
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ETHERCAT TABANLI ENDÜSTRİYEL BİLGİSAYAR TASARIMI

Yunus DÖNMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yunus DÖNMEZ

02/08/2024

ETHERCAT TABANLI ENDÜSTRİYEL BİLGİSAYAR TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Yunus DÖNMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2024

ÖZET

Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarının gerçekleştirilmesinde saha veri yolu sistemler, nesnelerin interneti tabanlı haberleşme protokolleri ve endüstriyel Ethernet tabanlı iletişim ağları kullanılmaktadır. Yüksek hızlara ulaşılması gereken, haberleşmenin gerçekleştirildiği cihazlar arasındaki gecikmenin önemli olduğu, veri güvenliği için özel önlemlere ihtiyaç duyan sistemlerde haberleşmenin sağlanması için kullanılan EtherCAT mimarisi; EtherCAT efendi ve EtherCAT köle cihazlar kullanılarak sağlanmaktadır. EtherCAT efendi cihazın geliştirilmesi için kullanılan işlemciye ait çekirdek ve iş parçacığı sayısı, işlem gücü, bellek alt yapısı ve sağladığı fiziksel ara yüzler endüstriyel haberleşme için önemlidir. Tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen endüstriyel bilgisayar tasarımında Intel Xeon-D serisi işlemci ve AMD Ultrascale+ serisi FPGA, EtherCAT efendi ve EtherCAT köle uygulamalar için ihtiyaç duyulan gereksinimleri karşılamak için kullanılmıştır. Donanımda bulunan AMD Radeon serisi grafik işlemcisi diğer uygulamalardan farklı olarak kullanıcıların hem görüntü işleme uygulamaları geliştirmelerine hem de endüstriyel kontrol uygulamaları sırasında grafiksel ara yüzlerden yararlanmalarına olanak tanımaktadır. Endüstriyel tesislerde kullanılan cihazlar yüksek sıcaklık, nem ve elektromanyetik etkileşim gibi çevresel etkilerden etkilenmektedir. Tasarımda kullanılan malzemelerin seçimi aşamasında endüstriyel bilgisayarın uzun süreli aşırı çevresel etkilerden korunabilmesini sağlamak için endüstriyel seviye elektronik malzemeler seçilmiştir. PCB yığın tasarımında, malzeme yerleşiminde ve layout tasarımında alınan önlemlerle birlikte gerçekleştirilen sinyal bütünlüğü ve güç bütünlüğü analizleri ile tasarım doğrulanmış ve Linux veya Windows ortamında açık kaynak kodlu yazılımların kullanılabileceği EtherCAT mimarisinin uygulandığı endüstriyel bilgisayar tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu	:	93447
Anahtar Kelimeler	:	EtherCAT efendi, EtherCAT köle, endüstriyel bilgisayar, donanım tasarımı, sinyal ve güç bütünlüğü
Sayfa Adedi	:	43
Danışman	:	Doç. Dr. Ali SAYGIN

ETHERCAT BASED INDUSTRIAL COMPUTER DESIGN

(M. Sc. Thesis)

Yunus DÖNMEZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2024

ABSTRACT

Fieldbus systems, IoT communication protocols, and industrial Ethernet communication networks are used in the realisation of industrial automation and control applications. EtherCAT architecture is used to ensure communication in systems that require high speeds, where the delay between devices with which communication is carried out is significant, and in systems that require special measures for data security; it is provided using EtherCAT master and EtherCAT slave devices. The number of cores and threads of the processor used to develop the EtherCAT master device, processing power, memory, and the physical data interfaces it provides are important for industrial communication. In the industrial computer design within the scope of the thesis, an Intel Xeon-D series processor and an AMD Ultrascale+ series FPGA were used to meet the requirements needed for EtherCAT master and EtherCAT slave applications. Unlike other applications, the AMD Radeon series graphics processor included in the hardware allows users to both develop image-processing applications and use it as a graphical interface during industrial control applications. Devices used in industrial facilities are affected by environmental effects such as high temperatures, humidity, and electromagnetic affect. During the selection of electronic components used in the design, industrial level electronic components were selected to ensure that the industrial computer can be protected from long-term extreme environmental effects. The design was verified with signal integrity and power integrity analyses carried out together with the precautions taken in PCB Stack-Up design, component placement, and layout design, and an industrial computer design was realised in which the EtherCAT architecture, in which open source software can be used in a Linux or Windows environment, was implemented.

Science Code : 93447

Key Words : EtherCAT master, EtherCAT slave, industrial computer, hardware design, signal and power integrity

Page Number : 43

Supervisor : Assoc. Dr. Ali SAYGIN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim hayatım boyunca ve tez sürecinde çalışma konumun belirlenmesi ve çalışmanın gerçekleştirilmesi sürecindeki katkılarının yanı sıra bana olan desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ali SAYGIN'a teşekkür ederim.

Çalıştığım kurum olan TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN Donanım Tasarım Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm çalışma arkadaşlarıma ve yöneticim Sayın Dr. İsa Servan UZUN'a sunduğu imkânlar için teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve tüm hayatım boyunca bana koşulsuz güvenen annem ve babama teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana gösterdiği anlayış, sabır ve sürekli desteği için sevgili eşim Yeşim DÖNMEZ'e çok teşekkür ederim. Son olarak, ona ayırmam gereken zamandan feragat ettiğim, süreç boyunca oyun arkadaşı olamadığım canım oğlum Yağız'a ve heyecanla dünyaya gelmesini beklediğimiz güzel kızıma çok teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. ENDÜSTRİYEL OTOMASYON VE KONTROL SİSTEMLERİ 3

2.1. Otomasyon Piramidi 4

2.2. Endüstriyel Kontrol Ekipmanları 6

2.3. Endüstriyel Haberleşme Ağları 7

2.3.1. Saha veri yolu haberleşme protokolleri 8

2.3.2. Endüstriyel nesnelerin interneti haberleşme protokolleri 11

2.3.3. Endüstriyel Ethernet haberleşme protokolleri 14

2.3.4. EtherCAT haberleşme protokolü 16

3. ENDÜSTRİYEL BİLGİSAYAR TASARIMI 21

3.1. Mimari Tasarım 21

3.1.1. İşlemci birimi 22

3.1.2. FPGA birimi 23

3.1.3. GPU birimi 23

3.1.4. EtherCAT efendi yazılım birimi 24

3.1.5. EtherCAT köle yazılım birimi 24

Sayfa

3.2. Şematik Tasarım 24

3.3. Güç Dağıtım Ağı Tasarımı ve Analizi 29

3.4. Stack-Up Hesaplamaları, Yerleşim ve Layout Tasarımı 30

3.5. Gerilim Düşümü Analizi 33

4. TARTIŞMA 35

5. SONUÇ ve ÖNERİLER 39

KAYNAKLAR 41

ÖZGEÇMİŞ 43

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Saha veri yolu haberleşme protokolleri karşılaştırması 11

Çizelge 2.2. IIoT haberleşme protokolleri karşılaştırması 14

Çizelge 3.1. Empedans hesaplamaları..... 31

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Otomasyon piramidi 5

Şekil 2.2. EtherCAT veri yapısı 18

Şekil 3.1. Endüstriyel bilgisayar mimarisi 21

Şekil 3.2. Intel Xeon-D mimarisi 23

Şekil 3.3. İşlemci - hafıza birimi fly by topolojisi 25

Şekil 3.4. İşlemci RJ-45 konektör bağlantı bilgileri 26

Şekil 3.5. İşlemci PCIe bağlantıları 26

Şekil 3.6. FPGA RJ-45 konektör bağlantı bilgileri 27

Şekil 3.7. GPU DisplayPort bağlantıları 28

Şekil 3.8. Güç dağıtım ağı analizi 29

Şekil 3.9. Stack-Up yapısı 30

Şekil 3.10. Endüstriyel bilgisayar donanımı 3 boyut görüntüsü – üst kat 32

Şekil 3.11. Endüstriyel bilgisayar donanımı 3 boyut görüntüsü – alt kat 32

Şekil 3.12. İşlemci VCCIN gerilim düşümü analizi 33

Şekil 3.13. GPU VCC_Core gerilim düşümü analizi 34

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
mA	Mili amper
A	Amper
V	Volt
m	Metre
km	Kilometre
Kbps	Kilo bit per second
Mbps	Mega bit per second
Gbps	Giga bit per second
GHz	Giga hertz
W	Watt

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ADS	Automation Device Specification
AMD	Advanced Micro Devices
AoE	ADS over EtherCAT
ANSI	American National Standards Institute
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BIOS	Basic Input / Output System
BMBF	The Federal Ministry of Education and Research
Canbus	Controller Area Network Bus
CBA	Component Based Automation
CoE	CAN Application Protocol over EtherCAT Interface
CIP	Common Industrial Protocol
CPLD	Complex Programmable Logic Device

Kısaltmalar	Açıklamalar
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundancy Check
CoAP	Constrained Application Protocol
DA	Destination Address
DCS	Distributed Control System
DDR	Double Data Rate
DP	Decentralized Peripherals
DSP	Digital Signal Processing
DTLS	Datagram Transport Layer Security
DVI	Digital Visual Interface
EBC	EtherCAT Branch Controller
ECC	Error Correction Code
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
EoE	Ethernet over EtherCAT
ERP	Enterprise Resource Planning
ESD	Electrostatic Discharge
ETG	EtherCAT Technology Group
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology
FCS	Frame Check Sequence
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
FMS	Fieldbus Message Specification
FoE	File Access over EtherCAT
FSoE	FailSafe over EtherCAT
GDDR	Graphics Double Data Rate
GPU	Graphical Processing Unit
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HMI	Human Machine Interface
HTML	Hypertext Mark-up Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
IEC	International Electrotechnical Commission

Kısaltmalar	Açıklamalar
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
IO	Input Output
IP	Internet Protocol
IRT	Isochronous Real Time
IS	Intrinsic Safety
ISA	International Society of Automation
I2C	Inter-Integrated Circuit
ISO	International Organization for Standardization
JSON	JavaScript Object Notation
LDO	Low Dropout
LPC	Low Pin Count
LRC	Longitudinal Redundancy Check
MAC	Medium Access Control
MES	Manufacturing Execution System
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MTU	Master Terminal Unit
ODVA	Open DeviceNet Vendors Association
PA	Process Automation
PAD	Padding
PCB	Printed Circuit Board
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express
PHY	Physical Layer
PI	Power Integrity
PID	Proportional-Integral-Derivative
PLC	Programmable Logic Controller
Profibus	Process Field Bus
Profinet	Process Field Net
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio Frequency Identification
RMII	Reduced Media Independent Interface

Kısaltmalar	Açıklamalar
RT	Real Time
RTU	Remote Terminal Units
RS	Recommended Standard
SA	Source Address
SATA	Serial Advanced Technology Attachment
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International
SERDES	Serializer / Deserializer
SFD	Start Frame Delimiter
SFR	Special Function Register
SI	Signal Integrity
SIL	Safety Integrity Level
SoE	Servodrive-Profile over EtherCAT
SoM	System on Module
SPI	Serial Peripheral Interface
SSD	Solid State Drive
SSL	Secure Sockets Layer
TCP	Transmission Control Protocol
TLS	Transport Layer Security
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator
USB	Universal Serial Bus
XML	Extensible Markup Language

1. GİRİŞ

Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri, modern üretim süreçlerinin temel taşlarından biridir. Bu sistemler, üretim verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve insan hatasını minimize etmek amacıyla geniş bir yelpazede uygulamalara sahiptir. Otomasyon sistemlerinin temel amacı, tekrarlayan ve karmaşık görevleri insan müdahalesi olmaksızın gerçekleştirebilmektir. Bu amaç doğrultusunda, hassas kontrol ve hızlı veri iletimi büyük önem taşımaktadır.

Gelişen teknolojik gelişmelerle birlikte endüstriyel tesislerin gereksinimleri teknolojiye ayak uydurmak zorunda kalmış, nesnelerin interneti, bulut bilişim, yapay zekâ, büyük veri gibi teknolojiler Endüstri 4.0 tanımı altında endüstriyel tesisler için lüks olmaktan çok zorunluluk haline gelmeye başlamıştır. Verinin ve haberleşmenin ön plana çıktığı bu süreçte PLC, DCS vb. geleneksel kontrol yöntemleri yerlerini yüksek işlem gücü, dayanıklılık ve yüksek performans imkânı sunan sunucu ve bilgisayarlara bırakmıştır.

Tez konusu geliştirilen tasarımın amacı günümüz endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarının gerektirdiği yüksek hızlara ulaşabilen, veri iletişiminde gecikmeniz en aza indirgenebildiği, veri güvenliği ve sağladığı fiziksel alt yapı sayesinde çeşitli ağ topolojilerini destekleme alt yapısına sahip endüstriyel bilgisayar tasarımı gerçekleştirmektir. Tasarımın bir diğer önemli amacı ise endüstriyel ortamların olumsuz etkilerine karşı alınan önlemlerle birlikte dışa bağımlılığı azaltan yerli endüstriyel bilgisayar tasarımı gerçekleştirerek endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında kullanılan yazılımların yerlileştirilmesine alt yapı sağlamaktır.

Tez konusu yapılan bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen endüstriyel bilgisayar donanımına ait sistem ve donanım mimarisi, şemalar, stack-up tasarımı, malzeme yerleşimi, layout tasarımı ve tasarımda alınan özel önlemlerle birlikte hesaplamalar ve analizler ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Tasarlanan endüstriyel bilgisayar donanımı EtherCAT tabanlı endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamaları gereksinimlerini karşılamak için geliştirilmiş olmasına rağmen

donanıma ait işlemci, FPGA, GPU ve çevre birimleri geliştirilen donanımın endüstriyel uygulamaların dışındaki uygulamalarda da kullanılabilmesine imkân sunmaktadır.

Bir sonraki bölümde endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerine ait hiyerarşi, süreçlerde kullanılan cihazlar, haberleşme protokolleri ve tez konusu çalışmanın üzerine kurgulandığı endüstriyel Ethernet tabanlı EtherCAT protokolü hakkında teknik bilgiler aktarılmıştır. Üçüncü bölüm tasarlanan endüstriyel bilgisayar donanımına ait sistem mimarisi ve mimariyi oluşturan temel donanım ve yazılım birimleri ile birlikte donanım tasarım süreci, kullanılan metotlar, tasarımda alınan özel önlemler, hesaplamalar ve yapılan analizleri içermektedir. Dördüncü bölümde literatür taraması yapılarak tez konusu ürüne benzer çalışmalar özetlenmiş, geliştirilen sistemle aralarındaki farkları belirtilmiştir. Son bölümde ise yapılan çalışma sonuçları belirtilerek elde edilen kazanımlar, sistemin benzer ürünlerden farkları ve gelecekte aynı donanım kullanılarak gerçekleştirebilecek uygulamalar hakkında bilgi verilmiştir.

2. ENDÜSTRİYEL OTOMASYON VE KONTROL SİSTEMLERİ

Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri bir üretim sürecinde veya kontrol uygulamasında insan etkisini asgari seviyeye çekerek süreçlerin otomatik olarak uygulanmasını amaçlayan, uygulandığı alanda yer alan cihaz, makine veya ekipmanlardan aldığı bilgileri sistemi içerisinde yer alan donanım, yazılım ve haberleşme çözümleriyle otomatik aksiyon alabilen bilgiye dönüştüren sistemlerdir. Üretim ve montaj hatlarında, savunma sanayi uygulamalarında, otomotiv, madencilik, kimya, inşaat, haberleşme, ulaşım ve enerji sektörlerinde kullanılan endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri makinelerin, sistemlerin ve süreçlerin otomatikleştirilmesine, takip edilmesine ve kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır.

Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinin en önemli faydası insan etkisinden bağımsız olarak sürekli ve kesintisiz çalışarak üretim süreçlerini hızlandırması ve hataları azaltarak üretim verimliliğini artırmasıdır [1]. Bu sayede çok daha kısa sürede daha fazla ürün üretilebilmektedir. Üretim veriminin artmasının sağladığı maddi kazançların yanı sıra çalışanlardan kaynaklanan hataların minimum seviye inmesi ve enerji verimliliği gibi konuları düşündüğümüzde süreçlerde endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinin uygulanması ürün maliyetini de düşürmektedir.

Uygulamalarda kullanılan sensörler, röleler, kontrol cihazları ve analiz yazılımları sayesinde ürünlerin tutarlı ve yüksek kalitede ve hassas olarak üretilmesi sağlanabilmektedir. Bu durum ürünlerdeki fire oranını azaltarak maddi kazanç sağlamaktadır.

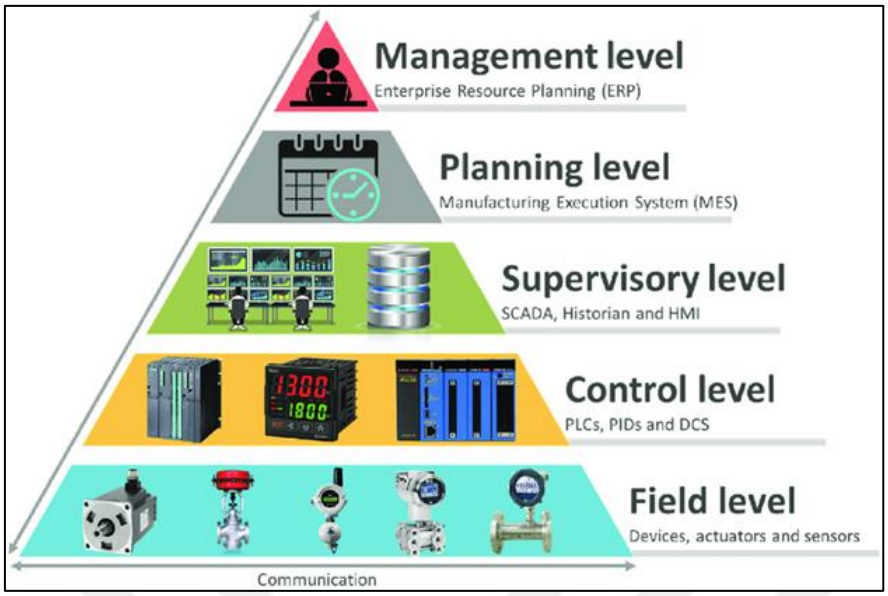
Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte iş güvenliği, süreç güvenliği ve veri güvenliği gibi alanlarda oldukça önemli kazanımlar elde edilmiştir. Tehlikeli, ağır ve zorlu çalışma koşullarında süreçlerin makineler tarafından yapılması insan müdahalesini en aza indirerek iş güvenliğini artırmakta, iş kazalarını azaltmaktadır. Ayrıca, acil durumlarda hızlı ve doğru tepkiler vererek kazaların önlenmesine de olanak sağlamaktadır.

Sistemlerde yer alan otomasyon cihazları, endüstriyel süreçleri sürekli olarak izleyerek ve kontrol ederek süreçlerdeki anormallikleri veya arızaları anında tespit ederek cihazlara müdahale etme imkânı sunmaktadır. Üretim süreçlerinin sürekli izlenmesi ve takip edilmesi performans değerlendirmeleri yapılabilmesine ve planlamalar gerçekleştirilerek süreçlerin optimize edilebilmesini de sağlamaktadır. Bu çalışmalar süreçlerdeki insan kaynağı kullanımı, malzeme ve enerji yönetimi gibi konuların daha verimli kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Sistem içerisinde yer alan veri analiz cihazlarında sahada yer alan cihazlardan alınan verilerin toplanması ve bu verilerin büyük veri ve makine öğrenmesi uygulamalarında kullanılması, sistemlerde kullanılan makinelerde karşılaşılabilecek arızaların kolayca önceden tespit edilebilmesine olanak sağlayarak önleyici bakıma yardımcı olmakta ve kolaylıkla büyük arızaların önüne geçilebilmektedir. Makinelerde karşılaşılabilecek arızaların önceden tespit edilebilmesi ve otomasyon sistemlerinin devamlı ve tutarlı çalışabilmesi sistemdeki istenmeyen duruş sürelerini de azaltmaktadır.

Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde veri güvenliği hem endüstriyel süreçleri korumak hem de üretim ve devamlılık açısından oldukça önemlidir. Otomasyon sistemlerinde veri iletişiminde şifreleme uygulamak, güvenli iletişim protokolleri kullanmak ve alt yapıların güvenlik duvarları veya ağ izolasyonları içermesi verilere yetkisi olmayan kişilerin erişiminin engellenmesini sağlamaktadır. Sistemlerde kullanılan veri izleme ve analiz alt yapıları sayesinde kimlerin hangi verilere ne zaman eriştiğini kaydeden ayrıntılı erişim günlükleri ile herhangi bir güvenlik ihlali kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde veri güvenliği ile ilgili bir diğer önlem ise veri yedekleme sistemleridir. Bu özellik sayesinde acil durum, doğal afetler ve sistem arızaları gibi beklenmeyen acil durumlarda sistem hafızası korunarak sistemin devamlılığı sağlanmış olur.

2.1. Otomasyon Piramidi

Uluslararası Otomasyon Topluluğu tarafından otomasyon piramidi veya ANSI/ISA-95 mimarisi olarak tanımlanan otomasyon sistemleri hiyerarşisi Şekil 2.1’de gösterildiği gibi saha katmanı, kontrol katmanı, denetleyici katmanı, planlama katmanı ve yönetim katmanı olmak üzere toplamda beş bölümden oluşmaktadır [2].



Şekil 2.1. Otomasyon piramidi

Otomasyon piramidinin en alt bölümünü oluşturan saha katmanı fabrikalar veya üretim tesislerinde fiziksel olarak üretimin yapıldığı veya üretimin izlendiği katmandır. Saha katmanında sensörler, motorlar, barkodlar ve valfler yer almaktadır. Bu katmanda yer alan cihazlar piramidin üst katmanında kullanılmak üzere üretim alanından elde ettiği basınç, akım-gerilim, akış, sıcaklık veya diğer elektriksel sensör bilgilerini toplayarak gerçek zamanlı verilere dönüştürürler veya bilgisayar ya da kontrol cihazlarından gelen komutların mekanik, hidrolik, pnömatik veya elektriksel cihazlarda kullanılabilmesine yardımcı olurlar.

Kontrol katmanı saha katmanında fiziksel işleri yapan cihazların kontrol edildiği ve yönetildiği katmandır. Bu katmanda bulunan cihazlar saha katmanında yer alan cihazlardan alınan verilere göre önceden tanımlanmış-programlanmış kararları uygularlar. Bir otomasyon sisteminde kontrol katmanında genel olarak PLC'ler, DCS'ler ve PID kontrolörler görev almaktadır. Kontrol katmanında gerçekleştirilen basit ve temel kontrol fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde PLC'ler tek başlarına kullanılabilmektedir. Genellikle merkezi yapıda kullanılan PLC'lerin aksine DCS sistemler daha geniş alanlara yayılmış ve karmaşık süreçleri kontrol etmek için kullanılmaktadır. PID kontrolörler ise kontrol katmanında genel olarak PLC'ler ile birlikte kullanılarak hata tespitinde, otomatik ayarların gerçekleştirilmesinde, sistem kararlılığını sağlamada ve hızlı ve doğru karar verme süreçlerinde kullanılmaktadır.

SCADA, Historian ve HMI sistemler denetleyici katmanı oluşturan temel cihazlardır. SCADA sistemler saha katmanı ve kontrol katmanındaki birden fazla cihazdan alınan verilerin tek bir noktadan izlenmesinde ve kontrol edilmesinde görev almaktadır. Sahadan alınan verilerin toplanması, depolanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesi süreçlerinde ise Historian sistemler kullanılmaktadır [3]. HMI sistemler ise bu süreçte operatörlere grafiksel ara yüz imkânı sağlayarak sürecin uzaktan kontrol edilmesini sağlamaktadır.

Planlama katmanında MES olarak kısaltması verilen, bir fabrika veya üretim tesisinde hammaddeden paketlenmiş ürüne kadar olan tüm süreci izleyen üretim yönetim sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, gerçek verilere dayanarak hammadde siparişlerinden sevkiyat planlamalarına kadar sürecin rahatlıkla ayarlanmasına olanak sağlar.

Otomasyon piramidinin en tepesinde ticari süreçlerin takip ve kontrol edildiği yönetim katmanı bulunmaktadır [4]. Bu katman üretim tesisine ait ERP sistemlerini kullanmaktadır. ERP sistemler üretim tesislerine ait satışlardan satın almalara, finans verilerinden iş planlamasına tüm verilerin izlendiği sistemlerdir. Üretim tesisinde görev alan üst yönetim, hem ERP de yer alan bu verileri kullanarak hem de müşterilerden veya marketten gelen taleplere göre karar alabilme imkânına sahiptir.

2.2. Endüstriyel Kontrol Ekipmanları

Üretim, malzeme taşınması, elektrik üretimi vb. bir endüstriyel amacı gerçekleştirmek amacıyla sistemde yer alan elektriksel, mekanik, hidrolik ve pnömatik malzemeleri kontrol edebilmek için endüstriyel kontrol ekipmanı olarak SCADA, DCS ve PLC'ler kullanılmaktadır [5].

Saha ekipmanları, RTU, MTU, dâhili ağlar, HMI ve operatörden oluşan SCADA sistemler endüstriyel uygulamaların tek bir merkezden izlenmesi ve kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. SCADA sistem içerisinde saha ekipmanlarından alınan verilerin MTU'ya iletilmesinde RTU'lar görev almaktadır. SCADA sistem içerisinde birden fazla RTU yer alabilir. SCADA sistem içerisinde bir adet bulunan MTU, sahadaki cihazlardan toplanan verilerin HMI'e iletilmesi ve kontrol komutlarının RTU'lara iletilmesinde görev almaktadırlar. Operatör ve SCADA sistemde yer alan cihazlar arasında bağlantının

gerçekleştirilmesinde, MTU'dan verilerin toplanmasında ve kontrol komutlarının uygulanmasında HMI görev almaktadır. Operatör, SCADA sisteminde yer alan cihazlardan gelen uyarıları ve verileri takip eden ve kontrol süreçlerini uygulayan kişidir. Dâhili ağlar SCADA sistem içerisindeki saha ekipmanlarından alınan verilerin depolanması ve analiz edilmesinde görev almaktadır [6].

DCS sistemler saha cihazlarından alınan verilerin izlenmesi ve kontrol edilmesinde SCADA sistemlerin aksine birden fazla kontrolcü, PLC, iş istasyonu ve bilgisayar kullanmaktadır. DCS sistemlerde yer alan her bir kontrol elemanı sahaya dağıtılmış şekilde bulunur ve merkezi bir kontrol ünitesine bağlı olmadan yerel olarak kontrol süreçlerini gerçekleştirir. Sistemin dağıtık mimaride olması, tek bir kontrol ünitesinin arızalanması durumunda tüm sistemin etkilenmemesini sağlayarak sistemin güvenilirliğini ve esnekliğini artırır.

PLC'ler kontrol olaylarını yürütebilmek için işlemci birimi, programlama ve önceden tanımlanmış verileri saklamak için hafıza birimi, sistemde bulunan cihazlarla haberleşebilmek için haberleşme birimleri, saha katmanıyla veri haberleşmesini sağlayabilmek için giriş-çıkış modülleri ve güç modüllerini içermektedir. PLC'ler sayıca az veya basit endüstriyel fonksiyonların kontrol edilmesinde tek başına kullanılmalarının yanı sıra SCADA ve DCS kontrol sistemleri içerisinde yerel kontrol süreçlerinde de kullanılabilmektedir. PLC'ler SCADA ve DCS sistemlerden farklı olarak merkezi bir kontrol sunucusu veya HMI içermezler ve doğrudan insan müdahalesi olmadan kapalı döngü kontrol olaylarında kullanılmaktadırlar.

2.3. Endüstriyel Haberleşme Ağları

Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarının geliştirilmesi sürecinde, (Bkz. Şekil 2.1'de) verilen otomasyon piramidinde yer alan saha katmanı, kontrol katmanı, denetleme katmanı, planlama katmanı ve yönetim katmanında yer alan cihazların birbirleriyle olan haberleşmelerini sağlamaları aşamasında Fieldbuse (Saha veri yolu sistemler), endüstriyel Ethernet ve IoT (Nesnelerin interneti) haberleşme protokolleri kullanılmaktadır. Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamaların gerçekleştirildiği ilk dönemlerde kontrol cihazları ile saha katmanında yer alan sensör, motor ve aktüatörler arasında sağlanan haberleşme noktadan noktaya olacak şekilde yapılmakta ve çok yoğun paralel kablolama

uygulamalarına sebep olmaktaydı. Fieldbuse haberleşme sistemlerinin yaygınlaşmasıyla bu sorun ortadan kalkarak bir bus yapı üzerine birden fazla cihaz bağlanabilecek duruma gelmiştir. Teknoloji ve endüstriyel taleplerinin değişmesi, Endüstri 4.0 uygulamaların süreçlerde etkisini artırması ile birlikte otomasyon piramidinde yer alan cihazların birbirleri ile olan haberleşmesinde daha yoğun veri, daha yüksek hız, güvenlik ve gerçek zamanlı haberleşme ihtiyaçları ortaya çıkmıştır. Bu durum günümüzde endüstriyel Ethernet ve IoT haberleşme protokollerinin otomasyon ve kontrol uygulamalarında daha çok tercih edilmelerine sebep olmuştur [7].

2.3.1. Saha veri yolu haberleşme protokolleri

IEC 61158 standardı saha veri yolu haberleşme sistemlerini, yerel kontrolörler, aktüatörler, dönüştürücüler vb. cihazlar arasında dijital ve seri haberleşmeyi sağlayan veri yolları olarak tanımlamaktadır. Saha veri yolu haberleşme protokolleri endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarının ilk aşamalarında daha çok tercih edilen 4-20 mA sistemleri veya +/- 10V sistemlerin yerini alarak otomasyon sisteminde yer alan cihazlar arasında daha yüksek seviyede çift yönlü haberleşme ortamı sağlamıştır. Noktadan noktaya yapı yerine ağ yapıların kullanılması otomasyon sistemlerine kurulum, devreye alma ve bakım aşamalarında kolaylık sağlayan modüler bir yapı imkânı sunmuştur [8]. Saha veri yolu haberleşme sistemleri gerçek zamanlı haberleşmenin kritik olmadığı, veri hız ve boyutlarının düşük olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında kullanılan saha veri yolu haberleşme protokollerine Modbus, Canbus ve Profibus ve CC-Link örnek verilebilir.

Modbus protokolü

Otomasyon ve kontrol uygulamalarında kullanılan açık kaynak kodlu Modbus iletişim protokolü, 1979 yılında Modicon (şimdiki Schneider Electric) tarafından geliştirilmiştir. Bir Modbus ağında bir efendi cihaza 247 köle cihaz bağlanabilir. Tekli efendi çoklu köle mimarisini kullanmaktadır. Haberleşmenin efendi cihazca başlatılabildiği bu sistemde efendi cihaz aynı anda sadece bir köle cihazla iletişim kurabilmektedir. RS-232, RS-485 veya TCP/IP fiziksel katmanlarında kullanılabilen Modbus protokolünün en fazla 115,2 Kbps hızlara ulaşabilmesi onun yüksek hız gerektiren uygulamalarda kullanılamamasına sebep olmaktadır [9].

Modbus uygulamalarının seri iletişim yöntemini kullanan Modbus RTU ve Modbus ASCII olmak üzere 2 versiyonu bulunmaktadır. Modbus RTU verileri 2 bit formda iletirken Modbus ASCII verileri ASCII karakterleri olarak iletmektedir. Modbus ASCII Modbus RTU ya göre daha yavaştır. Modbus protokolü veri yapısı incelendiğinde hatalı veri gönderimini engellemek için CRC yapısı ve toplam veri uzunluğunu kontrol eden LRC yöntemi kullanılmaktadır.

Profibus protokolü

Profibus protokolünün geliştirilmesi için 1987 yılında 21 firmanın katılımı ile çalışmalara başlanmış ve 1989 yılında Alman Eğitim ve Araştırma Bakanlığı (BMBF) tarafından açık kaynak olacak şekilde standardize edilmiştir. Günümüzde daha çok Siemens firmasınca desteklenmektedir. Tekrarlayıcı donanımların kullanılmasıyla birlikte Profibus ağında en fazla 126 cihaz kullanılabilir. Bu cihazların her biri efendi olabilir. Ağda bulunan efendi cihaza en fazla 32 köle cihaz bağlanabilir. Fiziksel katman olarak RS-485 alt yapısını kullanan Profibus ağı 12 Mbps hızlara ulaşabilir [10]. Hata kontrol yöntemi olarak CRC'nin kullanıldığı protokolde efendi cihazdan başka bir efendi cihaza veya efendi cihazla köle cihaz arasında haberleşme kurulabilir.

Profibus haberleşme protokolünün DP, PA ve FMS olmak üzere 3 farklı alt protokolü vardır. İlk tanıtılan Profibus protokolü olan, fiziksel katman olarak RS-485 alt yapısını kullanan, en fazla 500 Kbps hıza ulaşabilen Profibus FMS; Profibus DP ve Profibus PA ya göre daha geniş ve detaylı komut setleri içermektedir. Ancak, zamanla daha hızlı ve basit iletişim gereksinimlerinin ortaya çıkmasıyla PROFIBUS DP protokolü daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Profibus DP 9,6 Kbps ile 12 Mbps arası hızlarda çalışabilmektedir. Gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımı diğer Profibus protokollerine göre daha uygundur. Daha zorlu, patlayıcı ortamda kullanılan uygulamalarda tercih edilen Profibus PA protokolü fiziksel katman olarak 485-IS protokolünü kullanmaktadır ve en fazla 31,25 Kbps hızlara ulaşabilmektedir. Profibus DP ve Profibus FMS uygulamalarına göre daha az enerji tüketen Profibus PA uygulamalarında, alınan fiziksel önlemler sayesinde kıvılcım veya aşırı ısınma riski minimize edilerek daha uzun mesafelerde veri iletişimi ve güç iletimi sağlanabilmektedir.

Canbus protokolü

1986 yılında Bosch tarafından geliştirilen, ISO 11898 mimarisi olarak de bilinen Canbus veri yolu, çoklu efendi yapıda olup otomasyon piramidinde yer alan cihazların birbirleri arasında iletişim kurmasında kullanılmaktadır. Standart Canbus mesaj yapısı incelendiğinde protokolün CRC kullanarak hata tespiti yapabildiği görülmektedir. Canbus haberleşmesi fiziksel olarak Can-Yüksek ve Can-Düşük olarak bir çift sinyal ile yapılmaktadır ve Canbus kullanılarak cihazlar arasındaki haberleşme 125 Kbps, 500 Kbps ve 1Mbps standart veri hızlarında yapılandırılabilir. Canbus protokolü kullanılarak yüksek hızlarda 64 Byte a kadar veri aktarımı sağlanabilir. Diğer saha veri yolu haberleşme protokollerin aksine Canbus ağındaki efendi cihazlardan birinin arızalanması durumunda ağda olan diğer efendi cihazlar haberleşme sürecini devam ettirebilmektedir [11].

CC-Link protokolü

1996 yılında Mitsubishi firmasınca geliştirilen açık kaynak kodlu CC-Link protokolü fiziksel olarak RS-485 katmanını kullanmaktadır. Daha çok uzak doğru ülkelerinde endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. Saha veri yolu tabanlı orijinal CC-Link protokolü en fazla 10 Mbps hızlara ulaşabilirken endüstriyel Ethernet tabanlı versiyonları 1 Gbps hızlara ulaşabilmektedir. RS-485 fiziksel katmanının kullanıldığı durumlarda ağa 64 ayrı istasyon bağlanabilir [12].

Saha veri yolu sistemlerde kullanılan protokollere ait karşılaştırma Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Saha veri yolu haberleşme protokolleri karşılaştırması

	PROFİBUS	MODBUS	CANBUS	CC-LİNK
Yıl	1989	1979	1986	1996
Kuran – Geliştiren Firma	BMBF / Siemens	Modicon / Schneider Electric	Bosch	Mitsubishi
Uyduğu Standartlar	EN 50170, EN 50254, IEC 61158	EN 1434-3	ISO/DIS 11519-1 ISO/DIS 11898	IEC 61158 IEC 61784 ISO 15745-5
Kablo Tipi	2 damarlı, Bükülmüş kablo	2 damarlı, Bükülmüş kablo	2 damarlı, Bükülmüş kablo	Zırhlı, 3 damarlı Bükülmüş çiftli kablo
Ağ Topolojisi	Doğrusal, Yıldız, Dairesel	Doğrusal, Yıldız, Ağaç	Doğrusal, Yıldız, Dairesel	Doğrusal, Yıldız, Dairesel
En Fazla Bağlanabilen Cihaz	127	248	127	64
Veri Aktarım Hızı	12 Mbps	115,2 Kbps	1 Mbps	10 Mbps
Veri Aktarım Mesafesi	1,2 km	1 km	500 m	1200 m
Veri Boyutu	0-255 Byte	256 Byte	64 Byte	218 Byte
Veri Erişim Kontrolü	Jeton Geçiş	Efendi / Köle	Efendi / Köle	Efendi / Köle
Veri Hata Kontrolü	CRC	CRC, LRC	CRC	CRC

2.3.2. Endüstriyel nesnelerin interneti haberleşme protokolleri

Endüstriyel otomasyon ve kontrol süreçlerine yönelik geliştirilen kablosuz haberleşme teknolojilerinde, RFID ve internet tabanlı uygulamalarda ve mobil sistemlerdeki teknolojik gelişmeler; Endüstriyel Nesnelerin İnterneti uygulamaların otomasyon piramidinde yer alan katmanlarda veya katmanlar arasında haberleşmenin sağlanmasında kullanılmasına olanak sağlamıştır. IIoT teknolojilerin endüstriyel tesislerde tercih edilen kullanım veya uygulama alanları aşağıda verilmiştir [13]:

- Tanımlama ve takip uygulamaları
- Kontrol uygulamaları
- İzleme ve analiz uygulamaları
- Kestirimci – önleyici bakım uygulamaları
- İletişim alt yapısının sağlaması
- Ağ altyapısının sağlaması
- Kalite – servis altyapısının sağlanması
- Veri güvenliği – haberleşme güvenliğinin sağlanması

Endüstriyel otomasyon ve kontrol süreçleri için geliştirilen IIoT uygulamalarda kullanılan cihazlar endüstriyel ortamların beraberinde getirdiği zorlu çevresel şartlarda görev ve güvenlik kritik uygulamaları gerçekleştirmelidir. Sahadan gerçek zamanlı olarak sürekli verilerin alınarak izlenmesi aşamasında IIoT uygulamalar için aşağıda verilen parametreler kritik olmaktadır [14]:

- Enerji verimi
- Veri hızı, veri genişliği optimizasyonu
- Gerçek zamanlı performans
- Diğer cihazlarla birlikte çalışabilme
- Güvenlik
- Gizlilik

Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamaları süreçlerinde kullanılan IIoT haberleşme protokollerine internet tabanlı protokolleri kullanan REST mimarisi, TCP/IP tabanlı MQTT, UDP tabanlı CoAP, TCP tabanlı WebSocket örnek verilebilir [15].

REST mimarisi

REST, endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında yer alan cihazların birbirleri ile haberleşmesini sağlama aşamasında HTTP, HTTPS, URL ve XML vb. internet tabanlı iletişim standartlarını kullanan mimari çözümdür. İstemci-sunucu ve istek-yanıt eş düzeyler arası haberleşme altyapısını kullanır. REST mimarisini kullanan uygulamalar RESTful servisler olarak adlandırılır. Basit, esnek ve kolayca geliştirilebilir olması nedeniyle web tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. REST mimaride kullanılan mesaj yapıları HTML, JSON, ASCII ve XML yapıda olabilir. REST mimarisinde kullanılan metin dosyaları, HTML sayfaları, resimler, videolar ve veriler kaynak olarak tanımlanır. REST sunucu her bir kaynağa bir URI atayarak istemcilerin kolayca kaynaklara erişebilmesine olanak sağlar. Mimari, kaynak tipinde herhangi bir kısıtlama içermez, veriler gerçekleştirildiği uygulamaya göre internet ortamında kullanılabilen herhangi bir formatta olabilir.

MQTT protokolü

Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında düşük bant genişliği ve güvenilir

iletişim gereksinimlerini karşılamak için tasarlanmış haberleşme protokolüdür. Enerji verimliliği ihtiyacı olan uygulamalarda tercih edilmektedir. Yayınla-abone ol haberleşme alt yapısını kullanmaktadır. Veri iletişiminde TCP/IP'yi ve haberleşme güvenliğini sağlamak için TLS/SSL'i kullanır. MQTT protokolünde istemciler arasındaki haberleşme merkezde yer alan broker adı verilen aracılar ile sağlanmaktadır. Her bir istemci yayıncı veya alıcı olabilir. Yayıncılar, mesajlarını belirli konu başlıklarına yayınlar. Alıcılar ise bu konulara abone olarak, ilgili mesajları alırlar. MQTT broker, istemciler arasında verileri saklayarak yayıncı ve alıcılar arasında iletişimi gerçekleştirir.

CoAP protokolü

Düşük bant genişliği ve sınırlı kaynak ihtiyacı olan cihazların birbirleriyle iletişimini sağlamasında tercih edilmektedir. RESTful gereksinimlerini sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Veri iletişiminde standart olarak UDP'yi kullanırken güvenlik ihtiyacı olan uygulamalarda DTLS ve SSL kullanmaktadır. İstemci-sunucu alt yapısını kullanır. Hafıza ihtiyacının çok az olması ve çok az güç tüketmesinden dolayı gömülü cihazlarda kolaylıkla kullanılabilmektedir. Hem senkron hem de asenkron çalışabilir.

WebSocket protokolü

Endüstriyel otomasyon ve kontrol süreçlerinde düşük gecikme ihtiyacı olan gerçek zamanlı veri iletimi ve kontrol uygulamalarında tercih edilmektedir. İstemci-sunucu alt yapısını kullanır. Çift yönlü haberleşme aşamasında veri iletişim katmanı olarak HTTP'yi kullanan WebSocket TCP tabanlıdır. Güvenlik uygulamaları için TLS'yi kullanır. Gerçek zamanlı çift yönlü iletişim alt yapısı sayesinde sensör verileri ve kontrol komutları gibi bilgilerin etkin olarak kullanılmasına imkân sağlar. WebSocket veri yapısı metin dosyası veya binary veri içerebilir. Veri bant genişliğinin sınırlı olduğu uygulamalarda büyük boyutlu verileri paketler halinde ileterek iletişimi gerçekleştirir.

Endüstriyel nesnelerin interneti haberleşme protokollerine ait karşılaştırma Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. IIoT haberleşme protokolleri karşılaştırması

	REST	MQTT	CoAP	WebSocket
Haberleşme Protokolü	TCP	TCP	UDP	TCP
Mimari	İstemci, Sunucu	İstemci, Sunucu, Aracı	İstemci, sunucu	İstemci, Sunucu
İletim Modeli	İstek-yanıt	Yayıncı, alıcı	İstek-yanıt	İstek-yanıt, sürekli
Veri Başlangıç Boyutu	-	2 byte	4 byte	16 byte
Max. Mesaj Boyutu	-	256 Mb	1024 Kb	-
Güvenlik	TLS/SSL	TLS/SSL	DTLS, SSL	TLS/SSL

2.3.3. Endüstriyel ethernet haberleşme protokolleri

Endüstriyel Ethernet haberleşme protokolleri, endüstriyel ortamlarda otomasyon ve kontrol süreçlerinde kullanılan Ethernet tabanlı protokollerdir. Standart Ethernet'in aksine Endüstriyel Ethernet; yüksek sıcaklık, nem, elektromanyetik girişim ve fiziksel tehlikeler de dâhil zorlu endüstriyel koşullarda güvenilir ve etkili çalışmayı gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Endüstriyel haberleşme protokolü olarak kullanılabilen saha veri yolu haberleşme sistemleri yüksek hız, yüksek bant genişliği, düşük gecikme, hassas kontrol ve yüksek güvenlik gereksinimi olan büyük çaplı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Endüstriyel Ethernet haberleşme protokollerinde veri iletimi ve ağ trafiğinin düzenlenmesinde MAC katmanının kullanılması otomasyon piramidinde yer alan cihazlar arasında gerçekleştirilen haberleşme sırasındaki gecikmeyi mikro saniyeler seviyesine çekebilmektedir. Bu özellik büyük çaplı endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarının gereksinimlerini karşılayarak gerçek zamanlı olarak bir ağ üzerine çok sayıda cihazın bağlanmasını sağlamaktadır.

2000'li yılların başlarından itibaren aktif olarak otomasyon ve kontrol süreçlerinde kullanılan Endüstriyel Ethernet protokolleri IEC 61158 standardının geliştirilmesiyle oluşan IEC 61784 ile standardize edilmiştir [16]. Endüstriyel Ethernet protokollerine Profinet, Ethernet/IP, Modbus-TCP, Powerlink ve EtherCAT örnek olarak verilebilir.

Profinet protokolü

Siemens ve General Electric firmalarının otomasyon ve kontrol uygulamalarında endüstriyel haberleşme protokolü olarak kullandığı Profinet protokolü 1989 yılında Profibus Organizasyonu tarafından IEC 61158 standardına uygun olarak geliştirdiği gerçek zamanlı açık kaynak kodlu haberleşme protokolüdür [17]. Profinet protokolü uygulama alanlarına göre Profinet CBA ve Profinet IO olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır. Profinet IO dağıtılmış giriş-çıkış cihazlarını kontrol etmek için kullanılırken Profinet CBA dağıtılmış otomasyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Profinet IO Profinet RT, Profinet IRT ve Profinet Basic olarak 3'e ayrılmaktadır. Profinet RT gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılırken Profinet IRT çok az gecikme ve kesin zamanlama ihtiyacı olan uygulamalarda, 1 ms'den daha az hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Profinet Basic ise düşük performans ve basit işlem kabiliyeti olan, basit sensör ve aktüatörlerin kontrol edilmesinde kullanılmaktadır.

Profinet protokolü ağ yapılandırmaları ve yedeklilik durumlarına göre A, B ve C olmak üzere 3'e ayrılmaktadır. Profinet A Protokolü uygulama karmaşıklığı basit olan, yedeklilik gerektirmeyen, gecikmenin ve eş zamanlamanın kritik olmadığı sistemlerde tercih edilmektedir. 100 ms'ye kadar eş zamanlılık sağlayabilir. Profinet B Protokolünde bu gecikme 10 ms seviyelerindedir. Eş zamanlamanın kritik olduğu, hassas kontrol uygulamalarında kullanılan Profinet C Protokolünde ise gecikme 1 ms'den daha düşük seviyelerdedir. TCP/IP tabanlı olan Profinet Protokolünde 1 Gbps hızlara ulaşılabilmektedir.

Ethernet/IP protokolü

Uygulama katmanında Endüstriyel Ethernet protokol yapısını kullanan Ethernet/IP haberleşme protokolü ODVA tarafından 2001 yılında geliştirilmiş ve IEEE 802.3'ye uyacak şekilde standardize edilmiştir. Profinet Protokolüne benzer olarak TCP/IP tabanlıdır ve ODVA tarafından tanımlanan CIP'e uygun olarak geliştirilmiştir. Pratikte bir Ethernet/IP ağına sınırsız cihaz bağlanabilmektedir. Rockwell firması tarafınca desteklenmektedir. Ethernet/IP Protokolü kullanılarak 1 Gbps hızlara ulaşabilmekte ve 100 ms hassasiyette haberleşme sağlanabilmektedir.

Modbus-TCP protokolü

IEC 61158 standardına uygun olarak Bosch tarafından geliştirilen, TCP/IP tabanlı açık kaynak kodlu Modbus-TCP protokolü endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında haberleşmeyi gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Genellikle 10 Mbps ve 100 Mbps hızlarda çalışmaktadır. Noktadan noktaya yapısı sebebiyle karmaşık, bant genişliği yüksek gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildir.

Powerlink protokolü

2004 yılında Avusturya merkezli B&R Automation firmasında IEC 61158 standardına uygun olacak şekilde geliştirilen açık kaynak kodlu Powerlink Protokolü TCP/IP tabanlı endüstriyel Ethernet protokolüdür. Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında yüksek determinizm, güvenlik, hassas kontrol ve eş zamanlama gereksinimlerini karşılamak için kullanılmaktadır. Powerlink protokolü kullanılarak 1 Gbps hızlara ulaşılabilir ve mikro saniye seviyelerinde eş zamanlama sağlanabilir.

2.3.4. EtherCAT haberleşme protokolü

Gerçek zamanlı veri haberleşmesini gerçekleştirebilmek için 2003 yılında Beckoff firmasınca geliştirilen EtherCAT haberleşme protokolü yüksek hız, güvenilir iletişim ve düşük eş zamanlama ihtiyacı olan endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. 2004 yılında kurulan ETG ile birlikte açık kaynak kod olarak piyasaya sürülerek geliştirme ve standardize etme çalışmaları halka açılmıştır.

Tek bir Ethernet konektörü kullanılarak EtherCAT düğümündeki cihazlar birbirlerine bağlanabilmekle birlikte genel olarak bir EtherCAT düğümünde alıcı ve gönderici olmak üzere 2 ayrı Ethernet konektörü yer almaktadır. EtherCAT'in bu yapısı sistemin yıldız, halka vb. birçok ağ topolojisini desteklemesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca bu durum EtherCAT ağındaki cihazların 2 yönlü olarak iletişim kurabilmelerine imkân sunmaktadır.

EtherCAT protokolü kullanılan bir ağda efendi cihaza bağlı 65535 köle cihaz yer alabilir. EtherCAT protokolü kullanan bir ağ 100 Mbps hızlara ulaşabilirken ağda yer alan cihazlar 100 ns'den daha küçük gecikmelerde eş zamanlama gerçekleştirilebilir [18].

Uyduğu uluslararası standartlar

EtherCAT ve EtherCAT üzerinde güvenlik protokolleri hem fiziksel hem de uygulama katmanlarında IEC 61158 ve IEC 61784 standartlarına uygun olarak geliştirilmiştir. EtherCAT Protokolü yarı iletken teknolojileri için kullanılan SEMI E54.20 kapsamında haberleşme standardı olarak da kabul edilmiş durumdadır. EtherCAT protokolünün uluslararası standartlara uygun olarak geliştirilmesi süreci ETG tarafından yürütülmektedir.

Çalışma prensibi

EtherCAT protokolünün çalışma prensibi, veri paketlerinin tüm cihazlar üzerinde geçerken işleyebilen ve kendisine ait olmayan verilerin ağda yer alan cihazlara doğrudan aktarılmasını sağlayan data on the fly teknolojisi üzerine kurulmuştur. EtherCAT haberleşmesinin başlangıcında efendi cihaz ağ üzerinde yer alan her bir düğüme ulaşabilecek şekilde veri paketini ağa göndermektedir. Ağdaki her bir cihaz, kendisine ait olan veri adreslemesine dikkat ederek kendisine ait verileri alır, olmayanları ise ağa tekrar iletir. Burada sadece ağ üzerindeki donanım iletim gecikmesi zaman kaybı yaratır. Ağ üzerinde yer alan son cihaz EtherCAT ağının iki yönlü haberleşme alt yapısını kullanarak efendi cihaza iletişimin tamamlandığı bilgisini iletir ve bir haberleşme çevrimi tamamlanmış olur. Bu özellik ağ üzerinde veri paketlerinin hızlı ve etkin bir şekilde iletilmesine ve çok düşük gecikmelerle gerçek zamanlı haberleşmenin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

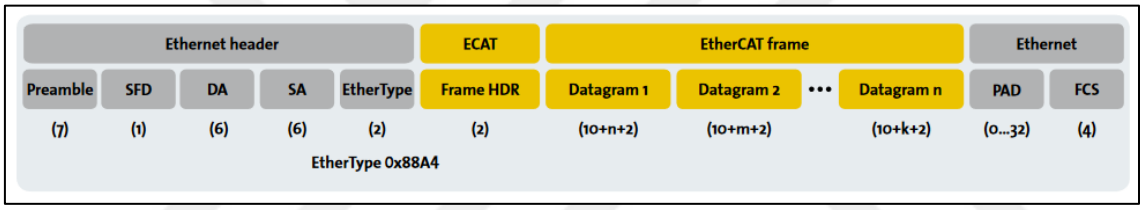
EtherCAT protokolü tek bir kontrolcü içeren merkezi sistem mimarisini desteklemekle birlikte dağıtılmış mimarili uygulamalarda da kullanılabilmektedir. EtherCAT protokolü kullanılarak geliştirilen bir sistemde ağ üzerinde yer alan bir efendi cihaz ağdaki diğer efendi cihazla, efendi cihaz köle cihazlarla ve köle cihazlar kendi aralarında iletişim kurabilmektedirler.

Klasik saha veri yolu haberleşme sistemleriyle karşılaştırdığımızda EtherCAT ağı üzerinde yer alan cihazların adreslemeleri ağ üzerinde ayarlamalara ihtiyaç duymadan otomatik olarak yapılabilmekte, ağ üzerinde hata tespiti anlık olarak tespit edilebilmektedir. Diğer endüstriyel Ethernet haberleşme protokollerinin aksine ise

EtherCAT protokolü uygulamalarında TCP/IP veya UDP'nin kullanılması zorunlu değildir. Bir Ethernet veri paketine EtherCAT adres tanımlayıcısı eklenerek EtherCAT protokolü kolaylıkla kullanılabilir. Bu özellik EtherCAT protokolünün standart Ethernet tabanlı donanımlarda kullanılabilmesine olanak sağlayarak hem geliştirme sürecine hızlandırmakta hem de maliyeti düşürerek yüksek performanslı çözüm imkânı sunmaktadır.

EtherCAT veri yapısı

EtherCAT protokolü IEEE 802.3 standart Ethernet veri yapısını kullanmaktadır. Standart Ethernet veri yapısı üzerinde yer alan EtherType ağ üzerinde yer alan cihazların hangi protokolü kullandığını belirtmektedir. EtherCAT için bu adres 0x88A4'dür.



Şekil 2.2. EtherCAT veri yapısı

Şekil 2.2'de verilen standart IEEE 802.3 Ethernet veri yapısı incelendiğinde veri iletiminin 7 byte uzunluğunda olan ön işlem ile başladığı görülmektedir. Önsöz veri paketinin başlangıcını, alıcının veri paketini algılamasını ve işlemesini sağlamaktadır. Önsözden sonra 1 byte uzunluğunda veri paketinin başlangıcını belirten SFD yer almaktadır. 6 byte uzunluğundaki DA, veri paketinin gideceği cihazın MAC adresini belirtmek için kullanılarak 6 byte uzunluğundaki SA ise veriyi ileten cihazın MAC adresini belirtmek için kullanılmaktadır. EtherCAT için 0x88A4 olarak belirtilen EtherType ise kullanılan protokolü belirtmektedir. EtherCAT verisi EtherCAT frame üzerinden iletilmektedir. EtherCAT verisi en düşük 64 byte olabilmektedir. Eğer veri boyutu daha düşük olursa veri yapısı üzerinde PAD kullanılarak veri 64 byte a tamamlanır. Standart Ethernet veri yapısı kullanıldığında EtherCAT kullanılarak en fazla 1500 byte veri aktarılabilmektedir. Gönderilen verinin doğruluğunu kontrol etmek için veri yapısının en sonunda 4 byte uzunluğunda FCS kullanılmaktadır.

Desteklediği ağ topolojileri

Diğer endüstriyel Ethernet protokollerinin aksine EtherCAT protokolünde göbek bağı veya Ethernet yönlendirme cihazlarına ihtiyaç bulunmamaktadır. Bu durumla birlikte EtherCAT protokolü kullanan sistemlerde verilerin alınması ve verilerin iletilmesi için ayrı konektörlerin kullanılması EtherCAT protokolüne bağlanan cihaz sayısını ve kullanılabilecek ağ topolojilerini sınırsız hale getirmektedir. EtherCAT protokolünün uygulanacağı sistemin boyutuna, karmaşıklığına, maliyet ve güvenilirlik gereksinimlerine bağlı olmak üzere bir EtherCAT ağı zincir, doğrusal, yıldız, ağaç ve halka topolojilerini kullanabilmektedir.

EtherCAT versiyonları

Endüstriyel otomasyon ve kontrol süreçlerinin getirdiği yüksek hız, düşük maliyet ve güvenlik gereksinimlerini karşılamak üzere özelleşmiş EtherCAT versiyonları bulunmaktadır.

Veri boyutunun yoğun ve karmaşık olduğu, yüksek hızlı büyük verilerin iletilmesi ihtiyacı duyan uygulamalarda kullanılan EtherCAT G haberleşme protokolü ile 10 Gbps haberleşme hızlarına ulaşılabilmektedir. EtherCAT G kullanılan sistemler branch adı verilen mimari ile üzerinde EtherCAT protokolünü destekleyen cihazların bulunduğu dallara ayrılmaktadır. Her bir dal EBC adı verilen kontrolcü ile kontrol edilmektedir ve standart EtherCAT protokolünü kullanır gibi 100 Mbps hızlara ulaşabilecek şekilde paralel olarak işlemlerini gerçekleştirmektedir.

Kablolama ve kurulum maliyetlerini azaltmak için tercih edilen EtherCAT P haberleşme protokolü kullanılarak veri iletimi sağlanırken cihazlara güç de dağıtılabilmektedir. EtherCAT P kullanılarak standart 4 kablolu Ethernet kablosu üzerinden veri ile birlikte 3A’e kadar 24V güç cihazlara aktarılabilmektedir.

FSoE EtherCAT üzerinde güvenlik protokolü endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarına yönelik fonksiyonel güvenlik gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmıştır. FSoE IEC 61508 güvenlik standardına uygun olarak geliştirilmiştir. IEC 61508 standardında güvenlik seviyeleri 4 kategoriye ayrılmış olup FSoE yüksek güvenlik

bütünlüğü seviyesi olan SIL 3 sınıfındadır. FSoE protokolü (Bkz. Şekil 2.2'de) verilen standart Ethernet veri yapısındaki EtherCAT veri çerçevesine güvenliğini sağlamayı istediği veriyi, haberleşmek istediği cihazın adresini ve hatalı veri iletmeyi önlemek için CRC verisini ekleyerek haberleşmeyi gerçekleştirir.

EtherCAT haberleşme profilleri

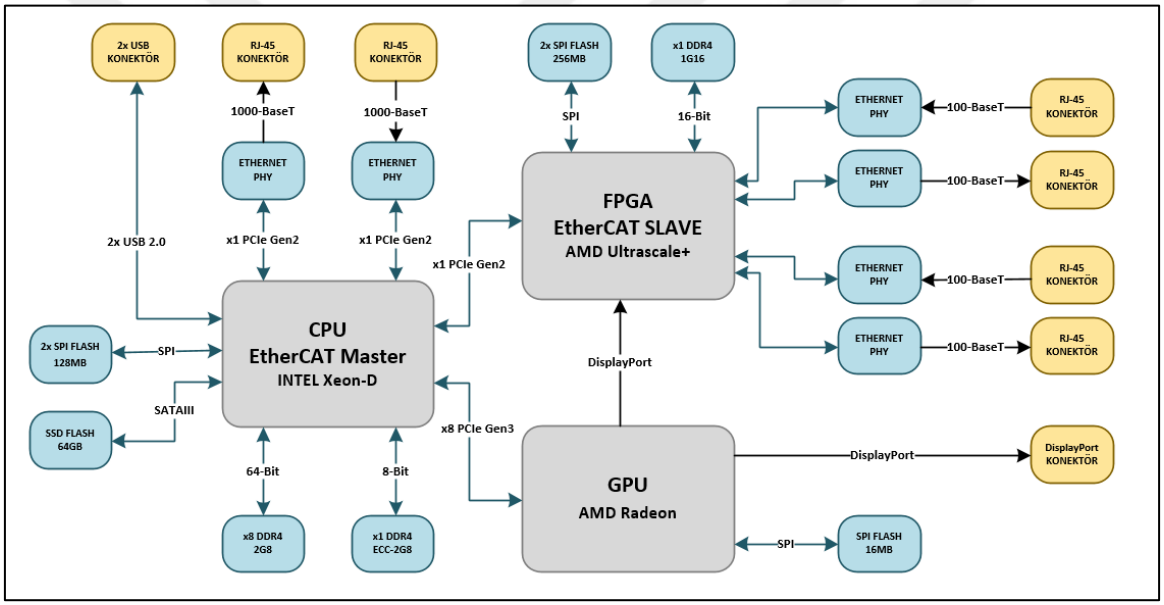
EtherCAT protokolünün standart IEEE 802.3 Ethernet veri yapısını kullanması ve TCP/IP veya UDP kullanmak zorunda olmaması diğer endüstriyel haberleşme protokollerini kullanan cihazlarla iletişim kurmasında kolaylık sağlamaktadır. EtherCAT protokolü üzerinde diğer haberleşme protokollerine ait veri yapılarının kullanılması sonucu CoE, SoE, FoE, EoE ve AoE kısaltmalarıyla tanımlanan haberleşme protokolleri ortaya çıkmıştır.

CoE CANOpen protokolünü desteklemekte ve daha çok yüksek hız ve düşük gecikme ihtiyacı olan uygulamalarda kullanılmaktadır. SoE; Sercos gerçek zamanlı haberleşme ara yüzünü kullanan servo sürücülerle gerçekleştirilen motor kontrol uygulamaları için tercih edilmektedir. EtherCAT ağında bulunan cihazlara yazılım yüklemek ve veri dosyaları iletmek için FoE kullanılmaktadır. Ethernet tabanlı cihazlarla haberleşmeyi sağlamak için kullanılan EoE, standart Ethernet protokollerinin (TCP/IP, UDP vb.) EtherCAT ağı üzerinden iletilmesini sağlayarak mevcut Ethernet cihazlarının EtherCAT ağına kolaylıkla entegre edilmesine olanak sağlamaktadır. AoE ise Beckoff tarafından geliştirilen ADS protokolünün entegrasyonunu sağlamak için kullanılmaktadır [19].

3. ENDÜSTRİYEL BİLGİSAYAR TASARIMI

3.1. Mimari Tasarım

Endüstriyel otomasyon ve kontrol uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan, endüstriyel ortamların sebep olduğu olumsuz çevre koşulları altında çalışabilecek, sağladığı donanım ve yazılım alt yapısı ile EtherCAT efendi ve EtherCAT köle uygulamalarının koşturulabileceği, görüntü işleme ve grafiksel ara yüz alt yapısına sahip endüstriyel bilgisayar tasarımına ait mimari Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Endüstriyel bilgisayar mimarisi

Sistem mimarisi, EtherCAT efendi uygulamalarının gerçekleştirileceği Intel Xeon-D 1559 işlemci üzerine kurulmuştur. Endüstriyel bilgisayar tasarımında EtherCAT köle uygulamaları AMD Ultrascale+ FPGA kullanılarak, kullanıcı ara yüzü ve görüntü işleme alt yapısı ise AMD Radeon serisi E9171 GPU kullanılarak sağlanacaktır. Mimaride belirtilen Ethernet konektörleri donanımın EtherCAT'in desteklediği tüm ağ topolojilerini desteklemesine uygun olacak şekilde belirlenmiş olup donanıma bağlı olan hafıza birimleri ile EtherCAT efendi ve EtherCAT köle yazılım birimleri için gerekli yapılandırma ayarlarının gerçekleştirilmesine, işletim sistemi ve sürücülerin yüklenmesine, uygulama yazılımlarının koşturulmasına olanak sağlanmıştır.

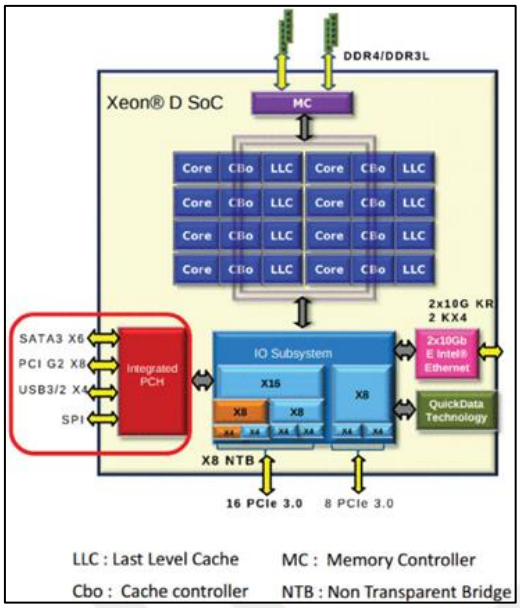
3.1.1. İşlemci birimi

Düşük güç tüketimi ve yüksek performans sunan, beşinci nesil Core işlemciler üzerine inşa edilen Broadwell-DE mimarisi, enerji veriminin önemli olduğu, aynı zamanda işlem gücü ihtiyacı da duyulan endüstriyel uygulamalar, yerleşik uygulamalar ve veri merkezi uygulamaları için Intel tarafından tasarlanmıştır.

Broadwell-DE mimarisi üzerine inşa edilen Intel Xeon-D 1559 işlemci 2016 yılında geliştirilmiş olup işlem gücünü sahip olduğu toplamda 12 çekirdek ve 24 iş parçasından almaktadır. İşlemci üzerinde yer alan her bir çekirdeğin temel çalışma frekansa 1,5 GHz iken yine Intel tarafından geliştirilen "Turbo Boost Technology" çözümü ile çekirdek çalışma frekansı 2,1 GHz'e kadar hızlara ulaşabilmektedir. İşlemci ayrıca sık kullanılan verilerin saklandığı ve hızlı erişim imkânı sunarak işlemci performansını artıran toplamda 18 MB önbelleğe sahiptir.

Şekil 3.2'de mimarisi verilen, fiziksel boyutları 37,5 mm × 37,5 mm büyüklüğünde olan işlemci, endüstriyel uygulamalar için de şartları sağlayan en düşük -40 derecede en fazla ise +85 derecede çalışabilmektedir. Intel Xeon-D 1559 işlemci tam yük altında 45W güç harcamaktadır.

Toplamda sahip olduğu 2 ayrı hafıza kanalı ile Intel Xeon-D 1559 işlemciler 128 GB bellek olanağına sahiptir. İşlemciye bağlı olan bu hafıza kanalları DDR3 veya DDR4 hafıza elemanlarını desteklemektedir. Intel Xeon-D 1559 işlemciler 10 Gbps'a kadar hızlarda haberleşmeyi gerçekleştirebilir. Sırasıyla 24-lane ve 8-lane PCIe Gen3 ve PCIe Gen2 protokollerini destekleyecek alt yapıya sahip işlemci, Ethernet tabanlı 10GBase-T, 1000Base-T, SFI, KX ve KR protokollerini de kullanabilir. Bu özellik sayesinde hem bakır hem de fiber tabanlı Ethernet haberleşmesi kurulabilmektedir. Intel Xeon-D 1559 işlemci ayrıca haberleşme, hafıza, güvenlik ve kontrol uygulamalarında kullanılabilecek SATAIII, USB 3.0, USB 2.0, LPC, SPI, UART ve I2C iletişim kanallarına sahiptir.



Şekil 3.2. Intel Xeon-D mimarisi

3.1.2. FPGA birimi

Kintex UltraScale+ FPGA'lar, AMD UltraScale+ FPGA serisinin bir parçası olarak 2016 yılında AMD tarafından piyasaya tanıtılmıştır. UltraScale mimarisinin fiziksel iç bağlantısı ve clock yapısı, FPGA içerisindeki mantık devrelerinin hızlı ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamakta, ayrıca düşük güç tüketimi ile yüksek performans sunmaktadır. Kintex UltraScale+ FPGA'lar, sahip oldukları SERDES, mantık, DSP, I/O ve hafıza blokları sayesinde yüksek hızlı, geniş bant genişliği, düşük gecikme veya yoğun hesaplama gerektiren uygulamaların esnek ve verimli bir şekilde geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, Kintex UltraScale+ FPGA'lar, bütünleşmiş PCIe, Ethernet MAC/PHY ve bellek denetleyici IP-Core'ları ile doğrulanmış ve optimize edilmiş uygulamaların geliştirilmesini destekler.

3.1.3. GPU birimi

AMD tarafından geliştirilen AMD Radeon serisi E9171 GPU, birbirinden bağımsız 5 adet ekran denetleyicisine sahiptir ve 4K çözünürlüğünde grafik uygulamalarını desteklemektedir. E9171 GPU üzerinde yer alan ekran denetleyicileri, DisplayPort, DVI ve HDMI ara yüzlerini desteklemektedir. Yüksek hız ve yüksek bant genişliği ihtiyacını sahip olduğu PCIe alt yapısı ile sağlayan E9171 GPU 4 GB GDDR5 hafızaya sahiptir.

3.1.4. EtherCAT efendi yazılım birimi

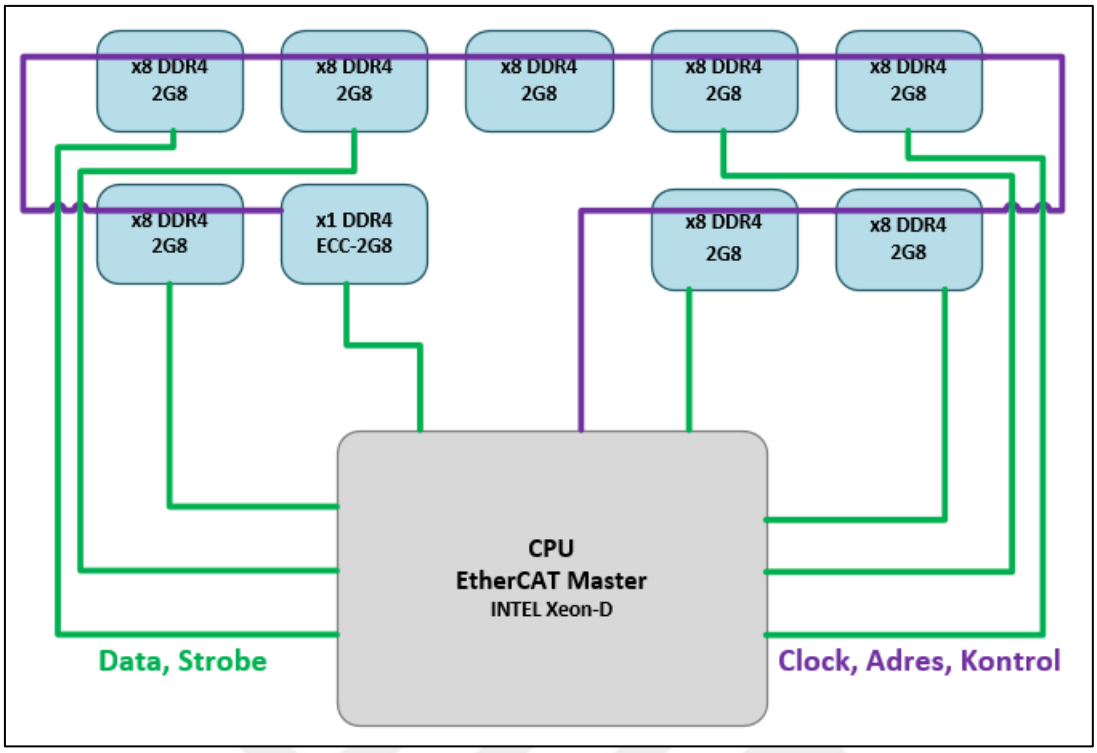
EtherCAT efendi yazılım birimi, EtherCAT ağındaki cihazlar arasında veri haberleşmesinin ve yönetiminin sağlandığı, yüksek hassasiyette eş zamanlamanın sağlandığı ve cihazlara ait yapılandırma parametrelerinin düzenlendiği yazılım bileşenidir. EtherCAT efendi birimi alt yapısı, gerçek zamanlı Windows, Linux gibi işletim sistemleri üzerinde çalışan çeşitli yazılım seçenekleriyle sağlanabilir. Bunlar arasında Beckhoff'un TwinCAT yazılımı, Koenig-pa firmasının KPA EtherCAT Master yazılımı, Acontis'in geliştirdiği EC-Master yazılımı veya açık kaynak kodlu SOEM yazılımı bulunmaktadır.

3.1.5. EtherCAT köle yazılım birimi

Beckoff firması tarafından geliştirilen ET1810, ET1811, ET1812, ET1815 ve ET1816 IP Core ları AMD Kintex Ultracale+ FPGA'ler üzerinde EtherCAT köle yazılım birimi olarak kullanılabilir.

3.2. Şematik Tasarım

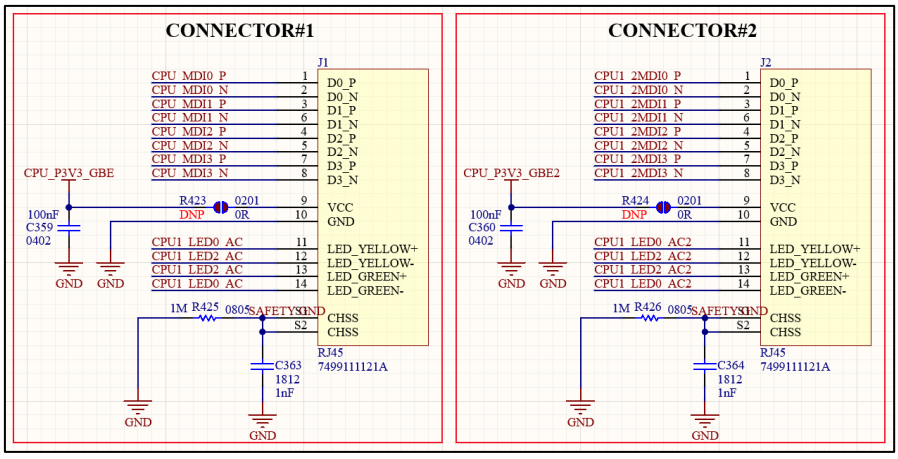
Şematik tasarım süreci, üzerinde EtherCAT efendi uygulamaların koşturulacağı, Intel Broadwell-DE mimarisini kullanan Xeon-D 1559 işlemcinin tasarımının gerçekleştirilmesiyle başlamıştır. Tasarımda Intel Xeon-D 1559 işlemcide bulunan 2 hafıza kanalından bir tanesi kullanılmıştır. Bu hafıza kanalına toplamda 16 GB DDR4 bellek ve 2 GB ECC DDR4 bellek olacak şekilde 8-Bit hafıza elemanları eklenmiştir. DDR4 hafıza elemanları tasarımda Şekil 3.3'de gösterildiği gibi "fly by" topolojisi uygulanarak kullanılmıştır. Fly by topolojisinde hafıza elemanlarına ait veri ve strobe hatları noktadan noktaya olacak şekilde bağlanırken clock, adres ve kontrol hatları bus üzerinde olacak şekilde bağlanmaktadır.



Şekil 3.3. İşlemci - hafıza birimi fly by topolojisi

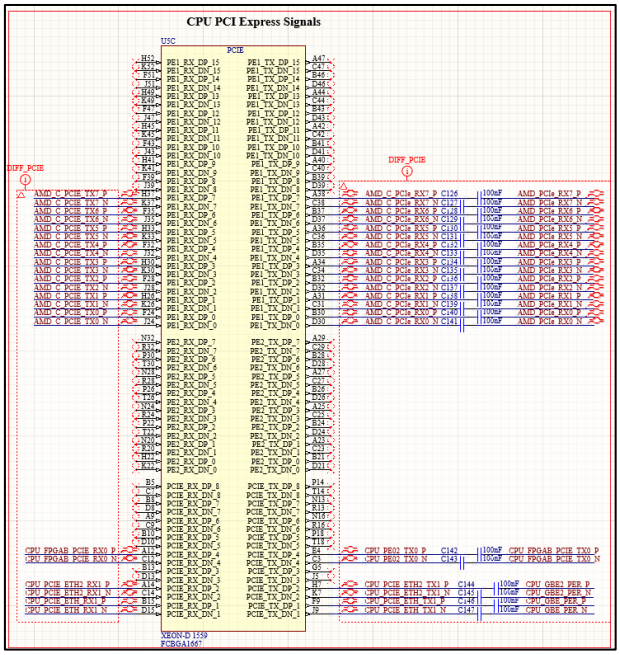
Intel Xeon-D 1559 işlemcisine ait sistem ayarlarının, sabit disk, SSD, USB gibi cihazlara ait sürücülerin ve işletim sistemi başlangıç ayarlarının saklandığı, sürücülerle donanım arasındaki ara yüz olan BIOS; donanım üzerinde kullanılan 128 Mbyte SPI NOR Flash hafıza elemanında saklanmaktadır. Sistem için çok kritik olmasından dolayı SPI NOR Flash yapılandırma belleği yedekli olacak şekilde 2 adet kullanılmıştır. Tasarım üzerinde işlemciye bağlı olarak kullanılan bir diğer hafıza elemanı ise Intel Xeon-D üzerinde Windows veya Linux benzeri işletim sistemlerinin yüklenebileceği 64 GB SSD NAND Flash hafıza elemanıdır. NAND Flash işlemciye SATAIII ara yüzü kullanılarak bağlanmıştır.

İşlemciye bağlı olarak tasarımda 2 adet Intel I210 Ethernet kontrolcü bulunmaktadır. Ethernet kontrolcüler tasarımda EtherCAT efendi uygulamalarına alt yapıyı sağlamak için kullanılmıştır. Ethernet kontrolcü ile işlemci arasında haberleşme 1-lane PCIe Gen 2 ara yüzü kullanılarak sağlanmıştır. Ethernet kontrolcü ile EtherCAT verileri dış dünyaya içerisinde trafo bulunan, Şekil 3.4'de pin bilgileri verilen RJ-45 konektörleri kullanılarak 1000 Base-T ara yüzü ile çıkarılmıştır. İçerisinde trafo bulunan RJ-45 konektörleri dış dünyayla donanım arasında izolasyonu sağlamak için tercih edilmiştir.



Şekil 3.4. İşlemci RJ-45 konektör bağlantı bilgileri

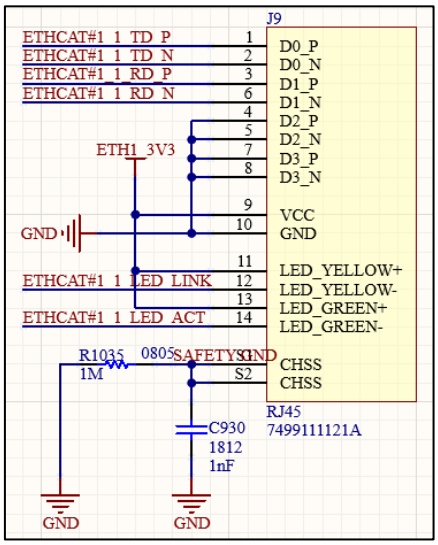
Hata ayıklama ve işlemciyle dış dünya arasında iletişim kurabilmek için işlemciye bağlı 2 USB 2.0 konektör bulunmaktadır. İşlemci ile EtherCAT köle uygulamalarının koşturulacağı FPGA arasındaki haberleşme RJ-45 konektörler aracılığıyla yapılabileceği gibi tasarımda ayrıca FPGA ile işlemci 1-lane PCIe Gen 2 ara yüzü ile birbirlerine bağlanmıştır. Görüntü işleme alt yapısını sağlamak için ise Intel Xeon-D 1559 işlemci ile AMD E9171 GPU arasında 8-lanes PCIe Gen 3 haberleşme ara yüzü kullanılmıştır. İşlemci PCIe ara yüzleri Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. İşlemci PCIe bağlantıları

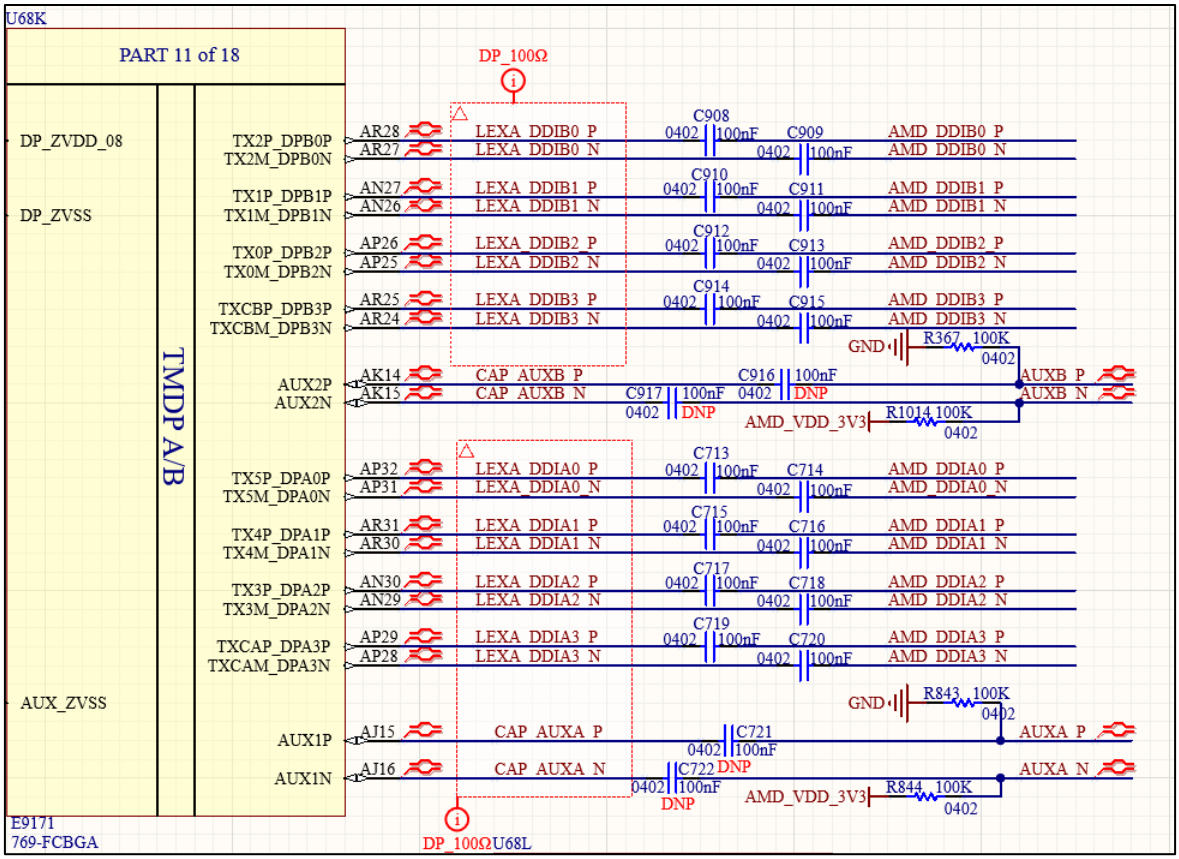
Kintex UltraScale+ serisi FPGA endüstriyel bilgisayar donanımı üzerinde EtherCAT köle yazılım biriminin uygulanması için kullanılmıştır. FPGA'ye bağlı olarak tasarımda 2 ayrı hafıza elemanı kullanılmıştır. FPGA'ye ait yapılandırma verilerinin tutulması ve EtherCAT köle yazılımının üzerinde saklanabilmesi için işlemci tasarımına benzer olarak yedekli yapıda 256 Mbyte SPI NOR Flash hafıza elemanı kullanılmıştır. FPGA'de ayrıca üzerinde gerçekleştirilecek uygulamalarda kullanılmak üzere 16-Bit 1 Gbyte DDR4 hafıza elemanı bağlanmıştır. GPU ile FPGA arasındaki bağlantı DisplayPort ara yüzü ile sağlanmış olup bu yapı FPGA üzerinde görüntü işleme uygulamalarına alt yapı sağlamıştır.

EtherCAT tabanlı endüstriyel bilgisayar donanımının EtherCAT protokolünün desteklediği tüm ağ topolojilerini destekleyebilmesi için donanım üzerinde bazı önlemler alınmıştır. Bunlardan en önemlisi FPGA'ye 4 adet Ethernet kontrolcü ve 4 adet RJ-45 bağlanmasıdır. Bu fiziksel yapı sayesinde ağ topolojilerinin desteklenmesinin yanı sıra efendi-köle ve köle-köle haberleşmelerinin güvenlik seviyesi artırılmıştır. FPGA'de Ethernet kontrolcü olarak TI DP83630 kullanılmıştır. Ethernet kontrolcü ile FPGA arasındaki haberleşme RMII ara yüzü ile sağlanırken dış dünyaya olan EtherCAT köle ara yüzü içerisinde trafo bulunan konektör ile sağlanmıştır. FPGA'ye bağlı RJ-45 konektörlerinden birine ait pin bilgileri Şekil 3.6'da verilmiştir. FPGA'ye bağlı diğer RJ-45 konektörlerinin pinleri Şekil 3.6'da verilenle aynıdır.



Şekil 3.6. FPGA RJ-45 konektör bağlantı bilgileri

Donanım üzerinde yer alan AMD Radeon E9171 GPU görev kritik uygulamalarda kullanılmakta ve çok yüksek güvenilirlik değerlerine sahiptir. Tasarımda kullanılan GPU ile FPGA arasındaki bağlantı görüntü işleme olanağı sağlarken GPU ile CPU arasındaki ara yüz ise hem görüntü işleme, hem görüntü oluşturabilme hem de kullanıcılara grafiksek ara yüz olanağı sunmaktadır. Dış dünya ile olan bağlantısını DisplayPort konektörü ile sağlayan GPU da yapılandırma belleği olarak 16 MB SPI NOR Flash hafıza elemanı kullanılmıştır. Tasarımda GPU üzerinde yer alan 5 adet ekran denetleyicisinden ikisi DisplayPort ara yüzü olarak kullanılmış olup biri dış dünyaya diğeri ise FPGA'ye bağlanmıştır. GPU'ya ait DisplayPort bağlantıları Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

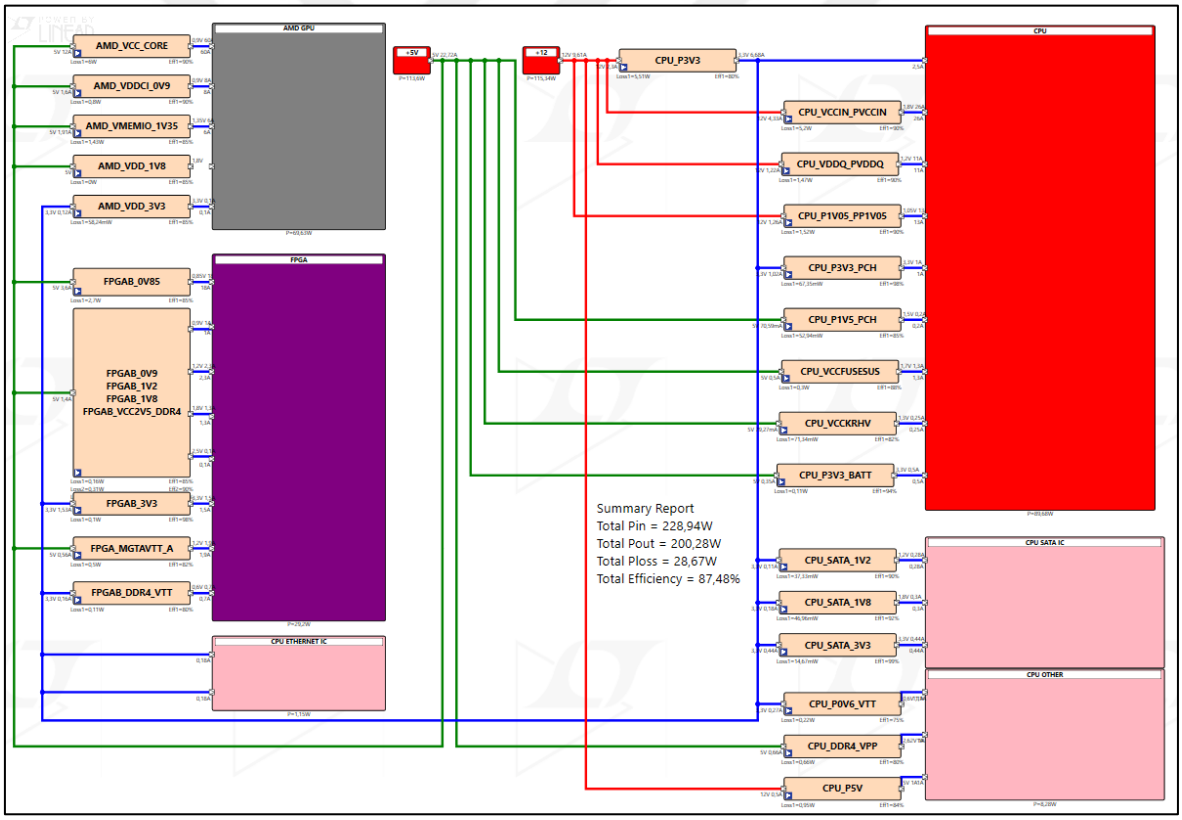


Şekil 3.7. GPU DisplayPort bağlantıları

Tasarımda kart yöneticisi olarak Intel MAX10 serisi CPLD kullanılmıştır. CPLD kart üzerinde yer alan elektronik malzemelerin açılma kapanma zamanlamasının ayarlanmasında, yeniden başlatma işlemlerinin gerçekleştirilmesinde, sağlık verilerinin alınması ve anlamlandırılmasında ve donanımların kontrol edilmesini sağlamak için kullanılmıştır.

3.3. Güç Dağıtım Ağı Tasarımı ve Analizi

EtherCAT tabanlı endüstriyel bilgisayar donanım üzerindeki tüm güç dönüşümlerini dış dünyadan aldığı +12 VDC gücünü kullanarak sağlamaktadır. Tasarımda en fazla güç tüketen işlemci ve GPU'ya ait ana güç ihtiyaçları verimi artırmak için çok fazlı gerilim düşürücüler kullanılarak sağlanmıştır. Bu aşamada GPU temel gerilimi üretilmesi aşamasında AMD SVI2 protokolü uyumlu kontrolcü kullanılırken işlemci için ise Intel VR13 SVID protokolü uyumlu güç kontrolcüleri kullanılmıştır. Tasarımda yer alan diğer güç ihtiyaçları ise DC-DC gerilim düşürücüler ile LDO'lar kullanılarak sağlanmıştır. Tasarımda yer alan temel donanım birimleri olan işlemci, FPGA ve GPU güç tüketimleri dikkate alınarak yapılan güç dağıtım ağı analizi Şekil 3.8'de verilmiştir.

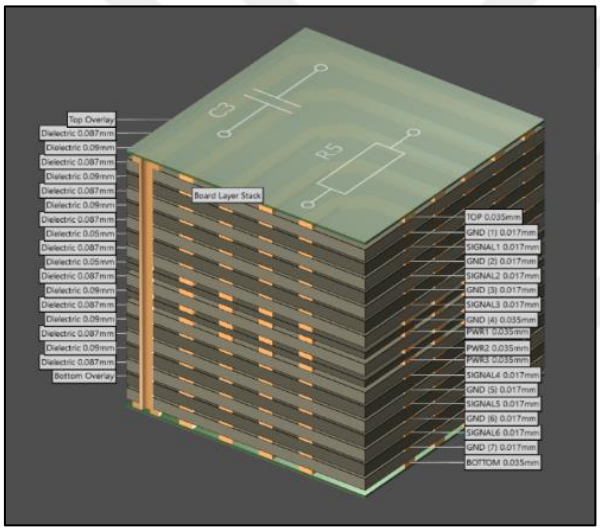


Şekil 3.8. Güç dağıtım ağı analizi

Şekil 3.8'de verilen güç dağıtım analizinde görüldüğü üzere EtherCAT tabanlı endüstriyel bilgisayar donanımının maksimum 230W güç tüketmesi öngörülmektedir. Donanımın çalışması sırasında yaklaşık 30W ısı kaybının beklendiği tasarımda güç veriminin %87 olması öngörülmektedir.

3.4. Stack-Up Hesaplamaları, Yerleşim ve Layout Tasarımı

EtherCAT tabanlı endüstriyel bilgisayar tasarımı üzerinde sinyal bütünlüğü ve güç bütünlüğü konusunda dikkat edilmesi gereken, yüksek hızlı sinyal olarak tanımlanan PCIe Gen 3, PCIe Gen 2, DDR4, SATAIII, USB 2.0, Ethernet, DisplayPort ve RMII vb. ara yüzleri bulunmaktadır. Ürün geliştirme aşamasında kayıpları azaltarak sinyal bütünlüğünü sağlamak için Stack-Up tasarımının gerçekleştirilmesi aşamasında Panasonic firmasına ait Megtron 7 serisi R-5785(GN)/R-5680(GN) dielektrik malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme, düşük dielektrik katsayısına ve düşük dağılım faktörü değerine sahiptir. Tasarımda kullanılan Stack-Up yapısı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Stack-Up yapısı

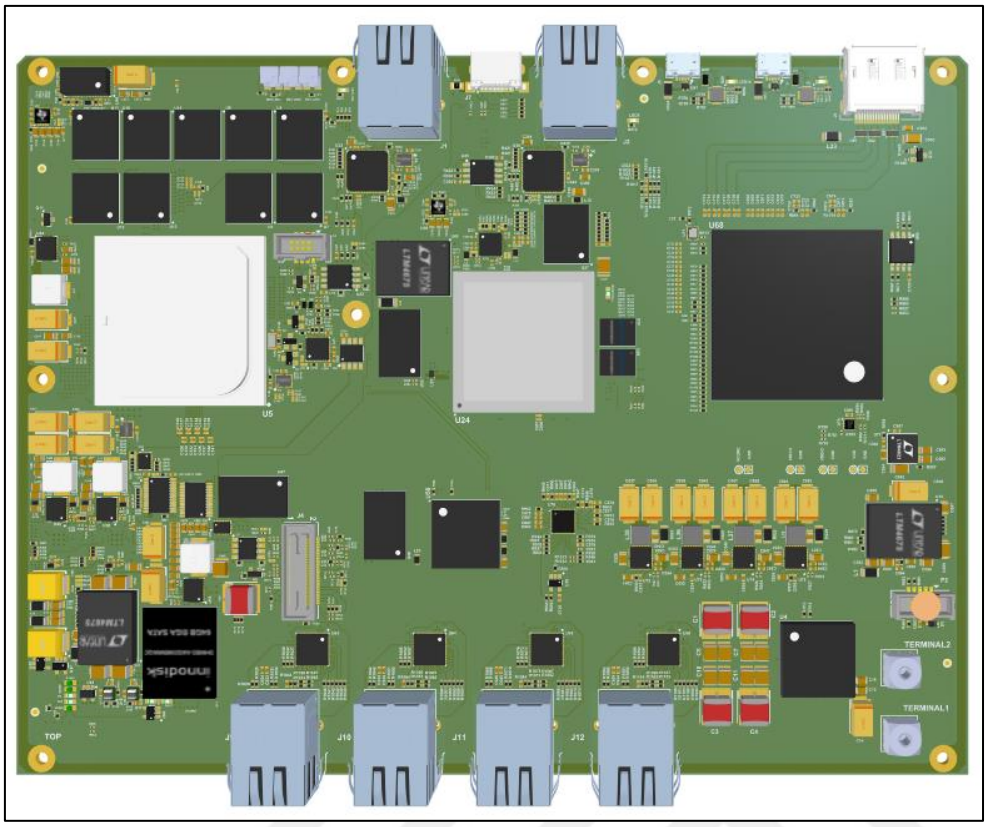
Şekil 3.9'da görüldüğü üzere Stack-Up tasarımı toplamda 18 katmandan oluşmaktadır. Bu 18 katmanın 10'unu güç ve toprak katmanı, 6'sını sinyal katmanı ve 2'sini ise alt ve üst katmanlar oluşturmaktadır. Yaklaşık 1,9 mm yükseklikteki Stack-Up içerisinde alt, üst ve güç katmanlarında 35 mikron, toprak ve sinyal katmanlarında ise 17 mikron bakır kullanılmıştır. Şekil 3.9'da belirtilen Stack-Up tasarımı temel alınarak yapılan hesaplamalar sonrası donanım üzerinde yer alan empedans kontrolü gereksinimi olan hatlarda kullanılması gereken genişlik ve aralık değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Empedans hesaplamaları

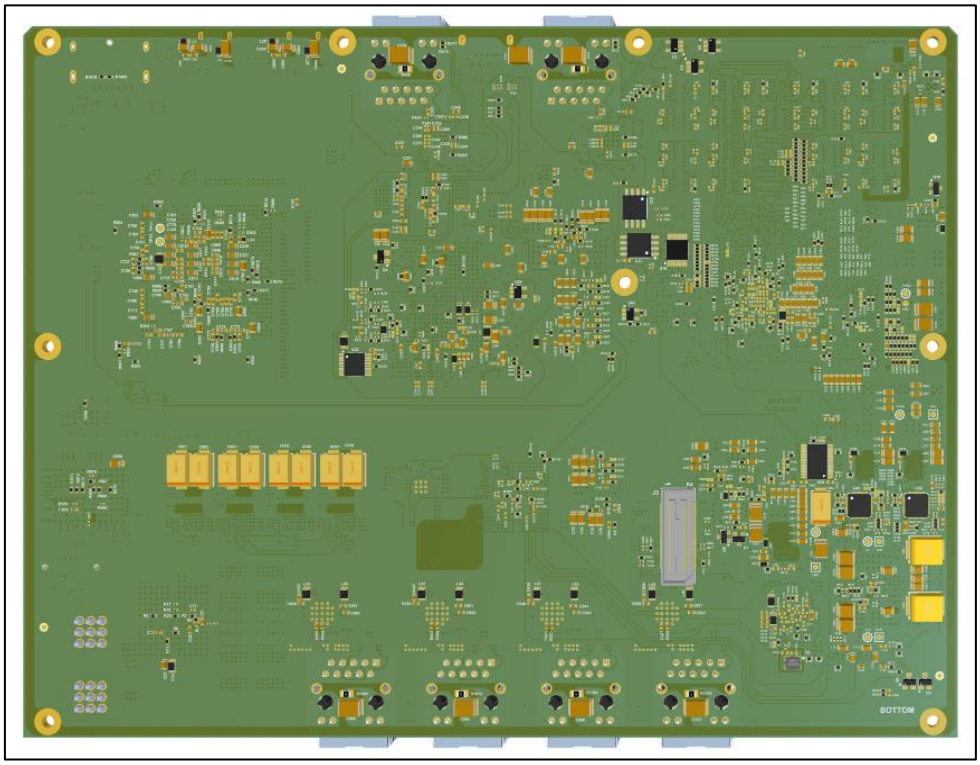
		Genişlik	Aralık	Hesaplanan
Microstrip	40 Ω	0,23 mm	-	41,7 Ω
	50 Ω	0,16 mm	-	50,4 Ω
	80 Ω	0,15 mm	0,09 mm	80,21 Ω
	100 Ω	0,1 mm	0,12 mm	100,52 Ω
Stripline	40 Ω	0,13 mm	-	40,7 Ω
	50 Ω	0,09 mm	-	49,3 Ω
	80 Ω	0,12 mm	0,11 mm	79,57 Ω
	100 Ω	0,08 mm	0,1 mm	94,7 Ω

Endüstriyel bilgisayar donanımı 160 mm'ye 210 mm boyutlarındadır. Donanımın üç boyutlu üst kattan görünüşü Şekil 3.10'da; üç boyutlu alt kattan görünüşü ise Şekil 3.11'de verilmiştir. Elektronik malzemelerin kart üzerine yerleşimi aşamasında malzemelerin termal dirençleri ve güç tüketimleri dikkate alınmaktadır. Termal dirençleri yüksek olan veya çok fazla güç tüketen elektronik malzemeler ile yüksekliği fazla olan malzemeler kart üzerinde üst kata yerleştirilmiştir. Kartın alt yüzünde ise yüksekliği veya termal direnci düşük ve az güç tüketen basit elektronik malzemeler yer almaktadır.

Malzemelerin yerleşiminde, endüstriyel bilgisayar üzerinde güç dağıtımı ve sinyal hatlarının yönlendirilmesinin birbirine etkisini en aza indirgemek amacıyla, kartın sağ ve sol alt bölgelerine güç devreleri yerleştirilmiştir. Dijital devre elemanları ise kartın üst ve alt orta bölgesinde konumlandırılmıştır. İşlemci ve GPU ile iletişimi sağlamak için kullanılan konektörler kartın üst tarafında, FPGA ile olan EtherCAT köle haberleşmesini sağlamak için ise konektörler kartın alt bölümüne yerleştirilmiştir. Kart üzerinde bulunan montaj delikleri, yüksek ısı üreten malzemelere yakın konumlandırılmıştır. Vida deliklerinin üzerlerindeki bakır alanlar açık bırakılarak şasi-metal bağlantısı güçlendirilmiştir.



Şekil 3.10. Endüstriyel bilgisayar donanımı 3 boyut görüntüsü – üst kat



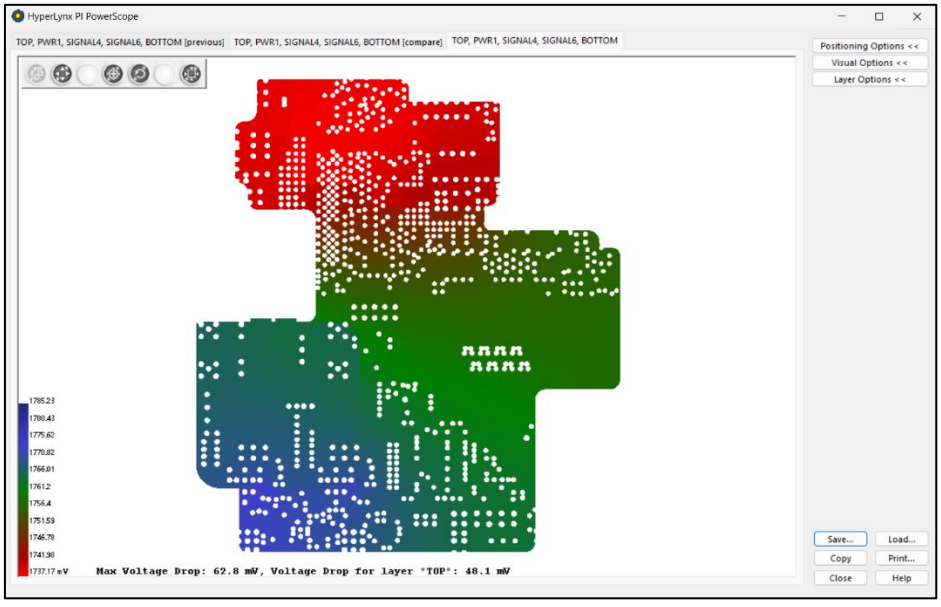
Şekil 3.11. Endüstriyel bilgisayar donanımı 3 boyut görüntüsü – alt kat

PCB üzerinde tasarım aşamasında alınan önlemler ile PCB dizgisi sürecinde yaşanması muhtemel hataların önüne geçilebilir. Kart kenarlarında yer alan elektronik malzemelerin kartın sınırlarına olan uzaklıkları, büyük malzemelerin yanına küçük malzemeler yerleştirilirken malzeme mesafe sınırlarına dikkat edilmesi, serim aşamasında lehim maskesi sınırlarına dikkat edilmesi ile üretimde sürecinde yaşanması muhtemel hatalar önlenebilir. Tasarım gerçekleştirilirken kart kenarlarında bakırdan bakıra mesafe en az 0,5 mm olacak şekilde aralık bırakılmıştır. Kart üzerinde delik geçişli vialar kullanılarak viaların üzerleri kapatılmıştır.

3.5. Gerilim Düşümü Analizi

Gerilim düşümü analizleri aşamasında Hyperlynx SI/PI programı kullanılmış olup analizler donanım üzerinde yer alan, en çok güç tüketmesi öngörülen gerilim kaynakları için gerçekleştirilmiştir. Donanım üzerinde yer alan işlemci temel gerilim kaynağı VCCIN gerilimidir. VCCIN gerilimi için aşağıdaki değerler dikkate alınarak gerilim düşümü analizi yapılmış olup analiz sonucu Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Analiz sonucuna göre VCCIN üzerinde en fazla 62,8 mV gerilim düşümü gerçekleşmesi öngörülmektedir.

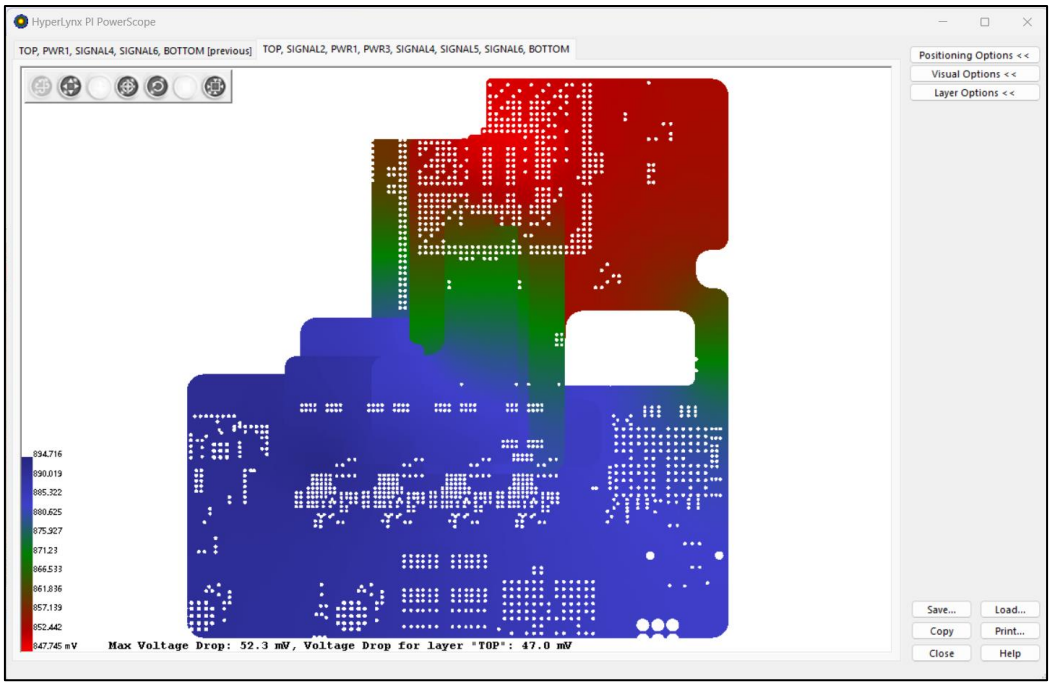
- 1,82 V Nominal Gerilim
- 1,6 V – VCCIN – 1,95 V
- 26 A Besleme Akımı



Şekil 3.12. İşlemci VCCIN gerilim düşümü analizi

(Bkz. Şekil 3.8'de) verilen güç dağıtım ağı analizinde görüldüğü üzere tam yük altında AMD Radeon E9171 GPU temel gerilim kaynağı olan VCC_Core için aşağıdaki değerler dikkate alınarak yapılan analiz sonucu Şekil 3.13'de verilmiştir. Bu analiz sonucunda VCC_Core kaynağında en fazla 52,3 mV gerilim düşümü olduğu görülmüştür.

- 0,9 V Nominal Gerilim
- 0,7 V – VCC_CORE – 1,075 V
- 60 A Besleme Akımı



Şekil 3.13. GPU VCC_Core gerilim düşümü analizi

4. TARTIŞMA

Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı Tez Merkezi üzerinde yapılan taramada "EtherCAT" anahtar kelimesi aratıldığında 2010 ve 2022 yılları arasında gerçekleştirilmiş 2 tanesi doktora tezi olmak üzere toplamda 12 adet tez çalışması olduğu görülmesine rağmen bu tezlerin bir tanesinde EtherCAT protokolü sadece diğer haberleşme protokolleriyle karşılaştırılmak amacıyla kullanılmıştır. 11 adet tez çalışması incelendiğinde çalışmaların tamamının haberleşme protokollerinin EtherCAT üzerinde uygulandığı, anomali tespiti, önleyici bakım, algoritma geliştirilmesi, görüntü işleme ve simülasyon vb. yazılım ağırlıklı uygulamalar olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda kullanılan donanımların tamamının hazır ürün olarak piyasada bulunan PLC, endüstriyel bilgisayar ve hazır geliştirme kartları olduğu görülmektedir. EtherCAT tabanlı endüstriyel bilgisayar tasarımının bu çalışmalardan en önemli farkı dışa bağımlılığı azaltan yerli donanım tasarımıdır. Ayrıca mevcut donanım alt yapısı, analizi yapılan çalışmaların tamamına yakınının geliştirilen donanım üzerinde geliştirilebileceğini göstermektedir.

Aynı veri tabanı üzerinde yapılan taramada "Endüstriyel Bilgisayar" anahtar kelimesi aratıldığında ise mühendislik filtrelemesinin uygulanması akabinde 1991 ile 2024 yılları arasında gerçekleştirilmiş 2 tanesi doktora tezi olmak üzere toplamda 27 adet tez çalışması olduğu görülmüştür. Erişime açık olan çalışmalar incelendiğinde bir tanesi hariç gerçekleştirilen çalışmaların çeşitli sistemlerle ilgili sorunlar veya süreç yönetimi ile ilgili, yazılım uygulamaları, kontrol uygulamaları, görüntü işleme ve hazır ürün kullanılarak gerçekleştirilmiş sistem çözümleri olduğu görülmüştür. 2006 yılında Erhan Uytun tarafından yapılan "Genel amaçlı veri alış veriş kartı tasarımı ve uygulaması" adlı tez çalışmasında mikro işlemci tabanlı veri işleme cihazı tasarlandığı görülmüştür. Modbus protokolünün uygulandığı bu sistem çok eski bir çalışma olduğu için EtherCAT tabanlı endüstriyel bilgisayar tasarımıyla karşılaştırıldığında işlem gücü, uygulanan haberleşme protokolü, görüntü işleme alt yapısı ve paralel işlem alt yapısına sahip olmadığı görülmüştür. Ayrıca çalışmaya ait dokümanda endüstriyel ortamlarda çalışmaya uygun malzeme kullanılmasına yönelik bir bilgi görülmemiştir.

IEEE Xplore veri tabanı üzerinde yapılan taramada "Industrial Computer" ve "EtherCAT" anahtar kelimeleri birlikte taratıldığında 2007 ile 2023 yılları arasında gerçekleştirilmiş 67

adet çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların 55 tanesi konferanslarda geri kalanlarının ise dergilerde yayınlaşmıştır. Çalışmalar incelendiğinde üzerinde hem EtherCAT protokolünün uygulandığı hem de bir donanım geliştirildiği uygulamaların dışında kalan çalışmaların genel olarak hazır donanımlar kullanılarak veya simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar genel olarak motor kontrol uygulamaları, robot uygulamaları, blok zincir, makine öğrenmesi ve yapay zekâ uygulamaları, eş zamanlama ve güvenlik uygulamaları ile EthetCAT protokolü üzerinde koşturulan haberleşme çözümleri olarak sıralanabilir. IEEE Xplore veri tabanı üzerinde toplam 4 adet hem donanım tasarımı içeren hem de EtherCAT protokolünün uygulandığı çalışma olduğu görülmüştür.

Düşük haberleşme gecikmesine sahip, hassas motor kontrol uygulaması sağlamak için tasarlanmış çalışmada motor sürücü donanımında EtherCAT haberleşme alt yapısı kullanılmıştır [20]. Bu çalışmada EtherCAT köle haberleşme alt yapısı Beckhoff ET1100, DSP ve ASIC kullanılarak tasarlanmış.

EtherCAT ağ performansını hız ve eş zamanlama açısından analiz etmek için tasarlanmış, hem EtherCAT efendi hem de EtherCAT köle olabilen gömülü sistemde mikro işlemci olarak MPC8349, köle donanım alt yapısını sağlamak için ise Beckhoff ET1100 kullanılmış [21].

EtherCAT tabanlı ağ geçidi donanım tasarımını içeren çalışmada EtherCAT protokolü ile RS-485 fiziksel alt yapısı birlikte kullanılarak 2 eksenli servo sürücü tasarlanmıştır. Uygulama TMS320F2818 DSP'si kullanılarak gerçekleştirilmiş [22].

Hareket kontrol uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan, yüksek performans modüler haberleşme platformu mimarisi içeren çalışmada kullanılan donanım; Backplane, 6 adet IO modül, üzerine Intel veya Xilinx SOM'ların takılabileceği işlemci kartı ve üç alt modülden oluşan bir sistemdir [23]. EtherCAT köle uygulaması gerçekleştirmek için geliştirilen sistemde FPGA'ler eş zamanlama ve veri işleme amacıyla kullanılmış, sistemde yer alan konektörler ve alt modüller ile de dış dünyayla olan bağlantılara ara yüz sağlanmak istenmiş.

IEEE Xplore veri tabanı üzerinde hem donanım tasarımı içeren hem de EtherCAT protokolünün uygulandığı çalışmaların çoğu ağ performansını ölçmek, motor kontrol, hareket kontrol veya servo sürücü gibi belirli bir fonksiyonu yerine getirmek üzere özelleşmiş tasarımlardır. Tez konusu tasarımı yapılan EtherCAT tabanlı endüstriyel bilgisayar donanımı bu çalışmalardan farklı olarak hem görüntü işleme alt yapısı oluşturmakta hem de sağladığı yüksek işlem gücü ve paralel işlem yapabilme kapasitesi ile EtherCAT tabanlı tüm uygulamaların geliştirilebileceği bir alt yapı sağlamaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez konusu yapılan bu çalışma sonucu tasarlanan endüstriyel bilgisayar donanımı üzerinde endüstriyel haberleşme protokolü olarak düşük gecikme ve yüksek hız imkânı sunan, verilerin belirli bir zamanda iletilmesini garanti eden, entegrasyonu ve uygulama geliştirme ortamlarının daha fazla olduğu, dış ortamlardan gelen saldırılara karşı daha korunaklı endüstriyel Ethernet haberleşme protokolü tabanlı EtherCAT protokolü tercih edilmiştir.

Yapılan tasarımın en önemli özelliği aynı donanım üzerinde EtherCAT efendi ve EtherCAT köle uygulamalarının geliştirilebilmesine olanak sağlamasıdır. Tasarıma eklenen konektörler sayesinde EtherCAT in desteklediği tüm topolojilere uyum sağlanabilmektedir. Tasarımın mevcut diğer ürünlerden bir diğer farkı ise görüntü işleme altyapısına sahip olmasıdır. Kart üzerindeki GPU hem kullanıcılara görüntü ara yüzü sağlamakta hem de görüntü işleme imkânı sunmaktadır. Açık kaynak kodlu yazılım katmanlarının kullanılmasına imkân sunan tasarımda kullanılan elektronik bileşenler endüstriyel şartların sağladığı zorlu koşullara uyum sağlamak üzere seçilmiştir. Tasarım üzerine yapılan analizler, donanım üzerinde EMI-EMC ve ESD özelinde alınan önlemler ve donanım üzerinde yer alan temel bileşenler incelendiğinde geliştirilen sistem endüstriyel uygulamaların yanı sıra birçok alanda kolaylıkla kullanılabilecek durumdadır.

Gelecekte tasarlanan Endüstriyel Bilgisayar Donanımının üretilmesi ve sistem içerisinde yer alan EtherCAT efendi ve EtherCAT köle yazılım birimlerinin yerlileştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca donanım üzerine MIL-STD-1553 veya ARINC-429 gibi havacılık uygulamaları için özelleşmiş ara yüzler eklenerek sistemin kullanım alanlarının geliştirilmesi sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

1. Gupta A.K., Arora S.K. ve Westcott J.R. (2016). *Industrial Automation and Robotics*. (First Edition). Virginia: Mercury Learning and Information, 18-28.

2. Jiang J.R. (2017). *An Improved Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0 Smart Factories*. IEEE International Conference on Applied System Innovation, 1-15.

3. Chen, J., Gao, X., Deng, R., He, Y., Fang, C. ve Cheng, P. (2022). Generating Adversarial Examples Against Machine Learning-Based Intrusion Detector in Industrial Control System. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 19, 1810-1825.

4. Kada, B., Alzubairi, A. ve Tameem, A. (2019). *Industrial Communication Networks and the Future of Industrial Automation*. Industrial & System Engineering Conference (ISEC), 1-5.

5. Stouffer, K., Falco, J. ve Scarfone, K. (2015). Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. Doküman: *NIST SP-800*.

6. Pliatsios, D., Sarigiannidis, P., Lagkas, T. ve Sarigiannidis, A. G. (2020). A Survey on SCADA Systems: Secure Protocols, Incidents, Threats and Tactics. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22, 1942-1976.

7. Wollschlaeger, B., Sauter, T. ve Jasperneite, J. (2017). The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11, 17-27.

8. Sauter T. (2010). The Three Generations of Field-Level Networks—Evolution and Compatibility Issues. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, 3585-3595.

9. Shaikh, M., Shah, P. ve Sekhar, R. (2023). *Communication Protocols in Industry 4.0*. International Conference on Sustainable Emerging Innovations in Engineering and Technology (ICSEIET), 709-714.

10. Aslan, F., Sevgen, Y. N., Ateş, Y. ve Yıldırım, O. (2021). Endüstriyel Tip Makinalarda Verimliliği Artırmak İçin Optimizasyon. *European Journal of Science and Technology*, 25, 355-362.

11. Siddiqui, A. S., Plusquellic, Y. G. J. Ve Saqib, F. (2017). *Secure communication over CANBus*. Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1264–1267.

12. Kanamaru, H. ve Rong, Z. Rong (2015). *International standardization and certification activities of CC-Link Partner Association*. 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 980–985.

13. Xu, L. D., He, W. Ve Li, S. (2014). Internet of Things in Industries: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10, 2233-2243.

14. Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U. ve Gidlund, M. (2018). Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatic*, 14, 4724-4734.

15. Bayılmış, C., Ebleme, M.A., Çavuşoğlu, Ü., Küçük, K. ve Sevin, A. (2022). A Survey on Communication Protocols and Performance Evaluations for Internet of Things. *Digital Communications and Networks*, 8, 1094-1104.

16. Vitturi, S., Zunino ve C., Sauter, T. (2019). Industrial Communication Systems and Their Future Challenges: Next-Generation Ethernet, IIoT, and 5G. *Proceedings of the IEEE*, 107, 944-961.

17. Imanto, T. ve Adriansyah, A. (2020). *Performance Analysis of Profinet Network in PLC-Based Automation System*. 2nd International Conference on Broadband Communications, Wireless Sensors and Powering (BCWSP), 47-52.

18. Rostan, M., Stubbs, J. E. ve Dzilno, D. (2010). *EtherCAT Enabled Advanced Control Architecture*. IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), 39-44.

19. İnternet: EtherCAT Technology Group. (2024). EtherCAT – The Ethernet Fieldbus. *URL:* https://www.ethercat.org/en/technology.html, Son Erişim Tarihi: 14.06.2024.

20. Sung, M., Kim, K., Jin, H. ve Kim, T. (2011). *An EtherCAT-based Motor Drive for High Precision Motion Systems*. 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 163-168.

21. Song, S., Jeon, Y., Kim, J., Seo, S., Kwon, K., Chun, J. ve Jeon, J. (2010). *Implementation and Analysis of the Embedded master for EtherCAT*. International Conference on Control, Automation and Systems, 2418-2422.

22. Yoon, S.S., Lee, J.C., Cho, S.J. ve Jeon, J.W. (2010). *Gateway Between High-performance Fieldbus and Serial Communication*. International Conference on Control, Automation and Systems, 971-974.

23. Setka, V., Jezek, O. ve Novickis, R. (2019). *Modular signal processing unit for motion control applications based on system-on-chip with FPGA*. 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 857-863.



Gazili olmak ayrıcalıktır