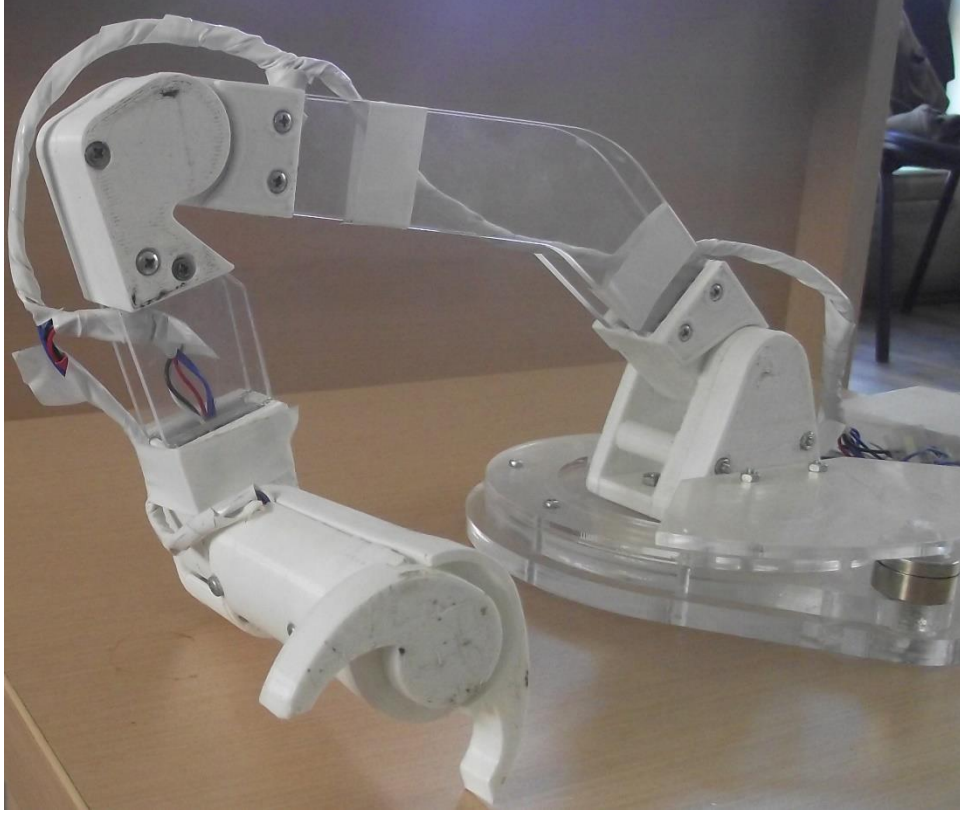
Şekil 3.2 Denetleyici Sistem Blok Diyagramı

3.2 Kopya Kol

Kopya kol gerçek bir ekskavatörün(Şekil 3.3) uzuv ölçülerinin insan kolu hareket bölgesine uyacak şekilde ölçeklendirilmiş bir kopyasıdır. Çalışma kapsamında bir kopya kol üretilmiştir(Şekil 3.4).



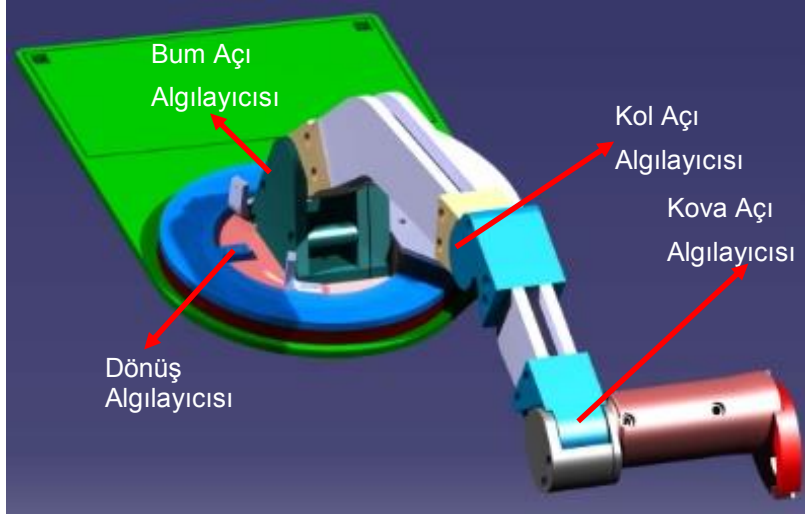
Şekil 3.3 CAT® Firmasının Ürettiği 324E Modeli



Şekil 3.4 Çalışma Kapsamında Üretilen Kopya Kol

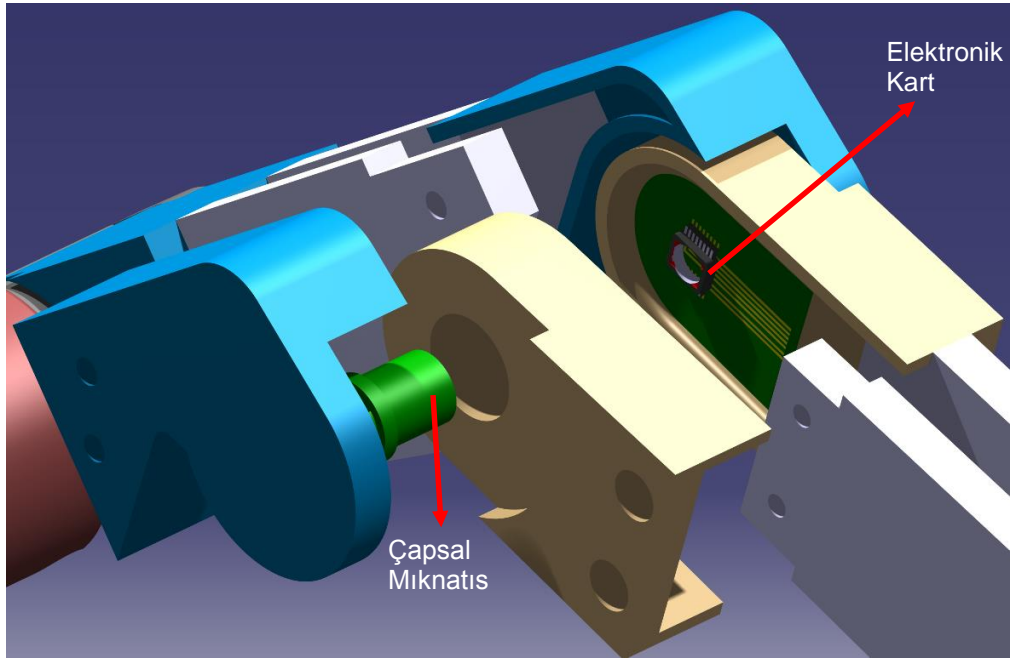
3.2.1 Kopya kol uzuv göreceli açı algılayıcıları

Kopya kol üzerinde uzuv göreceli açıları algılamak için manyetik rotatif pozisyon sensörü kullanılarak bir açı ölçer sistem geliştirilmiştir. Kopya kolun ekskavatöre ilgili komutları gönderebilmesi için 3 serbestliği karşılayan 3 adet açı bilgisi gerekmektedir. Bundan dolayı 3 uzuv birleşim noktasına açı algılayıcılar yerleştirilmiştir. Ekskavatörün bir diğer serbestliği de dördüncü serbestlik olan kendi eksenini etrafındaki dönme hareketidir (swing). Ancak operatör kontrolünde bu harekete ait konum geri beslemesine gerek duyulmadığından kopya koldan sağa dön, sola dön ve dur olmak üzere 3 komutla hız kontrolü gerçekleştirilmektedir. Bu işlem için de Hall etkisi¹ bir sensör olan DIODES firmasının ürettiği AH41 kullanılmıştır. Bu sensör kendisine yaklaşan bir aksenal mıknatısın yaklaştığı yöne ve kutba bağlı olarak oluşan manyetik alana göre analog bir çıktı vermektedir. Bu çıktı da mikroişlemci yardımıyla yorumlanarak yön bilgisi ve dönüş hızı elde edilmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Kopya Kol Açđ Algilayıcı Konumları

Şekil 3.6'da kopya kol uzuv göreceli açđlarını algılamak için geliştirilen ve direk uzuv üzerinde yer alan algılayıcı sistemi görölmektedir.



Şekil 3.6 Kopya Kol Açđ Algilayıcı Sistem Örneği

3.3 Mini Ekskavatör

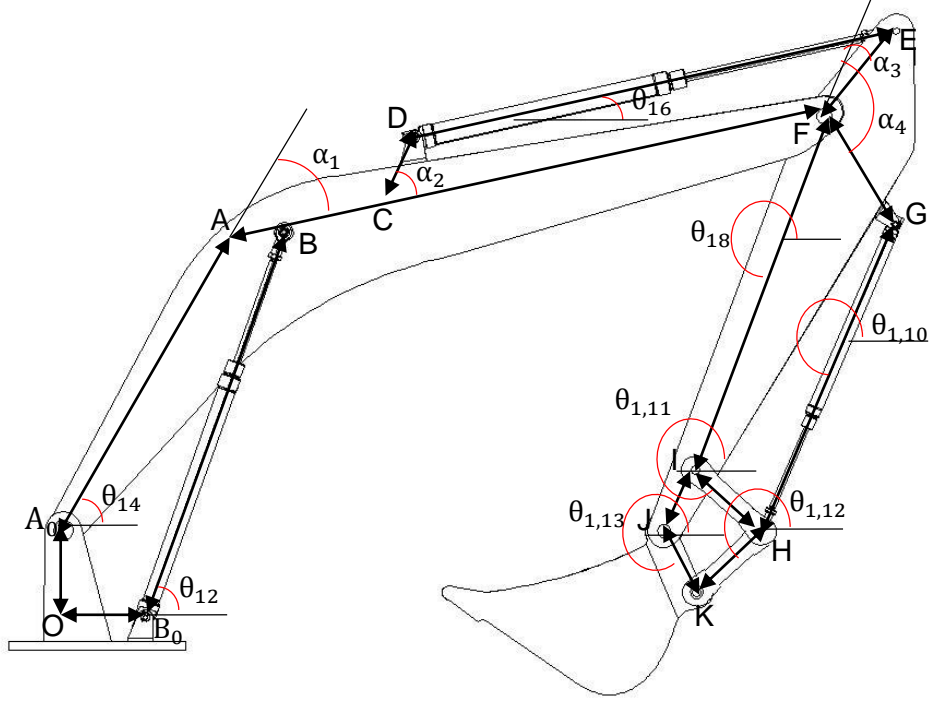
Çalışma kapsamındaki testler gerçek ekskavatörde gerçekleştirilemediğinden bir mini ekskavatör üretilmiştir(Şekil 3.7). Mini ekskavatör uzuv ölçüleri gerçek ekskavatör boyut oranlarına sağdik kalarak ölçeklendirilmiştir. Aç kapa valflerin kontrolündeki hidrolik silindirlerin manipülasyonu sonucu hareket gerçekleşmektedir.



Şekil 3.7 Çalışma Kapsamında Üretilen Mini Ekskavatör

Hidrolik silindirlerin seçiminde ne kadar yükü kaldıracağı ve uzama miktarı(strok) göz önünde bulundurulması gereken değerlerdir. Bundan dolayı ekskavatör sisteminin pozisyon analizi ve kuvvet analizi yapılip MATLAB programı yardımıyla çözülmüştür.

Kuvvet analizi ve pozisyon analizi yapılabilmesi için ekskavatör sisteminin parametre isimlendirmeleri yapılmıştır(Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Ekskavatör Sisteminin Şematik Gösterimi

Ekskavatör uzun ölçü isimlendirmeleri

$$\begin{aligned}
 |A_0O| = a_1, \quad |B_0O| = b_1, \quad |B_0B| = s_{23}, \quad |A_0A| = a_4, \quad |AB| = b_4, \\
 |BC| = c_4, \quad |CD| = a_5, \quad |CF| = d_4, \quad |DE| = s_{78}, \quad |FE| = b_8, \quad |FG| = d_8, \quad |FI| = a_8, \\
 |IJ| = c_8, \quad |IH| = a_{11}, \quad |HK| = a_{12}, \quad |JK| = a_{13}, \quad |GH| = s_{9,10}
 \end{aligned}$$

olarak yapılmıştır.

3.3.1 Mini ekskavatör pozisyon analizi

Sistem konumunun istenilen konuma gelebilmesi için, sistem açılarının girdi açılarını karşılamaları gerekmektedir. Sistemin bu konuma gelebilmesi için hidrolik silindirlerin uzunlukları değiştirilmelidir. Ekskavatör sisteminde kullanılacak hidrolik silindirlerin seçilebilmesi için strok değerlerinin elde edilmesi gereklidir. Bu uzunluk değerleri pozisyon analizi yöntemi ile elde edilmiştir. Bu analizi yapılabilme amacıyla sistem 4 kapalı döngü olarak incelenmiştir[14]. Kinematik analizlerde elde edilen eşitlikler her döngü için ayrı ayrı aşağıda verilmiştir.

- Döngü A₀B₀BA

$$\gamma_1 = \theta_{14} - \alpha_1 \quad (3.1)$$

$$s_{23} = \sqrt{\begin{aligned} & a_4^2 + b_4^2 + a_1^2 + b_1^2 + 2a_4b_4 \cos(\gamma_1) \cos(\theta_{14}) - 2a_4b_1 \cos(\theta_{14}) \\ & - 2b_4b_1 \cos(\gamma_1) + 2a_4a_1 \sin(\theta_{14}) + 2b_4a_1 \sin(\gamma_1) \\ & + 2a_4b_4 \sin(\gamma_1) \sin(\theta_{14}) \end{aligned}} \quad (3.2)$$

$$\theta_{12} = \text{Atan2}\left(\frac{a_4 \sin(\theta_{14}) + b_4 \sin(\gamma_1) + a_1}{s_{23}}, \frac{a_4 \cos(\theta_{14}) + b_4 \cos(\gamma_1) - b_1}{s_{23}}\right) \quad (3.3)$$

Bu döngüde girdi açısı bum açısı olan θ_{14} 'tür. Denklemler çözüldüğünde bum silindir uzunluğu s_{23} ve silindirin yere göre açısı olan θ_{12} bulunur.

- Döngü DCFE

$$\gamma_2 = \theta_{14} - \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3.4)$$

$$\gamma_3 = \theta_{18} - \alpha_3 \quad (3.5)$$

$$s_{78} = \sqrt{\begin{aligned} & a_5^2 + d_4^2 + b_8^2 - 2a_5d_4(\cos(\gamma_2)\cos(\gamma_1) + \sin(\gamma_2)\sin(\gamma_1)) \\ & + 2d_4b_8(\cos(\gamma_1)\cos(\gamma_3) + \sin(\gamma_1)\sin(\gamma_3)) \\ & - 2b_8a_5(\cos(\gamma_2)\cos(\gamma_3) + \sin(\gamma_2)\sin(\gamma_3)) \end{aligned}} \quad (3.6)$$

$$\theta_{16} = \text{Atan2}\left(\frac{\begin{aligned} & -a_5 \sin(\gamma_2) + d_4 \sin(\gamma_1) + b_8 \sin(\gamma_3) \\ & s_{78} \end{aligned}}{\begin{aligned} & -a_5 \cos(\gamma_2) + d_4 \cos(\gamma_1) + b_8 \cos(\gamma_3) \\ & s_{78} \end{aligned}}\right) \quad (3.7)$$

Bu döngüde girdi bum açısı θ_{14} ve kol açısı θ_{18} 'dir. Denklemler çözüldüğünde kol silindir uzunluğu s_{78} ve kol silindirinin yere göre olan açısı θ_{16} bulunur.

- Döngü FGHI

$$C_3 = a_{11}^2 - a_{13}^2 - c_8^2 - a_{12}^2 + 2a_{13}c_8(\cos(\theta_{18})\cos(\theta_{1,13}) + \sin(\theta_{18})\sin(\theta_{1,13})) \quad (3.8)$$

$$A_3 = 2a_{13}a_{12}\sin(\theta_{1,13}) - 2c_8a_{12}\sin(\theta_{18}) \quad (3.9)$$

$$B_3 = 2a_{13}a_{12}\cos(\theta_{1,13}) - 2c_8a_{12}\cos(\theta_{18}) \quad (3.10)$$

$$D_3 = \sqrt{A_3^2 + B_3^2} \quad (3.11)$$

$$\beta_3 = \text{Atan2}(A_3, B_3) \quad (3.12)$$

$$\theta_{1,12} = \text{Acos}\left(\frac{C_3}{D_3}\right) + \beta_3 \quad (3.13)$$

$$\theta_{1,11} = \text{Atan2}\left(\frac{\begin{aligned} & a_{13} \sin(\theta_{1,13}) - c_8 \sin(\theta_{18}) + a_{12} \sin(\theta_{1,12}) \\ & a_{11} \end{aligned}}{\begin{aligned} & a_{13} \cos(\theta_{1,13}) - c_8 \cos(\theta_{18}) + a_{12} \cos(\theta_{1,12}) \\ & a_{11} \end{aligned}}\right) \quad (3.14)$$

Bu döngüde girdi kol açısı θ_{18} ve kova açısı θ_{113} 'tür. Denklemler çözüldüğünde dördüncü döngünün çözülebilmesi için gerekli olan θ_{111} ve θ_{112} açıları bulunur.

- Döngü IHKJ

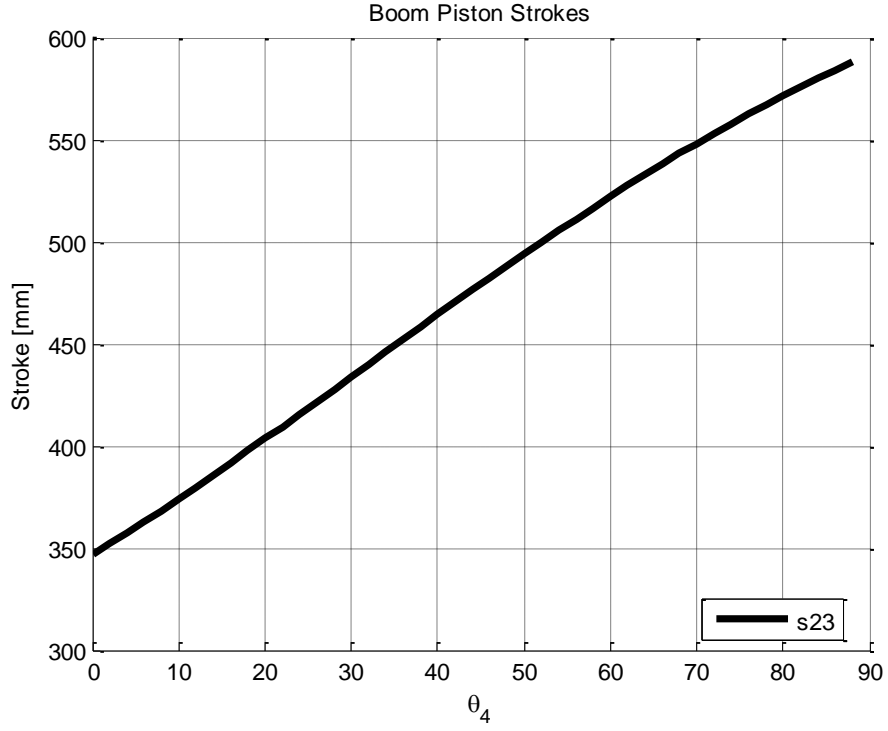
$$\gamma_4 = \theta_{18} - \alpha_4 \quad (3.15)$$

$$s_{9,10} = \sqrt{\begin{aligned} & a_8^2 + a_{11}^2 + d_8^2 - 2a_8a_{11}\cos(\theta_{18})\cos(\theta_{1,11}) - 2a_{11}d_8\cos(\gamma_4)\cos(\theta_{1,11}) \\ & + 2a_8d_8\cos(\theta_{18})\cos(\gamma_4) - 2a_8a_{11}\sin(\theta_{18})\sin(\theta_{1,11}) \\ & - 2a_{11}d_8\sin(\gamma_4)\sin(\theta_{1,11}) + 2a_8d_8\sin(\theta_{18})\sin(\gamma_4) \end{aligned}} \quad (3.16)$$

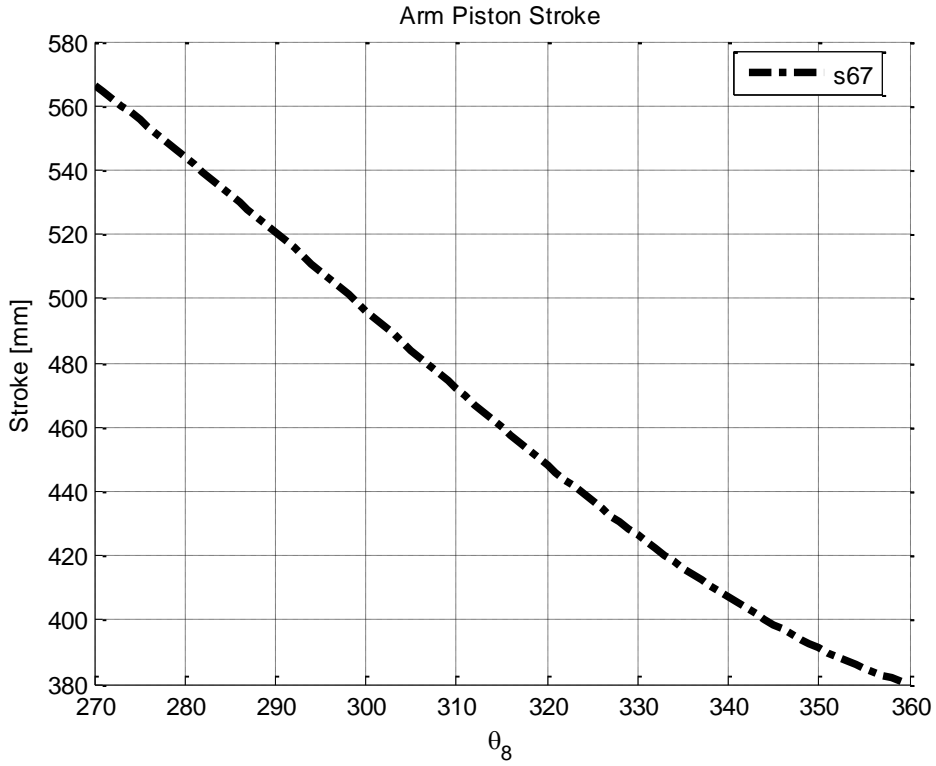
$$\theta_{1,10} = \text{Atan2} \left(\frac{\left(\frac{a_8\sin(\theta_{18}) - a_{11}\sin(\theta_{1,11}) + d_8\sin(\gamma_4)}{s_{9,10}} \right)}{\left(\frac{a_8\cos(\theta_{18}) - a_{11}\cos(\theta_{1,11}) + d_8\cos(\gamma_4)}{s_{9,10}} \right)} \right) \quad (3.17)$$

Bu döngüde θ_{18} , θ_{111} açıları girdi olarak kullanılarak kova silindir uzunluğu s_{910} ve kova silindirinin yere göre olan açısı θ_{110} açısı bulunur.

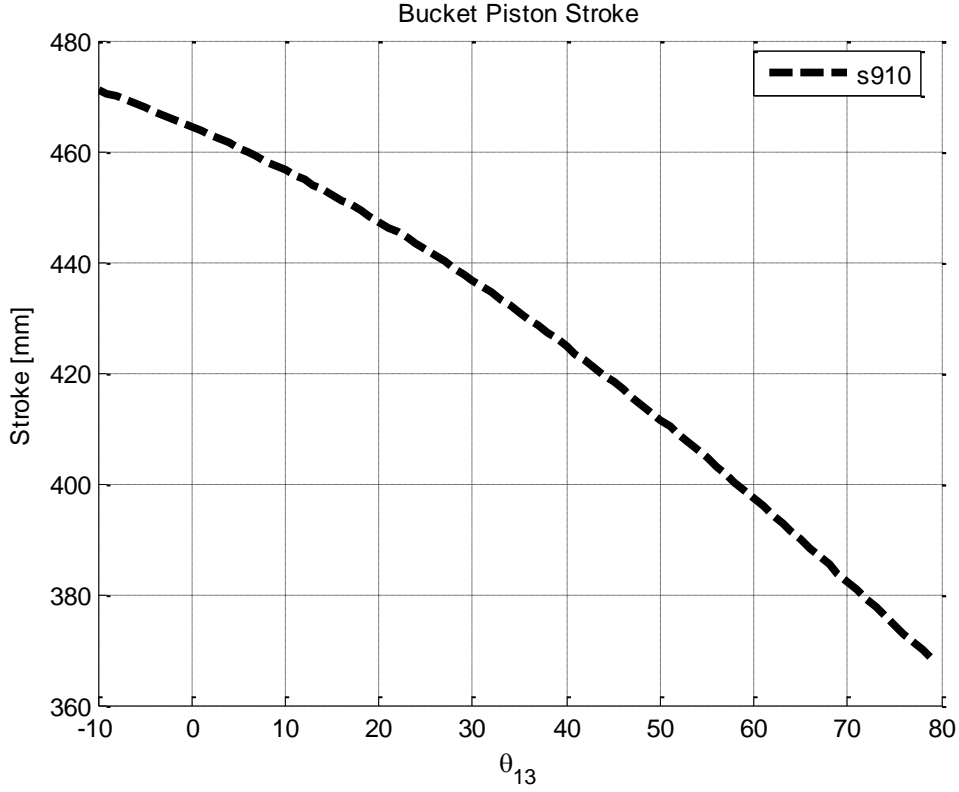
Denklemler MATLAB yardımıyla çözüldüğünde bum silindir uzunluğu(Şekil 3.9), kol silindir uzunluğu(Şekil 3.10) ve kova silindir uzunluğu(Şekil 3.11) grafikleri elde edilmiştir. Bumun 0-90 derece arasındaki hareketinde bum silindir uzunluğunun 350mm-585mm aralığında olacağı görülmüştür. Kolun buma göre 270-360 derece arasındaki hareketinde kol silindir uzunluğunun 565mm-380mm aralığında olacağı görülmüştür. Kovanın kola göre -10-80 derece arasındaki hareketinde kova silindir uzunluğunun 470mm-370mm aralığında olacağı görülmüştür.



Şekil 3.9 Bum Hidrolik Silindir Strok Değerleri MATLAB Çıktısı



Şekil 3.10 Kol Hidrolik Silindir Strok Değerleri MATLAB Çıktısı

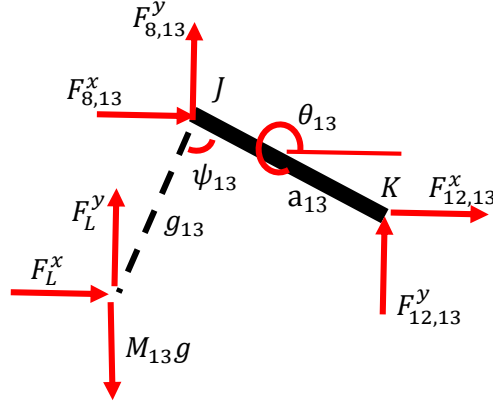


Şekil 3.11 Kova Hidrolik Silindir Strok Değerleri MATLAB Çıktısı

3.3.2 Mini ekskavatör kuvvet analizi

Ekskavatör sisteminin, istenilen konuma gidebilmesi için hidrolik silindirlerin gerekli uzunluklara ulaşması gerekmektedir. Bunu yapabilmek için her silindirin karşılaştığı yükü karşılayacak kapasitede olması gerekmektedir. Ekskavatör sisteminde kullanılacak hidrolik silindirlerin seçilebilmesi için karşılaşılabilecekleri maksimum yük değerlerinin elde edilmesi gereklidir. Maksimum yükler gerekli olduğundan dolayı analizler sistem sınır değerlerindeyken statik olarak düşünülerek yapılmıştır. Yük değerleri düğüm nokta analizi yöntemi ile elde edilmiştir. Kuvvet analizi için elde edilen eşitlikler her uzuv için ayrı ayrı aşağıda verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken kova uç konumunda 50 kg yük var kabul edilmiştir.

Ekskavatör sistemi 9 uzva ayrılmıştır. Sistem dengede kabul edildiği için bir uzuv üzerindeki x eksenindeki kuvvetler toplamı sıfır, y eksenindeki kuvvetler toplamı sıfır ve seçilen nokta üzerindeki moment sıfır olarak eşitlikler her uzuv için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Uzuvlar ve ilgili uzvun eşitlikleri aşağıda sırayla verilmiştir.



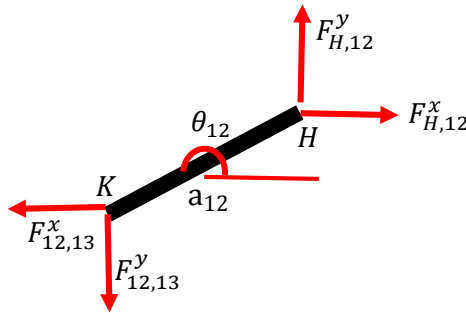
Şekil 3.12 J-K Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.12’de görülen J-K elemanında 3 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve J noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.18), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.19) ve J noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.20) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{8,13}^x + F_{12,13}^x = -F_L^x \quad (3.18)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{8,13}^y + F_{12,13}^y = -F_L^y + M_{13}g \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \sum M_j = 0 \Rightarrow & F_L^x g_{13} \sin(0 - \theta_{13} + \psi_{13}) + F_L^y g_{13} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{13} + \psi_{13}\right) \\ & + M_{13}g g_{13} \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_{13} + \psi_{13}\right) + F_{12,13}^x a_{13} \sin(0 - \theta_{13}) \\ & + F_{12,13}^y a_{13} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{13}\right) = 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$



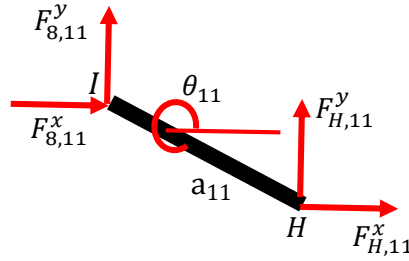
Şekil 3.13 K-H Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.13'te görülen K-H elemanında 2 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve H noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.21), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.22) ve H noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.23) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{H,12}^x + F_{12,13}^x = 0 \quad (3.21)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{H,12}^y + F_{12,13}^y = 0 \quad (3.22)$$

$$\sum M_H = 0 \Rightarrow F_{12,13}^x a_{12} \sin(\pi - \theta_{12}) + F_{12,13}^y a_{12} \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_{12}\right) = 0 \quad (3.23)$$



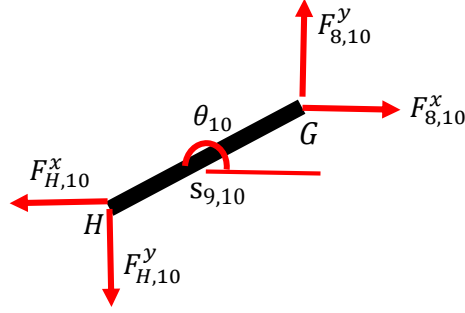
Şekil 3.14 H-I Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.14'te görülen H-I elemanında 2 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve I noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.24), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.25) ve I noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.26) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{H,11}^x + F_{8,11}^x = 0 \quad (3.24)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{H,11}^y + F_{8,11}^y = 0 \quad (3.25)$$

$$\sum M_I = 0 \Rightarrow F_{H,11}^x a_{11} \sin(0 - \theta_{11}) + F_{H,11}^y a_{11} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{11}\right) = 0 \quad (3.26)$$



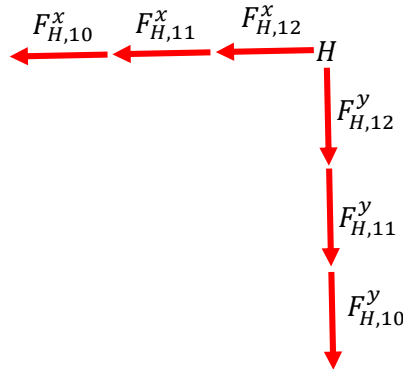
Şekil 3.15 G-H Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.15'te görülen G-H elemanında 2 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve G noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.27), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.28) ve G noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.29) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{8,10}^x + F_{H,10}^x = 0 \quad (3.27)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{8,10}^y + F_{H,10}^y = 0 \quad (3.28)$$

$$\sum M_G = 0 \Rightarrow F_{H,10}^x s_{9,10} \sin(0 - \theta_{10}) + F_{H,10}^y s_{9,10} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{10}\right) = 0 \quad (3.29)$$

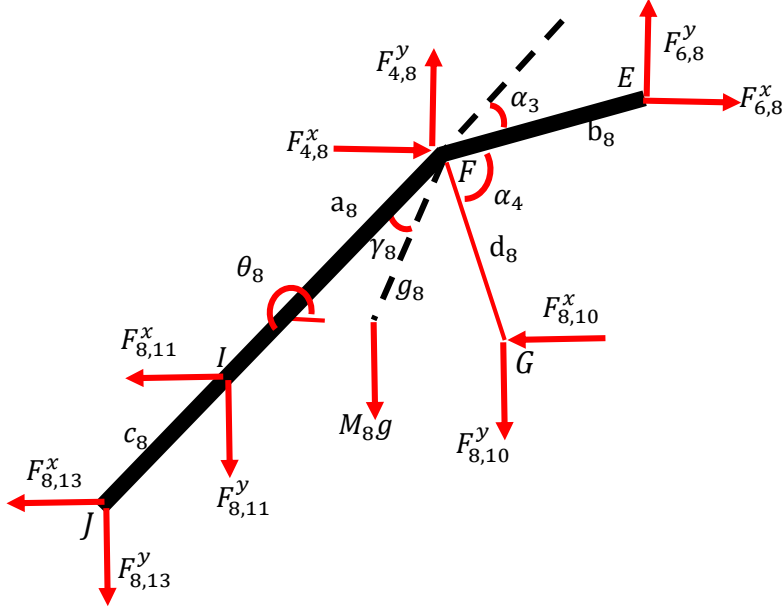


Şekil 3.16 H Noktası Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.16'da görülen H noktasında H noktası üzerine kuvvetler koyulmuş ve sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.30), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.31) olacak şekilde 2 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{H,10}^x + F_{H,11}^x + F_{H,12}^x = 0 \quad (3.30)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{H,10}^y + F_{H,11}^y + F_{H,12}^y = 0 \quad (3.31)$$



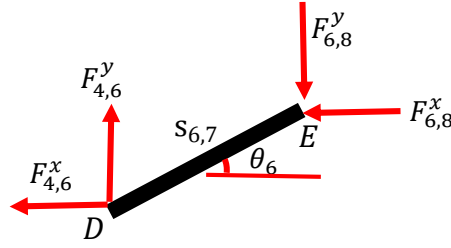
Şekil 3.17 E-J Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.17’de görülen E-J elemanında 6 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve F noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.32), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.33) ve F noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.34) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{6,8}^x + F_{4,8}^x - F_{8,10}^x - F_{8,11}^x - F_{8,13}^x = 0 \quad (3.32)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{6,8}^y + F_{4,8}^y - F_{8,10}^y - F_{8,11}^y - F_{8,13}^y = M_8g \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned}
\sum M_F &= 0 \\
&\Rightarrow F_{6,8}^x b_8 \sin(0 - \theta_8 + \pi + \alpha_3) \\
&+ F_{6,8}^y b_8 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_8 + \pi + \alpha_3\right) + F_{8,10}^x d_8 \sin(\pi - \theta_8 + \pi + \alpha_4) \\
&+ F_{8,10}^y d_8 \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_8 + \pi + \alpha_4\right) + F_{8,11}^x a_8 \sin(\pi - \theta_8) \\
&+ F_{8,11}^y a_8 \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_8\right) + F_{8,13}^x (a_8 + c_8) \sin(\pi - \theta_8) \\
&+ F_{8,13}^y (a_8 + c_8) \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_8\right) + M_8 g g_8 \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_8 - \gamma_8\right) = 0
\end{aligned} \tag{3.34}$$



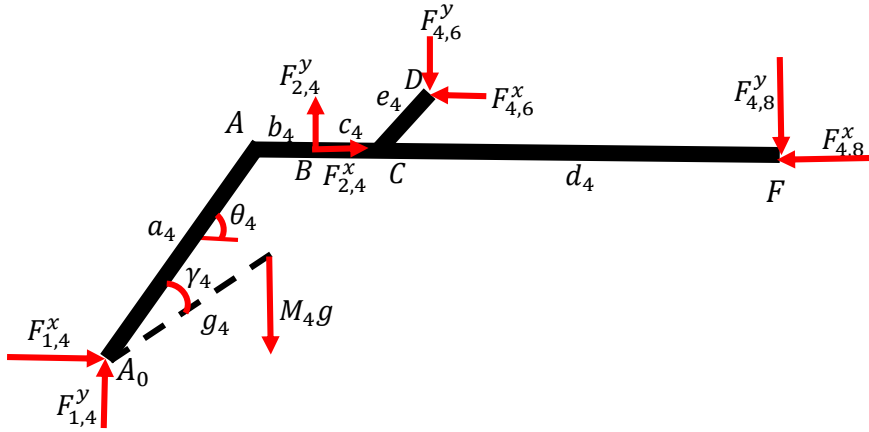
Şekil 3.18 E-D Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.18'de görülen E-D elemanında 2 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve D noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.35), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.36) ve D noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.37) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{4,6}^x + F_{6,8}^x = 0 \tag{3.35}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{4,6}^y + F_{6,8}^y = 0 \tag{3.36}$$

$$\sum M_D = 0 \Rightarrow F_{6,8}^x s_{6,7} \sin(\pi - \theta_6) + F_{6,8}^y s_{6,7} \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_6\right) = 0 \tag{3.37}$$



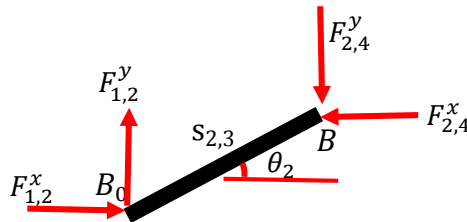
Şekil 3.19 A₀-F Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 3.19'da görülen A₀-F elemanında 5 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve A₀ noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.38), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.39) ve A₀ noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.40) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{1,4}^x + F_{2,4}^x - F_{4,6}^x - F_{4,8}^x = 0 \quad (3.38)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{1,4}^y + F_{2,4}^y - F_{4,6}^y - F_{4,8}^y = M_4g \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \sum M_{A_0} = 0 \Rightarrow & F_{4,8}^x |A_0F| \sin(\pi - \widehat{A_0F}) + F_{4,8}^y |A_0F| \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \widehat{A_0F}\right) \\ & + F_{4,6}^x |A_0D| \sin(\pi - \widehat{A_0D}) + F_{4,6}^y |A_0D| \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \widehat{A_0D}\right) \\ & + F_{2,4}^x |A_0B| \sin(0 - \widehat{A_0B}) + F_{2,4}^y |A_0B| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \widehat{A_0B}\right) \\ & + M_4g g_4 \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_4 - \gamma_4\right) = 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$



Şekil 3.20 B₀-B Elemanı Serbest Cisim Diyagramı

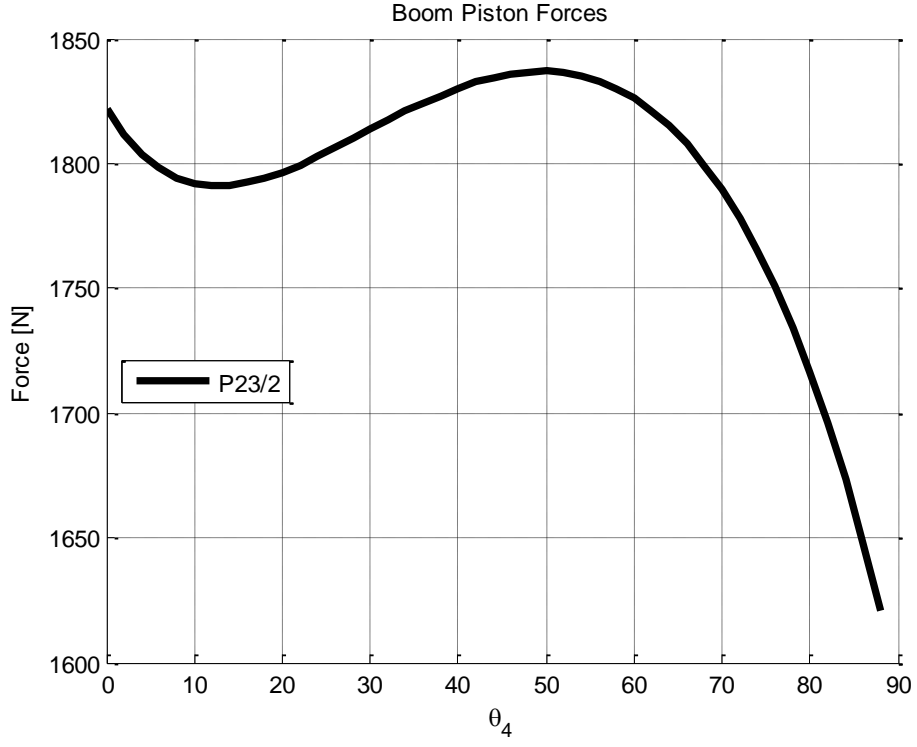
Şekil 3.20’de görülen B₀-B elemanında 2 nokta üzerine kuvvetler koyulmuş ve B₀ noktası üzerinde moment kabul edilmiştir. Sistem dengede kabul edildiğinden x eksenindeki kuvvetler toplamı 0 (3.41), y eksenindeki kuvvet toplamı 0 (3.42) ve B₀ noktası üzerindeki toplam moment 0 (3.43) olacak şekilde 3 adet denklem çıkarılmıştır.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{1,2}^x + F_{2,4}^x = 0 \quad (3.41)$$

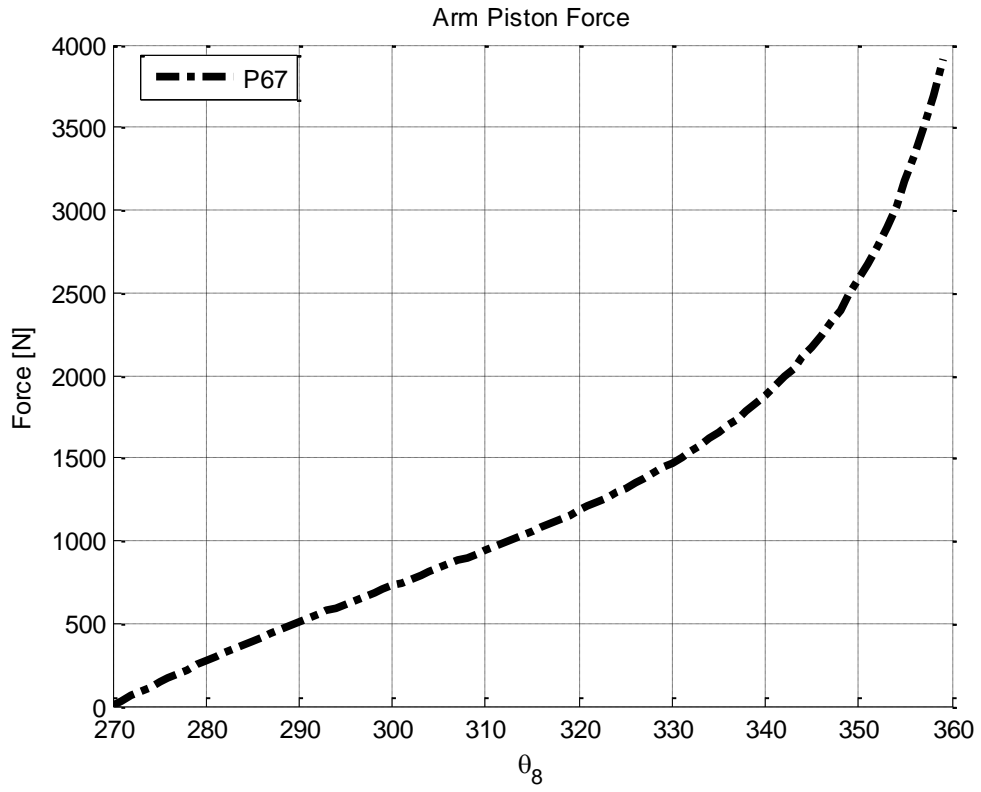
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{1,2}^y + F_{2,4}^y = 0 \quad (3.42)$$

$$\sum M_{B_0} = 0 \Rightarrow F_{2,4}^x s_{2,3} \sin(\pi - \theta_2) + F_{2,4}^y s_{2,3} \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_2\right) = 0 \quad (3.43)$$

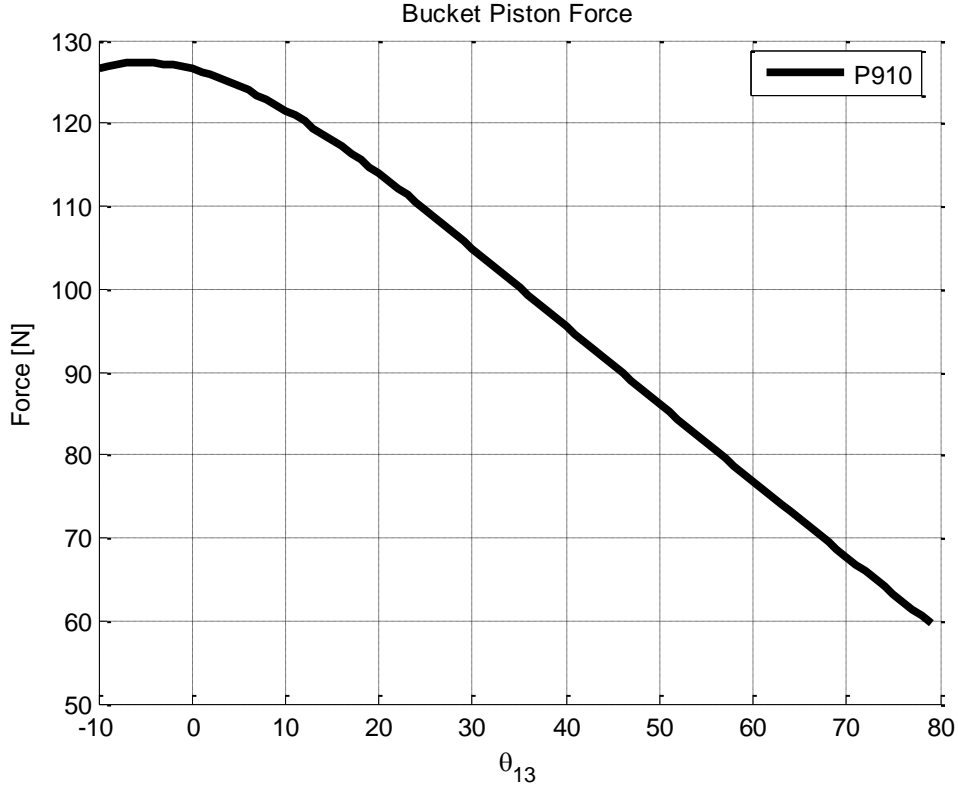
9 adet uzvun denklemleri oluşturulmuş ve toplamda 26 adet denklem ve 26 bilinmeyen elde edilmiştir. Denklemler matris yöntemi kullanılabilmesi için 26x26=676 elemandan oluşan bilinenler matrisi ve 1x26=26 elemandan oluşan bilinmeyenler matrisi oluşturulmuş ve MATLAB yardımı ile çözülerek bum silindir kuvvetleri(Şekil 3.21), kol silindir kuvvetleri(Şekil 3.22) ve kova silindir kuvvetleri(Şekil 3.23) elde edilmiştir. Bumun 0-90 derece arasındaki hareketinde bum silindir yükünün 1840N-1630N aralığında olacağı görülmüştür. Kolun buma göre 270-360 derece arasındaki hareketinde kol silindir yükünün 0N-3900N aralığında olacağı görülmüştür. Kovanın kola göre -10-80 derece arasındaki hareketinde kova silindir yükünün 128N-60N aralığında olacağı görülmüştür.



Şekil 3.21 Bum Hidrolik Silindir Kuvvet Değerleri MATLAB Çıktısı



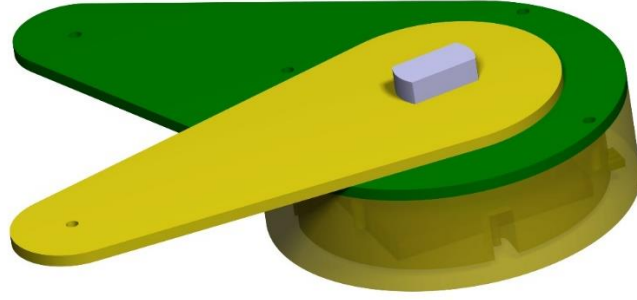
Şekil 3.22 Kol Hidrolik Silindir Kuvvet Değerleri MATLAB Çıktısı



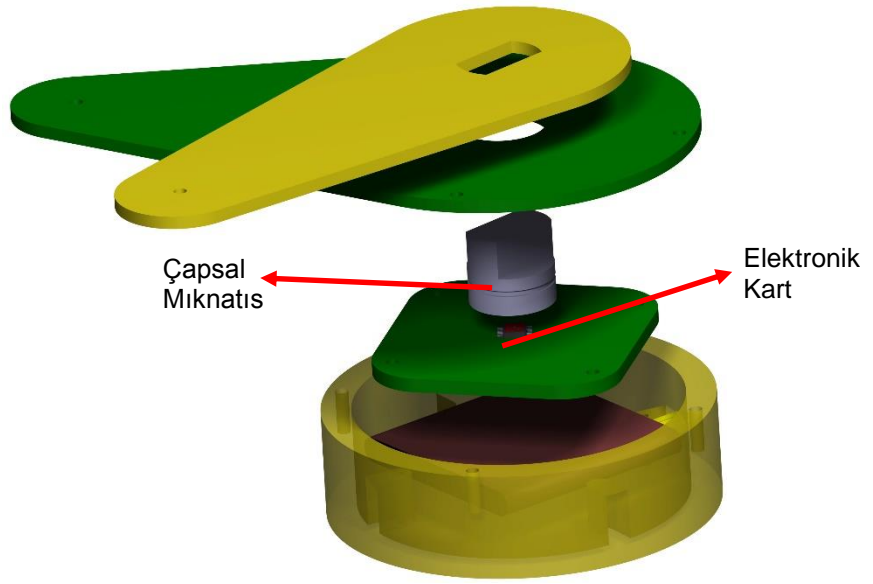
Şekil 3.23 Kova Hidrolik Silindir Kuvvet Değerleri MATLAB Çıktısı

3.3.3 Ekskavatör uzuv göreceli açı algılayıcıları

Bu çalışmada ekskavatör üzerindeki uzuv göreceli açıları algılamak için manyetik rotatif pozisyon sensörü kullanılarak bir açı ölçer sistem geliştirilmiştir(Şekil 3.24). Açı ölçer sistem mekanizması şekil 3.25'te görülmektedir. Sistem tasarımında gerçek ekskavatör sistemi göz önünde bulundurularak direkt olarak uzuv şaftlarına müdahale etmenin gerek montaj aşamasında gerek bakım onarım aşamasında maliyetleri ve süreyi uzatacağı düşünülerek direkt uzuvlar üzerine monte edilebilecek kablosuz haberleşme yapan bir sistem geliştirilmiştir[5]. Sistemin kablosuz haberleşme yapabilmesi sayesinde ekskavatör üzerinde fazladan kablolama yapılmasına gerek yoktur.

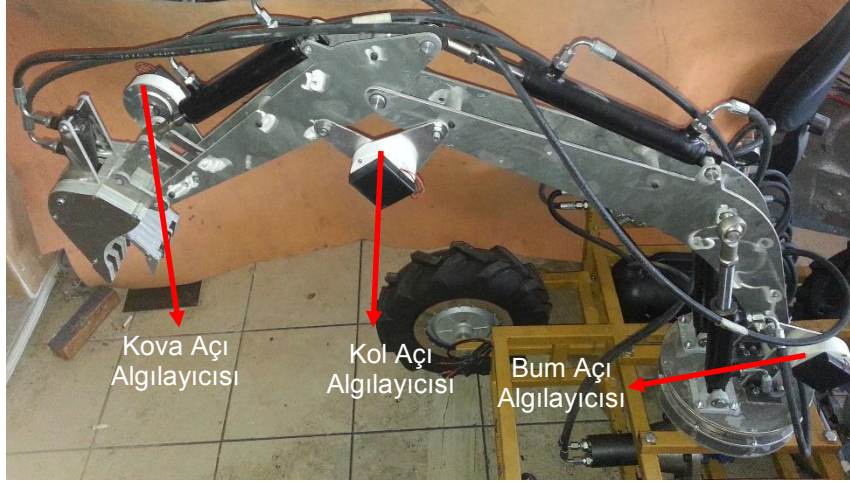


Şekil 3.24 Ekskavatör Uzun Göreceli Aç ı Algılayıcı 3 Boyutlu Ortam Tasarımı



Şekil 3.25 Ekskavatör Uzun Göreceli Aç ı Algılayıcı (Demonte)

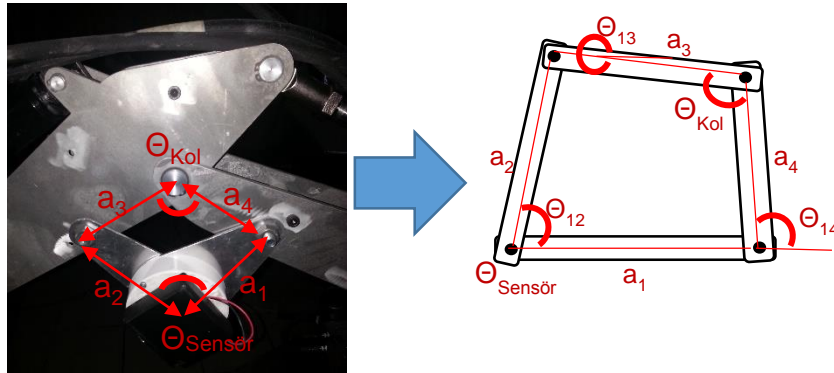
Ekskavatörde algılanması gereken 3 aç ı vardır. Bundan dolayı ekskavatör sisteminde 3 adet algılayıcı kullanılmıştır(Şekil 3.26).



Şekil 3.26 Ekskavatör Açısı Algılayıcı Konumları

Açı algılayıcılar şaftla aynı eksende olmadığından dolayı ilgili uzvun açısını elde edebilmek için pozisyon analizi yöntemi kullanılmıştır.

Çözülecek sistem Şekil 3.27’de görüleceği gibi bir dört çubuk mekanizmasıdır.



Şekil 3.27 Pozisyon Analizi Parametreleri Açıklamaları

$$\theta_{14} - \theta_{13} = \theta_{KOL} \quad (3.44)$$

$$\theta_{SENSÖR} = \theta_{12} \quad (3.45)$$

$$\Rightarrow \theta_{12} \text{ biliniyor.} \quad (3.46)$$

Vektör devre denklemi oluşturulup Euler formülü kullanıldığında denklemler aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$a_2 e^{i\theta_{12}} + a_3 e^{i\theta_{13}} = a_1 + a_4 e^{i\theta_{14}} \quad (3.47)$$

$$a_3 e^{i\theta_{13}} = a_1 + a_4 e^{i\theta_{14}} - a_2 e^{i\theta_{12}} \quad (3.48)$$

$$a_3 \cos \theta_{13} = a_1 - a_2 \cos \theta_{12} + a_4 \cos \theta_{14} \quad (3.49)$$

$$a_3 \sin \theta_{13} = -a_2 \sin \theta_{12} + a_4 \cos \theta_{14} \quad (3.50)$$

$$a_1 - a_2 \cos \theta_{12} = X \quad (3.51)$$

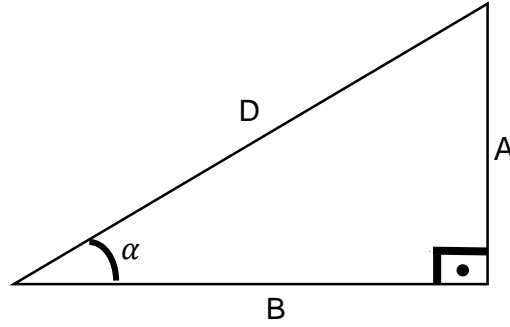
$$-a_2 \cos \theta_{12} = Y \quad (3.52)$$

(3.51) ve (3.52) (3.49) ve (3.50) denklemlerinde yerlerine koyulup, kareleri alınıp taraf tarafa toplandığında elde edilen denklem (3.53) sabitler ve değişkenler ayrıldığında (3.54) gibi olur. Burada kosinüs değerleri, sinüs değerleri ve sabitler ayrı ayrı adlandırılarak (3.55) işlemlere devam edilir.

$$a_3^2 = X^2 + Y^2 + a_4^2 - 2Xa_4 \cos \theta_{14} - 2Ya_4 \sin \theta_{14} \quad (3.53)$$

$$2Xa_4 \cos \theta_{14} + 2Ya_4 \sin \theta_{14} = a_3^2 - X^2 - Y^2 - a_4^2 \quad (3.54)$$

$$2Xa_4 \cos \theta_{14} = A, \quad 2Ya_4 \sin \theta_{14} = B, \quad a_3^2 - X^2 - Y^2 - a_4^2 = C \quad (3.55)$$



Şekil 3.28 Pozisyon Analizi Yönteminde Kullanılan Dik Üçgen

Şekil 3.28'deki gibi bir dik üçgene değerler yerleştirilip dik üçgen eşitlikleri (3.56), (3.57) ve (3.58) oluşturulabilir.

$$D = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (3.56)$$

$$A = D \sin(\alpha) \quad (3.57)$$

$$B = D \cos(\alpha) \quad (3.58)$$

$$\alpha = \text{atan2}(A, B) \quad (3.59)$$

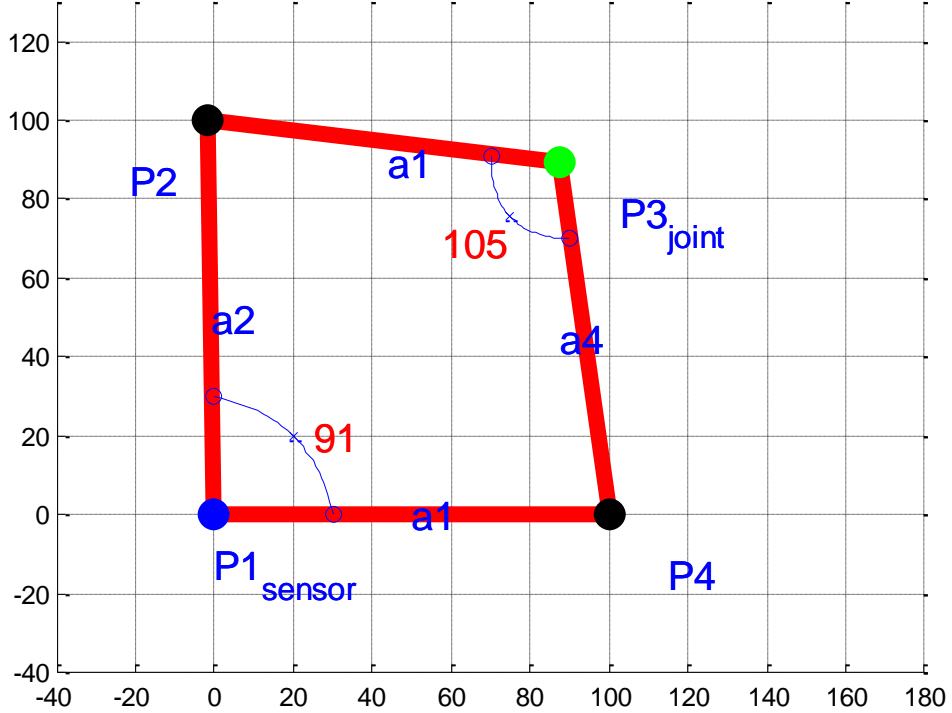
$$C = D(\sin(\alpha) \cos(\theta_{14}) + \cos(\alpha) \sin(\theta_{14})) \quad (3.60)$$

$$\sin(\theta_{14} + \alpha) = \frac{C}{D} \quad (3.61)$$

$$\theta_{14} = \text{asin}\left(\frac{C}{D}\right) - \alpha \quad (3.62)$$

$$\theta_{13} = \text{atan2}[(Y + a_4 \sin \theta_{14}), (X + a_4 \cos \theta_{14})] \quad (3.63)$$

Denklemler çözüldüğünde sensörden gelen açı değerinden, $\theta_{\text{SENSÖR}}$, UZUV AÇISI, θ_{KOL} elde edilmektedir. Denklemlerin doğruluğu MATLAB programı kullanılarak sağlanmıştır(Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Dört Çubuk Mekanizmasının MATLAB Programı Kullanılarak Çözümü

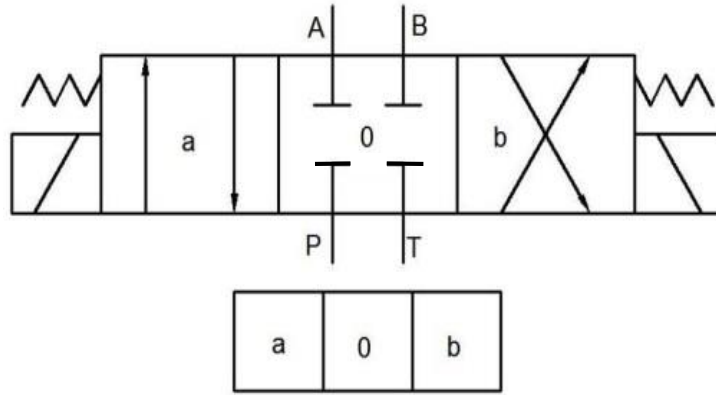
3.3.4 Hidrolik elemanlar

Gerçek ekskavatör sistemindekine benzer bir şekilde mini ekskavatörde de hidrolik silindirlerin manipülasyonu sonucu hareket gerçekleşmektedir. Hidrolik silindirlerdeki yükü karşılayacak bir kuvvet yaratmak için sistemde bir adet DC motorun sürdüğü bir dişli pompa bulunmaktadır(Şekil 3.30). Pompa, basınçlandırdığı hidrolik yağı valf bloğuna iletmektedir.



Şekil 3.30 Doğru Akım Motoru ve Hidrolik Pompa

Valfler ihtiyaca göre 2 farklı şekilde seçilmiştir. Hidrolik silindirin uzayıp kısılmasına ve hidrolik motorun hangi yönde döneceğine karar veren valflerde 4/3 kapalı merkez yönlendirme valfleri kullanılmıştır. Bu valflerin A,B,P ve T olmak üzere 4 giriş çıkışı vardır. Burada P pompayı T tankı temsil etmektedir. A ve B ise 2 farklı yönü temsil etmektedir(Şekil 3.31).



Şekil 3.31 4/3 Kapalı Merkez Hidrolik Valf Şematik Gösterimi

Valfler aldığı komutlarla a,0 ve b olmak üzere 3 farklı konum cevabı verir. Bu konumlar

- a: pompadan A'ya B'den tanka
- 0: bütün giriş çıkışlar kapalı
- b: pompadan B'ye A'dan tanka

şeklinde dir. Ekskavatör sistemi hareket halinde değilken bırakılan konumda kalması için hidrolik silindirlerin sahip oldukları hidrolik yağ miktarını korumaları

gerekmektedir. Bundan dolayı Bu valfler kapalı merkez seçilmiştir. Ancak bu durumda sistem hareketsiz iken pompa çok fazla basınçlanacağından pompayı durdurmak gerekir. Hareket başladığında ise tekrar basınçlandırıp valfleri açmak gerekir. Bu zaman kaybı yaratacağı için diğer bir kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde bir adet 4/2 açık merkez yönlendirme valfi kullanılır. Bu valfin de A,B,P ve T olmak üzere 4 giriş çıkışı vardır. Fakat a ve 0 olmak üzere 2 konumu vardır. Konumlar

- a: pompadan A'ya B'den tanka
- 0: pompadan tanka

olarak sıralanabilir. Bu sayede sistem hareket halindeyken a konumu seçilerek diğer yön valfleri beslenir. Ancak sistem hareketsizken pompayı durdurmak yerine bu valf 0 konumuna getirilir ve pompa hidrolik yağı tanka döndürür. Bu sayede pompa basınçlı kalır ve her hangi bir komuta zaman kaybı olmadan yanıt verir.

Valf bloğu valflerin bütün giriş çıkışlarının bağlı olduğu kanalları içeren bir bloktur. Her valfe pompa ve tank hattı bağlamak yerine doğrudan valf bloğuna bağlamak yeterlidir. 4/2 yönlendirme valfi ilk valftir. Ardından bum, kol, kova ve dönüş valfleri gelir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 Valf Bloğu

Hidrolik silindirlerin karşılaşıcağı yük kuvvet analizi ile hesaplanmış ve silindir boyutları, pompa debisi vb. parametreler aşağıdaki denklemler çözülerek elde edilmiştir.

$$Q = V_{iletim}n \quad (3.64)$$

$$V_{itme} = L_{silindir}\pi r_{silindir}^2 \quad (3.65)$$

$$V_{çekme} = L_{silindir}\pi(r_{silindir}^2 - r_{mil}^2) \quad (3.66)$$

$$v_{itme} = 60 \frac{V_{itme}}{Q} \quad (3.67)$$

$$v_{çekme} = 60 \frac{V_{çekme}}{Q} \quad (3.68)$$

$$\mathbb{P} = \frac{PQ}{540} \quad (3.69)$$

$$F_{çekme} = PA_{çekme} = P[\pi(r_{silindir}^2 - r_{mil}^2)] \quad (3.70)$$

$$F_{itme} = PA_{itme} = P[\pi r_{silindir}^2] \quad (3.71)$$

Burada

Q: debi $\left(\frac{\text{lt}}{\text{dk}}\right)$

V_{iletim} : iletim hacmi $\left(\frac{\text{lt}}{\text{dev}}\right)$

n: devir $\left(\frac{\text{dev}}{\text{dk}}\right)$

V_{itme} : Silindir itme hacmi (lt)

$V_{çekme}$: Silindir çekme hacmi (lt)

$L_{silindir}$: Strok (mm)

$r_{silindir}$: silindir yarı çapı(mm)

r_{mil} : mil yarı çapı(mm)

P: basınç(bar)

\mathbb{P} : güç (kW)

F_{itme} : silindir itme kuvveti (N)

$F_{çekme}$: silindir çekme kuvveti (N)

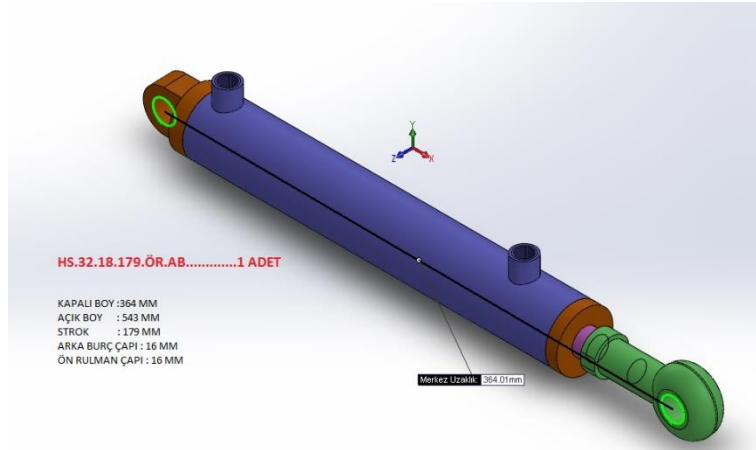
olarak kullanılmıştır.

Hidrolik motor devir değeri ekskavatörün kendi eksenini etrafındaki dönme hareketi (swing) için fazla olduğundan hem kuvveti arttırmak hem de devir değerini aşağı çekmek için hidrolik motora redüktör bağlanarak dönüş hareketi elde edilmiştir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33 Hidrolik Motor ve Redüktör

Kuvvet analizi, pozisyon analizi ve hidrolik hesaplamaların ardından hidrolik silindir ölçüleri belirlenmiş ve üretilmiştir (Şekil 3.34).



Şekil 3.34 Hidrolik Silindir Örneği

4. KOPYA KOL KUMANDA SİSTEMİNDE KUVVET GERİ BESLEMESİ

4.1 Giriş

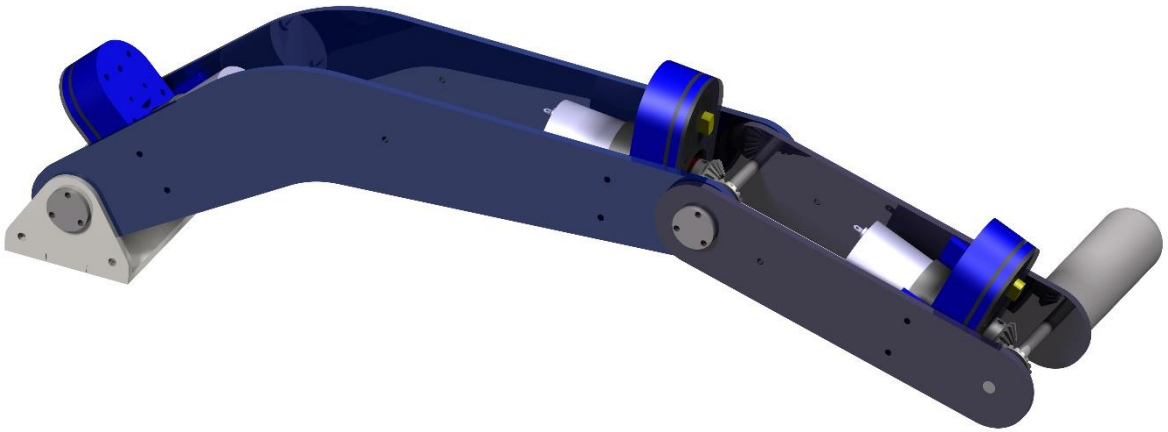
Kuvvet geri beslemesi algılayıcı ve kontrol sistemlerinin gelişmesiyle birlikte tıp, sanayi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İnsan makine etkileşimli sistemlere kuvvet geri beslemesi eklenmesi normalde var olan görsel kontrole ek operatörün daha fazla duyusunu kullanmasına ve bununla beraber daha hassas operasyonlar gerçekleştirmesine olanak sağlar. Bu sistemdeki gibi temas hissine dayalı kontrol sistemlerinin günümüzde var olan normal sistemlere göre avantajları

- Operatörü tehlike yaratabilecek engellere karşı uyarması
- Kazalar sonucu doğacak bakım onarım maliyetlerinin engellenmesi
- Kazalar sonucu doğacak ölüm veya yaralanmaların önüne geçilmesi
- Operatörün çalışma bölgesini daha rahat kavrayabilmesi
 - örneğin doğal gaz boru hattı kazısında boruya teması hissetmesi.

olarak sıralanabilir.

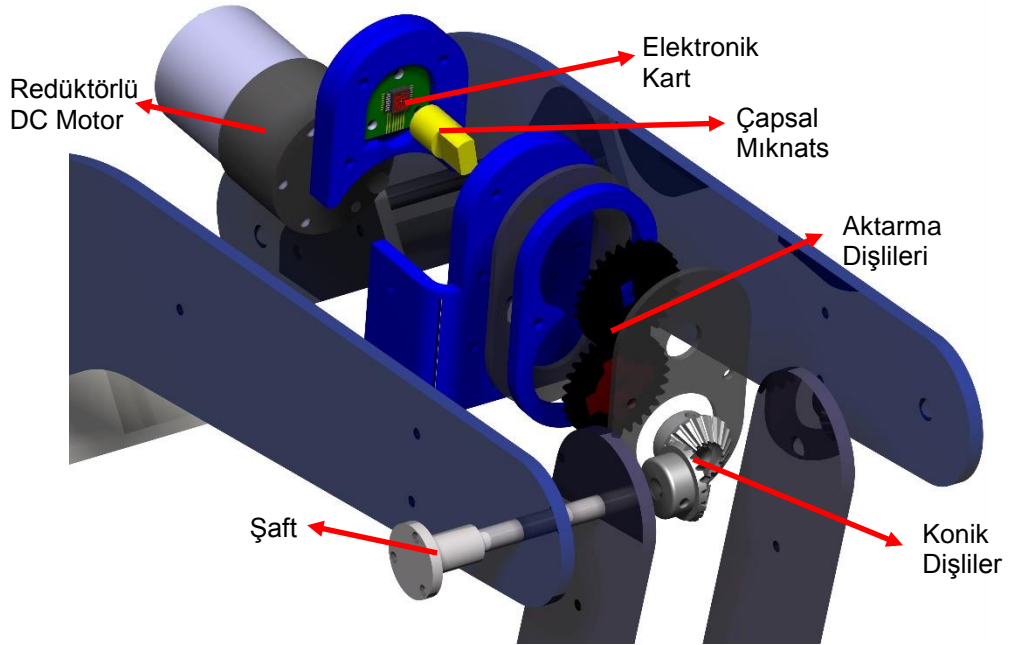
4.2 Kuvvet Geri Beslemesi Eklenmiş Kopya Kol

Kopya kol kumanda sisteminde kuvvet geri beslemesi yapılabilmesi için kopya kol tasarımı değiştirilmiştir(Şekil 4.1).



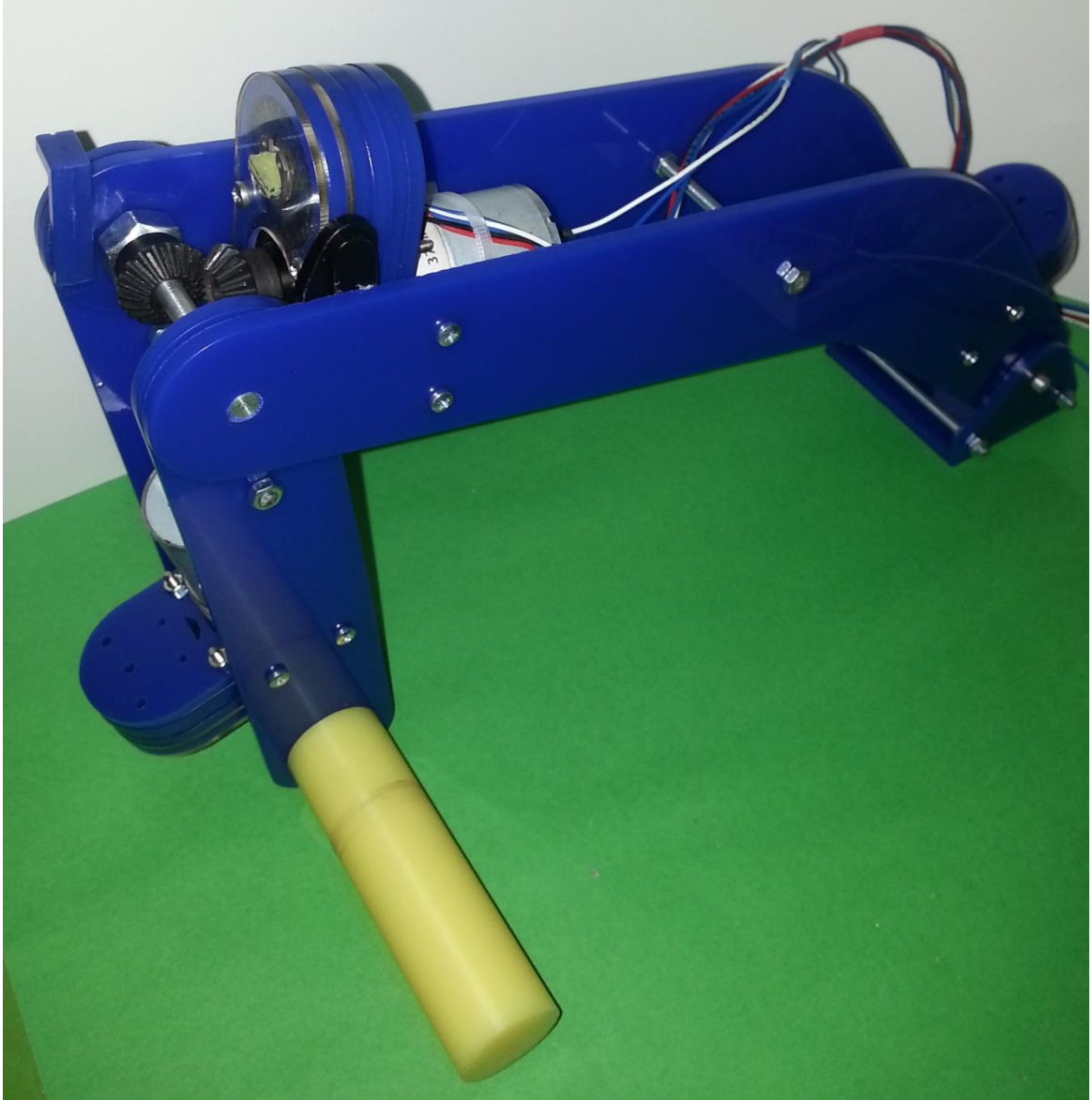
Şekil 4.1 Kuvvet Geri Beslemeli Kopya Kol Bilgisayar Ortamında 3 Boyutlu Tasarımı

Kuvvet geri beslemesi olabilmesi için kuvvet yaratabilecek bir eleman gerekmektedir. Bu sistemde beslenecek kuvvet, redüktörlü doğru akım motorlarıyla sağlanmasına karar verilmiş ve her ekleme bir adet motor eklenmiştir. Motorlar doğrudan şaft eksenine monte edilmemiştir. Bunun sebebi motorların şaft eksenine monte edildiğinde yaratacakları dengesizliktir. Motorların şaft eksenine yerine şaft eksenine dik bir eksene yerleştirilmelerinden dolayı motorun hareketini şafta aktarabilmek için her sistemde 2 adet birbiriyle aynı özelliklere sahip konik dişli kullanılmıştır. Dişliler birbirlerinin aynısı olduğu için herhangi bir hareket sonrası dairesel hareket miktarları aynı olacaktır. Bundan dolayı uzuv şaftı ve motor redüktör çıkış milinin pozisyonlarını ayrı ayrı ölçmeye gerek yoktur. Açık algılayıcı sensör sistemi motor eksenine paralel bir eksene oturtulmuştur. Motor redüktör çıkış milindeki hareket, açı algılayıcı sistemin çapsal mıknatısının bağlı olduğu mile birbirleriyle aynı özelliklere sahip 2 adet düz dişli vasıtasıyla aktarılmaktadır. Böylece uzuv şaftı ve açı algılayıcı sistemin çıkış mili aynı yönde, motorun redüktör çıkış mili ise ters yönde hareket etmektedir. Kuvvet Geri Beslemeli Kopya Kol eklemine ait sistem Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2 Kuvvet Geri Beslemeli Kopya Kol Eklemi

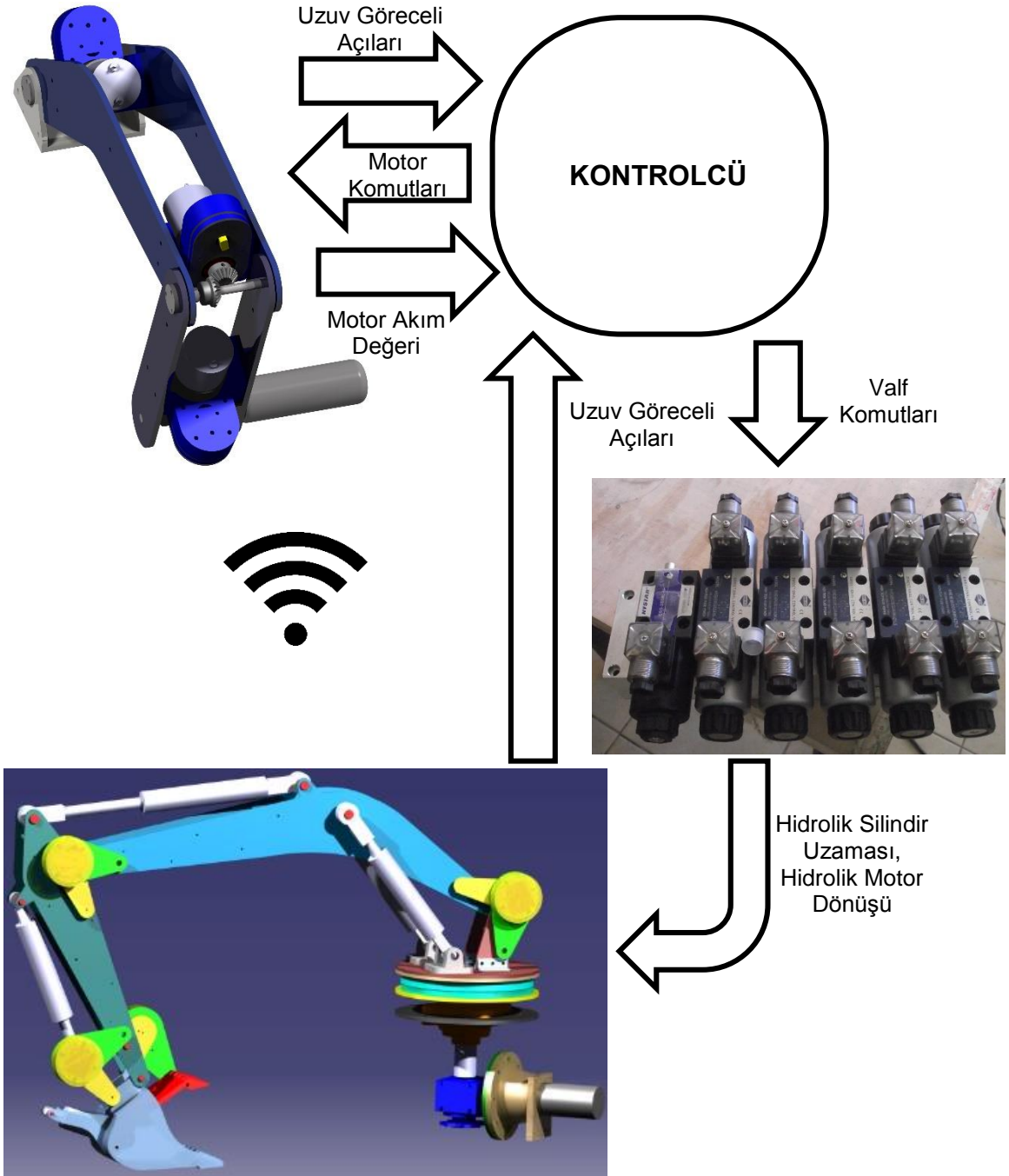
Çalışma kapsamında üretilen kuvvet geri beslemeli kopya kol şekil 4.3'te görülmektedir.



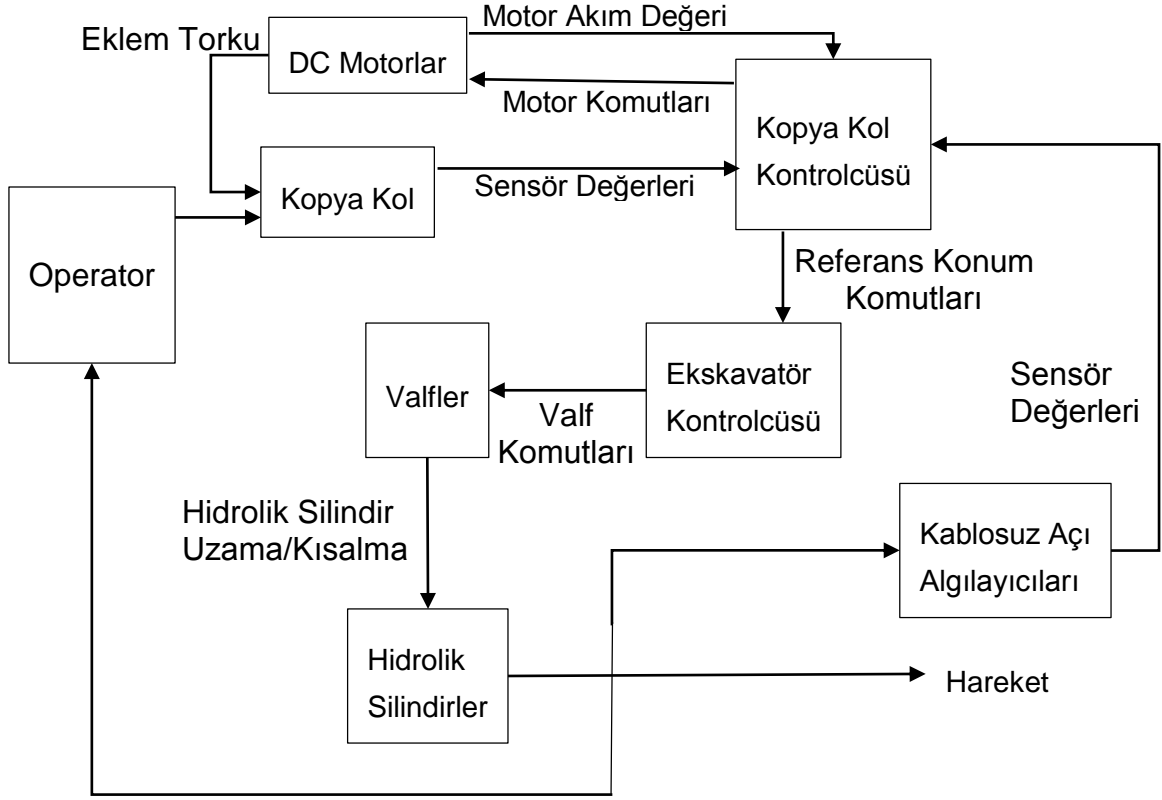
Şekil 4.3 Çalışma Kapsamında Üretilen Kuvvet Geri Beslemeli Kopya Kol

4.3 Kontrolcü Sistemi

Ekskavatör sistemi, kontrolcünün kopya koldan gelen açı bilgileri ve ekskavatör üzerinden gelen açı bilgilerini kıyaslamasının ardından ürettiği valf komutları sonucunda hidrolik silindirlere manipülasyonu ile hareket etmektedir. Sisteme kuvvet geri beslemesi eklendiği durumdaki kontrolcü sistem çalışma prensibi Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4 Kopya Kol Kumanda Sisteminde Kuvvet Geri Beslemesi Çalışma Prensipleri

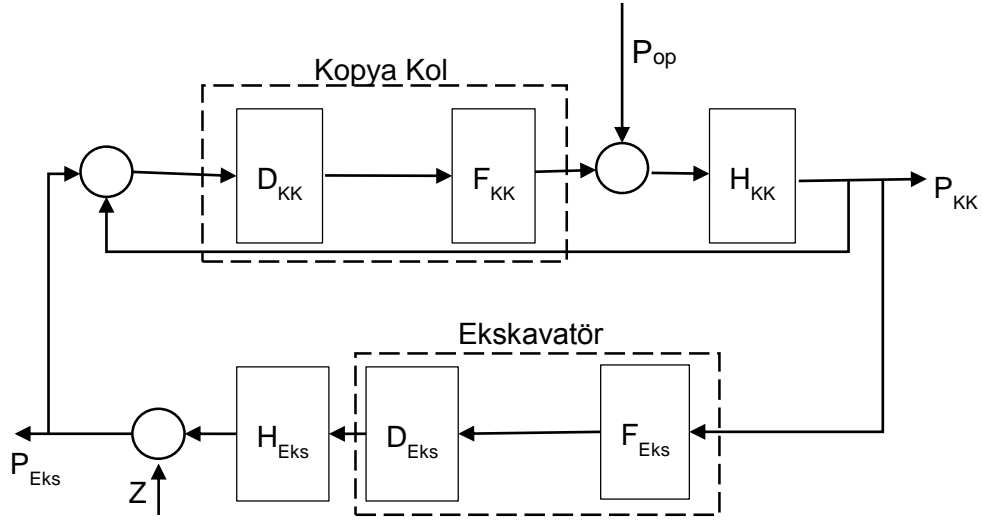


Şekil 4.5 Kopya Kol Kumanda Sisteminde Kuvvet Geri Beslemesi Blok Diyagramı

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi ekskavatör kopya kol kontrol sistemi kontrolcüsü kuvvet geri beslemesi yaratabilmek için geliştirilmiştir.

Operatör gerçekleştirmek istediği hareketi(P_{op}) kopya kol yardımıyla sağlamaktadır. Kopya kol hareketi ile eklemlerindeki açı algılayıcıların çıktılarını toplayan kopya kol denetleyicisi çıktıları yorumlayarak açı bilgisine çevirmektedir. Bu sayede kopya kolun pozisyonu(P_{KK}) denetleyici(D_{KK}) tarafından algılanmış olur. Denetleyici, ekskavatörün referans pozisyonu ve ekskavatörün anlık pozisyonu(P_{Eks}) arasında gerekli kıyaslamaların ardından ekskavatör kontrolcüsüne silindir komutlarını gönderir. Ekskavatör kontrolcüsü(D_{Eks}) silindir hareketlerini sağlayabilmek için ilgili valf komutlarını üretir ve valflere aç, kapa veya dur komutlarından birini gönderir. Silindirlerin uyguladığı kuvvet(F_{Eks}) ile ekskavatör anlık pozisyonuna gelir. Bu hareket esnasında ekskavatör uzuvlarına bağlı olan açı algılayıcıları, uzuv göreceli açılarını kopya kol denetleyicisine gönderir. Eğer ekskavatörün karşılaştığı zorlanma, silindirlerin uyguladığı kuvvet ile normalde gerçekleşecek yer değiştirme yerine daha az miktarda bir yer değiştirme gerçekleşmesine sebep olmuş ise kopya kol denetleyicisi ilgili uzuvdaki DC motora karşılaşılan kuvvetin büyüklüğü ile orantılı

ve yönüyle aynı yönde bir kuvvet yaratarak operatörün karşılaştığı zorlanmanın farkına varmasını sağlamaktadır. Motordaki yük darbe genişlik modülasyonu¹ ile yaratılmakta ve operatörü zorlama miktarı motorun akımı ölçülerek belirlenmektedir. Böylece haptik bir efendi/köle kontrolü gerçekleştirilmektedir(Şekil 4.6).

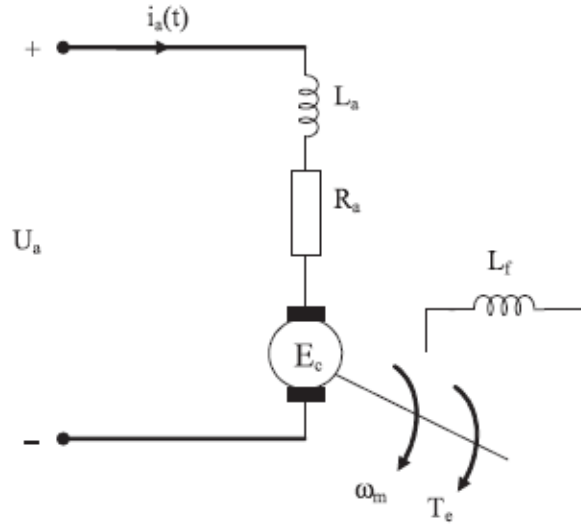


Şekil 4.6 Haptik Efendi/Köle Kontrol Diyagramı

Bu sistemde kuvvet geri beslemesi üretirken ekskavatörün karşılaştığı kuvvet oransal bir şekilde kopya kola yansıtılmaktadır. Kopya kolda kuvvet uzuv eklemlerine bağlanan DC motorların yarattığı torkla sağlanmaktadır.

Şekil 4.7'deki gibi DC motor modeli oluşturulup gerekli denklemler çıkartıldığında motor torku, motor gerilimi ve akım arasındaki ilişki oluşturulur[13].

¹İng. Pulse Width Modulation (PWM)



Şekil 4.7 DC Motor Modeli [13]

$$E_c + R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} = U_a \quad (4.1)$$

Burada

- L_a : motor indüktansı
- R_a : motor direnci
- i_a : motor akımı
- U_a : motor üzerindeki gerilim
- E_c : zıt elektromotor kuvveti

olarak sıralanabilir.

DC motorun elektriksel değişkeni akım, mekanik değişkeni ise hızdır. Zıt elektromotor kuvveti hızla orantılıdır(4.2). Elektromekanik tork motor akımıyla orantılıdır(4.3).

$$E_c = K_b \omega_m \quad (4.2)$$

$$T_e = K_b i_a \quad (4.3)$$

Burada

- T_e : elektromekanik tork
- ω_m : motor hızı

olarak sıralanabilir.

$$K_b \omega_m + R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} = U_a \quad (4.4)$$

DC motor hızı ω_m çok düşük olduğundan sıfır kabul edildiğinde ve motor üzerindeki gerilim U_a PWM ile yaratıldığından eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır(4.5).

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} = PWM \quad (4.5)$$

Böylece PWM değeri ve motor akımı arasındaki ilişki oluşturulmuştur.

DC motor akımı Allegro Microsystems firmasının ürettiği ACS712 entegresi ölçülmüştür(Şekil 4.8).



Şekil 4.8 ACS712 Entegresi

Bu modül -5 amper +5 amper akım değerine kadar girdi alabilir. Buna karşılık 5 volt analog olarak çıktı verir. 0 amper değerine karşılık 2.5 volt çıkış verir. Bu da 0-5 ampere aralığındaki çözünürlüğün 2.5 volt olduğunu göstermektedir. Akım değişimine karşı doğrusal çıktı vermektedir. Alınan analog değer mikroişlemci yardımıyla yorumlanması ile akım değeri elde edilmektedir. Bu sayede motorun referans akım değeri ve anlık akım değeri arasındaki fark ölçülebilmektedir. Bu ölçülen değer hata olarak kabul edilmiştir.

DC motorların referans akım ve anlık akım değerleri arasında oluşan hatayı gidermek için bir denetleyici kullanılması gerekmektedir. Denetleyici tipleri oransal denetleyici(P), türevsel denetleyici(D) ve integral denetleyici(I) olmak üzere 3 tiptir.

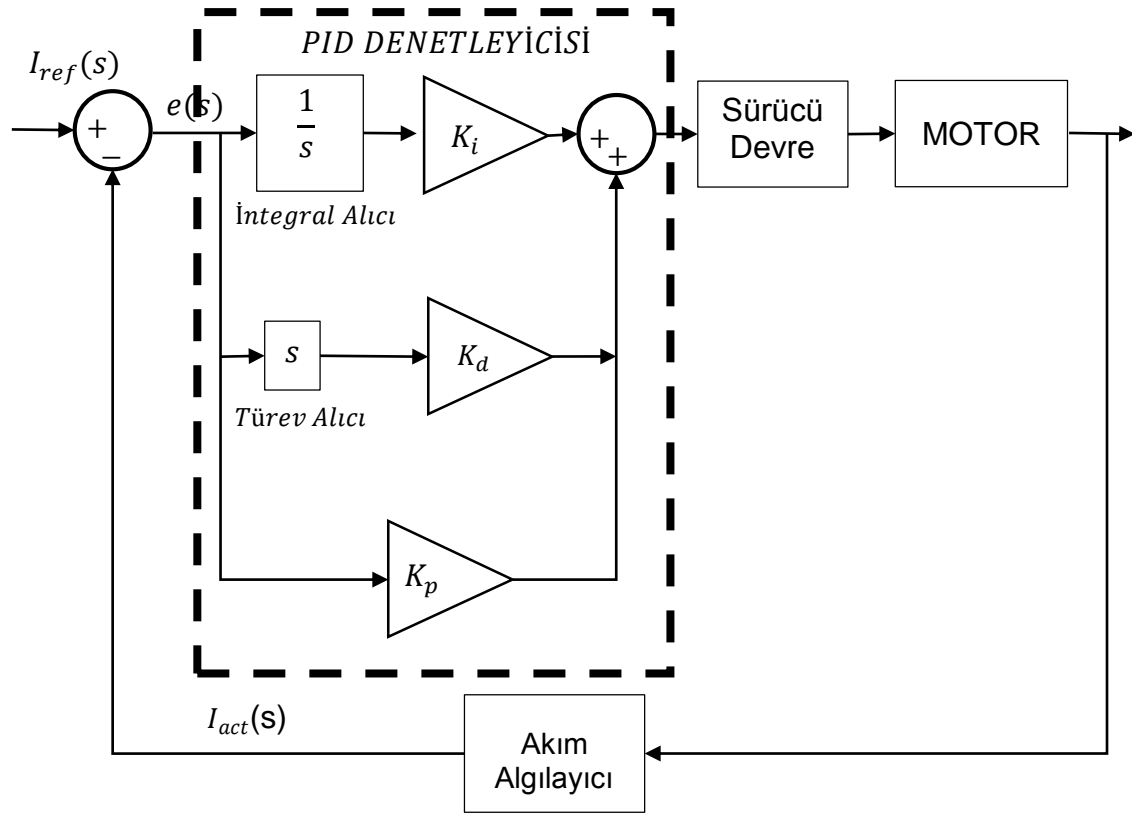
Kullanım amaçlarını

- oransal denetleyici : hataya oranla manipülasyonu düzenlemek
- integral denetleyici : kalıcı durum hatasını yok etmek

- türevsel denetleyici : sönümlenmeyi düzenlemek

olarak sıralayabiliriz. P denetleyici tek başına kullanılabilir. Yetersiz olduğu sistemlerde ihtiyaca göre PI veya PD olarak kullanılabilir. Denetleyicinin hala yetersiz geldiği durumlarda ise PID denetleyici kullanılır. Bu çalışmada ilk önce P denetleyici kullanılmıştır. Ancak sistem salınım yapmaya başlamıştır. Salınımı sönümlenmek amacıyla D denetleyici eklenerek PD denetleyici kullanılmıştır. Ancak sistem cevap süresi uzun bulunarak I denetleyici eklenerek PID denetleyici kullanılmasına karar verilmiştir.

Motora beslenen PWM değeri sayesinde oluşan motor akım değeri akım algılayıcı ile ölçülür ve referans akım değerinden çıkartılarak oluşturulan hata PID denetleyicisine beslenir. PID denetleyici bu hata değeri ile yeni bir PWM değeri üretir ve hata yok olana kadar bu döngü devam eder. PID denetleyici blok diyagramı şekil 4.9'da gösterilmiştir.



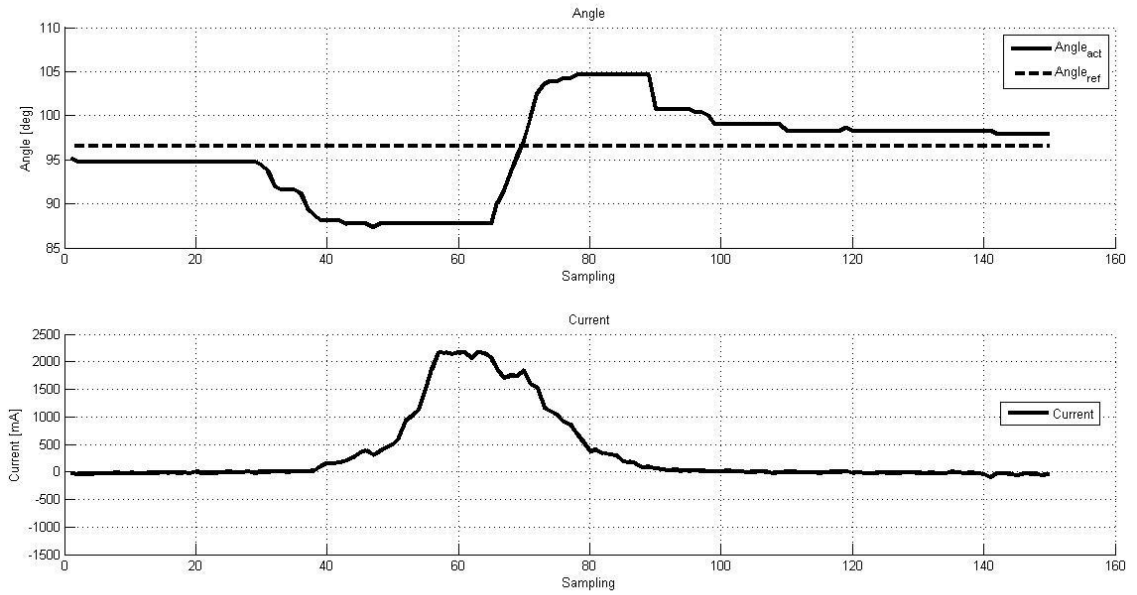
Şekil 4.9 PID Denetleyici Blok Diyagramı

PID kontrolcü ve PWM değeri arasındaki matematiksel ilişki aşağıdaki gibidir (4.5) numaralı denklemdeki gibidir[15].

$$PWM(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

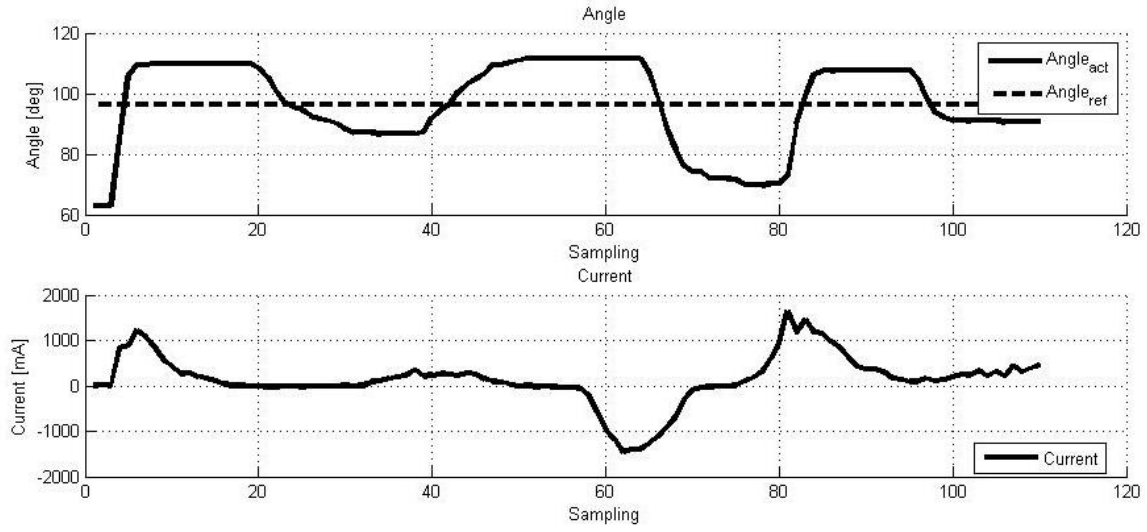
Burada K_i integral denetleyici katsayısı, K_p oransal denetleyici katsayısı, K_d türevsel denetleyici katsayısı, e hata ve PWM de yeni PWM değeridir. İntegral denetleyici tümlevsel bir denetleyici olduğu için kontrol altında tutulmalıdır. Bundan dolayı integral alıcının çıktı değeri belirlenen maksimum ve minimum değerler arasında tutulmaktadır.

Sistemde PID parametreleri ayarlandıktan sonra örneklemeler alınmıştır. Ekskavatör konumu ve kopya kol konumu arasındaki fark başlangıçta tolerans dahilindeyken denetleyicinin motorlar vasıtasıyla yarattığı akım değişmemektedir. Ancak kopya kol pozisyonu ekskavatör pozisyonundan uzaklaştırıldığında denetleyici kopya kol üzerindeki motorlar vasıtasıyla operatöre yapması gereken hareket hakkında yardımcı olmaktadır. Bundan dolayı motorun akım değeri başlangıçta sıfır değerinde sabit kalmış, daha sonra pozisyon bozulduğunda operatör gerekli hareketi yapmaya kadar akım negatif kuvvet uygulamak amacıyla artmaya devam etmiştir. Kopya koldan alınan çıktıların MATLAB programına beslenmesi sonucu elde edilen grafik Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10 PID Denetleyici Uygulanan Sistem Cevabı

Operatörün kopya kol konumunu ekskavatör konumundan farklılaştırması sonucu oluşan çıktılar Şekil 4.11’de görülmektedir.



Şekil 4.11 PID Denetleyici Uygulanan Sistem Cevabı

4.3.1 Kopya kol kontrolcü elektronik devre kartı

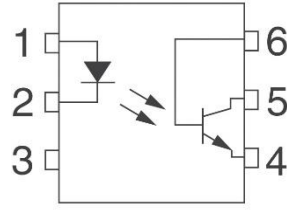
Kopya kol kontrolcüsü, kopya kol uzuv göreceli açılarını, kopya kol uzuv motorlarının akımlarını ve ekskavatörün uzuv göreceli açılarını toplayarak kopya kol uzuv motorlarındaki yük miktarı ve ekskavatör silindir komutlarını üretir.

Kontrolcü elektronik kartında işlemci olarak Microchip firmasının ürettiği pic16F887 serisi mikroişlemciler kullanılmıştır. Pic16F887 2 adet PWM kanalına sahiptir. Ancak kopya kol üzerinde kuvvet geri beslemesi yapılması gereken 3 eklem bulunmaktadır. Eklemlerde oluşacak kuvvetler farklı olacağından her eklemden bulunan motorun kendine özgü PWM değeri alması gerekmektedir.

Bundan dolayı boşta kalan eklemi karşılaması için bir mikroişlemci daha kullanılarak kopya kol kontrolcüsünde 2 adet mikroişlemci kullanılmıştır.

Bu sistemde mikroişlemci çalışma gerilimi ve akımı motorlar için yeterli olmadığından dolayı motorları sürmek için Sparkfun firmasının ürettiği L298 entegresi kullanılmıştır. L298 2 kanallı ve istenirse tek tek 2 kanal kullanarak 2 amper akıma kadar 2 ayrı çıkış ya da 2 kanallı paralel kullanarak 4 amper akıma kadar tek bir çıkış elde edilebilir. Bu sistemde her motor için 1 kanal olmak üzere toplam 2 L298 entegresi kullanılmıştır. Motorların çektiği akımın mikroişlemci üzerinde dalgalanma yaratmaması için elektronik devre yüksek akım ve düşük akım

olmak üzere 2 bölüme ayrılmıştır. Düşük akım bölümü mikroişlemci tarafı(Şekil 4.14) yüksek akım bölümü de motor sürme tarafıdır(Şekil 4.15). Bu 2 bölüm birbirlerinden TOSHIBA firmasının ürettiği TLP optikbağlayıcılar(Optocoupler) kullanılarak ayrılmıştır. Optikbağlayıcılar birbirlerinden fiziksel olarak ayrı 2 bölüme sahiptir. Bir bölüm aldığı girdiyle içinde bulunan LED'i yakar ve diğer bölüm üzerindeki fototransistor ile LED'in parlaklığına göre analog çıktı verir. Bu sayede ayırdıkları 2 bölümün birbirlerinden izole bir şekilde çalışmasına olanak tanır(Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Optikbağlayıcı Şematik Gösterimi

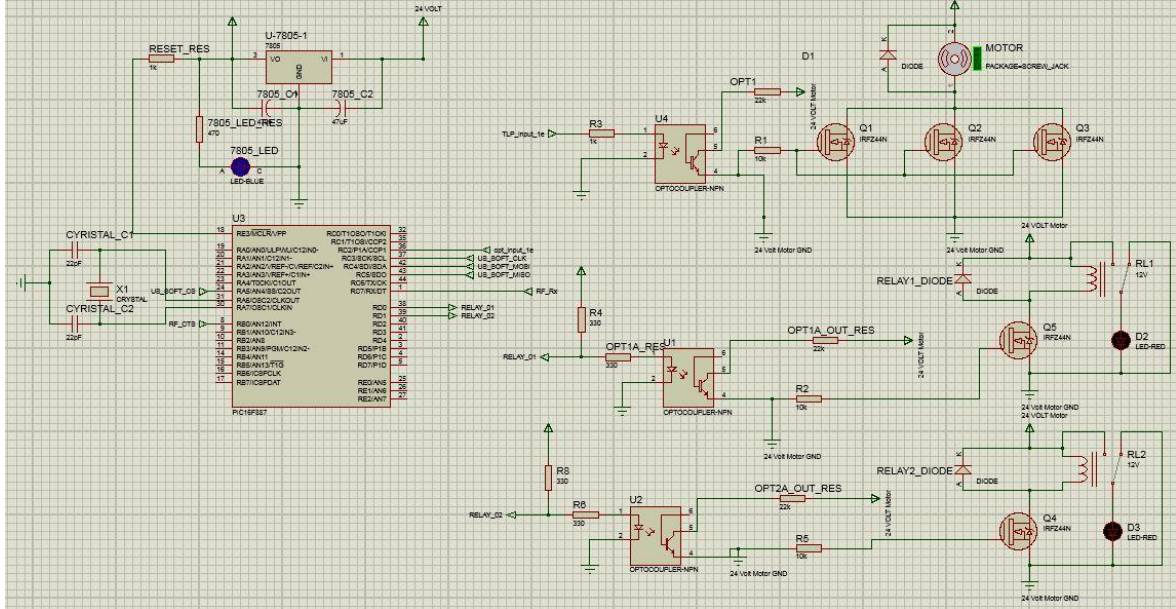
Kopya kol kontrolcüsünün ekskavatör kontrolcüsü ve ekskavatör üzerindeki açı algılayıcılar ile olan haberleşmesi kablosuzdur. Bunun için NORDIC SEMICONDUCTOR firmasının ürettiği NRF24L01 entegresi kullanan bir modül kullanılmıştır(Şekil 4.13). Modül 2.4GHz'de çalışmaktadır ve mikroişlemci ile SPI¹ arayüzü ile konuşmaktadır.



Şekil 4.13 NRF24L01 Kullanan Kablosuz Haberleşme Modülü

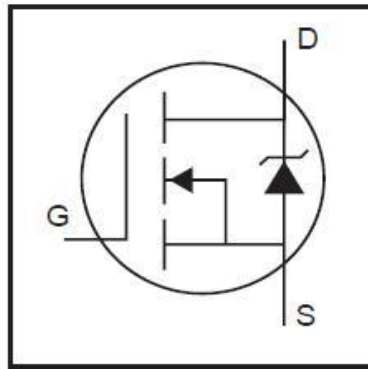
¹İng. Serial Peripheral Interface

ve motorun yüksek akım bölümü için gerekli entegrelerden oluşmaktadır. Bu iki bölüm birbirlerinden Vishay firmasının ürettiği 4N25 optikbağlayıcılar ile ayrılmıştır(Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Ekskavatör Kontrolcü Elektronik Devre Kartı Tasarım Örneği

Valflerin konumu valf üzerinde bulunan selenoidler(sarmal bobin) ile ayarlanmaktadır. Şekil 4.16'da görülen devre şemasında valf selenoidleri RL1 ve RL2 olmak üzere röleler ile gösterilmiştir. Selenoidleri kontrol etmek için International Rectifier firmasının ürettiği IRFZ44N HEXFET Power MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)(Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör)'ler kullanılmıştır(Şekil 4.17). Bu transistörler yüksek gerilim ve akım altında çalışabilmektedirler(55V 49A).

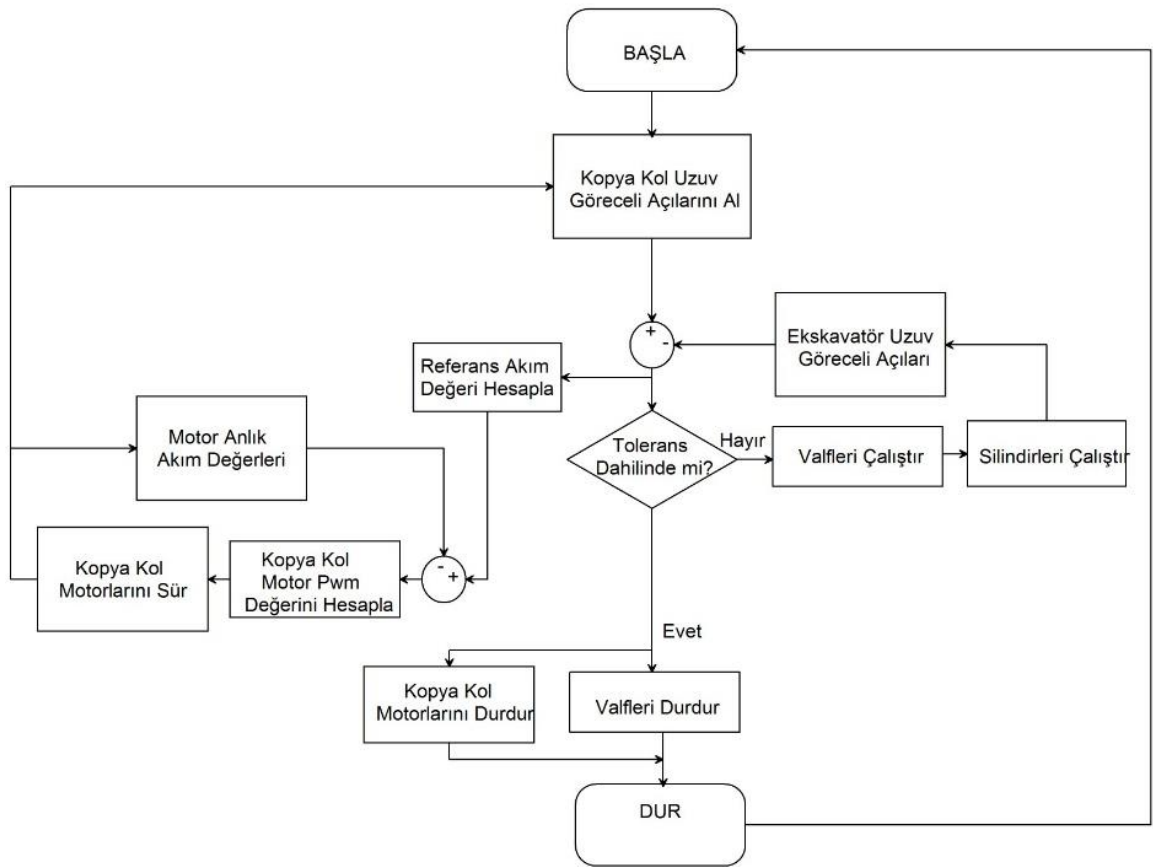


Şekil 4.17 IRFZ44N HEXFET Power MOSFET Şematik Gösterimi

Hidrolik pompayı süren DC motoru tek yönlü sürmek yeterli olduğundan kart üzerinde tek yönlü sürüş gerçekleştirilmiştir. Bunun için birbirine paralel 3 adet IRFZ44N transistör kullanılmıştır.

4.3.3 Kontrolcü mikroişlemci yazılımları

Kopya kol kontrolcü elektronik devre kartı ve ekskavatör elektronik devre kartlarında kullanılan mikroişlemcilerin istenilen görevleri yerine getirebilmeleri için Pic C dilinde yazılımlar geliştirilmiştir. Kontrolcü yazılımları akış diyagramı şekil 4.18'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.18 Kontrolcü Yazılımları Akış Diyagramı

Sistem başladığında kopya kol kontrolcüsü kopya kol uzun göreceli açılarını ve ekskavatör uzun göreceli açılarını toplar ve açılar arasındaki farkı oluşturur. Bu farka göre kuvvet geri beslemesi yapacak DC motorları sürebilmesi için gerekli referans akım değerini hesaplar ve DC motorların anlık akım değeriyle bir hata oluşturur. Bu hatayı PID kontrolcüsüne besler ve PWM değeri oluşur. Bu PWM değeri ile DC motorlar sürülür ve kopya kol üzerinde eklem torku yaratılır. Daha sonra kopya kol

kontrolcüsü ekskavatör ve kopya kol açıları arasındaki farkın tolerans dahilinde olup olmadığına bakar. Eğer tolerans dahilinde değil ise ekskavatör kontrolcüsüne gerekli komutları gönderir. Komutları alan ekskavatör kontrolcüsü valf komutlarını üretir ve silindirlerin hareketi sonucu ekskavatör yeni pozisyonuna gelir. Ekskavatör ve kopya kol pozisyonları arasındaki fark tolerans dahiline gelene kadar bu döngü devam eder. Pozisyonlar arasındaki fark tolerans dahiline geldiğinde ise kopya kol kontrolcüsü, ekskavatör kontrolcüsüne durma komutunu gönderir ve ekskavatör kontrolcüsü valfleri kapatır. Eşzamanlı olarak kopya kol kontrolcüsü DC motorlara durma komutu gönderir. Yeni bir tolerans dışı pozisyon farkı olana kadar sistem dengede kalır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada önceki çalışmalarda geliştirilen ekskavatörler için kopya kol kumanda sistemine, kopya kol sistemi geliştirilerek kuvvet geri beslemesi eklenmiştir. Kuvvet geri beslemesi eklenmesiyle beraber operatöre görme duyusuna ek olarak dokunma duyusu da kazandırılarak daha hassas operasyonları gerçekleştirme ve uzaktan kablosuz kontrol sayesinde operasyonları operasyon sahasından uzakta daha güvenli bir şekilde gerçekleştirme imkanı sağlanması hedeflenmiştir.

Ekskavatör ve kopya kol pozisyonlarını algılamak için kullanılan açı algılayıcı sistemde algılayıcı ömrünün uzun olması için mekanik algılayıcılar yerine temassız manyetik algılayıcılar kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür. Gerçek ekskavatör sisteminde algılayıcıların montaj kolaylığı açısından şaft üzerine monte edilmesi yerine uzuvlar üzerine monte edilen ve kablosuz çalışabilen bir algılayıcı kullanılmasının daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Ekskavatörler üzerine yapılan güncel çalışmalara bakıldığında uzaktan kablosuz kontrol ve kuvvet geri beslemesi üzerine birçok çalışma olduğu görülmüştür. Sistemler incelendiğinde çeşitli dezavantajları ve avantajları gözlemlenmiş ve bu gözlemler göz önünde bulundurularak kopya kol kuvvet geri beslemesi sistemi geliştirilmiştir.

Bu çalışmada kopya kol üzerinde kuvvet geri beslemesi yaratabilmek için eyleyici olarak redüktörlü DC motorlar tercih edilmiştir. Uzuv açılarını ölçmek ve kuvvet sağlamak için iki ayrı sistem yerine hem uzuv eklemlerinde gerekli torku yaratacak hem de motor üzerinden uzuv açısını ölçebilecek bir sistem geliştirilmiştir. Sistemde motor direkt olarak şaft yerine şafta dik bir eksenle yerleştirilmiştir. Motor mil hareketini şafta aktarmak için konik dişliler kullanılmıştır. Burada redüktör dişli boşluğu ve konik dişlilerin sistem esnekliğinden dolayı diş atlama sonucu uzuvlarda küçük bir açı kaybı yaşanabilmektedir ve bu kopya kol uç konumunda kopya kol açık olduğunda göz ardı edilemeyecek bir pozisyon farklılığına yol açabilmektedir. Motor redüktörleri ve kopya kol konstrüksiyonu değiştirilerek daha kararlı bir yapı elde edilebilir.

Kopya kol kumanda sistemini gerçek bir ekskavatör sisteminde deneme imkanı olmaması ve sistemin uygulanabilirliği açısından çalışma kapsamında bir mini ekskavatör üretilmiştir. Bu ekskavatörde de gerçek ekskavatör gibi hidrolik valflerin

kontrolündeki hidrolik silindirlerin manipülasyonu sonucu hareket sağlanmaktadır. Ancak imkanlar dahilinde sistem aç kapa valfler ile kontrol edilmektedir. Bu da sistemde hız kontrolü yapılamamasına yol açmıştır. Sistemde kullanılan aç kapa yön kontrol valfleri oransal servo valfler ile değiştirilerek sisteme hız kontrolü eklenebilir ve kopya kol kumanda sisteminin hız kontrol testleri gerçekleştirilebilir. Mini ekskavatörün kendi eksenini etrafındaki dönüşü hidrolik bir motorla sağlanmıştır. Ancak motorun dakikadaki dönüş değeri sistem için fazla olduğundan hem hızı düşürmek hem de motor çıkış kuvvetini arttırmak için motora bir redüktör bağlanmıştır. Seçilen redüktörün dişli boşluklarından dolayı açılma olarak çok küçük gözükse de ekskavatör kolu tam açıkken uç konumunda göz ardı edilemeyecek miktarda bir ölü alan yaratmaktadır. Redüktör değiştirilerek veya hidrolik motor daha yavaş ve daha kuvvetli olacak şekilde seçilerek redüktörsüz bir çözümle bu problemin önüne geçilebilir. Sistemdeki hidrolik yağın akışı bir hidrolik pompaya doğru akım motoru bağlanarak sağlanmıştır. Motor, ekskavatör uzuvları sınır pozisyonlarında gerekli gücü üretmediğinden dolayı sistemde kilitlemeler yaşanmakta ve pompa aşırı zorlanmaktadır. Pompada kullanılan motorun daha uygun bir türeyle değiştirilmesi bu durumu ortadan kaldıracaktır.

Sunulan çalışma kapsamında yukarıda anlatılan çeşitli problemler ve olası iyileştirmeler gözlemlenmiştir. Kopya kol kumanda sistemi gerçek bir ekskavatör sistemi üzerinde denenememiştir. Bundan dolayı çalışmanın gelecek hedefleri

- Mini ekskavatör sistemi aç kapa valflerinin oransal servo valflerle değiştirilerek gerçek sistem benzerliğinin artırılması ve sistemde hız kontrol imkanı sağlanması
- Kopya kol tasarımının değiştirilerek karşılaşılan problemlerin aşılması ve gözlemlenen değişiklikler yapılarak sistem veriminin artırılması
- Mini ekskavatörde gerekli testler bitirilerek gerçek ekskavatör sistemi üzerinde testlere başlanması ve sistemin gerçek ekskavatör sistemi üzerindeki uygulanabilirliğinin geliştirilmesi

olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Önal A., Şamiloğlu A.T., Ekskavatör Otomatik Kontrol Sistemi, SAVTEK 2012, 6. Savunma Teknolojileri Kongresi, 2012.
- [2] Bieilczyk K., "Angle Measurement Using a Miniature Hall Effect Position Sensor", Electrodynamic and Mechatronics,. SCE 11 '09. 2nd International Students Conference, 2009.
- [3] Lee Y.Y., Wu R.H. ve Xu S.T., " Applications of Linear Hall-Effect Sensors on Angular Measurement", IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of 2011 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2011.
- [4] Jeong, Rhyu, Kwon, ve Kim, "Design of the Rotary Magnetic Position Sensor With the Sinusoidally Magnetized Permanent Magnet", IEEE Transactions On Magnetism, Vol. 43, NO. 4, 2007.
- [5] Ghassemi F., Tafazoli S., Lawrence P.D. ve Hashtrudi-Zaad K., "Design and Calibration of an Integration-Free Accelerometer-Based Joint-Angle Sensor", IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, Vol. 57, No. 1, 2008.
- [6] The eXcavator Position Monitor (XPM), IHC Systems, <http://www.ihcsystems.com/excavators/excavators/presentation-remote-access/> , 2011.
- [7] Kim D., Kim J., Lee K., Park C., Song J., Kang D., "Excavator tele-operation system using a human arm", Automation in Construction vol. 18, pp.173–182, 2009.
- [8] Mouri T., Kawasaki H. ve Umebayashi K., "Developments of New Anthropomorphic Robot Hand and its Master Slave System", Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference,2005.
- [9] Hayn H. , Schwarzmann D. , A Haptically Enhanced Operational Concept for a Hydraulic Excavator, Advances in Haptics, pp.199-220 , 2010.
- [10] Hayashi, K.; Tamura, T.; , "Teleoperation performance using excavator with tactile feedback," Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on , vol., no., pp.2759-2764, 9-12 Aug. 2009.

- [11] Kontz M. ve Book W.J., "Flow Control For Coordinated Motion And Haptic Feedback", International Journal of Fluid Power, 2014.
- [12] Demirbaş Ő. , "İnternet Tabanlı Pı Kontrollü Bir Doğru Akım Motoru Deney Seti", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. , Cilt 22, No 2, 401-410, 2007.
- [13] Yıldız A.B. , "Electrical Equivalent Circuit Based Modeling And Analysis Of Direct Current Motors", Electrical Power and Energy Systems, Volume 43, Issue 1, Pages 1043-1047, 2012.
- [14] Söylemez E., "Mekanizma Tekniđi", Birsen Yayınevi, 2007.
- [15] Ogata K., "Modern Control Engineering", Prentice Hall, 2010.