

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATA NUTKU MODEL HAVUZU DALGA DENETLEYİCİSİNİN
ELEKTRONİK KART VE GÖMÜLÜ YAZILIM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Vehbi Umur ÇABUK

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Haziran 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATA NUTKU MODEL HAVUZU DALGA DENETLEYİCİSİNİN
ELEKTRONİK KART VE GÖMÜLÜ YAZILIM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Vehbi Umur ÇABUK
504161129**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Osman Kaan EROL

Haziran 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504161129 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Vehbi Umur ÇABUK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ATA NUTKU MODEL HAVUZU DALGA DENETLEYİCİSİNİN ELEKTRONİK KART VE GÖMÜLÜ YAZILIM TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Osman Kaan Erol**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Bilge Tutak**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şeref Naci Engin
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **3 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **10 Haziran 2019**



Aileme ve dostlarıma,

ÖNSÖZ

Bu çalışmada Ata Nutku Dalga Model Havuzu'nun kapalı çevrim kontrolünün yapılması için elektronik devre tasarlanmış ve buna ait çevre birimi yazılımları entegre edilmiştir. Sahada güçlü motorlar ile çalışan ve elektriksel gürültüye maruz kalan elektronik devreler tasarım zorluğu barındıran çalışmalardır. Özellikle âni yük değişimlerine maruz kalan hatlarda elektronik kartın çalışabilirliğini koruması ve sistemin mekanik anlamda güvenliğinin sağlanması ilk karşılaşılan zorluklar arasındadır.

Elektronik devre ve bu denli büyük güçlü bir sistemin kontrolü gibi zorlu iki konunun yer aldığı çalışmamda bana yol gösteren ve destek olan tez danışmanım Doç. Dr. Osman Kaan Erol'a ve gerek bu tezin hazırlanması sırasında gerekse de tüm eğitim hayatım boyunca benden her anlamda desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Tasarım isterlerini karşılamamanın yanı sıra gerçek işletme şartlarında güvenle çalışan ve bozuculara karşı dayanımlı ürünler çıkarmanın ne kadar zorlu bir süreç olduğunu tez çalışmalarım boyunca bir kez daha anladım. Kusursuz bir ürün ortaya çıkmasa da bu konuda edinilen deneyim ve bilgi birikiminin oldukça önemli ve değerli olduğunu belirtmek isterim. Oluşan bilgi birikiminin üzerine konularak ileriye taşınması bu projede çalışmış ve çalışacak olan herkes için büyük bir şevk ve mutluluk kaynağı olacaktır.

Mayıs 2019

Vehbi Umur Çabuk
Kontrol ve Otomasyon Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tarihçe.....	1
1.2 Çalışmanın Şekillendirilmesi	3
2. SİSTEM VE ÇEVRE BİRİMLERİ	7
2.1 Lineer Cetvel	7
2.1.1 Lineer cetvelin çalışma prensibi	8
2.1.2 Haberleşme protokolü ve arayüzü.....	10
2.1.2.1 SSI haberleşme protokolü	10
2.1.2.2 Sensörün RS-422 haberleşme arayüzü.....	12
2.1.3 Gray code	14
2.2 Aktüatör.....	15
2.3 Elektronik Kartta Kullanılan Mikrokontrolörün Genel Özellikleri.....	16
3. DONANIM TASARIMI	19
3.1 Elektronik Kartın Güç Beslemesi Donanım Tasarımı.....	20
3.2 Geliştirme Kartı Sinyal Bağlantıları.....	22
3.3 Lineer Cetvel İçin Donanım Tasarımı.....	23
3.4 Aktüatör İçin Donanım Tasarımı	28
3.5 Butonlar İçin Donanım Tasarımı.....	37
3.6 Elektronik Kartın Baskı Devre Görselleri ve BOM Listesi	38
4. GÖMÜLÜ YAZILIM VE KONTROLÖRÜN İMPLEMENTASYONU	45
4.1 Bilgisayar ve Elektronik Kart Haberleşmesi	45
4.2 Lineer Cetvel – Elektronik Kart Haberleşmesi	48
4.3 PID Kontrolörünün İmplementasyonu	49
4.4 Cihazın Durumları Arasında Geçişler	51
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	57

KISALTMALAR

CDC	: Communication Device Class
PID	: Propotional Integral Derivative
USB	: Universal Serial Bus
ADC	: Analog Dijital Converter
SSI	: Serial Synchronous Interface
MSB	: Most Significant Bit
LSB	: Least Significant Bit
LED	: Light Emitting Diode
NMOS	: Negative channel Metal Oxide Semiconductor
SMPS	: Switch Mode Power Supply
DIP	: Dual In-line Package
RS-xxx	: Recommended Standarts
OPAMP	: Operational Amplifier
UTP	: Unshielded Bükümlü çift
STP	: Shielded Bükümlü çift
FPU	: Floating Point Unit
CAD	: Computer Assisted Design
SPI	: Serial Peripheral Interface
CRC	: Cyclic Redundancy Check
MOSI	: Master Output Slave Input
MISO	: Master Input Slave Output
SCLK	: Serial Clock
CS	: Chip Select
LCD	: Liquid-Crystal Display



SEMBOLLER

<i>um</i>	: Mikro metre
<i>kBd</i>	: Kilo baud
<i>MBd</i>	: Mega baud
<i>MB/s</i>	: Mega byte saniye
<i>us</i>	: Mikro saniye
<i>T_p</i>	: İki senkron sinyali arası duraklama zamanı
Ω	: Ohm
<i>V_{OD}</i>	: RS-422 alıcısı minimum fark gerilimi
<i>R_t</i>	: Sonlandırma direnci
<i>mA</i>	: Miliamper
<i>I_{PD}</i>	: Fotodiyot akımı
<i>uV</i>	: Mikrovolt
<i>V_{in}</i>	: OPAMP giriş gerilimi
<i>V_o</i>	: OPAMP çıkış gerilimi
<i>V_{ref}</i>	:Lineer regülatör referans voltajı
<i>V_{olm}</i>	: Lineer regülatör çıkış gerilimi



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Sensöre ait özellikler.	8
Çizelge 3.1: 6N137 entegresi doğruluk tablosu.....	25
Çizelge 3.2: Şekil 3.8'deki şematikte kullanılan ifadeler ve açıklamaları.	27
Çizelge 3.3: Şekil 3.10'daki şematikte kullanılan ifadeler ve açıklamaları.	31
Çizelge 3.4: Devre üzerindeki kapasiteler ve değerleri.	38
Çizelge 3.5: Devre üzerindeki dirençler ve değerleri.	38
Çizelge 3.6: Devre üzerindeki tümleşik devreler ve değerleri.	39
Çizelge 3.7: Devre üzerindeki diyotlar ve değerleri.....	40
Çizelge 3.8: Devre üzerindeki mekanik parçalar ve değerleri.....	40
Çizelge 4.1: Binary haberleşme paketlerinin ayrıştırılması.....	46
Çizelge 4.2: Bilgisayar – elektronik kart haberleşmesinde kullanılan komutlar.	47
Çizelge 4.3: Buton girişleri ve diğer olayların meydana gelmesi ile cihaz durumunun değişimi.....	51



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Dalga havuzu yan kesiti.	1
Şekil 1.2: Dalga havuzu mekaniğinin teknik çizimi.	2
Şekil 2.1: Sistemin en genel yapısı.	7
Şekil 2.2: Lineer cetvelin genel görseli.	8
Şekil 2.3: Lineer cetvelin iç yapısı ve algılama mekanizması.	9
Şekil 2.4: Mikrokontrolör ve sensör arası iletişim yönleri.	11
Şekil 2.5: SSI haberleşmesi zamanlama grafiği.	11
Şekil 2.6: Sensörün yazmacının yenilenmesini engelleyen zamanlama.	12
Şekil 2.7: RS-422 diferansiyel iletim hattı.	13
Şekil 2.8: Sensör içinde clock sinyalinin alan devre parçası.	14
Şekil 2.9: Sensör haberleşmesi ve örnek devresi.	14
Şekil 2.10: Gray code çözümleme algoritması.	15
Şekil 2.11: Aktüatörün sürüşü ile ilgili genel görsel.	16
Şekil 2.12: STM32F446 Nucleo geliştirme kartı.	17
Şekil 3.1: Giriş beslemesinde gerilimin düşürülmesini sağlayan SMPS modülleri. .	20
Şekil 3.2: Giriş beslemesinde gerilim arttırımını sağlayan SMPS modülü.	20
Şekil 3.3: Kart üzerinde güç dağıtımını yapan modüller.	21
Şekil 3.4: Mikrokontrolör geliştirme kartının elektronik devre olan dijital bağlantıları.	22
Şekil 3.5: MAX491 entegresi pin isimleri ve örnek bağlantısı.	23
Şekil 3.6: Çiftlenmiş ve normal hatlarda manyetik alan girişiminin engellenmesi. .	24
Şekil 3.7: 6N137 entegresi pinleri ve işlevleri.	25
Şekil 3.8: Lineer cetvel haberleşmesi için hazırlanan şematik.	26
Şekil 3.9: DAC genel çalışma mantığı.	29
Şekil 3.10: Aktüatör sürüşü için hazırlanan şematik.	30
Şekil 3.11: HCNR200 entegresi iç yapısı ve akım yönleri.	32
Şekil 3.12: Çalışmada HCNR200 hatasını düzeltmede kullanılan integratör geri beslemeli devre parçası.	34
Şekil 3.13: HCNR200 entegresi kuvvetlendirici devre parçası.	34
Şekil 3.14: LM317 lineer regülatör devre parçası.	35
Şekil 3.15: Aktüatöre kontrol sinyallerini aynı anda verilmesini sağlayan devre parçası.	36
Şekil 3.16: Butonların bağlantısı.	37
Şekil 3.17: Tasarlanan kartın hazırlanmış hali.	41
Şekil 3.18: Tasarlanan kartın malzemelerinin yerleştirilmiş hali.	42
Şekil 3.19: Elektronik kartın kutulanmış görseli.	43
Şekil 4.1: SPI haberleşme protokolü hatları.	48
Şekil 4.2: RS-422 haberleşmesinin uygulaması.	48
Şekil 4.3: PID kontrolörün paralel formu.	49



ATA NUTKU MODEL HAVUZU DALGA DENETLEYİCİSİNİN ELEKTRONİK KART VE GÖMÜLÜ YAZILIM TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde bulunan Ata Nutku Gemi Model Havuzu'nun kapalı çevrim kontrolünü yapacak, gerektiğinde manuel veya bilgisayar üzerinden kullanıcı arayüzü ile kontrol edilebilecek bir elektronik kart tasarlanmıştır.

Ata Nutku Gemi Model Havuz'u iki adet 12.5kW gücünde motora sahiptir. Havuz 4.5m derinliğindedir ve içerisinde iki adet motorun hidrolik devre ile hareket verdiği, zeminden 3.15m yukarıda ve 1.35m yüksekliğinde bir palet bulundurur. Motorlar paleti hareket ettirerek havuz içerisinde istenilen dalga şekillerinin oluşmasını sağlar. Sistem genel olarak bir elektronik kontrol kartı, motorlara hareket veren aktüatör ve paletten konum geri beslemesi almayı sağlayan sensörden meydana gelir.

Büyük güç kontrolü gerektiren uygulamalarda sistemin güvenilir olması, zorlu çalışma şartlarında geri besleme sensörü ile haberleşmenin yüksek hızlarda sürdürülebilir olması, doğru kontrol sinyallerinin üretilmesi ve dolayısıyla mekanik bütünlüğün korunması açısından kritiktir. İki adet 12.5kW gücünde motor bulunan sistemde motor hareketlerinin hızla gerçekleştirilmesi ortama elektromanyetik dalgalar yaymakta ve bu da elektronik kart üzerinde bulunan güç besleme hatlarının gürültü olarak elektronik komponentlerin çalışmamasına veya zarar görmesine neden olmaktadır. Bunun önlenmesi her sistem modülünün izole beslenmesi ve elektronik kart üzerinde sinyaller seviyesinde izolasyonun devam ettirilmesi ile mümkün kılınabilir. İzole besleme ile birbirinden elektriksel olarak yalıtılan sistem modülleri herhangi birinin arızalanma veya kısa devre sonucu birbirlerini etkilemesinin de önüne geçer. Bir problem anında da şayet zarar göreceksen, sistem modülünün elektronik kart üzerinde bağlı bulunduğu, kendisini ilgilendiren kısmı zarar görür. Böylece elektriksel anlamda güvenilir bir elektronik kart elde edilmiş olunur.

Sensör bağlı bulunduğu sistemde palet konumunu ölçer. Elektronik kartın sensör ile haberleşmesi RS422 arayüzü üzerinden SSI protokolü ile gerçekleştirilir. RS422 arayüzü diferansiyel sinyallere dayanan bir haberleşme arayüzüdür. Sensör ile haberleşmenin yüksek hızlarda gerçekleştirilmesi dijital optokuplörle sinyal seviyesinde de izole edilmiş haberleşme hatları ile sağlanır. Sensörün desteklediği SSI protokolü mikrokontrolörün SPI haberleşme birimi kullanılarak gerçekleştirilmiş olur. Sensörden alınan veriler ise mikrokontrolör üzerinde çözümleme algoritmalarından geçirildikten sonra kontrol döngüsüne dahil edilerek kullanılır.

Motora hareket veren aktüatörün kontrolü ise mikrokontrolörün DAC çıkışı ile sağlanır. Burada da sinyal seviyesinde izolasyonun korunması için analog optokuplörler kullanılır. Sistemin aktüatörü iki adet kontrol girişine sahiptir. Bu çalışmada bir girişi sabit gerilim uygulanırken diğer giriş mikrokontrolörde bulunan kontrol algoritmasının ürettiği kontrol sinyalleri ile sürülmüştür. Mikrokontrolörün

DAC çıkışından üretilen kontrol sinyallerinin genliği uygun aralıklarda olmasına adına OPAMP'lar yardımı ile kuvvetlendirilmiştir.

Bilgisayar ile haberleşebilen elektronik kart kullanıcı için görsel ve kullanışlı bir arayüz sunacaktır. Arayüz üzerinden elektronik kartın detaylı ayarları yapılabilecek ve uygun formatlarda kaydedilmiş dosyalar üzerinden dalga modelleri doğrudan elektronik karta gönderilebilecektir. Böylece pahalı sistemler yerine daha ucuz maliyetler ile aynı işi yapabilen bir elektronik kart tasarlanmış ve gerçekleştirilmiş olacaktır.



DESIGN OF ELECTRONIC CONTROL BOARD AND EMBEDDED SOFTWARE FOR ATA NUTKU SHIP MODEL TESTING POOL WAVE GENERATION TOOL

SUMMARY

An electronic control card has been designed for doing closed loop control of pool and also providing user interface, which is from directly to the board or from a computer via serial communication port for Ata Nutku Ship Model Pool which is located at Istanbul Technical Univeristy.

Ata Nutku Ship Model Pool has two 12.5kW motors. Pool's deep about 4.5m and has a flap which is taking movement from hydraulic circuit and hydraulic circuit taking power from motors. The flap is located above 3.15m from ground and height is 1.35m. Motors move flap as we want and generate wave in the pool. System has an electronic control board, an actuator for giving move orders to the motors and a sensor for taking position feedback from flap.

Ata Nutku Ship Model Pool has been revised from first setup. First system has a mechanical control unit. So it couldn't generate complicated waves. Mechanical control system has been become outdated in time. Also had mechanical damage in time. Digital controller unit and controller computer had been used after first revision and mechanical parts had been repaired.

New digital controller is able to run in automatic mode. Controller computer sends wave model to digital controller unit and wave occurs in the pool. Then revised system's digital controller had been broken. Repair and maintenance costs were too expensive. Therefore an electronic board and embedded software designing has been aimed and will be used instead of old digital controller in this work.

Examining of working zone is important for determining of methods which will be used while designing of electronic board and software. There is a panel for locating electronic board, a sensor for getting flap position and a actuator for giving move to motors at working zone. Also there are power and communication cabling with panel and motors. All of these components has been examined and will be using in this work.

There was some concern about cabling, power delivery cables and communication cables are located near each other. Close cabling will be problem for logical communication lines and electronic board. Power cable feed motor and motor produces magnetic field while working and also power delivery cables do same thing while immediate current transfer. Magnetic fields could easily affects signal cables and causes observing of noise effect. This situation affects electronic board working in unpredictable way. For preventing this, system modules should isolated from each other and this isolation should continue on electronic board at logic signal level. So isolated system modules can not affect each other from noise. Also isolated system modules can not give damages to each other in condition of short circuit. If one system module will take damage, only its circuit will broken others won't effect. This will be an important point while designing electronic board.

There is a position sensor which senses the systems flap's position. The sensor communicate with electronic control board over RS-422 interface with SSI protocol. RS-422 is type of communication interface depends on differential signals. Working principle of RS-422 interface and SSI protocol has been examined.

RS-422 communication interface also naming as TIA/EIA-422-B and often uses at industrial devices. Industrial devices become immune via RS-422 interface at long communication lines. This type of differential communication interface transfers 1 bit data via two communication cable at a time. Therefore system should have decoding/encoding IC for RS-422 interface. So isolated RS-422 interface will be provided on electronic board via MAX491 driver/receiver IC. So communication with the sensor at high speed provide from isolated communication lines with digital optocouplers at signal level. The sensor SSI communication protocol is applied over microcontroller's SPI communication module.

Data which are taking from the sensor is encoded with Gray Code. Gray Code has been invented by Frank Gray at Bell laboratories. It usually prefers against binary encoding in encoders and provides extra safety. Decoding of Gray Code is based on XOR gate. Processing unit receives Gray code and handles them bit by bit. The first bit directly writes as first bit of binary code. After that all of remaining bits pass through XOR gate with previous bit. Therefore after running decoding algorithm MCU has binary encoded data and it could be used in control algorithm.

Another examined component is acuator. The actuator has been used for giving moves to motor and it controlled via analog control inputs. It has two control inputs and two working modes. One of them is supplying it with simetrically $\pm 12\text{VDC}$ and appyling control signals in $\pm 10\text{V}$ range. Other one is supplying it directly 24VDC and applying control signals in $0 - 20\text{V}$ range. Second working mode has been applied in this work.

A one control input has supplied with constant 10V and the other has supplied by control algorithms output which is running on microcontroller at $0 - 20\text{V}$ range. For protecting isolation at signal level with microcontroller, an analog optocoupler has been used.

Using of analog optocoupler doesn't easy as using of digital optocouplers. Analog optocoupler needs extra analog control circuit because there may be voltage offset between isolated sides due to its design. For this reason a PI controller has been designed with OPAMP and voltage offset is fixed. After isolation circuit the voltage level should be boosted because isolated voltage didn't enough for maximum control signal. The control signal which is provided from DAC, have boosted to suitable range with OPAMP. Also constant voltage was provided via LM317 linear regulator.

Another important point is selecting microcontroller. Microcontroller will be used for reading sensor, controlling acuator and computing control signal. As explained, microcontroller should have at least one SPI communication module, one UART communication module and DAC output and also should be fast for running control algorithm and handling communications. Therefore an ARM core based STM32F446RE microcontroller has been selected and used in this work. This microcontroller has been used with its development board which name is STM32F446RE Nucleo. Development board has some advantages for this work. Most important one is provides debugging and USB communication.

The electronic control board which is communicating with computer and running digital controller, have provided a visual and an useful user interface. Electronic

board's detailed settings could set and wave models could applied over user interface. Also running control algorithm and generates control signal over DAC module to actuator.

Communication with electronic board established via USB. As mentioned USB line has been provided by development board and communicate via CDC protocol with computer. Computer opens virtual COM port for USB CDC devices and so electronic board acts like serial communication device. Therefore a communication package has been defined. This package ten bytes length and able to transfer even double type variable which is largest variable type. First byte of this package is command byte, following eight byte is data byte and last byte is checksum byte. Checksum byte usually uses for verifying incoming packages.

As mentioned before a PID controller runs on electronic board for generating control signal for actuator. PID controller has short execution time and provides easy design. Our microcontroller works on discrete time domain. So PID controller should be discretized. A PID controller could be write in three different forms for integral methods. Trapezoidal integration method has been applied for integral part and backward integration method has been applied for derivative filter. So difference equations have been achieved and the controller programmed into microcontroller with C programming language.

An electronic board has been achieved at the end of this work. This board is cheaper then equivalent systems which are providing by PLCs. On the other hand the board is application specific. So it has flexibility, it could be developed in the future without extra costs and its maintenance cost will be cheaper.

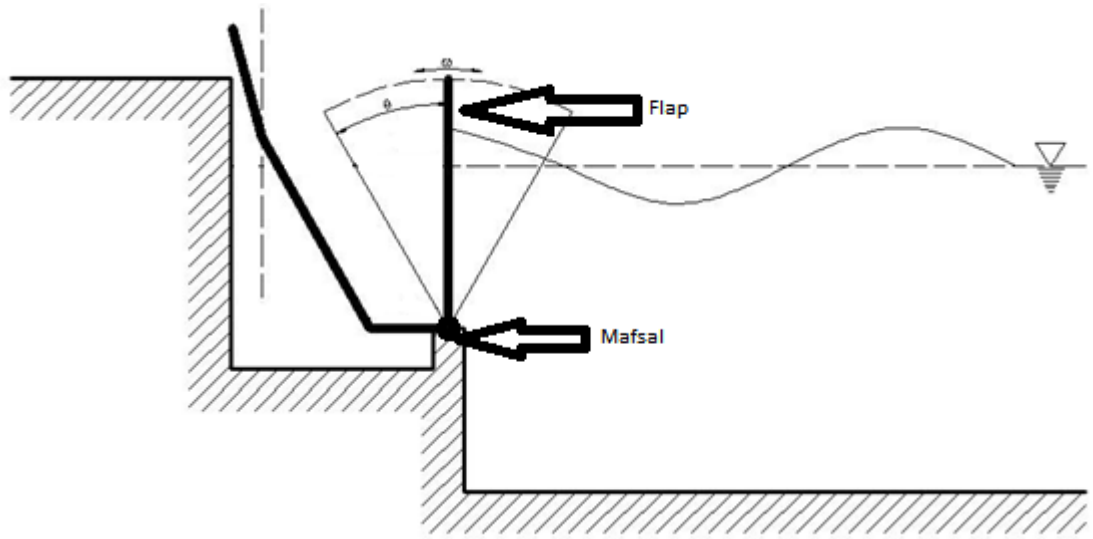


1. GİRİŞ

Ata Nutku Gemi Model Deney Havuzu İstanbul Teknik Üniversitesi içerisinde bulunan bir deney havuzudur. Bu başlık altında deney havuzunun tarihçesi ve havuz için yapılacak olan çalışmalar şekillendirilecektir.

1.1 Tarihçe

İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde yer alan Ata Nutku Gemi Model Deney Havuzu İstanbul Teknik Üniversitesi içerisinde gemi parçalarının dayanımlarının testi için kullanılmaktadır. Bu sistemin temel ünitesi olan hidrolik ünite, bir yağ deposu ve onun üzerinde düzenlenmiş olan elektrik motoru tahrikli bir pompa ve piston ile pistonu hareket veren iki hidrolik devreden oluşmaktadır. Yüksekliği 1.35 m olan palet, 4,5 m derinliğindeki havuzda dipten 3.15 m yükseklikte yer alan bir topuk üzerine mafsallanmış olup üçgen bir şekle sahiptir. Hidrolik sistemden gelen piston, bir kardan mafsalı ve ona bağlı olan 1.4 m uzunluğunda bir malle paleta bağlanmaktadır. Böylece palet, silindirdeki lineer harekete cevaben topuktaki mafsall etrafında hareket ederek dönme hareketi yapar ve tankın içerisinde dalgalar oluşmaya başlar.



Şekil 1.1: Dalga havuzu yan kesiti.

Palet hareketleri mekanik kontrol ünitesine bağı olan selonid valflerle karşılanmaktadır. Ancak mekanik bir sistem olmasından dolayı ayarlar elle yapılmakta ve hassasiyet yeterli seviyede olamadığından dolayı frekanslar sınırlı kalıp, karışık dalga üretmek zor olmaktadır. Mekanik kontrol sisteminin ayarları daha sonraları bir bilgisayar yardımıyla yapılabilir hale getirilmiş olsada bu sistem yetersiz kalmıştır(H: Barış Karayel, M. Barbaros Okan, 2007).

İlk revize işleminde ise sistemi daha kuvvetlendirmek için mekanik iyileştirmeler yapılmış, çalışmaz hale gelen parçalar onarılmıştır. Kullanım zorluğunu ortadan kaldırmak ve karmaşık dalgaları üretebilmek adına modern bir kontrol sistemi konulmuştur. Yeni kontrol sistemi hem kendi üzerinden hem de bir bilgisayar ile kullanıcı dostu bir arayüz sağlamakta ve dalga modellerini bilgisayarda gösterilen dalga modeli dosyalarından okuyarak işleme koymaktadır. Mevcut sistem genellikle bilgisayardan kontrollü olacak şekilde kullanmaya müsaittir.

Dalga havuzunun mevcut durumunda ise bu kontrol sistemi de arızalanmıştır. Yüksek bakım ve onarım maliyetlerinden dolayı bu çalışmada mevcutta bulunan sisteme alternatif olması açısından maliyet olarak çok daha ucuza benzer görevi üstlenen bir elektronik kart ve gömülü yazılım hazırlanması hedeflenmektedir.

1.2 Çalışmanın Şekillendirilmesi

Yapılacak olan çalışmayı şekillendirmek ve ihtiyaç duyulacak yöntemlere karar vermek için çalışma bölgesinde yapılan incelemelerde mevcutta elektronik kartın konumlandırılabilceği bir panel, palet konumunun elektronik kart tarafından öğrenilebilmesi için bir adet sensör ve motora hareket vermek için bir adet aktüatör olduğu görülmüştür. Panel ve sensörün arasında 20 – 30 metre kadar gerek haberleşme gerekse güç iletimi için bir kablolama yapıldığı gözlemlenmiştir. Sensör haberleşme ve güç iletim kabloları birbirlerine çok yakın geçmektedir. Bu durum gerek elektronik devre tasarımı gerek kablolamada göz önüne alınması gereken önemli bir husustur. İncelenen parçalardan sensör ve aktüatör için elektronik kartta tasarım çalışması yapılacak ve mevcutta bulunan panele sığması adına uygun bir kutuya karar verilip elektronik kart ona göre boyutlandırılacaktır.

Sistemde güç iletim hatları ile sinyal iletim hatlarının birbirlerine yakın geçmesi ve ortamda çalışan motorların bulunması hem sinyal iletim hatları üzerinde hem de elektronik kart üzerinde bozucu etkiye sebep olmaktadır. Çünkü motorlar çalışırken bulunduğu ortama manyetik gürültü yaymaktadırlar. Manyetik gürültü ise özellikle

düşük gerilim seviyelerinde çalışan sinyal kabloları üzerinde kolayca girişimde bulunup gürültü olarak nitelendirilen sinyallerin gözlemlenmesine neden olmaktadır.

Bunları önleyebilmek ve elektronik kart üzerinde sistemin modüllerinin birbirlerini olumsuz durumlardan etkilememeleri için sistem modülleri arasında elektriksel izolasyon uygulanacaktır. İzolasyon bu uygulamaya benzer olarak çoğunlukla hassas işlerde görev alan elektronik devrelerde sıklıkla tercih edilir. PLC'ler, motor sürücüler, medikal ekipmanlar, güneş paneli güç çeviricileri, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılırlar. Bu çalışmada sistem modülleri farklı transformatörler üzerinden beslenerek izole edileceklerdir. Elektronik kart üzerinde de izole edilmiş sistem modüllerinin izolasyonunun korunması için sinyal hatlarında dijital ve analog optokuplörler ile birlikte gürültü eleminasyonu için filtre elemanları kullanılacaktır.

Sistemin modüllerinden biri olan sensör ile haberleşmesinde yukarıda bahsedilen gürültüye karşı dayanımı yüksek hem de sensörün desteklediği arayüzlerden biri olması kritiktir. Sensörün desteklediği haberleşme arayüzü endüstri standartları arasında yer alan ve sıklıkla kullanılan RS-422'dir. Elektronik devre tasarımında bu haberleşme arayüzü bir tasarım kriteri olarak dikkate alınacaktır. Arayüze uygun entegre seçimi yapılacak ve devre şematiği hazırlanarak uygulanacaktır.

Sensör ile alakalı bir diğer dikkat edilmesi gereken husus ise fiziksel haberleşme hattıdır. Haberleşmenin fiziksel boyutu, gürültüye karşı bağışıklığı yüksek bir haberleşme hattı için oldukça önemlidir. Endüstri içinde süre gelen zamanda standartlaşmış ve sıklıkla uygulanan kablolama yöntemleri mevcuttur. Bunlardan en önemlisi bükümlü çift kablolamadır. UTP ve STP kabloları bükümlü çift kablolama biçiminde hazırlanan kablolardır ve sensörün desteklediği RS-422 arayüzü ile uyumlu olarak çalışabilmektedir. Bu kablolar zorlu ortamlarda çalışmak için idealdir ve doğaları gereği gürültüyü engelleyecek şekilde davranırlar. David Barnett'e göre(2004)“ Uzak ara en ekonomik ve sıklıkla kullanılan kablolama tipi bükümlü çift'dir.”(s. 11).

Çalışma alanında yapılan incelemede sistem modülleri arasında motora hareket verebilmek adına bir aktüatör olduğu bilinmektedir. Mevcutta bulunan aktüatör için detaylı bilgi bulunmamasına karşın çalışma gerilimi ve motora hareket verirken referans alacağı kontrol sinyallerinin maksimum gerilim seviyeleri bilinmektedir.

Elektronik kart tasarımı sırasında aktüatörün kontrolü için gerekli devre hazırlanırken bu bilgilerin ışığında hareket edilecektir.

Bahsedilen bileşenlerin bir araya gelmesi ile ortaya çıkan sistemin istenilen şekilde davranmaya zorlanması gerekmektedir. Sahip olduğu sensörden palet konum bilgisini alarak ve aktüatör üzerinden motora hareket vererek elektronik kart bu sistemi istenilen şekilde davranmaya zorlayabilir. Bunun için günümüzde pek çok kontrol metodu mevcuttur. Bu çalışmada çevrim süresinin kısa olması, kolay tasarım imkanı sağlaması açısından PID kontrolör tercih edilmiştir.

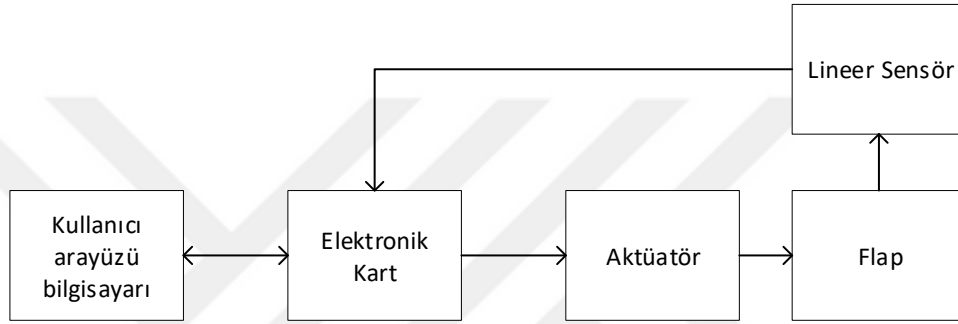
Tüm bu sistem modüllerinin ilgili devreler üzerinden kontrol edilebilmesi, bilgisayar üzerinden bir kullanıcı arayüzü sunabilmesi ve paleti istenilen şekilde kontrol edecek olan dijital kontrolörün çalıştırılabilmesi için elektronik kartta mikrokontrolör kullanılacaktır. Kullanılacak olan mikrokontrolör sahip olduğu haberleşme modülleri sayısı ile gerek kullanıcı arayüzünde gerekse sensör ile olan haberleşmede kolaylık ve esneklik sağlayacaktır. Yapısı içerisinde FPU barındırdığından kayan nokta işlemlerinde de hızlı olması ile önce çıkan mikrokontrolör dijital kontrolörlerin zamanında ve hızlı çalıştırılmasına imkan sağlamaktadır.

Kartı çalışma alanında konumlandırabilmek için alanda bulunan panoya takılabilir ve uygun boyutlarda bir kutu seçimi yapılmıştır. Elektronik devrenin boyutları seçilen bu kutuya göre belirlenmiş ve daha önce bahsedilen tasarım kriterleri doğrultusunda CAD programları yardımı ile şematiği hazırlanıp, malzeme yerleşimleri yapılmıştır



2. SİSTEM VE ÇEVRE BİRİMLERİ

Sistem üç temel parçadan oluşmaktadır. Bunlar motora hareket veren aktüatör, motor paletinden konum geri beslemesi almayı sağlayan sensör yani lineer cetvel ve bu sistemleri kontrol eden bir elektronik karttır. Sistem bir bütün olarak Şekil 2.1'deki gibi çalışmaktadır.



Şekil 2.1: Sistemin en genel yapısı.

Şekil 2.1'deki yapı incelendiğinde elektronik kartın kullanıcı arayüzü ile sistem arasında bir aracı olduğu ve en önemli pozisyonda bulunduğu görülmektedir. Bu sebeple aktüatör ve lineer sensörün iyi şekilde anlaşılması elektronik kartın tasarımı sırasında hata yapılmadan doğru bir şekilde tasarlanmasını sağlayacak ve ilerleyen aşamalarda sistemin tümüyle sorunsuz çalışmasını garanti edecektir.

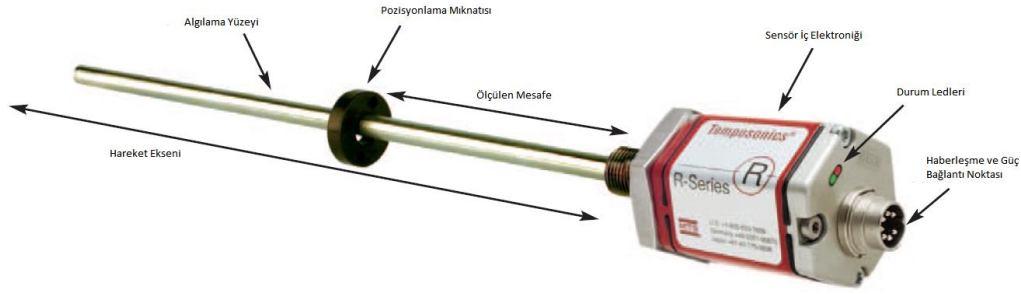
Bu başlık altında lineer cetvel ve aktüatör incelenecek, mikrokontrolör tanıtılacak ve tasarlanacak olan elektronik kartın tasarım parametreleri belirlenecektir. Buradaki bilgiler bölüm 3'te elektronik kartın tasarımı sırasında kullanılacaktır.

2.1 Lineer Cetvel

Bu uygulamada MTS firmasının Temposonics R Serisi lineer pozisyonlama sensörü kullanılmıştır. Öncelikle sensörün çalışma prensibi anlatılacak devamında ise haberleşme arayüzü ve protokolü hakkında bilgi verilecektir. Son olaraksa veri çıktı formatı gömülü yazılımı hazırlanırken kullanılmak üzere irdelenecektir.

Lineer pozisyonlama sensörü hareket eksenini boyunca kesin konumu ölçen bir enkoderdir. Lineer cetvel ile sistemde dalga jeneratörünün palet konumu ölçülmüş ve

sensörün sağladığı arayüz ile mikrokontrolöre aktarılarak kontrol döngüsü içinde kullanılmak üzere işlenmiştir .



Şekil 2.2: Lineer cetvelin genel görseli

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi sensörün algılama yüzeyi üzerinde hareket eden yüzük mıknatıs vasıtası ile paletin ne kadar yer değiştirdiği anlaşılmaktadır. Ölçülen çıkış türü, sensörün çözünürlüğü ve çıkış özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

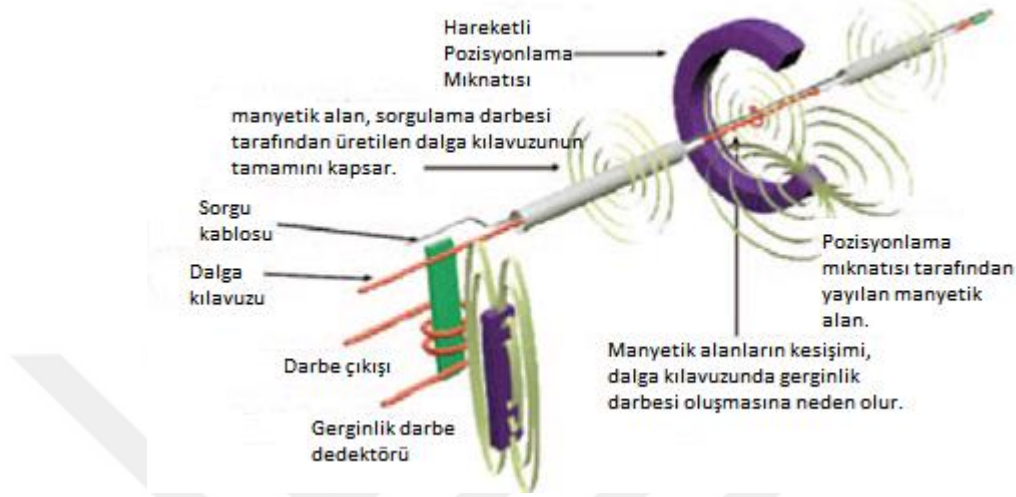
Çizelge 2.1: Sensöre ait özellikler.

Ölçülen Çıkış Türü	Pozisyon, 2 pozisyonlama mıknatısı arası mesafe, hız ve iç sıcaklık.
Çözünürlük	0.5 μm , 1 μm , 2 μm , 5 μm , 10 μm , 20 μm , 50 μm , 100 μm
Çıkış	Arayüz: Seri Senkronize Arayüz(RS-422) Veri Formatı: İkili veya Gray veri formatı, opsiyonel olarak parite ve hata bitleri içerebilir. Veri Uzunluğu: 8’den 32’bite kadar. Veri Hızı: 70 kBd’dan 1MBd’a kadar. Kablo uzunluğuna göre farklılık gösterebilir.

2.1.1 Lineer cetvelin çalışma prensibi

Bir çok endüstriyel işlem ünitesi, PLC gibi, çevredeki değişiklikleri ölçmek ve gözlemek için sensörlerden faydalanır. Bu çalışmada da lineer cetvelden faydalanılmıştır. Manyetostriktif pozisyonlama sensörü Şekil 2.2’de ki pozisyonlama

mıknatısı ile hareket ekseninin başına kadar olan mesafeyi ölçer. Hareket eksenini boyunca pozisyonlama mıknatısı hareket eksenine temas etmez. Sensör hareket eksenine paralel olacak şekilde monte edilir. Sensör elektroniği ise elde ettiği ölçümü dijital arayüzü sayesinde mikrokontrolöre iletir.



Şekil 2.3: Lineer cetvelin iç yapısı ve algılama mekanizması.

Şekil 2.3'te bazı komponentleri gösterilen lineer cetvel 5 ana kısımdan oluşur;

- Pozisyonlama magneti
- Dalga kılavuzu
- Darbe çıkışı
- Sorgu kablosu
- Elektronik modül

Pozisyonlama magneti kalıcı(permanent) mıknatıstır, yüzük şeklinde olur ve algılama yüzeyi boyunca hareket eder. Dalga kılavuzu ise Şekil 2.3'teki gibi algılama yüzeyinin içinde bulunur.

Manyetotraksiyon içinde bulunan materyalin özelliğidir ve bu materyal demir, nikel, kobalt ve bunların alaşımlarını içerir. Karışım sayesinde elde edilen materyalinin boyu ve şekli etkilendiği manyetik alana göre değişir. Bu değişimin sebebi malzemenin içindeki manyetik alanların dışarıdaki pozisyonlama mıknatısı vasıtası ile uygulanan manyetik alanla hizalanmasından kaynaklanmaktadır.

Dalga kılavzunun bu adı almasındaki sebep ise sensörün çalışması sırasında oluşan sonik dalgalar bu parça içinde hareket etmektedir. Sonik dalgalar pozisyonlama mıknatsının oluşturduğu manyetik alan ile elektronik modülün sorgu kablosuna uyguladığı akım dalgaları sayesinde oluşan manyetik alanın kesişmesi sonucu oluşur. İki manyetik alandaki manyetostriktif gerilme vektörü toplamı, pozisyon mıknatsının bulunduğu yerde dalga kılavuzu üzerinde bir gerilme dalgası oluşmasına neden olur.

Gerilme dalga kılavuzu üzerinde 2850m/s hızla hareket eder. Baş kısmında alıcı modül gerilme dalgasının gelişini algılar. Aynı zamanda diğer bir gerilme dalgası ise pozisyonlama mıknatsından baş kısmının aksi yönüne doğru hareket eder. Bu kullanışsız dalga, dalga sönmüleyici modül tarafından elemine edilir.

Elektronik modül sorgu kablosu üzerine sorgulama dalgası uygular ve elektronik bir sayaç başlatır. Bir süre sonra elektronik modül alıcı modülden pozisyonlama mıknatsının baş kısmından uzaklığı ile orantılı bir geri dönüş sinyali alır ve sayacı durdurur. Sayacın başlamasından itibaren geçen süre pozisyonlama mıknatsının bulunduğu konum ile orantılıdır. Örnek vermek gerekirse, 1 metre uzaklıktaki pozisyonlama mıknatsının konumunu 2850m/s ile ilerleyen dalga ile ölçmek istersek bu arada geçen zaman denklem (2.1)'deki gibi hesaplanır;

$$\frac{1 \text{ metre}}{2850 \text{ metre/saniye}} = 0.35 \text{ milisaniye} \quad (2.1)$$

Geçen zaman elektronik modül tarafından hesaplandıktan sonra asıl çıktı dijital arayüz aracılığı ile gerekli birimlere ulaştırılır.

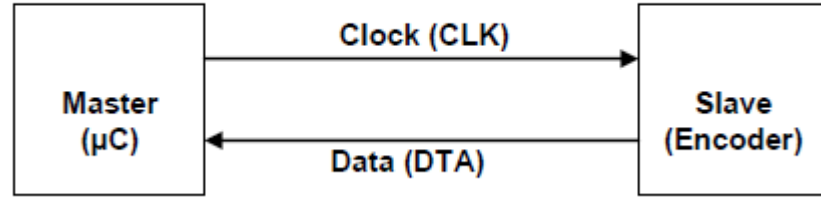
2.1.2 Haberleşme protokolü ve arayüzü

Lineer cetvel'in çıkışı RS-422 arayüzüne sahip olup haberleşme protokolü ise SSI haberleşme protokolüdür. Fiziksel olarak RS-422 arayüzünden SSI haberleşme protokolü ile veri aktarımı gerçekleştirilmektedir. Bu başlık altında öncelikle SSI haberleşme protokolü ve ardından RS-422 arayüzü anlatılacaktır.

2.1.2.1 SSI haberleşme protokolü

Seri Senkronize Arayüzü(SSI) endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. SSI protokolünde bir yönetici cihaz(mikrokontrolör, PLC gibi) ve kendine bağlı, ondan komut alan cihaz doğrudan birbirlerine bağlıdır. Bu tip haberleşme protokolünde dışarı verilecek olan veri daima sensörün yazmaçlarında hazır tutulur.

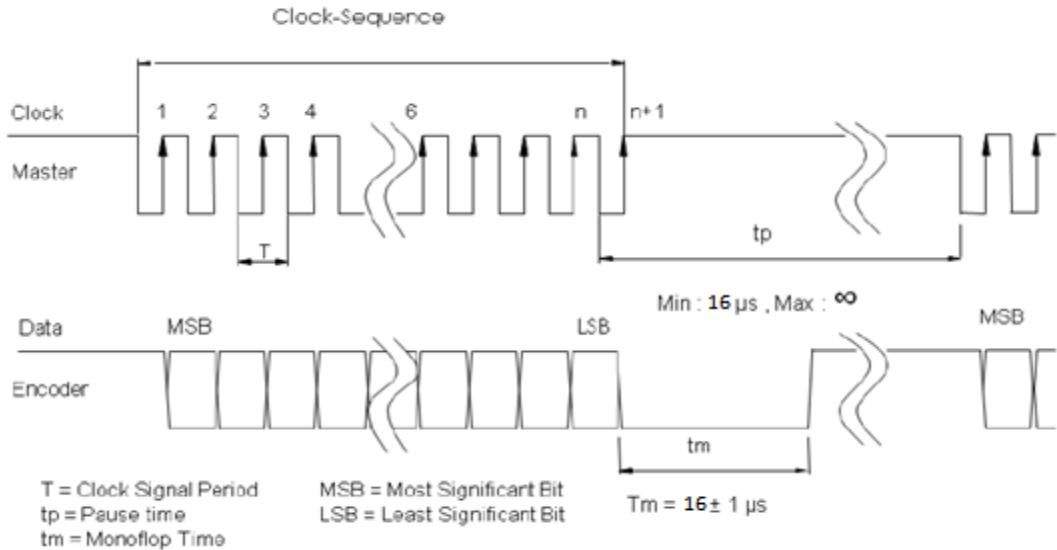
Sistemde kullanılan sensör SSI protokolünü kullanmaktadır. Pozisyon bilgisi 24/25/26 bit olacak şekilde birleştirilir ve yüksek hızda SSI arayüzünden mikrokontrolöre ulaştırılır. Kapalı çevrim kontrol sistemleri için senkronizasyon önemli bir avantajdır. Sensörün yazmaçlarında tutulan veri bağlı olduğu yönetici cihazdan senkronizasyon sinyalini almaya başladığı zaman her senkronizasyon sinyalinde 1 biti dışarı verilecek şekilde yönetici cihaza iletilir.



Şekil 2.4: Mikrokontrolör ve sensör arası iletişim yönleri.

32 bitlik SSI verisi ilk önce MSB iletilecek şekilde yazmaçlarında bulunan verileri iletim hattına verir. Endüstride sensör tipine ve üreticisine göre 32 bitlik alanın nasıl kullanılacağı değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan sensörde 25 bitlik kısmı kullanılmaktadır.

Örnek bir SSI zamanlama diyagramı Şekil 2.5'teki gibi olmalıdır (POSITAL FRABA 2013).

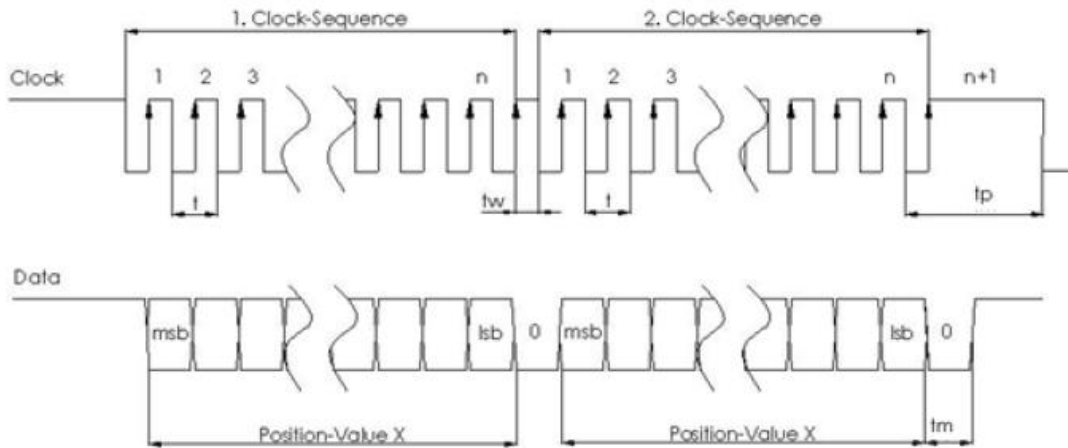


Şekil 2.5: SSI haberleşmesi zamanlama grafiği.

Şekil 2.5'te t_m zamanı enkoderin transferin tamamlandığını anlaması için gerekli olan süredir. t_p ise iki senkronizasyon sinyali arası duraklama zamanını temsil etmektedir. Bu örnekte en az $16\mu s$ olarak gösterilmiştir. Maksimum süresi ise tanımsızdır.

Senkronizasyon sinyali olmadığı durumlarda sensörün veri hattı daima lojik 1 seviyesinde durur. Senkronizasyon sinyalinin ilk düşen kenarında sensörün veri hattı hala lojik 1 seviyesinde durur. İlk yükselen senkronizasyon sinyali ile yazmaçlarda tutulan verinin MSB'si veri hattına gönderilir ve bunu takip eden her yükselen kenarda yeni veri hatta gönderilir. Son olarak verinin en önemsiz biti(LSB) veri hattına gönderildikten sonra senkronizasyon sinyali hattı lojik 1 seviyesinde en az $16\mu s$ tutularak sensörün yazmaçlarına yeni veriyi yüklemesi sağlanır.

Çoğu SSI arayüzüne sahip cihazlar çoklu transfer yöntemini içerirler. Çoklu transfer yöntemi aslında oluşabilecek bir hata sonucu rastgele verilerin veri hattına yollanmasını engeller. Eğer tam bir transferden sonra yönetici cihaz hala senkronizasyon sinyali göndermeye devam ederse veri hattında ilk gönderilen verinin aynısı gözükür. Sensör senkronizasyon sinyalinde durma süresi kadar lojik 1 seviyesini görmezse veri yazmacını yenilemez. Bu durum Şekil 2.6'da verilmiştir.



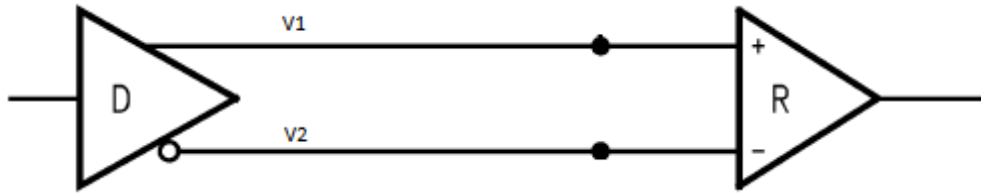
Şekil 2.6: Sensörün yazmacının yenilenmesini engelleyen zamanlama.

2.1.2.2 Sensörün RS-422 haberleşme arayüzü

Lineer cetvel RS-422 haberleşme arayüzü üzerinden SSI protokolü ile verilerini mikrokontrolöre iletmektedir. Bu uygulamada senkronizasyon ve veri sinyalleri RS-422 standartlarına göre iletilir. Bu standart aynı zamanda TIA/EIA-422-B, diferansiyel voltaj sürürlü endüstriyel iletim standardı olarakta bilinir ve endüstriyel ortamlarda çalışması beklenen sensörler ve cihazlar bu şekilde bozunumlara karşı dayanıklı iletişim arayüzlerine sahip olurlar. Diferansiyel iletimin avantajı, uzun iletim

hatlarında kabul edilebilir hızlar mertebesinde kalmayı ve iletim hatlarında meydana gelebilecek gürültülere karşı dayanımı yüksek haberleşmeyi sağlamasıdır. Bu iletim şekli endüstride yoğun ve geniş sinyal iletim hatlarında sıklıkla tercih edilir.

Diferansiyelden haberleşmeden anlatılmak istenen, bu haberleşme arayüzü bir bitlik veriyi iletmek için iki veri hattı kullanır. Kullanılan iki veri hattı arasındaki gerilim seviyesine göre alıcı veya verici arayüz entegreleri hattı yorumlayarak lojik 1 veya lojik 0 seviyesinde sinyale dönüştürür.



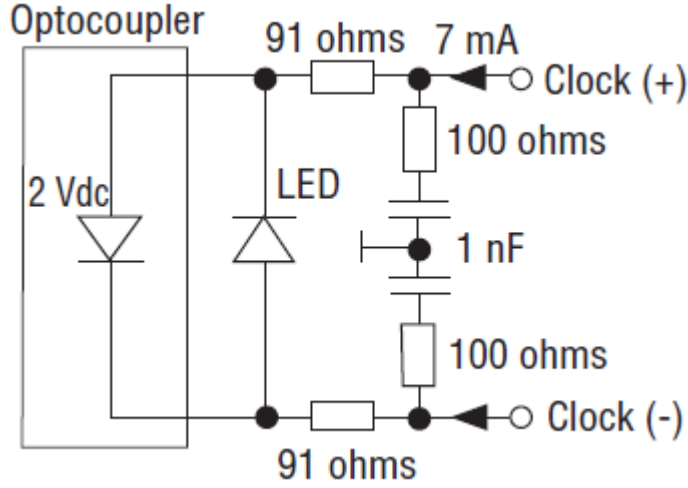
Şekil 2.7: RS-422 diferansiyel iletim hattı.

$$f(x) = \begin{cases} \text{Lojik 1} & , V1 - V2 > 2V \\ \text{Lojik 0} & , V1 - V2 < 2V \end{cases} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'de verildiği gibi diferansiyel hatlar arasındaki farkın 2V üzerinde olması alıcının çıkışının lojik 1 ve tersinin olması lojik 0 olmasına neden olur(Maxim Integrated, 2014).

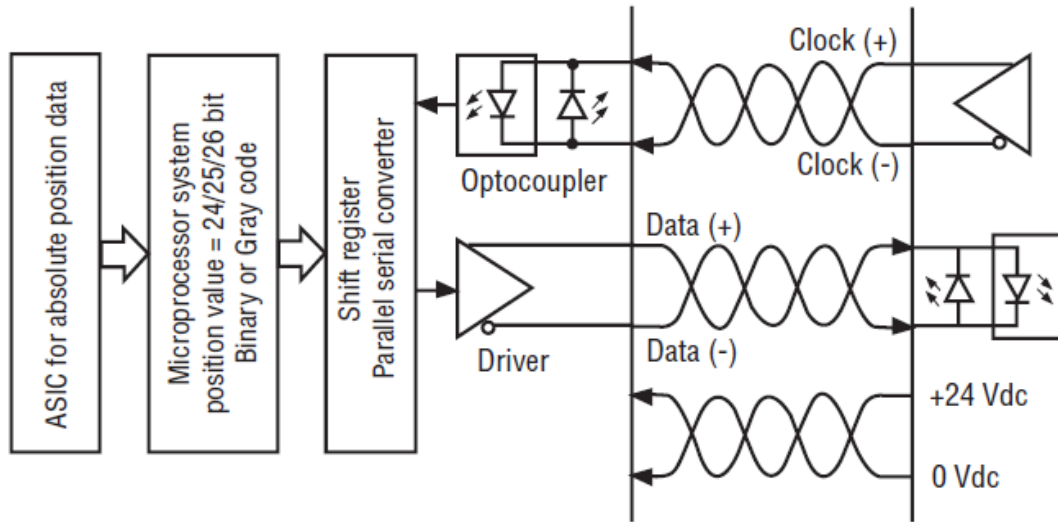
SSI protokolü senkronizasyon sinyali ve veri sinyallerinin her birini Şekil 2.7'deki gibi bir RS-422 sürücü entegresinden geçirerek diferansiyel olarak RS-422 alıcı entegresine iletir(Electronic Industries Association Engineering Department, 1994).

Bu sürüşün elektronik kart üzerinde bir karşılığı olacağı gibi bir karşılığında sensör üzerinde olması gerekmektedir. Aksi halde elektronik kart tarafından uygulanacak olan senkronizasyon sinyallerini sensörün yorumlaması mümkün değildir. Bu bağlamda lineer cetvelin senkronizasyon sinyalini alan iç devre parçası Şekil 2.8'de verilmiştir(MTS SENSORS, 2014a). Sensör içerisinde oluşturulmuş olan bu devrenin amacı uzun iletim hatlarında doğabilecek çok yüksek frekanslı gürültüleri senkronizasyon sinyalinden temizleyebilmektir.



Şekil 2.8: Sensör içinde clock sinyalini alan devre parçası

Genel olarak haberleşme ve güç devreleri göz önüne alındığında Şekil 2.9'daki yapının uygulanması gereklidir(MTS SENSORS, 2014a).;



Şekil 2.9: Sensör haberleşmesi ve örnek devresi.

Şekil 2.9'da gösterilen kablolama tipi bükümlü çift kablolama tipidir. Bu kablolama tipi kablolar üzerinde oluşması muhtemel gürültüleri doğası gereği bastıracaktır. Tasarım aşamasında açıklanacak olan bu yöntemin bu çalışmada uygulanması kaçınılmazdır.

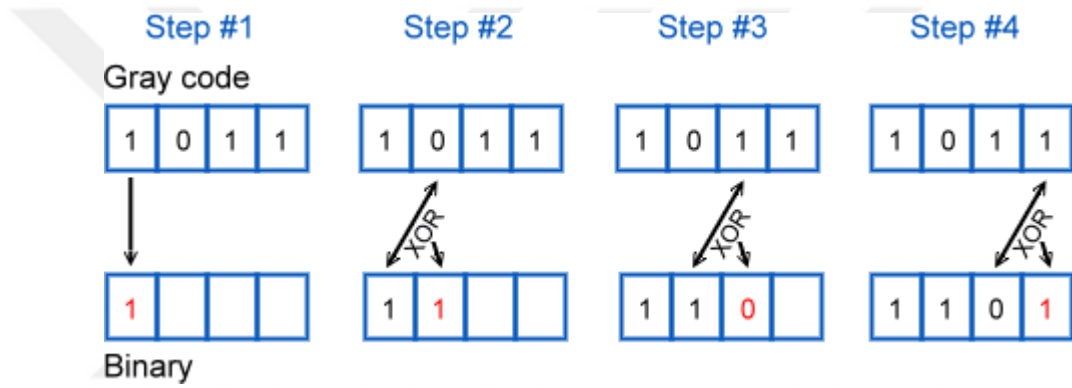
2.1.3 Gray code

Linear cetvel bu çalışmada pozisyon bilgisini SSI dijital haberleşme protokolü üzerinden Gray Code olarak iletmektedir. Gray code, ikili tabandaki sayıları bitlerin sekansı olarak ifade etmektir. Adını ise Frank Gray'den alır. Bell Labaratuarlarında

çalışan Frank Gray 1947 yılında buluşunu Pulse Code Communication patent sunumunda açıklamıştır. Frank Gray bu enkodlama yöntemini Gray Code olarak adlandırmamıştı, patentinde bunun için “reflected binary code” tanımını kullanmıştı(Black ve Paul E. 2004).

Gray Code enkoderlerde klasik ikili kodlama yöntemine nazaran tercih edilmektedir. Tercih edilmesini sebebi, birkaç bit ikili sistemde aynı anda değişirken herhangi birinin birinden önce yada sonra değişmesinden dolayı meydana gelebilecek eksik okumayı engellemektir. Döner enkoderlerin doğası gereği data çıkışları Gray Code’dur.

Gray Code formatında gelen bir veri standart ikili sayı düzenine çevrilirken Şekil 2.10’daki çözümleme yöntemi uygulanır;



Şekil 2.10: Gray code çözümleme algoritması.

Şekil 2.10’daki algoritma peşi sıra gelen veri bitlerini kendinden bir sonra gelen veri biti ile XOR kapısından geçirmektir. Bu algoritma matematiksel olarak denklem (2.3)’de gösterilmiştir.

$$f(x) = \begin{cases} x & , x = 25 \\ (x) \oplus (x - 1) & , x < 25 \end{cases} \quad (2.3)$$

Bu çözümleme algoritması elektronik kartın gömülü yazılımı hazırlanırken gelen verinin çözümlendiği yerde uygulanacaktır.

2.2 Aktüatör

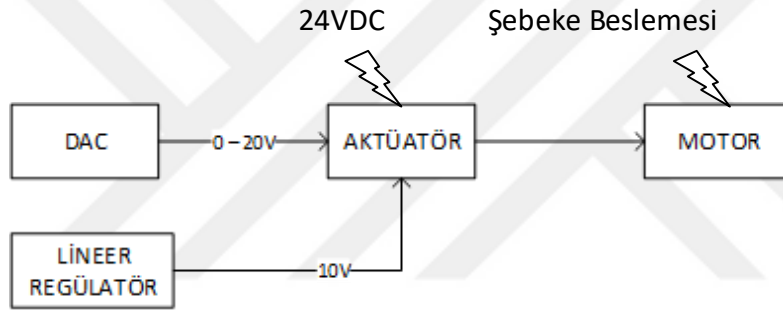
Kurulu sistem üzerinde çalışmakta olan aktüatör dalga jeneratörüne bağlı olan iki adet 12.5kW’lık elektrik motorunun tahrik edilmesini sağlamaktadır. Aktüatör 24V gerilimle çalışmakta ve iki kanaldan gelen analog kontrol sinyalleri ile kontrol edilmektedir.

Kontrol sinyali girişi iki kanal A ve B girişlerinden oluşmaktadır. İki giriş arası potansiyel farkın en fazla 20V mertebesinde olması uygundur. Bu tarzda bir sürüş aslında analog diferansiyel sürüş olarak adlandırılabilir.

Kontrol girişine uygulanacak olan sinyal, gerekli kontrol algoritmaları koşturulduktan sonra elektronik kart üzerindeki mikrodenetleyici içinde bulunan DAC modülü yardımı ile analog işarete çevrilecektir. Bu aktüatör için uygulanabilecek iki çeşit sürüş yöntemi mevcuttur.

- $\pm 12V$ giriş beslemesi ile $\pm 10V$ kontrol sinyali uygulamak.
- 24V giriş beslemesi ile 0 – 20V arası kontrol sinyali uygulamak.

Bu çalışmada ikinci sürüş yöntemi tercih edilmiştir ve elektronik devre ona göre tasarlanmıştır. Bahsedilen işletim prosedürü Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11: Aktüatörün sürüşü ile ilgili genel görsel.

2.3 Elektronik Kartta Kullanılan Mikrokontrolörün Genel Özellikleri

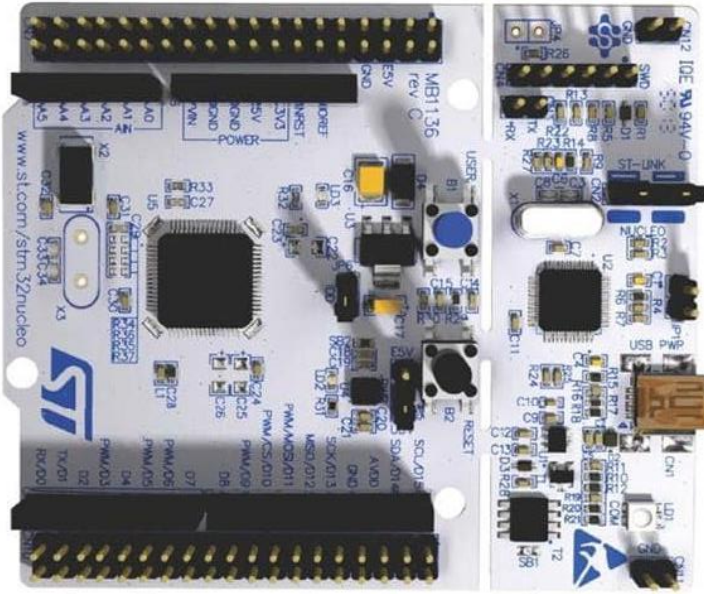
Mikrokontrolör bu çalışmada kontrol algoritmasının çalıştırıldığı, çevre birimleri ile haberleşmeyi sağlayan ve temel fonksiyonların yönetilmesinde rol alan önemli bir birimdir. Bu çalışmada ST Mikroelectronics firmasının STM32F446RE mikrokontrolörü kullanılmıştır. Mikrokontrolör seçilirken haberleşme birimleri, saat frekansı, hafıza birimleri ve dijital sinyal işleme gibi özellikleri göz önünde bulundurulmuştur.

STM32F446RE gibi mikroişlemciler FPU ve yüksek saat hızı özelliklerinden dolayı çoklu işlerde görev yapması beklenen platformlarda tercih edilirler. Yapısında FPU barındırması kayan noktalı işlemlerin yapılma hızını ciddi ölçüde arttırmaktadır ve yüksek saat hızı, çevre birimleri ile haberleşmesini yaparken aynı zamanda kontrol algoritmalarında zamanında çalıştırılmasını sağlamaktadır.

Önemli özellikleri aşağıda listelenmiştir;

- 180MHz saat hızı
- 12 Bit DAC
- 17 Timer
- 4 UART(11.25Mbit/s)
- 4 SPI (45Mbit/s)

Kullanılan geliştirme kartı Şekil 2.12’de verilmiştir;



Şekil 2.12: STM32F446 Nucleo geliştirme kartı.



3. DONANIM TASARIMI

Yapılan çalışmada lineer cetvelin okunması ve aktüatör için kontrol sinyallerinin oluşturulması aynı zamanda devrenin bozunumlara karşı dayanımlı olması kritiktir. Bozunumlara karşı dayanım ve sistem modüllerinin birbirlerini etkilememesi için farklı transformatörler ile beslenerek modüller enerjilendirilmiştir ve izolasyon sağlanmıştır. Transformatörlerden gelen gerilimler elektronik kart üzerinde SMPS modülleri ile uygun gerilim seviyelerine getirilerek kart üzerinde kullanılan elektronik komponentlere uygulanmıştır.

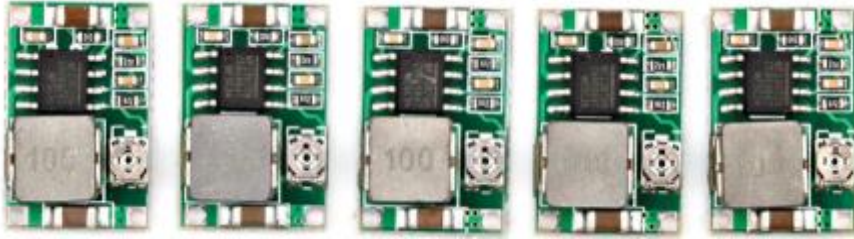
İzole beslemeli elektronik kart üzerinde diğer komponentlerin birbirleri ile analog veya dijital yollardan iletişime girmesi gerekmektedir. Örnek vermek gerekirse mikrokontrolör ile sensörün haberleşmesi için dijital olarak veya mikrokontrolörün aktüatör için kontrol işaretleri üretmesi ise analog olarak etkileşime girmeye örnek olarak gösterilebilir. Bu sebeple elektronik kart üzerinde dijital ve analog optokuplörlerin kullanılması kaçınılmazdır.

Bu bağlamda lineer cetvel ile haberleşebilmek için RS-422 arayüzüne uygun ve SSI haberleşmesinin hız ihtiyacını karşılayabilecek bir alıcı ve verici entegre ile uygun dijital optokuplörler seçilerek kullanılmıştır. Aynı zamanda zorlu çevre şartlarından olabildiğince az etkilenmesi adınada elektronik kart ile sensör arasında bükümlü çift kablolama uygulanmıştır.

Aktüatör için uygun kontrol sinyalinin oluşturulabilmesi için 2. Bölümde anlatılan aktüatör başlığında tanımlanan çalışma modu dikkate alınarak, bir kanalına sabit 10V gerilim uygulayacak lineer regülatörlü devre ve diğer kanalı için 0-20V aralığında kontrol sinyali üretecek bir devre tasarlanmıştır. 0-20V aralığında kontrol sinyali uygulayan devre, mikrokontrolörün DAC çıkışını öncelikle analog optokuplörden geçirerek izolasyonun devamlılığını sağlamıştır, devamında OPAMP ile kuvvetlendirerek istenilen gerilim seviyesine getirmiştir.

3.1 Elektronik Kartın Güç Beslemesi Donanım Tasarımı

Elektronik kart beslemeleri dışarıdan adaptörlerle yapılmaktadır. Fakat kart üzerine gelen gerilimin regüle edilmesi gerekmektedir. Bunun için kart üzerine gelen gerilimler SMPS regülatör devreleri ile regüle edilerek entegre beslemelerine verilmiştir. Gerilim düşümü için Şekil 3.1'deki SMPS regülatör modülleri kullanılmıştır. Bu modüller ayarlı olup üzerlerinde bulunan potansiyometreler ile çıkış gerilimleri değiştirilebilir vaziyettedir.



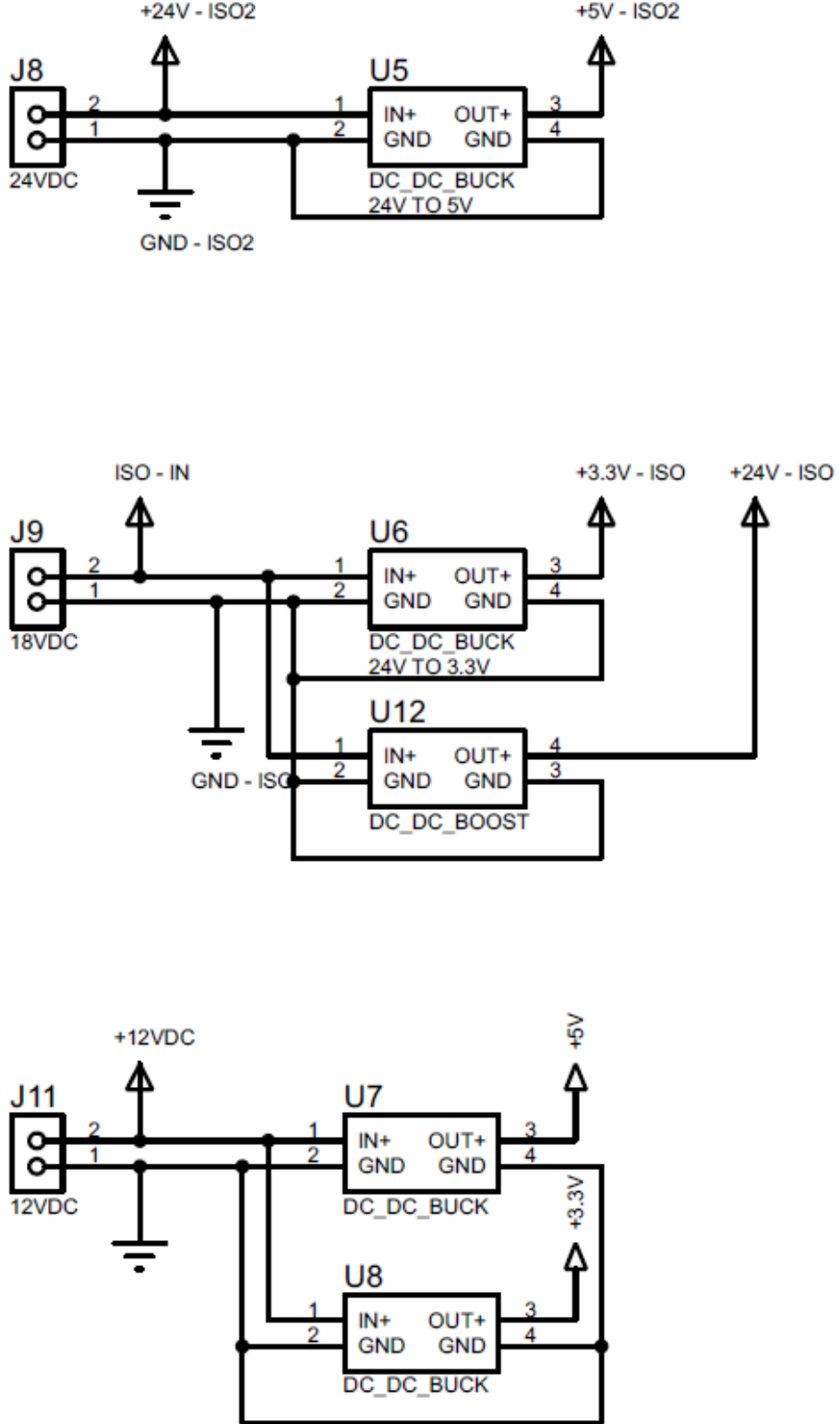
Şekil 3.1: Giriş beslemesinde gerilimin düşürülmesini sağlayan SMPS modülleri.

Gerilim arttırımı yani step-up için ise Şekil 3.2'deki SMPS regülatör modülü kullanılmıştır. Bu modülünde çıkış gerilimi diğer modüller gibi üzerinde bulunan potansiyometre ile ayarlanabilir vaziyettedir.



Şekil 3.2: Giriş beslemesinde gerilim arttırımını sağlama SMPS modülü.

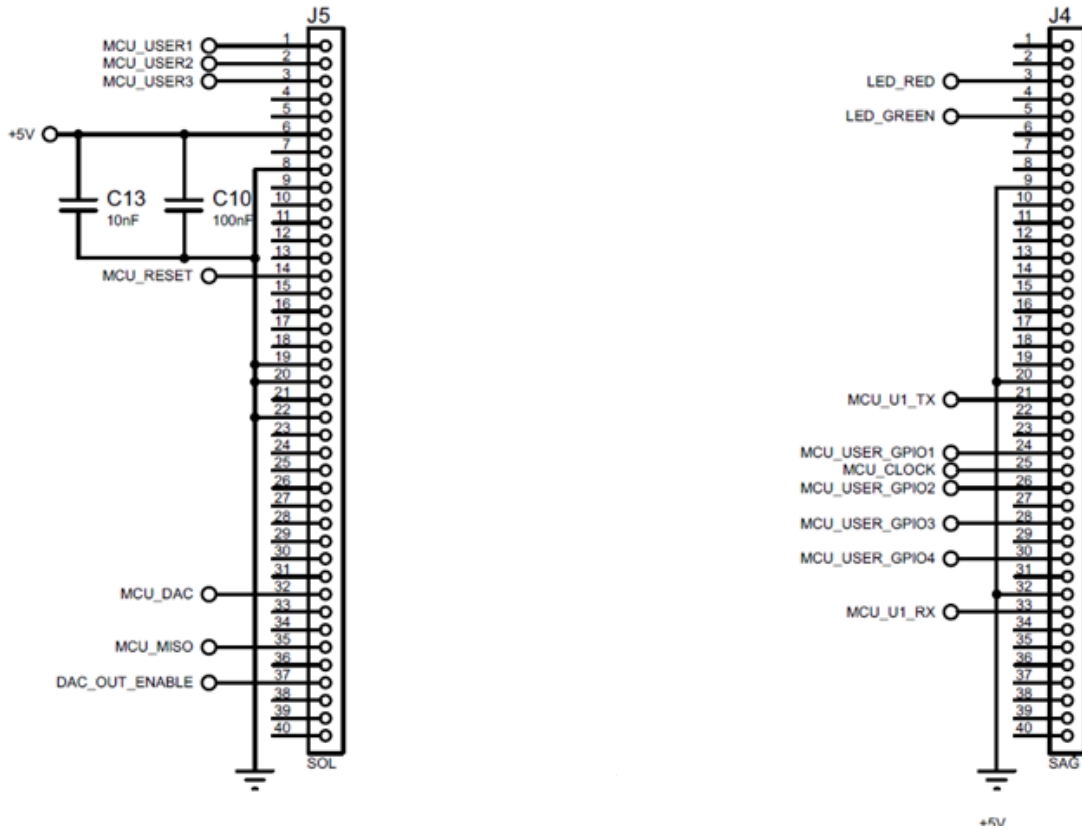
Şekil 3.3'te elektronik kart üzerinde güç dağıtımını yapan modüller verilmiştir. Her modülün giriş gerilimleri birbirlerinden izoledir. Bu sayede kart üzerinde bulunan entegreler izole olarak beslenmektedirler.



Şekil 3.3: Kart üzerinde güç dağıtımını yapan modüller.

3.2 Geliştirme Kartı Sinyal Bağlantıları

Bölüm 2’de tanıtilan geliştirme kartı elektronik kartta sistem modüllerinin kontrol edilmesi için kullanılmıştır. Bu bağlamda şematik üzerinde haberleşme, DAC ve dijital giriş çıkış pinleri ilgili devre parçalarına bağlanmıştır. Ayriyetten geliştirme kartı enerjisini kart üzerine yerleştirilen regülatörlerden almaktadır. Diğer komponentler için geçerli olan elektriksel gürültüden etkilenme durumu bu geliştirme kartı içinde geçerlidir ve giriş beslemesine olabildiğince yakın olacak şekilde C13 ve C10 bypass kapasitörleri bağlanmıştır. Benzer filtre elemanlarının geliştirme kartı üzerinde de olduğu kullanma kılavuzunda gözlemlenmiştir. Yapılan bu bağlantılar Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Mikrokontrolör geliştirme kartının elektronik devre olan dijital bağlantıları.

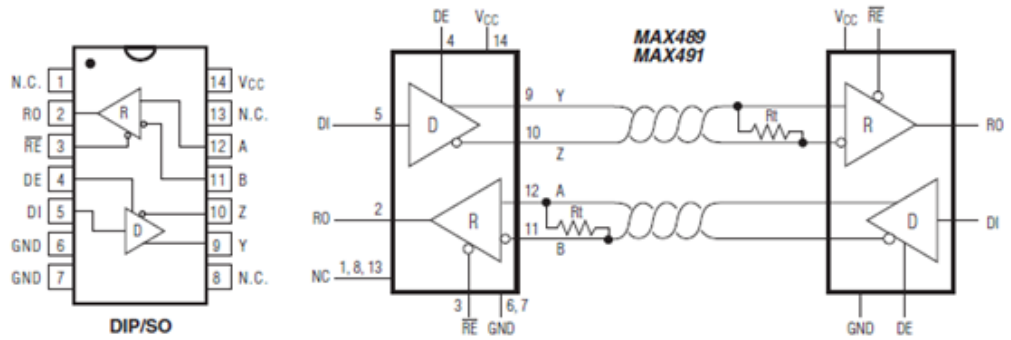
3.3 Linear Cetvel İçin Donanım Tasarımı

Sistemin modüllerinden biri olan lineer cetvel RS-422 arayüzüne sahiptir. RS-422 arayüzü üzerinden SSI haberleşme protokolünü kullanan sensör için uygun arayüz entegresi ve dijital optokuplör seçmek gereklidir.

Bu çalışmada RS-422 arayüzünün sağlanabilmesi için Maxim Integrated firmasının ürettiği MAX491 entegresi tercih edilmiştir. MAX491 entegresi RS-485 ve RS-422 arayüzleri için düşük güçlü bir alıcı/vericidir. Seçilen entegre 2.5Mbps hıza kadar veri transferini mümkün kılmaktadır. 5V gerilim altında çalışırken tam yükte 500 μ A akım çekmektedir(Maxim Integrated, 2014).

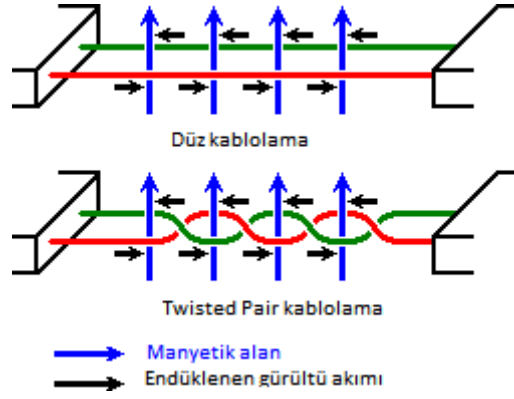
Sürücünün giriş ve çıkış uçları kısa devre için akım korumasına sahiptir ve aşırı ısınmaya karşı termal koruma içermektedir. Aynı zamanda açık devre güvenlik durumunda dahili olarak barındıran entegre hata durumlarında çıkışlarında sürekli lojik 1 seviyesini garanti etmektedir.

Entegrenin örnek bağlantısı Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5: MAX491 entegresi pin isimleri ve örnek bağlantısı.

Şekil 3.5’deki görsel incelendiğinde burada da bükümlü çift kablolanmanın kullanılması gerekliliği vurgulanmıştır. Bükümlü çift kablolanma düz şekilde kablolanmaya göre doğası gereği üzerinde manyetik alanlar ile endüklenen gürültü akımlarını bastırarak şekilde davranır.

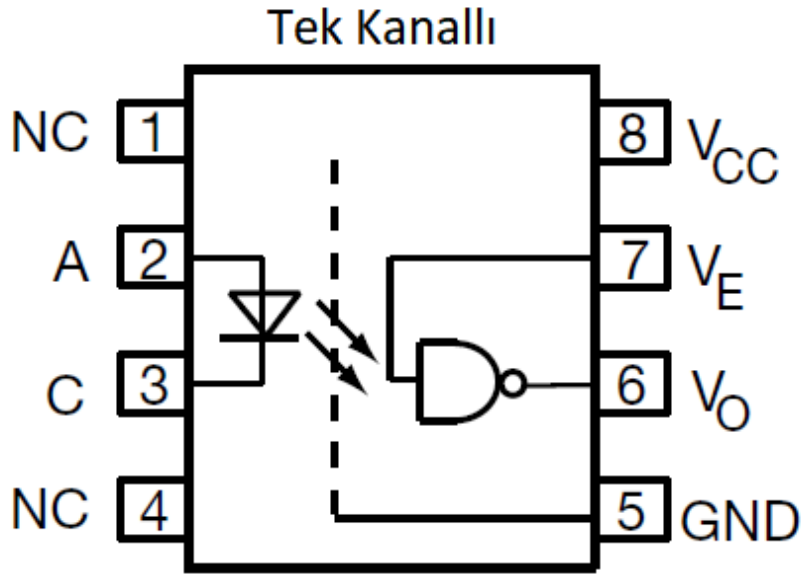


Şekil 3.6: Çiftlenmiş ve normal hatlarda manyetik alan girişiminin engellenmesi.

Şekil 3.6'deki gibi değişken manyetik alandan dolayı hatlarda meydana gelen gürültü akımları sağ el kuralı ile kontrol edildiğinde doğru kablolamada bir yön üzerinde gürültü akımını arttıracak şekilde olurken, bükümlü çift kablolamada birbirlerini sönmüleyecek şekilde davranırlar. Bu sebeplerden sensörün saha şartları kullanımı sırasında bükümlü çift olarak hazırlanmış iletim hatları ile kullanmak gereklidir.

Bunun yanında lineer cetvelin RS-422 haberleşme arayüzünün izole olarak elektronik kart üzerinde iletişiminin devam ettirilebilmesi için dijital izolatörlerin kullanılması gereklidir. Bu bağlamda bu çalışma gerçekleştirilirken 6N137 dijital yüksek hızlı optokuplörler tercih edilmiştir.

6N137 entegresi 10MBd(1.25MB/s) hıza sahip, yüksek verimli LED ve buna entegre bir fotodiyot dedektörden meydana gelir(Vishay, 2016). Dedektör çıkışı open drain NMOS-transistöre'e sahiptir. Bu sayede olabildiğince az sızıntı akım olur. Pin açıklamaları Şekil 3.7'te ve entegrenin doğruluk tablosu Çizelge 3.1'de verilmiştir.

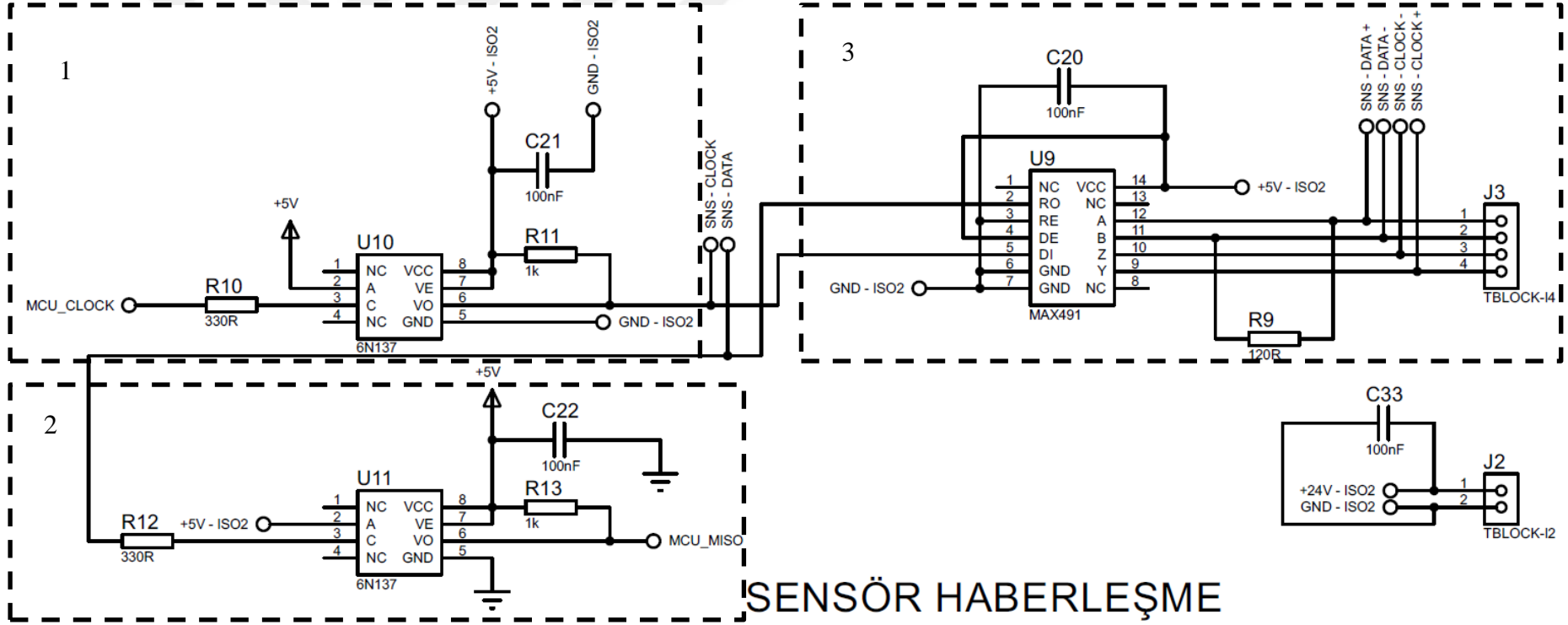


Şekil 3.7: 6N137 entegresi pinleri ve işlevleri.

Çizelge 3.1: 6N137 entegresi doğruluk tablosu.

LED DURUMU	V_E PİN DURUMU	V_O PİN DURUMU
Açık	Lojik 1	Lojik 0
Kapalı	Lojik 1	Lojik 1
Açık	Lojik 0	Lojik 1
Kapalı	Lojik 0	Lojik 1
Açık	Bağlı Değil	Lojik 0
Kapalı	Bağlı Değil	Lojik 1

Yukarıdaki bilgiler ışığında Şekil 3.8'deki şematik hazırlanmıştır.



Şekil 3.8: Lineer cetvel haberleşmesi için hazırlanan şematik.

Şekil 3.8'deki şematikte bulunan ifadeler Çizelge 3.2'de açıklanmıştır.

Çizelge 3.2: Şekil 3.8'deki şematikte kullanılan ifadeler ve açıklamaları.

Sinyal Adı	Açıklama
MCU_MISO	Mikrokontrolör SSI veri girişi
MCU_CLOCK	Mikrokontrolör SSI senkronizasyon sinyali
SNS_CLOCK	İzole SSI senkronizasyon sinyali
SNS_DATA	İzole SSI veri girişi
SNS – DATA+	RS-422 diferansiyel veri girişi
SNS – DATA-	
SNS – CLOCK+	RS-422 diferansiyel senkronizasyon sinyali
SNS – CLOCK-	

Şekil 3.8'nin 1. kısmında mikrokontrolör tarafından uygulanan MCU_CLOCK senkronizasyon sinyalinin elektriksel olarak yalıtılmasını ve Şekil 3.8'ün 2. kısmında ise RS-422 alıcı/vericisinden gelen SNS_DATA sinyalinin elektriksel olarak yalıtılmasını sağlayan devre parçası gösterilmiştir. 6N137 entegresinin LED sürülme tarafı ve sinyalin elde edildiği taraflar birbirlerinden izole kaynaklar ile beslenmiş ve izolasyonun devamlılığı sağlanmıştır.

Şekil 3.8'de U9, U10 ve U11 entegrelerinin besleme girişinde uygulanan gerilimde meydana gelebilecek dalgalanmalardan olabildiğince az etkilenmesi için 100nF değerinde bypass kapasiteleri kullanılmıştır. Bypass kapasiteleri entegrelere olabildiğince yakın bağlanmışlardır.

U10 ve U11 6N137 entegrelerinin V_O çıkışının open drain olduğu bilindiğinden R11 ve R13 pull-up dirençleri kullanılmıştır ve sinyal çıkışlarının herhangi bir sebeple yüzer durumda kalmaması sağlanmıştır. Bu sayede Çizelge 3.1'deki doğruluk tablosu her iki entegre için gerçekleşmiş olacaktır. Örneğin; U10 entegresine bağlı MCU_CLOCK sinyali lojik 1 seviyesindeyken LED üzerinden anot ve katot

gerilimleri eşit olduğu için akım akmayacaktır. Yani LED kapalı durumda olacaktır. U10 entegresinin V_E pini Şekil 3.8'nin 1. kısmında görüldüğü gibi +5V gerilime bağlıdır ve lojik 1 seviyesindedir. Bu durumda iletimde olmayan fototransistörden dolayı R11 direnci üzerinden akım akmayacak ve SNS – CLOCK sinyal çıkışında lojik 1 seviyesi gözlenecektir.

Şekil 3.8'nin 2. kısmında ise izole giriş SNS – DATA sinyalidir. Bu sinyal Şekil 3.8'nin 3. kısmında gösterilen RS-422 verici/alıcı modülün alıcı tarafından gelen sensör sinyalidir. Bu bağlantı şeması ile Çizelge 3.1'deki doğruluk tablosu sağlanmış olacaktır. Gelen veri mikrokontrolörün ilgili donanım pinine yönlendirilerek dijital olarak yazılım içerisinde elde edilecektir.

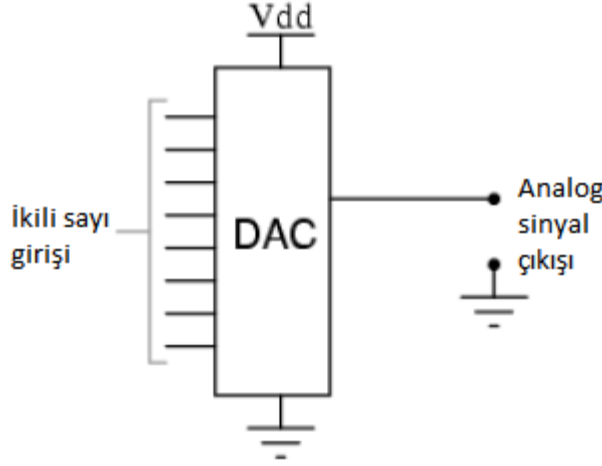
Şekil 3.8'nin 3. kısmında verilen devre parçasında MAX491 entegresi RS-422 alıcı/verici modülü olarak kullanılmıştır Alıcı kısmının aktif olması için RE pini lojik 0 ve verici modülün aktif olması için DE pini lojik 1'e bağlanmıştır.

Data alımı için veri hattının güvenilirliğini arttırmak adına R9 sonlandırma direnci kullanılmıştır. Bunun karşılığı sensör içerisinde SNS – CLOCK+ ve SNS – CLOCK– girişleri için mevcuttur. Sensör ile haberleşebilmek adına 9-10-11 ve 12. Pinleri J3 konnektörü üzerinden kablolar yardımı ile sensöre bağlanmıştır.

3.4 Aktüatör İçin Donanım Tasarımı

Sistemin modüllerinden biri olan aktüatörün iki adet kontrol işareti ile çalıştığı bilinmektedir. Aktüatörün çalıştırılacağı mod bölüm 2'de açıklanmıştı. Bu bilgiler ışığında aktüatörün bir girişi için sabit 10V gerilim lineer bir regülatör vasıtasıyla sağlanacak, diğer kontrol girişi içinse 0-20V arasında mikrokontrolör tarafından kontrol edilen ve analog sinyal üreten bir devre tasarlanacaktır. Bu bağlamda sistem modüllerinin izolasyonunu korumak için bir adet analog optokuplör, HCNR200 mikrokontrolörün DAC çıkışı için kullanılacaktır.

Dijital analog çevirici (Dijital Analog Converter) ikili düzendeki dijital verileri analog sinyallere çeviren bir cihazdır. DAC dijital dünya ile analog(gerçek) dünya arasında bir köprüdür.



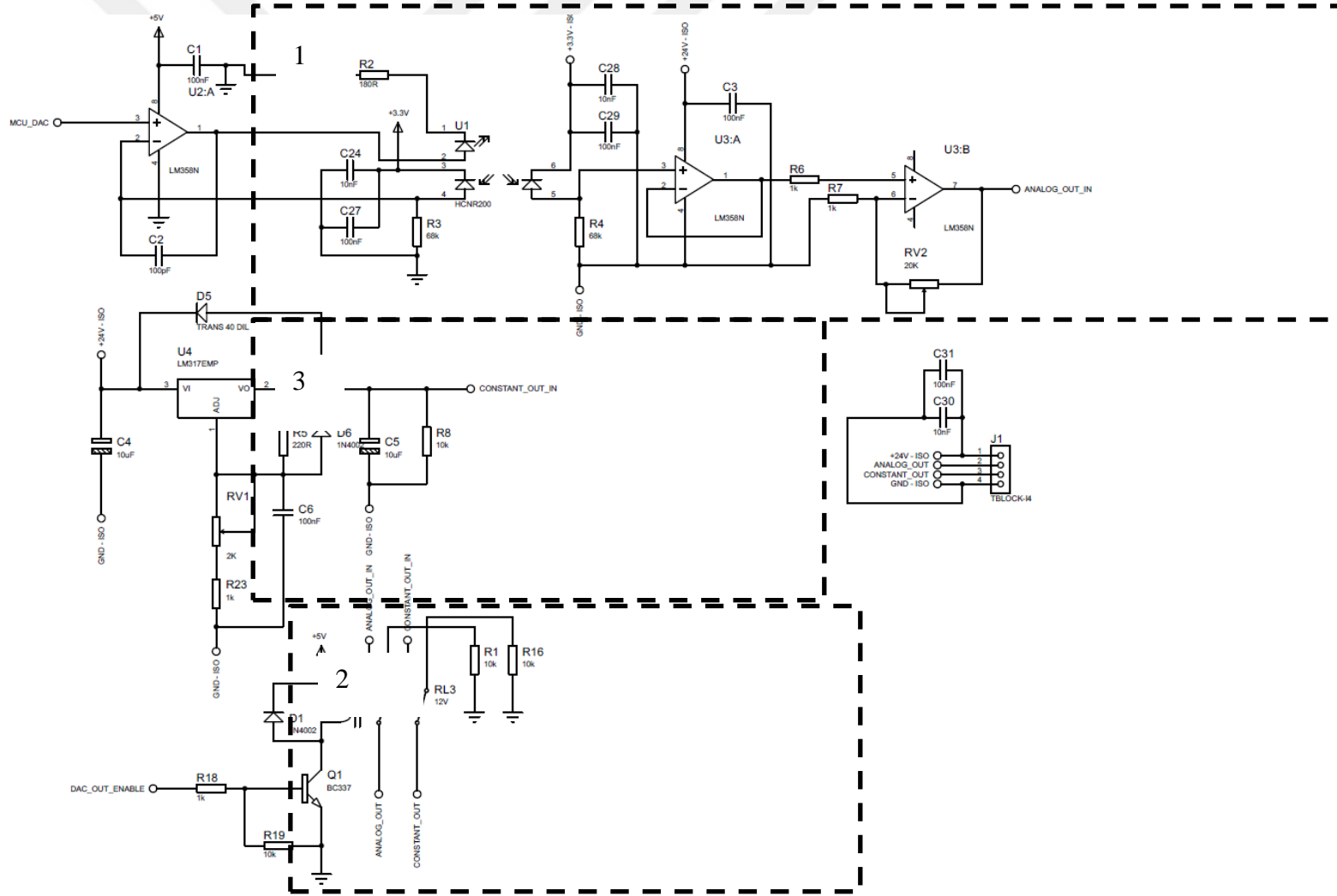
Şekil 3.9: DAC genel çalışma mantığı.

Şekil 3.9'te gösterildiği gibi DAC girişleri ikilik tabandaki sayıdan ve çıkışı analog sinyalden oluşmaktadır. Mikrokontrolör içinde bulunan DAC ünitesi genel anlamda bu yapı ile çalışmaktadır(Raghu Tumati, 2006).

Mikrokontrolör en fazla 3.3V DAC çıkışı üretebilmektedir. Bu çıkışın 20V mertebesine taşınması için OPAMP'lar kuvvetlendirici olarak kullanılacaktır. Kuvvetlendirici OPAMP olarak LM358 entegresi tercih edilmiştir.

Tasarım sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus aktüatörün daima motor ile kontak halinde olması ve sabit gerilim ile sürülen kontrol girişini besleyen lineer regülatörlü devrenin kart enerjilendiği andan itibaren çalışır durumda olmasıdır. Bu durumun bu çalışma için şöyle bir riski vardır; ayarlı analog girişi kontrol eden mikrokontrolör herhangi bir sebeple enerjilenmez veya reset durumunda kalırsa ayarlı kontrol girişi 0V mertebesinde kalacaktır. Fakat diğer yandan sabit gerilim üreten devre parçası mikrokontrolörden bağımsız olarak çalışmaya devam edecektir. Bu durumda iki kontrol girişi arasında olabilen en büyük seviyede potansiyel fark oluşacak ve kontrolsüz bir şekilde paleti harekete geçirecek, mekanik aksamın zarar görmesine neden olacaktır.

Bu bilgiler ışığında Şekil 3.10'daki şematik hazırlanmıştır. Şematikte kullanılan sinyallerin açıklamaları Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.10: Aktüatör sürüşü için hazırlanan şematik.

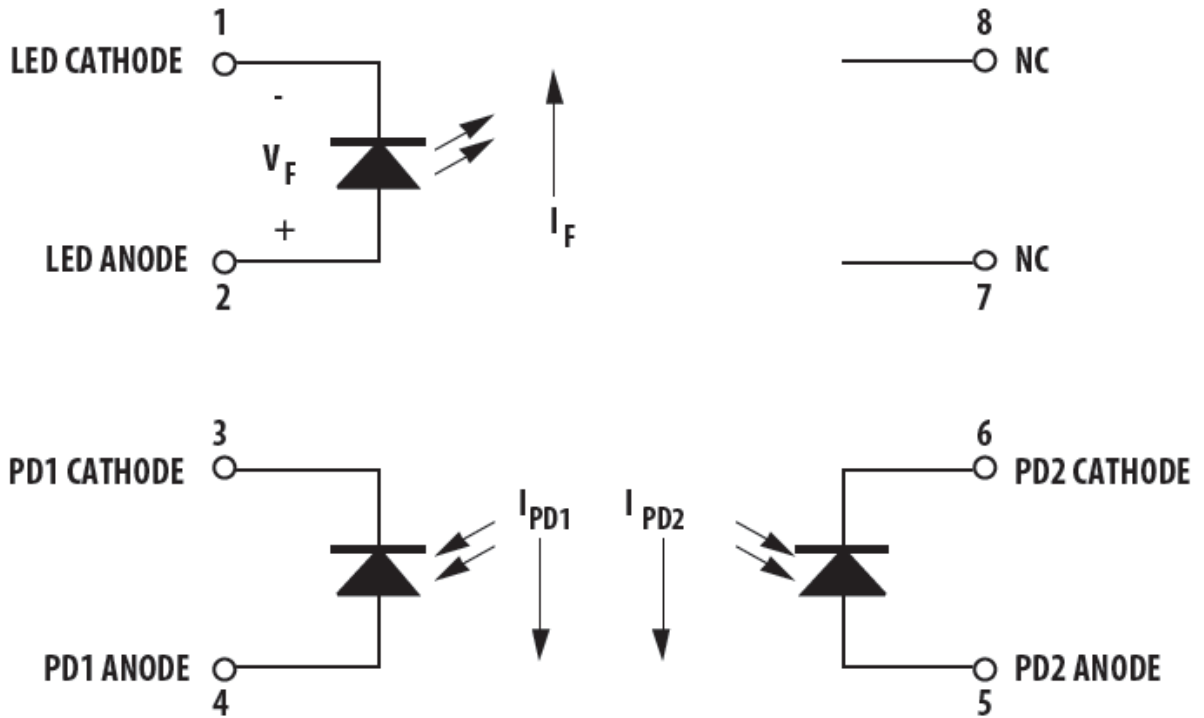
Çizelge 3.3: Şekil 3.10'daki şematikte kullanılan ifadeler ve açıklamaları.

Sinyal Adı	Açıklama
MCU_DAC	Mikrokontrolör tarafından üretilen DAC referans sinyali.
DAC_OUT_ENABLE	Aktüatörün kontrol sinyali hatlarının aynı anda enerjilendirilmesini sağlayan rölenin açma/kapama sinyali.
ANALOG_OUT_IN	Enerjilendirme rölesine giren, ilgili devre tarafından üretilen değişken kontrol sinyali.
CONSTANT_OUT_IN	Enerjilendirme rölesine giren, lineer regülatör tarafından üretilen sabit gerilim.
ANALOG_OUT	Enerjilendirme rölesinden geçerek sensöre giden değişken kontrol sinyali.
CONSTANT_OUT	Enerjilendirme rölesinden geçerek sensöre giden sabit kontrol sinyali.

Şekil 3.10'da aktüatörün sürüşü için hazırlanan şematikte tüm sinyaller üretildikten sonra J1 konnektörü üzerinden hem kontrol işaretleri uygulanmakta hem de aktüatörün enerjilendirilmesi gerçekleştirilmektedir.

Şekil 3.10'da 1. kısımda mikrokontrolörden gelen referans sinyalinin analog optokuplörden geçirilip elektriksel olarak yalıtıldıktan sonra opamp ile kuvvetlendirilerek aktüatör için uygun kontrol sinyaline dönüştüren devre parçacağıdır. Bu kısım aktüatörün ayarlı kontrol girişine uygulanacak olan 0-20V aralığındaki sinyali üretmektedir. Analog optokuplör olarak HCNR200 ve opamp olarak LM358 entegreleri tercih edilmiştir.

HCNR200 yüksek performanslı ve yüksek doğrusallığa sahip analog optokuplördür. HCNR200 entegresi bir adet LED ve 2 adet fotodiyottan meydana gelmektedir. 3,4. ve 5,6. bacaklarına bağlı olan fotodiyotlar özdeşirler. LED'e uygulanan gerilimin 2 adet fotodiyottan uygun elektriksel bağlantılarla aynı seviyede gözlenmesi beklenmektedir. Akım yönleri ve detaylı gösterimi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11: HCNR200 entegresi iç yapısı ve akım yönleri.

HCNR200 entegresinde bulunan LED için tavsiye edilen sürekli akım 1 – 20mA aralığındadır(Avago Technologies, 2014). Bu çalışmada LED'e en fazla 3.3V uygulanacaktır. Gerekli akımın sağlanması için R2 direnci denklem (3.1) ve (3.2)'deki hesaplamalara göre seçilir;

$$R2 \geq \frac{3.3}{20 \times 10^{-3}} \quad (3.1)$$

$$R2 \geq 165\Omega \quad (3.2)$$

Bu değere en yakın R2 direnci 180Ω seçilmiştir ve LED üzerinden akabilecek en büyük akım 18.3mA ile sınırlandırılmıştır.

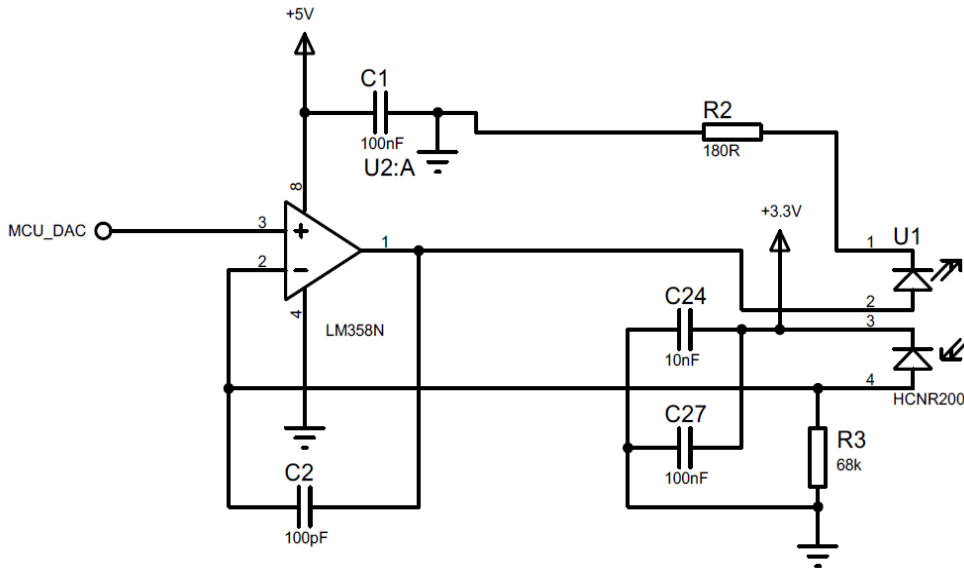
LED'den fotodiyotlara olan kazanç tipik olarak 1'dir(Avago Technologies, 2014). Şekil 3.11'da I_{PD} akımlarının kazanç 1 olduğunda en az 5nA ve en fazla 50uA olabileceği belirtilmiştir. Fotodiyotlar üzerinde LED'e uygulanan gerilimin doğrudan gözlenebileceğini bilindiğinden R3 ve R4 dirençlerine denklem (3.3) ve (3.4)'teki hesaplamalara göre karar verilir;

$$R3 \geq \frac{3.3}{50 \times 10^{-6}} \quad (3.3)$$

$$R3 \geq 66000\Omega \quad (3.4)$$

Bu çalışmada R3 ve R4 dirençleri 68kΩ seçilerek I_{PD} akımlarının en fazla 48,52μA olması garanti altına alınmıştır.

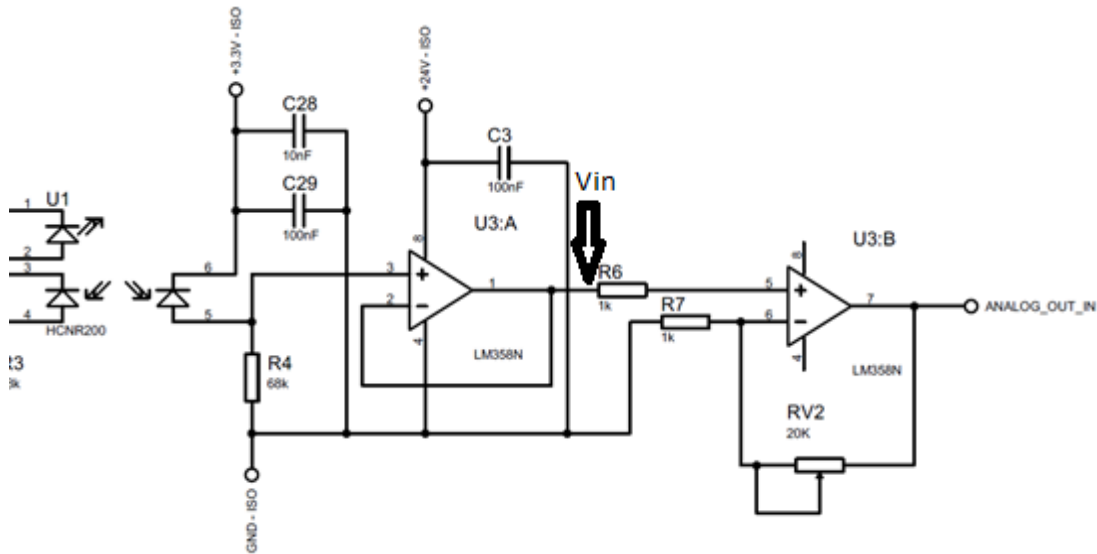
HCNR200 entegresi üzerinde 2 adet özdeş fotodiyot bulunmasının sebebi giriş ve çıkış arasında oluşabilecek olan gerilim farklarını elemine etmektir. Bu çalışmada HCNR200'ün girişi ve çıkışı arasında oluşabilecek olan bu gerilim farkları opamp kullanılarak integratör yardımı ile hatanın integrali alınıp LED sürüş çıkışına uygulanarak giderilmiştir. Şekil 3.12'de, Şekil 3.10'daki 1. Kısımındaki Opampli integratör yapısının büyütülmüş hali verilmiştir.



Şekil 3.12: Çalışmada HCNR200 hatasını düzeltmede kullanılan integratör geri beslemeli devre parçası.

HCNR200 entegresinin fotodiyotundan alınan geri besleme opampın tersleyen girişine uygulanmıştır. Burada opamp hatanın integralini almaktadır. Opampın terslemeyen girişine uygulanan referans sinyali ile arasında fark kalmayana kadar çıkış üretecektir ve HCNR200'ün ledinin fotodiyotlar üzerinde referans gerilimini oluşturacak kadar parlak yanmasını sağlayacaktır.

U1(HCNR200) entegresinin devamında elde edilen yalıtılmış analog sinyal U3(LM358) opamp entegresi üzerinden önce gerilim takipleycisi ardından gerilim kuvvetlendiricisi üzerinden geçirilerek 0 – 20V aralığına getirilmiştir. Şekil 3.10'daki 1. kısmın izole sinyali kuvvetlendiren bölümü Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13: HCNR200 entegresi kuvvetlendirici devre parçası.

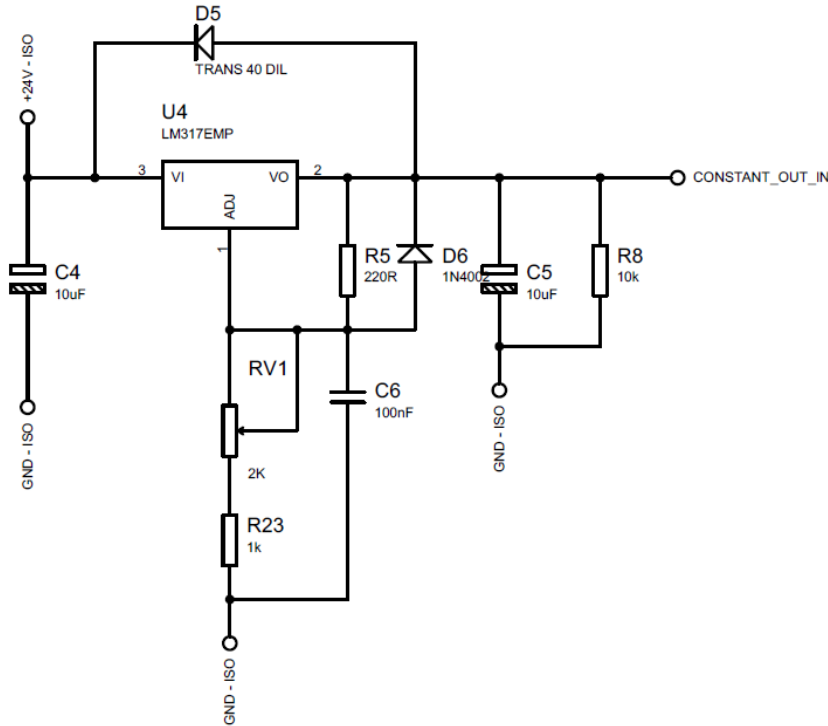
Elektriksel olarak yalıtılan referans sinyali öncelikle U3:A opampı üzerinde gerilim izleyici yapısı ile çıkışın akımı kuvvetlendirilerek U3:B opampı üzerinde 0 – 20V aralığına kuvvetlendirilmiştir. U3:B opampının çıkış kazancı denklem (3.5) ile hesaplanır;

$$V_o = \left(1 + \left(\frac{R7}{RV2} \right) \right) x V_{in} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'te V_{in} , R6 direncinden önce terslemeyen girişe uygulanan gerilimdir. Gerilim izleyici üzerinden geldiği için doğrudan referans işaretine eşittir.

Aktüatörün bir kanalı için üretilen 0 – 20V gerilimi sınırlar içerisinde kullanabilmek için diğer girişinin sabit gerilim altında olması gerekmektedir. Bunun için lineer ayarlı bir regülatör kullanılmıştır. Lineer ayarlı regülatöre ait devre şeması Şekil 3.10'da 3. Kısımda ve genişletilmiş olarak Şekil 3.14'de verilmiştir. LM317 entegresinin çıkışı RV1 potansiyometresi ile ayarlanmaktadır. LM317 entegresi çıkışındaki gerilim denklem (3.6) yardımıyla hesaplanır ve 10V'a sabitlenir;

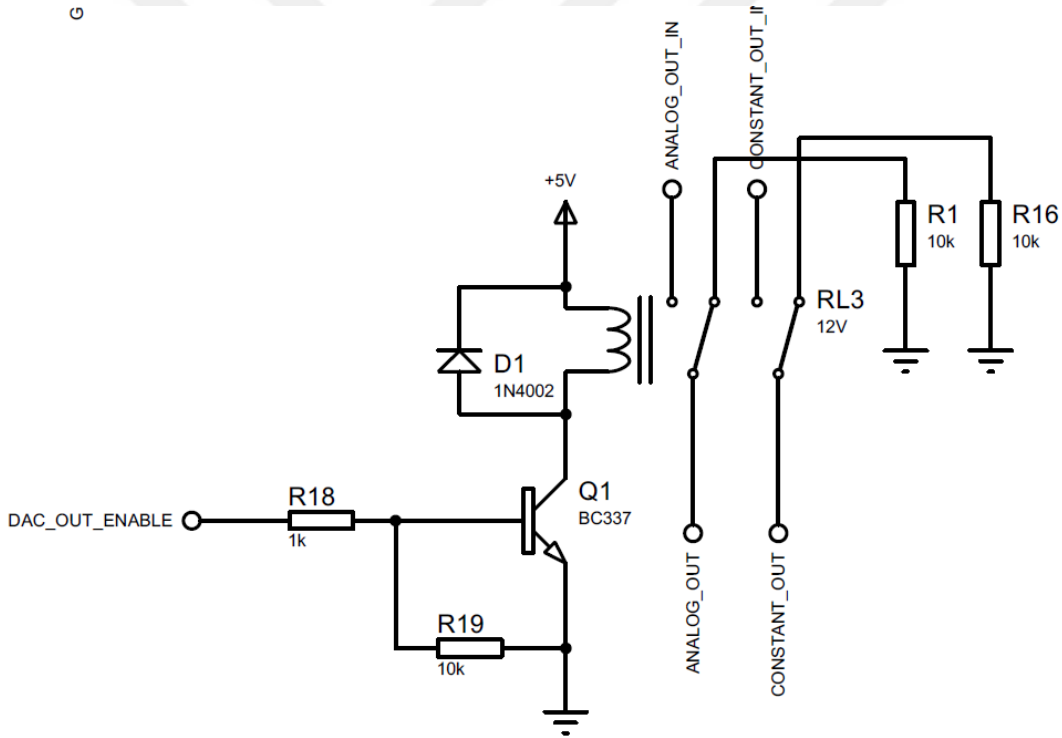
$$V_{olm} = V_{ref} x \left(1 + \frac{R_5}{RV1} \right), V_{ref} = 1.25V \quad (3.6)$$



Şekil 3.14: LM317 lineer regülatör devre parçası.

Aktüatör için şematik hazırlanırken dikkatli olunması gereken bir konuda kontrol sinyallerinin aktüatörün girişlerine aynı anda verilmesi gerektiği idi. Bununla alakalı devre Şekil 3.10'da 2. Kısımda ve genişletilmiş hali ise Şekil 3.15'de verilmiştir. Bu şemada DAC_OUT_ENABLE sinyali doğrudan mikrokontrolörden gelmektedir. Mikrokontrolörün reset anında tüm pinlerinin lojik 0 seviyesinde bulunduğu referans dosyasında belirtilmiştir. Bu bilgi ışığında reset anında lojik 0 seviyesinde bulunan pin mikrokontrolörün reseti anında rölenin normalde kapalı durumda bulunmasını sağlayacaktır. Normalde kapalı durumda ise aktüatör çıkışları pull-down dirençleri ile toprağa bağlanmıştır.

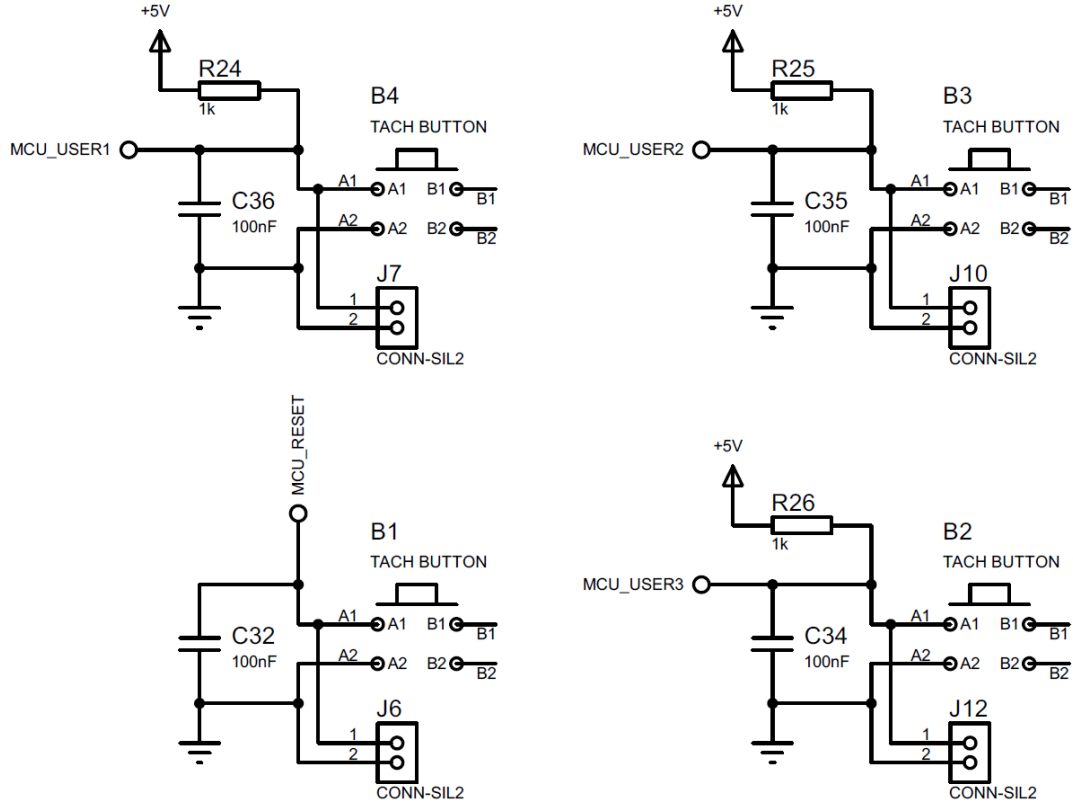
DAC_OUT_ENABLE sinyali yazılım içerisinde lojik 1 seviyesine getirildiğinde ise kontrol sinyalleri aynı anda devreye girecek ve sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayacaktır.



Şekil 3.15: Aktüatöre kontrol sinyallerini aynı anda verilmesini sağlayan devre parçası.

3.5 Butonlar İçin Donanım Tasarımı

Butonlar bu çalışmada bilgisayarlı kontrolün dışında kullanıcıya elektronik kart üzerinden de kumanda izni vermek için kullanılmıştır. Sisteme bağlı paleti ileri, geri hareket ettirmek, orta noktaya gelmesini sağlamak veya mikrokontrolöre reset atmak üzere kullanılacaklardır.



Şekil 3.16: Butonların bağlantısı.

Şekil 3.16’te gösterildiği gibi butonlar MCU_RESET pini hariç pull-up olarak bağlanmışlardır. MCU_RESET pini mikrokontrolör içerisinde dahili olarak pull-up içermektedir ve toprağa çekilmesi mikrokontrolörün reset atmasına sebep olmaktadır. Diğer pinler ise doğrudan kullanıcı kontrolündedir. Buton basışları sırasında mikrokontrolörün ilgili pininde mekanik hareketten dolayı oluşabilecek voltaj dalgalanmalarını engellemek için 100nF kapasitler paralel olarak bağlanmışlardır. Voltaj dalgalanmaları engellenmezse butonların mikrokontrolör yazılımı içinde birkaç kere okunmasına, yanlış veya sıralı tepkiler vermesine sebep olmaktadır.

3.6 Elektronik Kartın Baskı Devre Görselleri ve BOM Listesi

Çizelge 3.4 - Çizelge 3.8’de devre üzerinde kullanılan malzemelerin referans numaraları ve değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.4: Devre üzerindeki kapasiteler ve değerleri.

Kapasitörler		
Adet	Referans	Değer
17	C1,C3,C6,C7,C8,C10,C20,C21,C22,C27,C29,C31C32,C33, C34,C35,C36	100nF
1	C2	100pF
2	C4,C5	10uF
4	C13,C24,C28,C30	10nF

Çizelge 3.5: Devre üzerindeki dirençler ve değerleri.

Dirençler		
Adet	Referans	Değer
6	R1,R8,R16,R17,R19,R20	10k
1	R2	180R
2	R3,R4	68k
1	R5	220R
11	R6,R7,R11,R13,R14,R15,R18,R23,R24,R25,R26	1k
1	R9	120R
2	R10,R12	330R

Çizelge 3.5 (devam): Devre üzerindeki dirençler ve değerleri

Dirençler		
Adet	Referans	Değer
1	RV1	2k Pot
1	RV2	20k Pot

Çizelge 3.6: Devre üzerindeki tümleşik devreler ve değerleri.

Tümleşik Devreler		
Adet	Referans	Değer
1	U1	HCNR200
2	U2,U3	LM358N
1	U4	LM317
4	U5,U6,U7,U8	DC_DC_BUCK
1	U9	MAX491
2	U10,U11	6N137
1	U12	DC_DC_BOOST

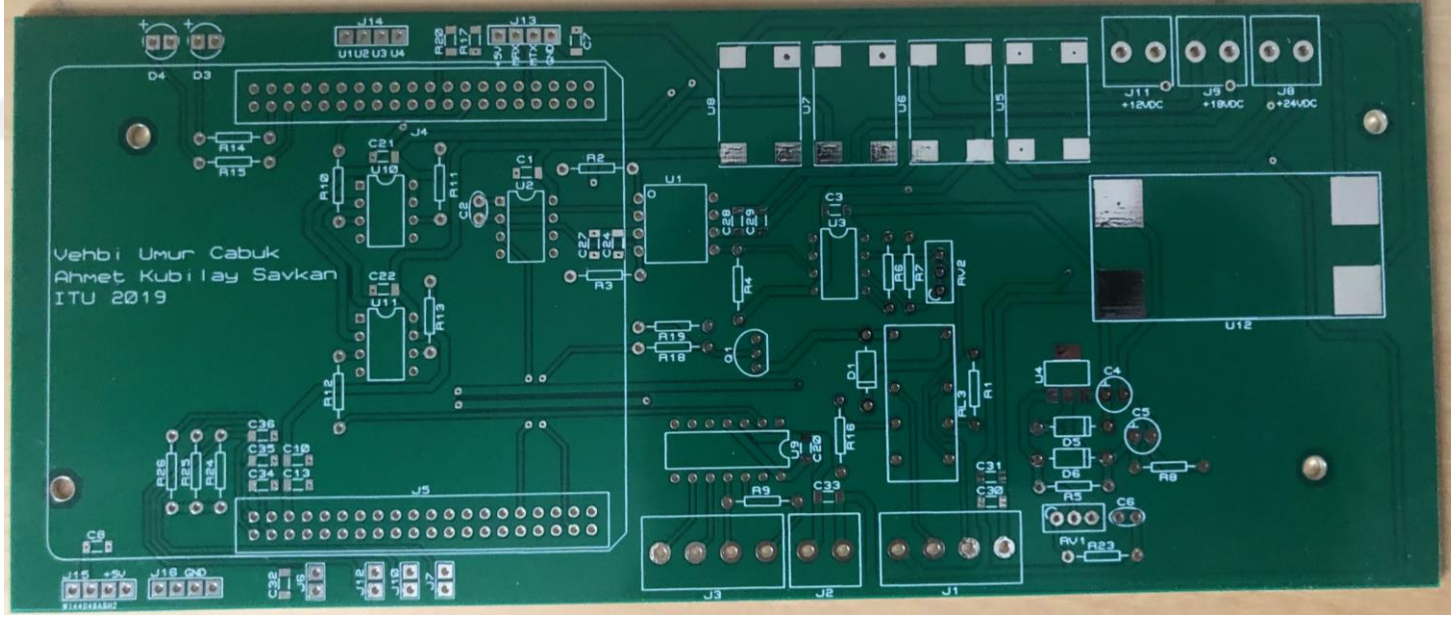
Çizelge 3.7: Devre üzerindeki diyotlar ve değerleri.

Diyotlar		
Adet	Referans	Değer
3	D1,D5,D6	1N4002
2	D3,D4	LED

Çizelge 3.8: Devre üzerindeki mekanik parçalar ve değerleri.

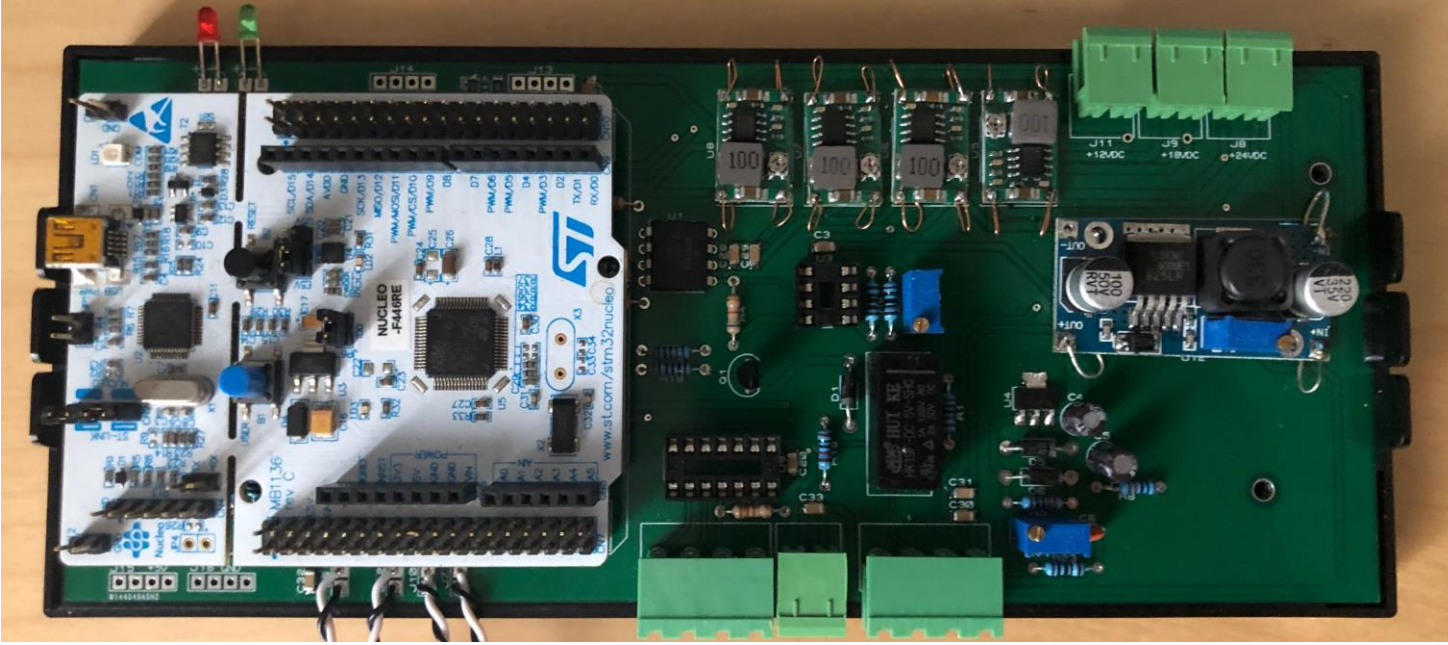
Mekanik Parçalar		
Adet	Referans	Değer
4	B1,B2,B3,B4	TACH BUTTON
1	J1,J3	90 Derece 4 Pin Soket
4	J2,J8,J9,J11	90 Derece 2 Pin Soket
2	J4,J5	Dişi 40 Pin Header
4	J6,J7,J10,J12	Erkek 2 Pin Header
4	J13,J14,J15,J16	Erkek 4 Pin Header
1	RL3	JRC-19F 5V Röle

Elektronik kartın tasarlandıktan sonra henüz komponentlerinin dizilmeden önceki hali Şekil 3.17’de paylaşılmıştır.



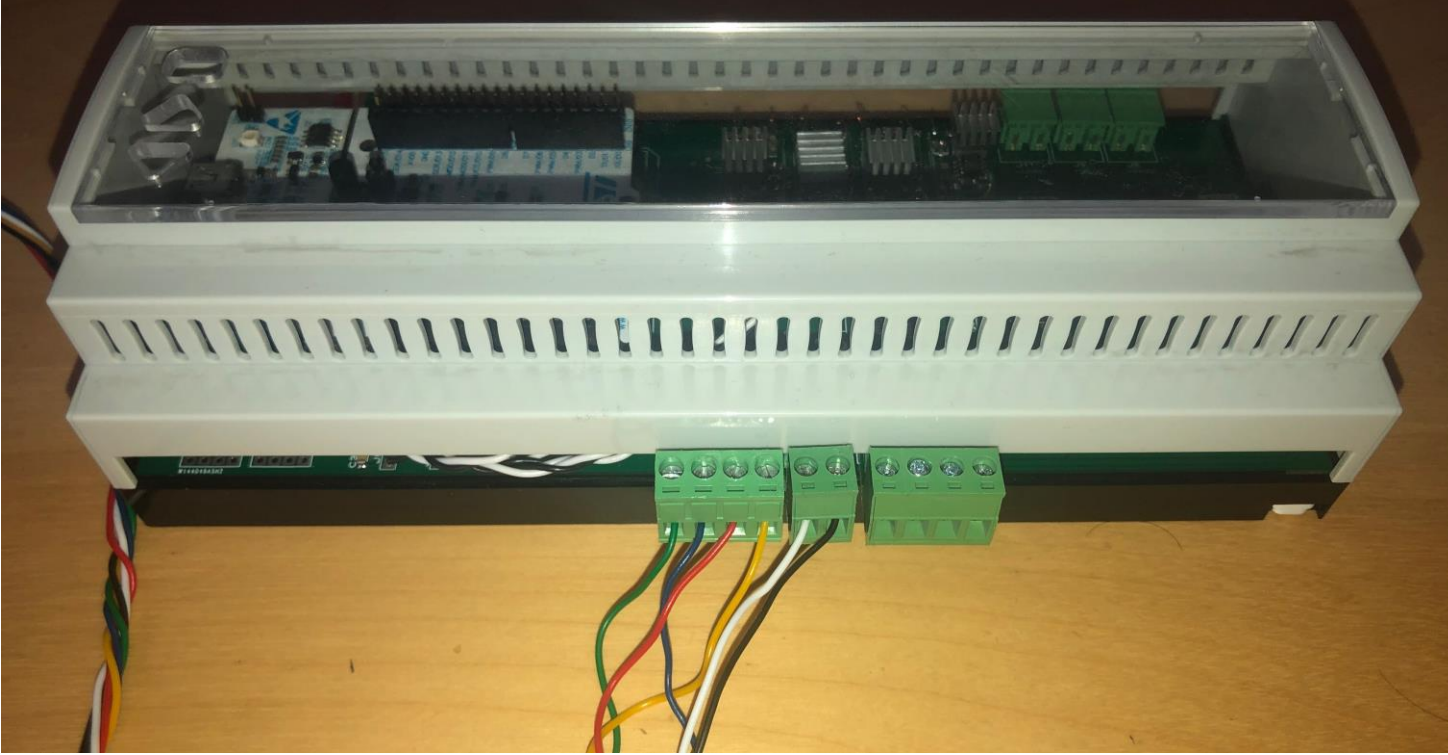
Şekil 3.17: Tasarlanan kartın hazırlanmış hali.

Elektronik kartın malzemeleri dizilmiş ve kutulanmadan önceki hali Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18: Tasarlanan kartın malzemelerinin yerleştirilmiş hali.

Son olarak kart kutulandıktan sonra çalışma alanında mevcut panoya takılmaya uygun olan kutusuna yerleştirilmiştir. Kutulanmış görseli Şekil 3.19’da paylaşılmıştır.



Şekil 3.19: Elektronik kartın kutulanmış görseli.



4. GÖMÜLÜ YAZILIM VE KONTROLÖRÜN İMPLEMENTASYONU

Yapılan çalışmada elektronik kart tasarımından sonra kart üzerinde bulunan mikrokontrolörün kendisine dijital veya analog yollar ile bağlı olan devre parçalarını kontrol etmesi gerekmektedir. Mikrokontrolör programlanabilir bir tümleşik devredir ve istenilen şekilde davranması için programlanması gerekmektedir.

Bu bağlamda elektronik kart – bilgisayar ve lineer cetvel – elektronik kart arasında mikrokontrolörün dijital haberleşme modülleri kullanılmıştır. Elektronik kart ve bilgisayar haberleşmesi geliştirme kartı üzerinde bulunan USB hattından sağlanmıştır ve elektronik kartın bilgisayar üzerinden çalışmaya, bir kullanıcı arayüzü sunmaya hazır hale gelmesi için bir iletişim protokolü belirlenmiştir.

Lineer cetvel ile olan haberleşme ise yine geliştirme kartı üzerinde bulunan SPI haberleşme modülü ile uygulanmıştır. Bu aşamada bu modüllerin kullanılması için gereken yazılım hazırlanmıştır.

Sistem modüllerinden biri olan aktüatör ile de analog yollar ile elektronik kart arasında bir kontrol sinyali hattı mevcuttur. Bu hattında istenilen şekilde çalışabilmesi için gerekli kontrolör mikrokontrolöre programlanmış ve hattın istenildiği gibi davranması sağlanmıştır.

4.1 Bilgisayar ve Elektronik Kart Haberleşmesi

Bilgisayar ve elektronik kart arasındaki haberleşme USB hattı üzerinden sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan USB hattı elektronik kart üzerinde kullanılan STM32F446 Nucleo geliştirme kartının sunmuş olduğu hata ayıklama arabirimi üzerinden bilgisayar ile iletişim kurmaktadır. Hata ayıklama birimi USB hattı ile CDC(Communication Device Class) protokolü üzerinden bilgisayar ile haberleşmektedir.

Bilgisayar, USB CDC protokolü ile USB hattına bağlanan cihaz için sanal bir haberleşme noktası(COM Port) açar ve USB üzerinden gelen verileri sanki bir seri haberleşme cihazıymış gibi kullanıcı için servis eder.

Geliştirme kartı üzerindeki mikrokontrolör ise hata ayıklama birimine UART haberleşme modülü ile bağlıdır. UART haberleşme modülü herhangi bir USB paketi işlemi yapmadan veriyi hata ayıklayıcıya gönderir ve hata ayıklayıcı bu bilgileri bir USB paketine koyarak bilgisayar tarafına iletir.

Bilgisayar ile düzenli bir haberleşme yapılabilmesi adına 10 byte'lık bir binary haberleşme protokolü oluşturulmuştur. 10 byte'lık paketin açılımı Çizelge 4.1'de verilmiştir;

Çizelge 4.1: Binary haberleşme paketlerinin ayrıştırılması.

1.Byte	2.Byte	3.Byte	4.Byte	5.Byte	6.Byte	7.Byte	8.Byte	9.Byte	10.Byte
Komut	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri	Checksum

10 byte'lık paketlerin oluşturulmasının sebebi en büyük alan kaplayan veri tipi olan “double” türündeki değişkenleri dahi transfer edebilmektir. Gelen komuta göre hangi veri tipinde verinin geldiği bilinecek ve ona göre mikrokontrolör içinde ilgili adreslere yazılacaktır.

Kontrol toplamı byte değeri ise 8 bitlik bir kontrol toplama hesaplamasıdır. Kontrol toplaması iletilirken paket içerisindeki ilk 9 Byte toplanır ve 256'ya bölünerek kalan sayı paketin sonuna 10. Byte olarak eklenerek karşı tarafa iletir. Paketi alan alıcı aynı işlemi tekrar eder ve 10. Byte ile elde edilen kalanı bulması gerekir. Eğer kontrol toplamı hesaplaması gelen paketdeki kontrol toplamı değeri ile uyuşmuyorsa pakette hata var demektir ve verinin tekrar iletilmesi gerekir. Denklem (4.1)'de matematiksel olarak gösterilmiştir.

$$\left(\sum_{n=1}^9 nByte \right) \% 256 = Checksum \quad (4.1)$$

Kullanılacak olan komutlar ve anlamlı veri boyutunu içeren bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir;

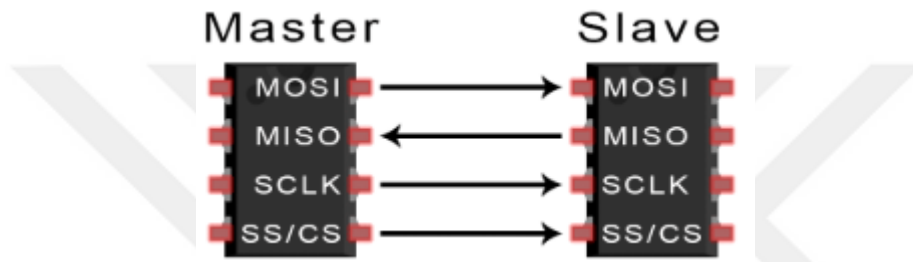
Çizelge 4.2: Bilgisayar – elektronik kart haberleşmesinde kullanılan komutlar.

Komut	İşlev	Anlamlı Veri Byte Sayısı
0x00	Cihaz Durumu	8 Byte
0x01	Referans Sinyali	8 Byte
0x02	DAC Gerilimi	8 Byte
0x03	Lineer Cetvel Bağlantı	1 Byte
0x04	Lineer Cetvel Pozisyon	8 Byte
0x05	Lineer Cetvel Hız	8 Byte
0x06	Lineer Cetvel İvme	8 Byte
0x07	Aküatör Röle Durumu	1 Byte
0x08	PID Kp Katsayısı	8 Byte
0x09	PID Ki Katsayısı	8 Byte
0x0A	PID Kd Katsayısı	8 Byte
0x0B	PID N Katsayısı	8 Byte
0x0C	PID Örnekleme Zamanı	8 Byte

4.2 Linear Cetvel – Elektronik Kart Haberleşmesi

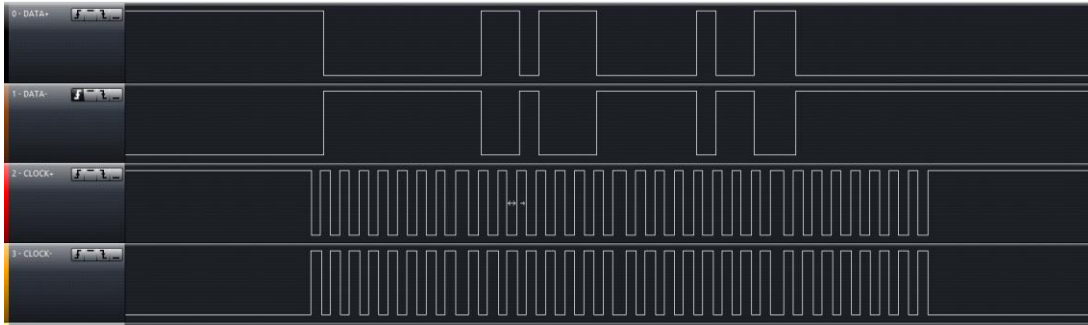
Linear cetvel ile elektronik kart arasındaki haberleşme RS-422 arayüzü üzerinden SSI haberleşme protokolü ile sağlanmıştır. SSI haberleşme protokolü mikrokontrolörün SPI modülü ile gerçekleştirilebilir ve gereken senkronizasyon sinyali üretilebilir.

SPI haberleşme protokolü temelde 4 kablolu bir haberleşmedir. Şekil 4.1’de verildiği üzere MOSI, MISO, SCLK ve CS olarak adlandırılırlar. Bu çalışmada kullanılan hatlar MISO ve SCLK’dır. SSI haberleşme arayüzünde olması gerektiği gibi bir hattan senkronizasyon sinyalleri uygulanırken(SCLK), diğer hattan gelen seri verinin(MISO) okunması gerekmektedir.



Şekil 4.1: SPI haberleşme protokolü hatları.

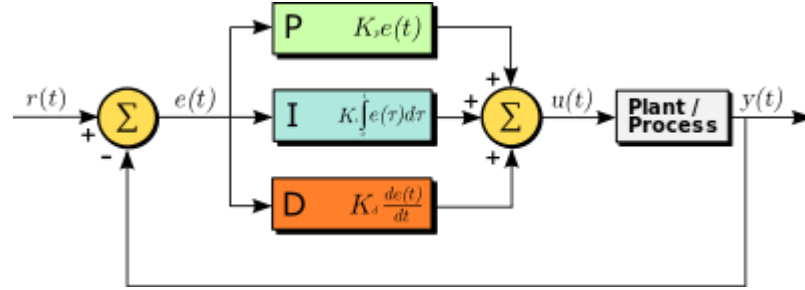
Şekil 4.2’de 4 yollu veri hattı ile diferansiyel haberleşmenin uygulanmış hali verilmiştir. DATA+ ve DATA- hatları birbirlerinin değilleri ve aynı şekilde CLOCK+ ve CLOCK-’de birbirlerinin değilleri şeklinde gözlenmektedir.



Şekil 4.2: RS-422 haberleşmesinin uygulaması.

4.3 PID Kontrolörünün İmplementasyonu

PID kontrolörü endüstride sıklıkla kullanılan bir kontrolör çeşididir. Bu uygulamada gerek tasarım rahatlığı gerekse kısa çevrim süreleri ile algoritmanın mikrokontrolör üzerinde çalıştırılabilmesi açısından tercih edilmiştir.



Şekil 4.3: PID kontrolörün paralel formu.

Şekil 4.3'te $r(t)$ referans sinyali ile $y(t)$ arasındaki farka $e(t)$ denirse, hataya bakarak kontrol sinyali üreten bir kontrolördür tanımlaması yapılır(Norman S. Nise). PID kontrolörü sürekli zamanda denklem (4.2)'deki gibi ifade edilir;

$$PID = K_p * e + K_i \int e * dt + K_d * \left(\frac{d}{dt}\right) \quad (4.2)$$

Fakat kullanılan mikrokontrolör ayrık zamanda çalıştığından sürekli zamanda ifade edilen PID kontrolörü ayrık zamanda fark denklemleri ile elde ifade edilmelidir. Ayrık zamanda çalışmada integral alma methodlarının farklılıklarından dolayı PID kontrolörü farklı fark denklemleri ile ifade edilebilir. Ayrık zamanda bir PID kontrolörü ileri Euler için denklem (4.3), geri Euler için denklem (4.4) ve trapezoidal integral metodu için denklem (4.5)'teki gibi ifade edilir(Katsuhiko Ogata, 1995);

$$C(z) = K_p + \frac{K_I * T_s}{z - 1} + \frac{K_D * N}{1 + N * T_s * \frac{z}{z - 1}} \quad (4.3)$$

$$C(z) = K_p + \frac{K_I * T_s * z}{z - 1} + \frac{K_D * N}{1 + N * T_s * \frac{z}{z - 1}} \quad (4.4)$$

$$C(z) = K_p + \frac{K_I * T_s * (z + 1)}{2 * (z - 1)} + \frac{K_D * N}{1 + N * T_s * \frac{z}{z - 1}} \quad (4.5)$$

Bu çalışmada PID kontrolörünün integral alma methodu olarak trapeozidal ve türev kısmında bulunan integral alma methodu olarak geri Euler methodu kullanılmış, denklem (4.5) tercih edilmiştir.

PID kontrolörünün fark denklemlerinin ayrıştırması denklem (4.6), (4.7) ve (4.8)'de verilmiştir. $e(k)$ referans sinyal ile sistem çıkışı arasındaki hatayı, $u(k)$ referans sinyalini ve $y(k - 1)$ sistemin bir adım önceki çıkışını ifade etmektedir.

$$P = K_p * e(k) \quad (4.6)$$

$$D = \frac{K_D * N(u(k) - u(k - 1)) + y(k - 1)}{N * T + 1} \quad (4.7)$$

$$I = \frac{K_I * T(u(k) + u(k - 1)) + 2 * y(k - 1)}{2} \quad (4.8)$$

C dili ile mikrokontrolör içine kodlanan bu kontrolcünün parametreleri bilgisayar haberleşmesi üzerinden ayarlanabilmektedir.

4.4 Cihazın Durumları Arasında Geçişler

Tasarlanan elektronik kart üzerinde bulunan butonlar ile sistem kontrol edilebilmektedir. Elektronik kart üzerinde bir kullanıcı arayüzü olmadığından basit işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Uzaktan kontrol modunda ise bilgisayar kullanıcı arayüzünün sağladığı tüm faydalardan yararlanılmaktadır. Detaylı cihaz durumları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Buton girişleri ve diğer olayların meydana gelmesi ile cihaz durumunun değişimi.

OLAY	CİHAZ DURUMU	GELECEK CİHAZ DURUMU	YEŞİL LED DURUMU	KIRMIZI LED DURUMU	SİSTEM HAREKETİ
-YOK-	Manuel Mod	Manuel Mod	Yanar söner	Sönük	Hareketsiz
-YOK-	Uzaktan Kontrol Modu	Uzaktan Kontrol Modu	Yanar	Sönük	Hareketsiz
İleri Buton Basışı	Manuel Mod	Manuel Mod	Yanar söner	Sönük	Lineer cetvel 1 cm ileri
İleri Buton Uzun Basışı	Manuel Mod	Manuel Mod	Yanar söner	Sönük	Lineer cetve sabit hız ile ileri
Geri Buton Basışı	Manuel Mod	Manuel Mod	Yanar söner	Sönük	Lineer cetvel 1 cm geri
Geri Buton Uzun Basışı	Manuel Mod	Manuel Mod	Yanar söner	Sönük	Lineer cetve sabit hız ile geri
Uzaktan Kontrol Buton Basışı	Manuel Mod	Uzaktan Kontrol Modu	Yanar	Sönük	Hareketsiz
Uzaktan Kontrol Buton Basışı	Uzaktan Kontrol Modu	Manuel Mod	Yanar söner	Sönük	Hareketsiz
Uzaktan Kontrol Buton Uzun Basışı	Manuel Mod	Manuel Mod	Yanar söner	Yanar söner	Lineer Cetve orta konuma gelir
Sistemsal Arıza	Herhangi Bir Mod	Hata Modu	Sönük	Yanar	Hareketsiz



5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada endüstriyel bir ortamda kullanılmak üzere elektronik kart tasarlanmış ve gerekli olabilecek dijital kontrolörler yazılım içerisine implemente edilmiştir. İmplemente edilen kontrolörün parametreleri kullanıcı tarafından ayarlanması için bilgisayar haberleşmesi ile dış dünyaya açılmış ve kullanıcı arayüzü hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan kullanıcı arayüzü, hesaplanmış olan kontrolör parametreleri ve simülasyon ortamında yapılan uygulama bu çalışma ile paralelde Ahmet Kubilay Şavkan ile birlikte yürütülen çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. Uygulamada STM32F446RE mikrokontrolörü ve bu mikrokontrolöre ait STM32F446 Nucleo geliştirme kiti kullanılmıştır.

Endüstriyel ortamlarda genellikle PLC gibi cihazlar kullanılmakta ve çevre birimleriyle birlikte satın alan kişiler veya firmalar için oldukça maliyetli olmaktadır. Bazı şartlar altında ise müşteri tarafında tüm isterleri ve arayüzleri gerçekleştirememektedirler.

Bu çalışma kapsamında PLC ve çevre birimleri gibi endüstriyel ortamlarda çalışmaya uygun, maliyet anlamında daha ucuza gelecek ve müşterinin tüm isterlerini karşılamayı hedefleyen doğrudan doğruya amaca yönelik bir elektronik kart tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla elektronik kart üzerinde gürültüyü en aza indirgeyecek ve devre parçaları arasında izolasyonu sağlayacak topolojiler uygulanmıştır. Çalışma kapsamında sinyal izolasyon metodları öncelikle devre nihai haline gelmeden önce test edilmiş ve uygulamaya konulmuştur. Böylece elektronik devrede elektriksel girişimler azaltılmıştır.

Bir diğer amaç ise sistem bileşenlerinin izolasyonudur. Bu amaçla devre parçalarını beslemek için farklı trafolar kullanılmış ve izolasyon sağlanmıştır. Ancak bu sorunun çözümü için daha sistematik yöntemlerin kullanılabileceği bilinmektedir.

En son aşamada ise test edilen ve tasarlanan tüm devreler ortak bir elektronik kart üzerine bir araya getirilmiş ve endüstriyel panolara takılabilmesi için uygun bir kutunun boyutlarında tasarlanmışlardır. Ayrıca PID kontrolörü ve gerekli yazılımlar mikrokontrolör üzerinde implemente edilmiştir.

Devre tasarımı ve gömülü yazılım özelinde gelecekte yapılabilecek geliştirmeler mevcuttur. Devre tasarımında daha düzenli ve profesyonel bir görünüm için flyback besleme katı tasarımı, kullanılan mikrokontrolörün geliştirme kartı üzerinde değilde doğrudan PCB üzerine montesi ve analog kanallardan geri besleme alınması için ilgili devre tasarımları gerçekleştirilebilir.

Gömülü yazılım geliştirmeleri içinse; sık kullanılan dalga modellerinin mikrokontrolör içerisinde kayıtlı hale getirilmesi gösterilebilir. Bu tarz bir geliştirme için otomatik modda bilgisayar üzerinde koşan bazı kontrolcülerinde mikrokontrolöre implementasyonu gerekir. Mikrokontrolör içine yazılacak yada gönderilecek olan dalga modellerinin kullanımını ise basit tuş kombinasyonları yada uygun grafik LCD yada karakter LCDli kullanıcı arayüzü ile sağlanabilir. Böylece kartın kullanılabilirliği artırılabilir.

KAYNAKLAR

Avago Technologies (2014), HCNR200 and HCNR201 High-Linearity Analog Optocouplers

Barnett David, Groth David, McBee Jim (2004), Cabling: The Complete Guide to Network Wiring, Third Edition

Black, Paul E. (2004), Gray Code

Electronic Industries Association Engineering Department (1994), TIA/EIA-422-B, Electrical Characteristics of Balanced Digital Interface Circuits

Karayel H. Barış, Okan M. Barbaros (2007), Ata Nutku Gemi Model Havuzu Dalga Cihazı Yenileme Çalışması, Teknik Rapor

Katsuhiko Ogata (1995), Discrete-Time Control Systems

Maxim Integrated (2014), Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers

MTS SENSORS (2014a), Magnetostrictive, Absolute, Non-contact Linear-Position Sensors

MTS SENSORS (2014b), Magnetostrictive Linear-Position Sensors

Norman S. Nise, Control Systems Engineering

POSITAL FRABA (2013), Implementation of SSI Master Interface Application Note

Raghu Tumati (2006), Digital to Analog Converter

Vishay (2016), High Speed Optocoupler, Single and Dual, 10MBd



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Vehbi Umur Çabuk
Doğum Tarihi ve Yeri : 21.07.1992, İstanbul
E-posta : umurcabuk@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 1 Kasım 2016'da Arçelik A.Ş.'de Gömülü Yazılım Mühendisi olarak çalışmaya başladı.
- Temmuz 2015 ve Haziran 2016 tarihleri arasında SEETech Elektrik ve Yazılım şirketinde uzun dönem stajyerlik yaptı.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Şavkan A.K., Çabuk V.U., Kahraman R., Karaduman F., Kırıl O., Sezer V.** 2018. Design and Control of a Tennis Ball Collector Robot. 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology, October 25-27, 2018 İstanbul, Turkey.