

**T.C.
SAKARYAÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**WiMAX(IEEE 802.16)-PROFIBUS ARABAĞLAŞIM
ELEMENİNİN PETRİ AĞLARLA MODELLENMESİ
VE PERFORMANS ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Elektronik Yük. Müh. Murat İSKEFİYELİ

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÖZÇELİK**

Ekim 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

WiMAX(IEEE 802.16)-PROFIBUS ARABAĞLAŞIM
ELEMENİNİN PETRİ AĞLARLA MODELLENMESİ
VE PERFORMANS ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Elektronik Yük. Müh. Murat İSKEFİYELİ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 01/10/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Hüseyin EKİZ
Jüri Başkanı



Doç.Dr.Celal ÇEKEN

Üye


Prof.Dr.Etem KÖKLÜKAYA
Üye



Doç.Dr.İsmail ERTÜRK
Üye



Yrd.Doç.Dr.İbrahim ÖZÇELİK

Üye


TEŞEKKÜR

Gerek mesleki, gerekse sosyal yaşamımda maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, hayat tecrübeleriyle beni yönlendiren, herşeyim olan aileme; akademik anlamda üzerimde emeği olan tüm hocalarıma; bu çalışmamda bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Yrd.Doç.Dr. İbrahim ÖZÇELİK'e, gerek fikirsel gerekse de donanımsal desteklerinden dolayı Sakarya Üniversitesi İris çalışma grubu üyelerine, tez izleme jürisindeki hocalarıma, çalışmamızı proje kapsamında destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Koordinatörlüğü'ne¹, desteklerinden dolayı Bölüm Başkanım Prof.Dr. Ümit KOCABIÇAK'a, bölüm üyesi hocalarıma ve arkadaşlarıma, çalışmam sırasında sıkıntılarımı paylaşan, beni anlayan, yardımlarını esirgemeyen eşime teşekkür ederim.

Murat İSKEFİYELİ

Ekim 2009

¹ Bu tez Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı tarafından 2006-FBD-006 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
TABLolar LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
SUMMARY	xix

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Endüstriyel Otomasyon ve İletişim Gereksinimleri	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önerilen Çözüm Yöntemi	7
1.3. Tez Organizasyonu	7

BÖLÜM 2.

ENDÜSTRİYEL İLETİŞİM SİSTEMLERİ VE PROFIBUS	9
2.1. Giriş	9
2.2. Proses Saha Yolu (PROcess FIeld BUS – PROFIBUS)	10
2.3. PROFIBUS Temel Karakteristikleri	12
2.3.1. PROFIBUS protokol yapısı	12
2.3.2. Fiziksel katman	14
2.3.3. Veriyolu erişim ve iletişim protokolü	14
2.3.3.1. Jeton aktarımı	16
2.3.3.2. Öncelikler	17
2.3.3.3. Çevrim ve sistem reaksiyon zamanları	18
2.3.3.4. Paket yapısı	21

2.3.3.5. Veri iletim hizmetleri	25
2.4. Sonuç	26
BÖLÜM 3.	
KABLOSUZ KENTSEL ALAN AĞLAR – IEEE 802.16, WiMAX	28
3.1. Giriş	28
3.2. Kablosuz İletişim	30
3.3. Kablosuz Genişbandın Gelişimi	31
3.4. WiMAX	32
3.4.1. WiMAX forum	33
3.4.2. WiMAX ve diğer genişbant teknolojiler	33
3.4.3. WiMAX Uygulama alanları	35
3.4.4. WiMAX standartları ve 802.16 ailesi	36
3.5. 802.16 Referans Modeli	37
3.5.1. MAC katmanı	37
3.5.1.1. Yakınsama Alt Katmanı	39
3.5.1.2. MAC ortak alan alt katmanı	39
3.5.1.3. MAC hizmet veri birimi yapısı	40
3.5.1.4. MAC protokol veri birimi yapısı	41
3.5.1.5. Genel MAC başlık yapısı	42
3.5.1.6. Bantgenişliği talep başlığı	43
3.5.1.7. Sınıflandırma	44
3.5.1.8. Servis sınıfları	45
3.5.1.9. Güvenlik katmanı	48
3.5.2. Fiziksel katman	49
3.5.2.1. Lisanslı ve lisanssız bantlar arasındaki farklar	51
3.5.2.2. Uyarlamalı modülasyon ve kodlama	53
3.6. Sonuç	55
BÖLÜM 4.	
MODELLEME ve PETRİ AĞLAR	57
4.1. Giriş	57

4.2. Formal (Biçimsel) Modelleme	59
4.3. Protokol Modelleme	59
4.4. Petri Ağlar	61
4.4.1. Sonlu durum makineleri ve Petri ağ farkı	62
4.4.2. Basit Petri ağlar	63
4.4.3. Petri ağların özellikleri	65
4.4.4. Petri ağ çeşitleri	66
4.4.5. Protokol doğrulama ve erişebilirlik analizi	67
4.5. Petri Ağ Benzetim Programları	67
4.6. Sonuç	70
BÖLÜM 5.	
PROFIBUS/IEEE 802.16 ARABAĞLAŞIM ELEMANININ TASARIMI	71
5.1. Giriş	71
5.2. PROFIBUS Segmentlerinin IEEE 802.16 Üzerinden Arabağlaşımı	72
5.3. PROFIBUS/IEEE 802.16 (WiMAX) Arabağlaşım Biriminin Tasarımı ...	73
5.4. PROFIBUS/IEEE 802.16 (WiMAX) Arabağlaşım Birimi Petri Ağ Modeli	78
5.4.1. Birinci master istasyonun Petri ağ modeli	82
5.4.2. Kablosuz arabirimin PROFIBUS ayağı Petri ağ modeli	83
5.4.3. Kablosuz arabirimin köprü işlem Petri ağ modeli	84
5.4.4. Kablosuz arabirimin WiMAX ayağı Petri ağ modeli	85
5.5. Modelleme Ortamı	87
5.6. Benzetim Sonuçları ve Performans Analizi	88
5.6.1. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi	89
5.6.2. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi	93
5.6.3. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi ...	97
5.6.4. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi	102
5.7. Sonuç	107
BÖLÜM 6	
SONUÇLAR, TARTIŞMA ve ÖNERİLER	110

6.1. Sonuçlar	110
6.2. Çalışmanın Getirdiği Katkılar	114
6.3. Tartışma ve neriler	115
KAYNAKLAR	117
ZGEMİş	128

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

µsn	: Microsaniye
3G	: 3. Nesil (3rd Generation)
AMC	: Uyarlamalı Modülasyon ve Kodlama (Adaptive Modulation and Coding)
AOS	: Ayrık Olaylı Sistem
ARQ	: Otomatik Tekrar Talebi (Automated Repeat Request)
ATM	: Asenkron Transfer Modu (Asynchronous Transfer Mode)
BDS	: Başlık Denetim Sırası
BE	: Elinden Geleni Veren (Best Effort)
BGT	: Bantgenişliği Talebi
BS	: Baz İstasyonu (Base Station)
BT	: Başlık Tipi
BTK	: Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
BWA	: Genişbant Erişim (Broadband Wireless Access)
CAN	: Kontrol Alan Ağı (Control Area Network)
CBR	: Sabit Bit Hızı (Constant Bit Rate)
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (European Organization for Nuclear Research)
CG	: CRC Göstergesi
CID	: Bağlantı Tanımlayıcı (Connection Identifier)
CIM	: Bilgisayar Entegreli Üretim (Computer Integrated Manufacturing)
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control)
CP	: İletişim İşlemcisi (Communication Processor)
CPS	: Ortan Alan Altkatmanı (Common Part Sublayer)
CRC	: Çevrimsel Artıklık Kodlaması (Cyclic Redundancy Check)
CS	: Yakınsama Altkatmanı (Convergence Sublayer)
CSRD	: Çevrimli Cevaplı Veri Gönder ve İste (Cyclic Send and Request)

	Data with Reply)
DA/SA	: Hedef ve Kaynak İstasyon Adresleri (Destination & Source address)
DDLM	: Direk Veri Bağı Eşleyici (Direct Data Link Mapper)
DES	: Ayrık Olaylı Sistemler (Discrete Event Systems)
DFS	: Dinamik Frekans Seçimi (Dynamic Frequency Selection)
DHCP	: Dinamik İstemci Konfigürasyon Protokolü (Dynamic Host Configuration Protocol)
DL	: Aboneye Doğru (Downlink)
DOCSIS	: Kablo Sistem Üzerinden Veri Aktarım Arabirim Belirtileri (Data Over Cable Service Interface Specification)
DP	: Merkezileştirilmemiş Çevrebirim (Decentralized Periphery)
DPM1	: DP Master Sınıf-1
DPM2	: DP Master Sınıf-2
DSL	: Sayısal Abone Hattı (Digital Subscriber Line)
E1	: E Taşıyıcı Hattı (E Carrier Line)
EC	: Şifreleme Kontrol
ED	: Bitiş Belirtecisi (End Delimiter)
ertPS	: Genişletilmiş Gerçek Zamanlı Yoklama Hizmeti (Extended Real Time Polling Service)
ETSI	: Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standard Institute)
FC	: Çerçeve Kontrol (Frame Control)
FCS	: Çerçeve Kontrol Dizisi (Frame Control Sequence)
FDD	: Frekans Bölmeli Çoğullama (Frequency Division Dublexing)
FDL	: Sahayolu Veri Bağı Katmanı (Fieldbus Data Link)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FIP	: Fabrika Alet Düzeni Protokolü (Factory Instrumentation Protocol)
FMS	: Sahayolu Mesaj Özellikleri (Fieldbus Message Specification)
FPGA	: Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array)
FTP	: Dosya Transfer Protokolü (File Transfer Protocol)
FTTH	: Eve Kadar Fiber (Fiber to the home)
GAA	: Genişletilmiş Altbaşlık Alanı

GHz	: Giga Hertz
GSPA	: Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağlar
HDTV	: Yüksek Çözünürlüklü TV (High Definition TV)
HMI	: İnsan Makine Arabirimi (Human Machine Interface)
I	: Input-Giriş
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisliği Enstitüsü (Institute of Electrical Electronics Engineering)
IP	: İnternet Protokolü (Internet Protocol)
ITU	: Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
k	: Düşük öncelikli mesaj çevrim sayısı
kbps	: Kilo Bit Per Second- kb/sn
km	: Kilometer
LAN	: Yerel Alan Ağı (Local Area Network)
LE	: Uzunluk (Length)
LEr	: Uzunluk Tekrarı (Length repeat)
LLI	: Düşük Katman Arabirimi (Lower Layer Interface)
LOS	: Görüş Hattında Olan (Line of Sight)
M	: İşaret (Mark)
m	: Metre
MAC	: Ortam Erişim Kontrolü (Media access control)
MAP	: Üretim Otomasyonu Protokolü (Manufacturing Automation Protocol)
MB	: Megabayt
Mbps	: Mega bit per second- Mb/sn
MHz	: Mega Hertz
MIMO	: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output)
MMS	: Mobil Çoklu Ortam Mesajlaşma Hizmeti (Multimedia Messaging Service)
mt	: Mesaj çevrimlerinin tekrar sayısı
na	: Master istasyon sayısı

NLOS	: Görüş Hattında Olmayan (Non-Line of Sight)
nrtPS	: Gerçek Zamanlı Olmayan Yoklama Hizmeti (None Real Time Polling Service)
O	: Çıkış (Output)
OFDM	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OFDMA	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
OP	: Operator Paneli
OSI	: Açık Sistemler Arabağlaşımı (Open Systems Interconnection)
P	: Durum (Place)
PA	: Proses Otomasyonu (Process Automation)
PC	: Kişisel Bilgisayar (Personal Computer)
PDU	: Protokol Veri Birimi (Protocol Data Unit)
PHS	: Kullanıcı Verisi Başlık Bastırma (Payload Header Suppression)
PHSI	: Kullanıcı Verisi Başlık Bastırma İndeksi (Payload Header Suppression Index)
PHY	: Fiziksel Katman (Physical Layer)
PLC	: Programlanabilir Mantık Denetleyicisi (Programmable Logic Controller)
PMP	: Noktadan Çoklu Noktaya (Point to Multipoint)
PN	: Petri Ağlar (Petri Nets)
PROFIBUS	: Proses Saha Yolu (Process Field Bus)
QAM	: Dördün Genlik Kiplenim (Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	: Hizmet Kalitesi (Quality of Service)
QPSK	: Dördün Faz Kaydırmalı Kiplenim (Quadrature Phase Shift Keying)
RAM	: Rastgele Erişimli Bellek (Random Access Memory)
RLC	: Radyo Link Kontrolü (Radio Link Control)
rtPS	: Gerçek Zamanlı Yoklama Hizmeti (Real Time Polling Service)
SAP	: Hizmet Erişim Noktası (Service Access Point)
SC	: Tekli Taşıyıcı (Single Carrier)
SD	: Başlangıç Belirtici (Start Delimiter)
SDA	: Kabullü Veri Gönder (Send Data with Acknowledge)

SDL	: Başlangıç Belirtici Veri Bağı (Start Delimiter Data Link)
SDM	: Sonlu Durum Makinaları
SDN	: Kabulsüz Veri Gönder (Send Data with No Acknowledge)
SDU	: Hizmet Veri Birimi (Service Data Units)
SFID	: Hizmet Akış Tanımlayıcı (Service Flow Identifier)
SINR	: Sinyalin Girişim ve Gürültüye Oranı (Signal-to-Interference plus Noise Ratio)
SMS	: Kısa Mesaj Hizmeti (Short Message Service)
SNMP	: Basit Ağ Yönetim Protokolü (Simple Network Management Protocol)
SNR	: Sinyalin Gürültüye Oranı (Signal-to-Noise Ratio)
SPA	: Stokastik Petri Ağlar
SRD	: Cevaplı Veri Gönder ve İste (Send and Request Data with Reply)
SS	: Abone İstasyonu (Subscriber Station)
ŞAS	: Şifreleme Anahtar Sırası
T	: Geçiş (Transition)
t	: Zaman
T1	: T1 Taşıyıcı Hat (T Carrier Line)
$T_{A/R}$: Kabul/Cevap Çerçeve Zamanı
T_{BIT}	: Bit zamanı
T_{BK}	: Bağlantı Kurulum Süresi
TCP/IP	: İletim Kontrol Protokolü/İnternet Protokolü (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)
TDM	: Zaman Bölüşümlü Çoğullama (Time Division Multiplexing)
TDMA	: Zaman Bölüşümlü Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
TFTP	: Bayağı Dosya Transfer Protokolü (Trivial File Transfer Protocol)
T_{ID}	: Boşluk Zamanı (Idle Time)
T_{KIG}	: Köprü İşlem Gecikmesi
T_{MAC}	: MAC Gecikmesi
T_{MC}	: Mesaj Çevrim Zamanı
T_{MC-A}	: A'dan Köprü Master'a Mesaj Çevrimi
T_{MC-B}	: Köprü Master'dan B'ye Mesaj Çevrimi
T_{RR}	: Gerçek Rotasyon Zamanı

$T_{S/R}$: Gönder/İste Çerçeve Zamanı
T_{SD}	: İstasyon Gecikme Zamanı
T_{SDR}	: Cevap Verici İstasyon Gecikme Zamanı
T_{TC}	: Jeton Çevrim Zamanı
T_{TD}	: İletim gecikme zamanı
T_{TF}	: Çerçeve Zamanı
T_{TH}	: Jeton Tutma Süresi (Token Holding Time)
T_{TR}	: Hedef rotasyon zamanı (Target Rotation Time)
UGS	: Talepsiz Tahsisat Hizmeti (Unsolicited Grant Services)
UL	: İstasyona Doğru (Uplink)
UMK	: Uyarlamalı Modülasyon ve Kodlama
vd.	: Ve diğerleri
VDSL	: Çok Yüksek DSL (Very high DSL)
VoD	: Talebe Bağlı Video (Video on Demand)
VoIP	: IP Üzerinden Ses İletimi (Voice over Internet Protocol)
WiBro	: Kablosuz Genişbant (Wireless Broadband)
Wi-Fi	: Kablosuz Bağlantı (Wireless Fidelity)
WiMAX	: Mikrodalga Erişim için Dünya Çapında Erişebilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
WLAN	: Kablosuz Yerel Alan Ağ (Wireless Local Area Network)
WMAN	: Kablosuz Kentsel Alan Ağ (Wireless Metropolitan Area Network)
WPAN	: Kablosuz Kişisel Alan Ağ (Wireless Personal Area Network)
xDSL	: Herhangi bir DSL teknolojisi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Otomasyon hiyerarşi piramidi	2
Şekil 2.1.	PROFIBUS protokol yapısı	13
Şekil 2.2.	Örnek bir PROFIBUS konfigürasyonu	17
Şekil 2.3.	Jeton tutma zamanının türetimi	19
Şekil 2.4.	Bir mesaj çevriminde PROFIBUS hattı üzerinde gerçekleştirilen işlemler	20
Şekil 2.5.	PROFIBUS ortam erişim metodu	21
Şekil 2.6.	Veri bağı çerçeve biçimi	22
Şekil 2.7.	PROFIBUS protokolünde kullanılan çerçeve çeşitleri	22
Şekil 3.1.	Dünya'daki gezgin telefon, internet ve genişbant erişim grafiği ..	29
Şekil 3.2.	Genişbant teknolojilerinin karşılaştırılması	34
Şekil 3.3.	802.16 referans modeli	37
Şekil 3.4.	WiMAX MAC katmanı	38
Şekil 3.5.	MAC SDU yapısı	41
Şekil 3.6.	MAC PDU yapısı	42
Şekil 3.7.	Genel MAC başlığı	42
Şekil 3.8.	Bantgenişliği talep başlığı	43
Şekil 3.9.	Aşağı yönde sınıflandırma ve CID haritalama	45
Şekil 3.10.	Yukarı yönde sınıflandırma ve CID haritalama	45
Şekil 3.11.	Mesafeye bağlı olarak modülasyon seçimi	54
Şekil 3.12.	Kullanılan modülasyona göre SINR-Verim grafiği	54
Şekil 4.1.	Basit Petri ağı	64
Şekil 4.2.	Basit Petri ağının ateşlemesi	65
Şekil 4.3.	HPSim benzetim programı arayüzü	69
Şekil 5.1.	PROFIBUS segmentlerinin IEEE 802.16 (WiMAX) ile arabağlaşımı	73

Şekil 5.2.	Arabağlaşım birimi protokol mimarisi	73
Şekil 5.3.	PROFIBUS paket yapısı	74
Şekil 5.4.	IEEE 802.16 çerçeve yapısı	75
Şekil 5.5.	PROFIBUS çerçevelerinin IEEE 802.16 MAC PDU ile kapsüllenmesi	75
Şekil 5.6.	Genel sistem yapısı	77
Şekil 5.7.	Modelin genel blok diyagramı	78
Şekil 5.8.	Sistemin Petri ağ modeli	80
Şekil 5.9.	Paketlerin izlediği yollar	81
Şekil 5.10.	M _{A1} bloğunun iç yapısı	82
Şekil 5.11.	M _{A2} bloğunun iç yapısı	83
Şekil 5.12.	K _A bloğunun iç yapısı	85
Şekil 5.13.	W _A bloğunun iç yapısı	86
Şekil 5.14.	HPSim benzetim ortamı	88
Şekil 5.15.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y)	90
Şekil 5.16.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y)	91
Şekil 5.17.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y)	92
Şekil 5.18.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)	93
Şekil 5.19.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y)	94
Şekil 5.20.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y)	95
Şekil 5.21.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y)	96
Şekil 5.22.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)	97
Şekil 5.23.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)	99
Şekil 5.24.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)	100
Şekil 5.25.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%30Y)	101
Şekil 5.26.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)	102
Şekil 5.27.	Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)	104

Şekil 5.28. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)	105
Şekil 5.29. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%30Y)	106
Şekil 5.30. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)	107

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	İletim hızlarına dayalı olarak mesafe özellikleri	14
Tablo 3.1.	IEEE 802.16 standart sürümleri	36
Tablo 3.2.	Genel MAC Başlığı Alanları	42
Tablo 3.3.	Bantgenişliği İstek Başlığı Alanları	44
Tablo 3.4.	WiMAX'ta desteklenen servis sınıfları	48
Tablo 3.5.	Farklı standartların karşılaştırılması	51
Tablo 3.6.	TDD ve FDD karşılaştırılması	52
Tablo 5.1.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y) ..	89
Tablo 5.2.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y) ..	90
Tablo 5.3.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y) ..	91
Tablo 5.4.	Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)	92
Tablo 5.5.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y) ...	93
Tablo 5.6.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y) ...	95
Tablo 5.7.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y) ...	96
Tablo 5.8.	Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)	97
Tablo 5.9.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)	98
Tablo 5.10.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)	99
Tablo 5.11.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%70Y)	100
Tablo 5.12.	Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)	102
Tablo 5.13.	Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)	103

Tablo 5.14.	Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)	104
Tablo 5.15.	Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%30Y)	105
Tablo 5.16.	Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)	107

ÖZET

Anahtar kelimeler: PROFIBUS, WiMAX, IEEE 802.16, Petri Ağlar, Arabağlaşım

Endüstriyel kontrol uygulamalarında saha seviyesindeki dağıtık kontrolör cihazların haberleşmesinde sahayolu ağları kullanılmaktadır. PROFIBUS (PROcess FIEld BUS) uluslararası standartlarla (IEC61158, EN50170) tanımlanmış en popüler sahayoludur. Üretim (fabrika), süreç ve bina otomasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılan PROFIBUS, 100 m ile 1200 m mesafede 9.6 kbps ile 12 Mbps arasındaki iletişim hızlarını desteklemektedir. Bu durum, PROFIBUS'ın daha geniş kapsama alanları ve yüksek hızlarda kullanılabilmesi için omurga teknolojisine sahip arabağlaşım elemanlarının kullanımını gerektirir.

Arabağlaşım için kullanılan omurga protokolü gereksinimleri gelişen teknolojilerle birlikte değişmektedir. Günümüzde, kurulum kolaylığı ve hareketlilik avantajlarından dolayı kablolu omurga çözümlerine karşılık, kablosuz omurga çözümleri de kullanılmaya başlanmış ve hızla yaygınlaşmaktadır. Kablosuz genişbant omurga teknolojisi olan IEEE 802.16-WiMAX, görüş hattında 50 km'lik bir kapsama alanı, 120 Mbps veri transfer hızı ve farklı servis sınıflarında (UGS, rtPS, nrtPS, BE, ErtPS) hizmet kalitesi sunan bir protokoldür.

Bu çalışmada, farklı lokasyonlardaki PROFIBUS segmentlerini IEEE 802.16-WiMAX kablosuz omurga teknolojisi üzerinden UGS servis sınıfı kullanarak birbirine bağlayan bir arabağlaşım birimi önerilmektedir. Bu birimin, senkronizasyon, koşut zamanlılık, kilitlenmeyi önleyebilme, üstel dağılım ve sabit zaman gecikme özellikleri olan Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağlar modeli sunulmaktadır. Ayrıca, model içerisinde PROFIBUS paketlerinin IEEE 802.16 paketleri içerisinde kapsüllendiği önerilmektedir.

Tasarlanan PROFIBUS/IEEE 802.16-WiMAX arabağlaşım birimi, geçit çıkış tampon boyutu, geçit giriş tampon boyutu, master istasyon jeton tutma süresi ve geçit PROFIBUS ayağı jeton tutma süresi parametrelerine bakılarak değerlendirilmiştir. Benzetimlerden alınan sonuçlar, arabağlaşım biriminin, farklı yükler altında yeterli bir hizmet sağladığını ve fiziksel gerçekleştirilmesini yapacak olan kişiler için de başarımı ölçülebilir bir tasarım modeli sunduğunu göstermektedir.

MODELLING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF WiMAX (IEEE 802.16)-PROFIBUS INTERNETWORKING DEVICE BY PETRI NETS

SUMMARY

Keywords: PROFIBUS, WiMAX, IEEE 802.16, Petri Nets, Internetworking

In the application of industrial controlling, fieldbuses are used in the communication of distributed controller devices at field layer. PROFIBUS (PROcess FIeld BUS) which is defined with the international standards (IEC61158, EN50170) is the most popular fieldbus. PROFIBUS which is used frequently in manufacturing (factory), process and building automations, provides datarates from 9.6 kbps to 12 Mbps at distance from 100 to 1200 meters. This situation requires using of internetworking units which has backbone technology, for using PROFIBUS at more coverage area and high datarates.

The requirements of a backbone protocol used for internetworking, are changed by the development in technology. Nowadays, because of advantages of easiness in installation and mobility, in addition to the wired backbone solutions, wireless backbone solutions began to be used and rapidly became common. As a wireless broadband backbone technology, IEEE 802.16-WiMAX is a protocol that can serve a 50 km coverage area, a 120 Mbps datarate and a QoS at different service classes (UGS, rtPS, nrtPS, BE, ErtPS) in line-of-sight.

In this study, an internetworking unit is proposed that interconnects PROFIBUS segments placed at different locations through a wireless backbone technology of IEEE 802.16-WiMAX by using UGS service class. By the features of synchronization, concurrent, deadlock avoidance, exponential distribution and constant time delay, Generalized Stochastic Petri Nets model of the unit is done. Also in the model, it is proposed that PROFIBUS packets are encapsulated into IEEE 802.16 packets.

The designed PROFIBUS/IEEE 802.16-WiMAX internetworking unit is analyzed according to gateway output buffer size, gateway input buffer size, master station token holding time and gateway PROFIBUS side token holding time parameters. The outputs of simulations show that internetworking unit can support a sufficient service under different loads and present a designed model with a measurable performance for the people who want to implement it physically.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Endüstriyel Otomasyon ve İletişim Gereksinimleri

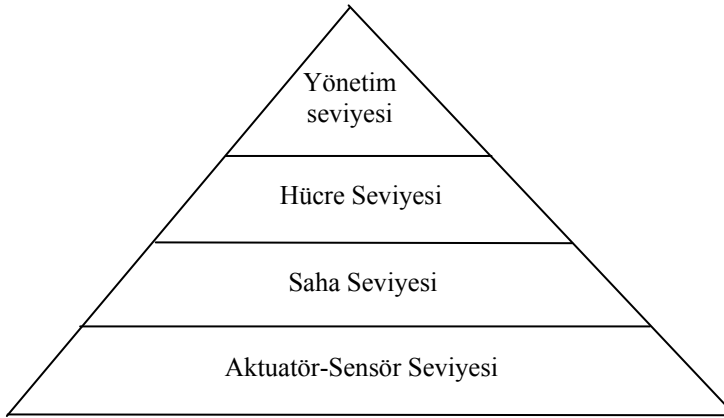
İletişim, modern dünyanın getirdiği gereksinimlerden biridir. Geçmişten bugüne kadar farklı iletişim ihtiyaçları için yapılan talepler, çeşitli iletişim protokollerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. İletişimde kullanılan kuralların/yöntemlerin tanımlanması olarak açıklanabilecek protokoller, cihazların bağlanma karakteristiklerine, cihazların buldukları ortama, gönderecekleri/alacakları veri büyüklüklerine ve uygulama gereksinimlerine göre birbirlerinden az ya da çok farklı olabilirler.

Endüstriyel bir ortamda, üretime ve planlamaya katkıda bulunan tüm cihazların doğal olarak birbirleri ile haberleşmesi istenir. Bu cihazlar; sahadaki PLC, CNC, robot, kontrol cihazları, vb. olabildiği gibi, tesisin bürolarında kullanılan ve değişik firmalara ait olan bilgisayar sistemleri, modelleme bilgisayarları gibi çok çeşitli donanımlar olabilir.

Kontrol uygulamalarında kullanılan bu cihazların farklı gereksinimleri, çeşitli kontrol seviyelerini ortaya çıkartır. Bundan dolayı, endüstride yapılan otomasyon projeleri belirli bir hiyerarşi içerisinde yürütülür. Bu hiyerarşi, “Bilgisayarla Tümüleşik Üretim (Computer Integrated Manufacturing, CIM) modeli” veya “Otomasyon Hiyerarşisi” olarak tanımlanır Jones (1989), Kokkinaki (1997).

CIM modeli ya da Otomasyon hiyerarşisi, genel olarak piramit biçiminde gösterilen ve birbirleriyle doğrudan ya da dolaylı olarak iletişimde bulunan dört seviyeden oluşur (Şekil 1.1): Aktuatör-Sensör (piramidin en altındaki seviye), Saha, Hücre (fabrika) ve Yönetim Lawrenz (1997), Samson (1999), Siemens (1999), Neumann (2001).

Hiyerarşideki seviyeler, bağlanan düğüm sayısı, istenen reaksiyon zamanı, transfer edilecek bilgi miktarı, transfer sıklığı, istenen güvenilirlik, vb. faktörlerden dolayı benzer olmayan veri akışlarına sahip olurlar. Bu faktörlerden veri miktarı ile reaksiyon zamanı arasındaki ilişki, seviyeleri ortaya çıkartır Lawrenz (1997), Özçelik (1999).



Şekil 1.1 Otomasyon hiyerarşi piramidi.

Otomasyon hiyerarşisinde en üst seviye olarak **Yönetim seviyesi** bulunur. Yönetim seviyesi, “planlama seviyesi” olarak da isimlendirilir. Burada saha ortamından çıkılmıştır ve çalışmalar artık büro ortamı içinde gerçekleştirilir. Üretim ihtiyacının karşılanması için gereken hammadde miktarları, ne zaman sevk edilmesi gerektiği, hangi yolları kullanarak bu sevk işlemlerinin yapılacağı, makinelerin çalışma zamanlarına bağlı olarak verimleri, olağanüstü durum aktiviteleri, vb. tüm stratejik kararlar bu seviyede verilir. Ethernet ve TCP/IP, bu seviyedeki ihtiyaçları karşılayan protokollerdir. TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) ile birlikte Ethernet, bu seviyenin ihtiyaçlarını karşılar Samson (1999), Leblanc (2000), Neumann (2001).

Otomasyon hiyerarşisindeki üçüncü seviye **Hücre (cell) seviyesi** olarak isimlendirilir. Bu seviyeye aynı zamanda “fabrika seviyesi” de denir. Bu seviyede PLC, CNC, PC, vb. her türlü kontrol cihazı bulunur. Bu cihazların kendi aralarındaki ve üst seviyelerle olan haberleşmesi son derece önem taşır. Bu seviyede genellikle yüksek oranda veri transferi yapılmaktadır ve bu verilerin hızları artık daha alt seviyelerde olduğu kadar kritik olmaktan çıkar. Endüstriyel Ethernet, Mini-MAP ve Profibus-

FMS sistemleri, bu seviye içindeki iletişimde ve bu seviyenin bir üst seviye olan ofis seviyesi ile arasındaki iletişimde en çok kullanılan haberleşme sistemleridir Lawrenz (1997), Samson (1999). Ayrıca süreç ile ilgili olan çeşitli modelleme programları ve yapılan çizimleri makinelerin anlayacağı dile çeviren programlar da bu seviye içerisinde tanımlanır.

Otomasyon hiyerarşisindeki ikinci seviye, **Saha seviyesidir**. Burada sahanın değişik yerlerinde bulunan çeşitli dağıtılmış kontrol cihazları yer almaktadır. Bu cihazlar, üst seviyelerden herhangi bir bilgi almadan da kendi görevlerini yerine getirebilirler. Bu seviyedeki iletişim, sahayolu sistemleri ile olmaktadır. Dünya üzerinde birden fazla sahayolu sistemi bulunmaktadır (Profibus-DP/PA, CANBus, WorldFIP, Interbus-S, vb.). Bu sahayolu sistemleri, cihazların kendi aralarındaki iletişimlerini sağladıkları gibi üst seviye ile de haberleşmelerini sağlarlar. Bu seviyede, süreç verisi çevrimli (*cyclically*) olarak iletilirken, alarmlar, eğilimler (*trends*) parametreler ve teşhis verileri de çevrimsiz (*acyclically*) olarak, gerektiğinde iletilecektir. Sahayolları, fabrikanın küçük bir bölümünden tümüne kadar bir fiziksel alanı kapsayabileceğinden dolayı genel olarak LAN olarak kategorize edilirler Hong (1997), Gaw (1997), Park (2000).

Otomasyon hiyerarşisi içerisindeki en alt seviye, **Aktüatör-Sensör seviyesidir**. Bu seviyede sürecin çeşitli yerlerinde bulunan motorlar, sensörler, valfler, ve sıcaklık ölçüm cihazları gibi sahanın en alt seviyesindeki elemanter cihazlar yer alır. Normal olarak bu cihazlar, kendi aralarında bilgi transferi gerektirmezler. Bu seviyedeki cihazlar, bir üst seviyedeki cihazların isteklerine göre çevrimli olarak (*cyclically*) veri transferi yaparlar. Actuator/Sensor (AS)-Interface, yapısı itibarıyla bu seviyedeki uygulamalar için uygun bir veriyolu sistemidir, Özçelik (2002)

Hücre ve saha seviyeleri, gerçekleştirilen otomasyon sisteminin genel kontrol yapısını belirlediğinden dolayı, bu iki seviyenin kendi içerisindeki ve aralarındaki iletişim büyük önem arz eder Lawrenz (1997). Bu sebeple, bu seviyelerin kendi içlerinde ve aralarındaki iletişim için birçok akademik ve ticari çalışmalar yapılmaktadır.

Otomasyon sistemlerinde PROFIBUS protokolünün kullanımı ve başarımların analizi Kwon (1997), Hong (1997), FIP ve PROFIBUS protokollerinin çalışma zamanından

önceki çizelgeleme metodları ve analizleri Vasques (1994), Kim (1997), kablosuz CAN tasarımı Kutlu (1996a), Kutlu (1996b), Bayılmış (2006), endüstriyel ortamlarda CAN protokolünün başarımları analizi Ekiz (1995), Ekiz (1996a), PROFIBUS ağlarındaki gerçek zamanlı iletişimlerin ve hedef jeton rotasyon zamanının analizi Tovar (1998), Tovar (1999a), Tovar (1999b), endüstriyel çoklu ortam uygulamaları için kablosuz sahayolu tasarımı Tovar (2001a), Tovar (2001b), kablolu/kablosuz PROFIBUS tabanlı ağlar üzerinde gerçek zamanlı iletişim Alves (2003), vb. çalışmalar, çeşitli sahayolu sistemlerinin iletişim ihtiyaçları için yapılan akademik çalışmalara örnek olarak verilebilir.

CAN / CAN doğrudan aktarmalı (*pass-through*) köprü tasarımı Ekiz (1996b), Ekiz (1996c), CAN / Ethernet köprü tasarımı Ekiz (1996d), Ekiz (1997a, 1997b), Özçelik (2001a), LonWorks sahayolu ile Ethernet TCP/IP ağlarının bağlantısı Gaw (1997), CAN ağlarının köprü kullanarak birbirine bağlantısı Eltze (1997), Thomas (1997), birbirinden bağımsız PROFIBUS dilimlerinin (*segments*) ATM üzerinden uzak köprü ve çok-portlu (*multiport*) köprü kullanılarak birbirine bağlantısı Kunert (1997), Özçelik (2002, 2004, 2006), saha seviyesindeki protokollerin birbirleri ile çalışabilirliğini gösteren yaklaşım Tranoris (2001), CAN mesajlarının kablosuz ATM üzerinden haberleşmesi Ertürk (2003, 2005), sahayolu sistemlerinin IEEE kablosuz yapılar üzerinden haberleşmesi Cavalieri (1998), CAN segmentlerinin IEEE 802.11 üzerinden haberleşmesi Bayılmış (2006) vb. çalışmalar, benzer ya da farklı iletişim sistemlerinin birbirleri ile olan iletişim ihtiyacını gösteren akademik çalışmalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, endüstriyel otomasyon endüstrisi, endüstriyel iletişim protokollerinin gelişiminde önemli rol oynadıklarından dolayı, birçok iletişim gereksinimi için özel çözümler üretmişlerdir: PROFIBUS / CAN iletişim çözümü PDB2CAN, DPCAN, MAP (*Manufacturing Automation Protocol*) / PROFIBUS iletişim çözümü AIXO, PROFIBUS-DP/ DeviceNet iletişim çözümü DPDN, Interbus / Ethernet iletişim çözümü IBS, vb.

Hücre seviyesinde başlangıçta kullanılan Ethernet protokolü, paylaşımlı bir ortam kullanmasından dolayı gerçek zamanlı iletişimlerini destekleyememe, sınırlı bir band genişliğine sahip olma, vb. dezavantajlara sahipti, Sjodin (2000), Herb (2000). Bundan dolayı Ethernet, otomasyon hiyerarşisinde ortaya çıkan farklı bölgelerdeki

saha sistemlerinin merkezi yönetimi, çoklu ortam uygulamalarının gerçek zamanlı iletişimi, vb. gereksinimleri karşılayamazken, gerçek zamanlı ethernetin geliştirilmesiyle Ethernet protokolüne gerçek zamanlılık özelliği kazandırılmıştır. Fakat, Ethernetin kısa mesafeli oluşu halen devam etmektedir.

Ethernetin dezavantajlarını ortadan kaldırmak üzere yapılan çalışmalarda Kunert (1997), Özçelik (2002), Özçelik vd. (2004, 2006) ATM protokolünü önermişlerdir.

Günümüz teknolojilerinde kablosuz iletişimin yaygınlaşması, iki seviye (hücre ve saha) arasındaki iletişim türünün de kablosuz olması yönünde çalışmalar mevcuttur. CAN segmentlerinin IEEE 802.11 üzerinden haberleştirilmesi örnek olarak verilebilir, Bayılmış (2006). IEEE 802.11 protokolünün mesafe kısıtlaması geniş alan uygulamalarında problem olabilir. Bu sebeple bu araştırmada kablosuz genişbant desteğini kentsel alan ağı seviyesinde veren IEEE 802.16-WiMAX'ın alternatif bir çözüm olabileceği önerilmiştir, İskefiyeli (2007). WiMAX, sabit, göçebe ve gezgin kullanım tarzına göre 50 km'ye kadar bir alana yayın yapabilmektedir. Kablosuz, genişbant ve geniş alan iletişim ortamı ile WiMAX büyük bir avantaj olacaktır.

Kullanılacak arabağlaşım cihazının türü; birbirine bağlanacak sistemlerin ihtiyaçlarına, sistemlerin karakteristiklerine ve sistemlerin bağlantılarının teknolojik olarak mümkün olup olmadığına bakılarak seçilir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında köprü olarak ifade edilen bu yapı günümüz gerçeklemlerinde geçit olarak tanımlanmaktadır.

IEEE 802.16 protokolü ve sahayolu sistemlerinin, OSI referans modelinin 3. katmanını desteklememesi nedeniyle, en uygun arabağlaşım cihazı geçit-arabağlaşım cihazı olacaktır. Arabağlaşım birimi, benzer ya da benzer olmayan LAN'lara bağlı olan istasyonların mantıksal olarak aynı LAN'daymış gibi birbirleriyle haberleşmelerine izin veren bir arabağlaşım cihazıdır Hawe (1984), Held (1993). Bu özellik, sahayolu sistemleri ile IEEE 802.16 arasındaki iletişimi sağlamak için bir arabağlaşım biriminin kullanılabilceğini gösterir.

Protokol gerçeeklemedeki amaç protokol geliştirme aşamasında hataları bulma ve düzeltme, kilitlenmeleri (deadlock) ve işletilemeyen durumları maksimum seviyede önlemektir. Gerçeekleme aşamasında, protokol öncelikle biçimsel olarak tanımlanır ve ardından doğru teknikler, analiz ve protokolün özneteliklerinin gerçeeklenmesinde kullanılır.

Performans analizi protokolün çalışma mekanizmasının incelenmesinde kullanılır ve protokol modelinin temelinde önemli parametreler ile protokolün ana fonksiyonlarının yürütülmesi de sistem benzetimidir. Aynı zamanda benzetim, protokolün biçimsel tanımlamasının bir çeşididir. Bilgisayar sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılan bu biçimsel metotlar sistem özelliklerini tanımlayan matematiksel tabanlı tekniklerdir. Bir metot eğer matematiksel temeli varsa ve biçimsel tanımlama diliyle ifade edilmişse biçimsel (formal) denilir. Modelleme seviyesinde Petri ağlardan başlayıp, özdevinir kuram (otomata teori) ve biçimsel diller üzerinden geliştirilen programlara kadar sistemin eşdeğerine yakın araçlar vardır. Araç seçiminde kişilerin geçmişteki birikimleri etkili olmaktadır Danthine (1980). Biçimsel metotlardan biri de ağ tabanlı yaklaşımlardır. Bu yaklaşım sistemin koşut zamanlı modelinin, ağ içindeki bir düğümden diğere hangi verinin hangi şartlarda akışını gösterecek şekilde ifade eden bir ağ yapısı ile modellenmesidir. Bu yapıya en güzel örnek Petri ağlardır.

Petri ağlar koşut zamanlılığı güzel bir şekilde ifade eder ve yüksek seviyede protokolün kontrol akışının modelini sağlar. İyi yapılandırılmış, modüler tasarıma, azaltılmış kurallara sahip, matematiksel temelli, arzu edilen birçok özelliği analiz edebilen özelliklerine sahiptir. Matematiksel ve grafiksel modelleme aracı olan Petri ağlar, senkronizasyon, koşutzamanlılık, kilitlenme önleyebilme özellikleri ile biçimsel tanımlamalarda kullanılmaktadır.

Petri Ağların haberleşme protokollerinde kullanılabilirliği Heindl (2001), Zhou (1998), Zhou (2006), Park (1996), Lin (1997), Marsan (2000) çalışmalarında görülmektedir. *Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağlar*, üstel dağılımlara ve sabit zaman gecikmelerine olanak verdiğiinden dolayı protokol modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple çalışmada da GSPA tercih edilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Önerilen Çözüm Yöntemi

Daha önce de ifade edildiği gibi, saha seviyesindeki iletişim ihtiyaçları için birçok protokol kullanılmaktadır. Bu çalışmada en başarılı sahayolu sistemlerinden olan PROFIBUS protokolü ile çalışılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, uzak iki PROFIBUS (PROcess FIeld BUS) segmentinin IEEE 802.16 WiMAX kablosuz kentsel alan ağı (WMAN) üzerinden iletişimi sağlayan yerel arabağlaşım cihazlarını tasarlamak ve benzetim yöntemiyle gerçekleştirmektir. Gerçeklenecek arabağlaşım birimi, PROFIBUS protokolünün hem mesafe problemini çözümlenecek hem de hücre seviyesiyle gerçek zamanlı iletişimini sağlayacaktır. Ayrıca, yerel arabağlaşım birimlerin fiziksel gerçekleştirmelerini yapacak olan kişi, kurum veya firmalar için başarıyı ölçülebilir bir tasarım modeli sunulacaktır.

Benzetim aşamasında Petri ağlar kullanılarak, hem modelleme hem de modellenen sistemin performansı incelenecektir.

1.3 Tez Organizasyonu

Yapılan çalışmanın sunulduğu tez, aşağıdaki biçimde organize edilmiştir.

Bölüm 1: Giriş: Bu bölümde problemin tanımı, çalışmanın amacı ve tez organizasyonu hakkında bilgi sunulmaktadır.

Bölüm 2: Endüstriyel İletişim Sistemleri ve PROFIBUS: Bu bölümde sahayolu tanımı ile birlikte otomasyon hiyerarşisi kavramları açıklanmaktadır. PROFIBUS (*Process Field Bus*) protokolleri hakkında bilgi verilmektedir.

Bölüm 3: Kablosuz Kentsel Alan Ağlar – IEEE 802.16, WiMAX: Farklı yapıdaki trafik türlerinin servis gereksinimlerini gerçek zamanlı olarak karşılayabilen IEEE 802.16 protokolü hakkında bilgiler sunulmaktadır.

Bölüm 4: Modelleme ve Petri Ağlar: Bu bölümde, ağ tabanlı bilgisayar sistemlerinin modelleme/benzetim teknikleri ile tasarımı ve analizi, genel bir bakış açısı ile

sunulmakta ve ayrıca arabağlaşım birimi tanımlarını değerlendirmek için kullanılan Petri Ağ kavramı hakkında bilgi verilmektedir.

Blim 5: PROFIBUS/IEEE 802.16 Arabağlaşım Elemanın Tasarımı: Bu bölümde, tasarlanan arabağlaşım biriminin özellikleri verildikten sonra zamanlama gereksinimleri incelenmiştir. PROFIBUS protokolünün, arabağlaşım elemanının ve IEEE 802.16 WiMAX protokolü için UGS servis sınıfı Petri ağ modelleri incelenmiştir. Benzetim sonucunda tampon boyutu, jeton tutma süresi, köprü işlem süresi gibi belirli parametreler irdelenmesi ile performans analizi yapılmıştır.

Blim 6: Sonuçlar: Bu bölümde, yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar sıralanmış ve bunlar üzerine değerlendirmelere yer verilerek yapılan çalışmanın gerek bilime gerekse endüstriye getireceği katkılar tartışılmıştır.

BÖLÜM 2. ENDÜSTRİYEL İLETİŞİM SİSTEMLERİ VE PROFIBUS

2.1. Giriş

İletişim modern dünyanın getirdiği gereksinimlerden biridir. Geçmişten bugüne kadar farklı iletişim ihtiyaçları için yapılan talepler, çeşitli iletişim protokollerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. İletişimde kullanılan kuralların/yöntemlerin tanımlanması olarak açıklanabilecek protokoller, cihazların bağlanma karakteristiklerine, buldukları ortama, gönderecekleri/alacakları veri büyüklüklerine ve uygulama gereksinimlerine göre birbirlerinden az ya da çok farklı olabilirler. Örneğin, yerel bir ortamdaki donanımlar arasında iletişimi sağlayan protokol ile birbirlerinden uzak mesafelerde bulunan donanımlar arasındaki iletişimi sağlayan protokol önemli farklılıklar gösterecektir. Aynı şekilde, yalnızca kişisel bilgisayarlar arasındaki iletişim için kullanılan protokol ile endüstriyel ortamlardaki cihazların iletişimi için kullanılan protokol de birbirinden farklı olacaktır.

Endüstriyel uygulamalar için geliştirilen iletişim protokolleri, yönetimdeki kişilere tüm fabrikanın sistem bilgilerini sunmak için kullanılan fabrika veriyolu (factory-bus) ve otomasyon sahasındaki farklı süreçleri izlemek amacıyla kullanılan sensör, aktuatör, sürücü ve PLC vb. ekipmanlar arasındaki iletişimi sağlamak için kullanılan **sahayollar**dan (fieldbuses) oluşur Lawrenz (1997). Özellikle sahayolları, büyük bir ticari potansiyele sahip olması nedeni ile büyük önem arz ederler.

Düşük fiyatlarda yüksek fonksiyonellik sunan silikon teknolojisindeki hızlı ilerleme, çok zeki saha cihazların gelişimini sağladı. Saha cihazları, çift yönlü sayısal haberleşmeyi desteklemenin yanında teşhis (*diagnostic*), kontrol, bakım (*maintenance*), vb. fonksiyonları da çalıştırabilecek özelliklere sahiptirler Özçelik, vd. (1999).. Bu özellikler, durum, sahayolu sisteminin getirdiği yeniliklerin sonucunda, hem mühendisin saha cihazlarına kolay erişmesine hem de saha

cihazlarının birbirleri ile haberleşmesine imkan tanır. Bu avantajlar, dağıtık (*distrubuted*) kontrol sistemlerinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır.

Bugün, dağıtık kontrol sistemlerini yüksek esneklikte şekillendiren ve aynı zamanda birbirleriyle de yarışma halinde olan Profibus, CANBus, WorldFIP, Interbus-S, P-NET, LonWorks, vb. birçok endüstriyel iletişim protokolü bulunmaktadır. Bu protokollerin herbiri farklı zamanda, farklı organizasyon tarafından ve farklı amaçlar için geliştirilmiştir Tranoris (2001, Pinto (1999), Wolfgang (1999), Özçelik, vd. (1999), Leblanc (2000), Herb (2000)

Bu ana bölümde, endüstriyel iletişim protokollerinin genel kavramlarından/gereksinimlerinden bahsedildikten sonra endüstriyel iletişimde geniş bir pazar payına sahip olan ve CERN (*European Organization for Nuclear Research*) tarafından da önerilen PROFIBUS protokolünün detayları verilecektir.

2.2. Proses Saha Yolu (*PROcess FIeld BUS, PROFIBUS*)

Proses Saha Yolu (*PROcess FIeld BUS, PROFIBUS*), uluslararası standartlarla (IEC 61158, EN 50170) tanımlanmış bir endüstriyel iletişim protokolüdür. PROFIBUS, içerisinde Siemens, ABB, Bosch, Klockner-Moeller, vb. 12 firma ile 5 farklı Alman araştırma enstitüsünün dahil olduğu bir grubun çalışmaları sonucunda ortaya çıkmıştır.

Farklı üreticilerin ürettiği PROFIBUS cihazları arasındaki iletişim, herhangi bir arabirim uyumlaştırması gerektirmeden yapılabilir. Bu özellik PROFIBUS'ın açık (*interoperability*) bir standart olmasını sağlar. Bu özelliğe ek olarak PROFIBUS, hem yüksek hızlı zaman kritikli uygulamalarda hem de kompleks iletişim işlerinde kullanılabilir.

PROFIBUS, endüstriyel uygulamaları gerçeklemek için fonksiyonel olarak geliştirilmiş üç farklı profil sunar: İletişim Profilleri, Fiziksel Profiller, Uygulama Profilleri PROFIBUS Technical Description (1999). Bu profilleri genel hatları ile incelendiğinde:

- **İletişim Profilleri:** İki adet iletişim profili bulunmaktadır ve bunlar kullanıcıların ortak bir iletim ortamı vasıtasıyla verilerini seri olarak nasıl göndereceklerini tanımlar.

Merkezileştirilmemiş Çevreirim (*Decentralized Periphery, DP*): Otomasyon sistemleri ve dağıtık çevreirimleri arasındaki iletişim için tasarlanmıştır. Saha seviyesinde çok yaygın olarak kullanılan bu profil, 4-20 mA analog sinyal ve 24 volt paralel sinyal iletiminin yerine uygun olarak kullanılabilen bir yapıdadır. DP’de hız, mesafeye göre optimize edilmiştir.

Sahayolu Mesaj Özellikleri (*Fieldbus Message Specification, FMS*): FMS, hücre seviyesinde zeki cihazlar arasındaki iletişim için birçok karmaşık iletişim fonksiyonları sunar. PROFIBUS’daki teknik gelişmelerin ve TCP/IP’nin yaygın kullanımının bir sonucu olarak FMS’in gelecekte daha az rol alması beklenmektedir.

- **Fiziksel Profiller:** Sahayolu uygulamaları, genellikle seçilen veri taşıma teknolojisine göre değişmektedir. Taşıma güvenliği, mesafe veya transfer hızı gibi temel isteklerin yanında basit ve ekonomik çözümler oldukça büyük önem taşımaktadır.

Tüm isteklerin / gereksinimlerin tek bir taşıma teknolojisi ile karşılanmasının mümkün olmaması nedeni ile, PROFIBUS üç değişik teknoloji (fiziksel profil) kullanmaktadır:

- Üretim otomasyonundaki genel uygulamalar için RS 485 teknolojisi.
 - Proses otomasyonunda kullanım için IEC 1158-2 teknolojisi.
 - Girişim ve geniş ağ mesafeleri için fiber-optik taşıma.
- **Uygulama Profilleri:** PROFIBUS uygulama profilleri, kullanılan iletim teknolojisi ile iletişim protokolünün etkileşimini tanımlar. Bu profiller, aynı zamanda PROFIBUS ile iletişim boyunca saha cihazlarının davranışını da tanımlar. En önemli PROFIBUS uygulama profili, ölçüm transuderleri, valfler ve pozisyonerler gibi süreç otomasyon cihazlarının parametrelerini ve fonksiyon

bloklarını tanımlayan süreç otomasyonu (*Process Automation, PA*) profilidir. Değişken hızlı sürücüler, insan-makine arabirimi (*Human Machine Interface, HMI*) ve kodlayıcılar için gerekli olan profiller, satıcıdan bağımsız olarak iletişim ve cihaz tiplerinin davranışlarını tanımlarlar, Özçelik (2002)

2.3. PROFIBUS Temel Karakteristikleri

PROFIBUS, saha seviyesinden hücre seviyesine kadar dağıtılmış sayısal kontrol cihazlarının bir ağ üzerinden haberleşmesini sağlayan bir iletişim protokolüdür. PROFIBUS, birden fazla aktif istasyonlu (master) bir sistemdir. Bu yapı, dağıtık çevreirim cihazlarının aynı anda tek bir veri yolu üzerinden kontrol edilmesi ve izlenmesini sağlar.

PROFIBUS, birbirlerine göre işlevsel farklılıklar gösteren iki tip istasyonu destekler: aktif istasyonlar ve pasif istasyonlar.

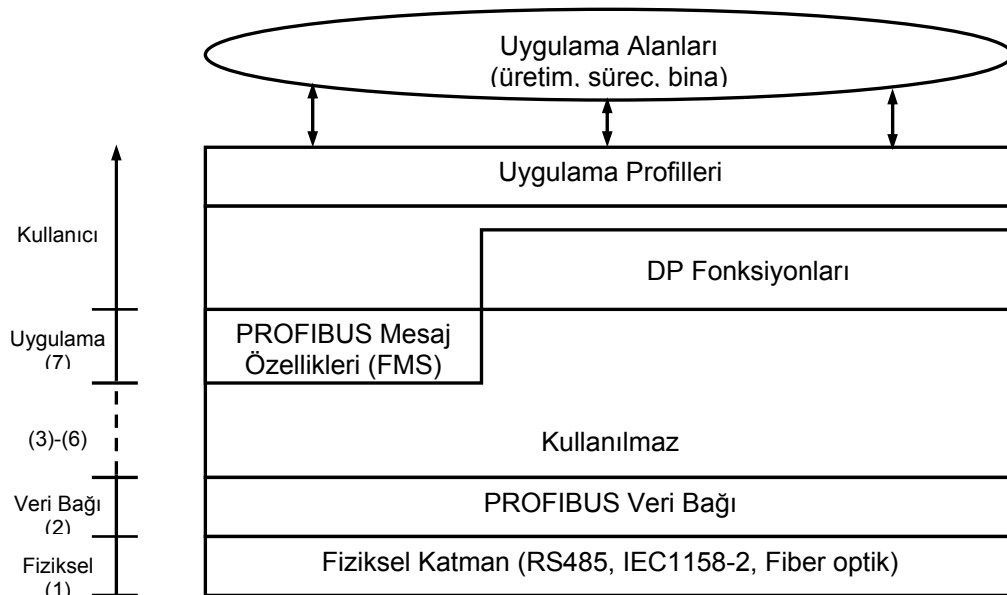
- **Aktif İstasyonlar (Master):** Veriyolu üzerindeki veri trafiğini belirlerler. Veri yoluna ulaşım hakkına (jeton) sahipse, bir master istasyonu herhangi bir dış talep olmadan mesaj gönderebilir. Programlanabilir lojik kontrolörler (*Programmable Logic Controller, PLC*), operatör paneller (*Operator Panel, OP*) ve kişisel bilgisayarlar (*Personel Computer, PC*) master cihazlara örnek olarak verilebilir.
- **Pasif İstasyonlar (Slave):** Çevreirimdeki (*periphery*) cihazlar veya elemanlardır. Giriş / çıkış modülleri, valfler, motor tahrik üniteleri ve transmitter pasif cihazlara örnek olarak verilebilir. Bu cihazların veriyoluna ulaşım hakları yoktur; ya yalnız gelen mesajları teyit ederler ya da master cihazdan istek geldiğinde onlara mesaj gönderirler.

2.3.1. PROFIBUS protokol yapısı

PROFIBUS protokol yapısı, IEC 61158 ve EN 50170 standartları ile tanımlı olup OSI referans modeline dayanmaktadır (Şekil 2.1). OSI referans modeline göre

oluşturulan modelde her katman, kendisi için net olarak tanımlanmış görevleri gerçekleştirir: Katman 1 (fiziksel katman), fiziksel taşıma karakteristiklerini belirlerken, Katman 2 (veri bağı katmanı) veriyolu erişim protokolünü belirler. Katman 7 (uygulama katmanı) ise uygulama fonksiyonlarını tanımlamaktadır.

- PROFIBUS-DP, katman 1, 2' ye ilave olarak kullanıcı arabirimi kullanan etkili bir iletişim protokolüdür. Katman 3, 4, 5, 6 ve 7 bu profil için tanımlanmamıştır. Özelleştirilmiş bu yapı, hızlı ve etkin bir haberleşmeye imkan tanır. Direk veri bağı eşleyici (*Direct Data Link Mapper*, DDLM), kullanıcı arabiriminin katman 2'ye kolay erişimini sağlar. Kullanıcı arabirimi bölümünde, çeşitli cihazlar için kullanıcı fonksiyonları ile sistem ve cihaz reaksiyonları tanımlanmıştır.
- PROFIBUS-FMS, katman 1, 2 ve 7'nin tanımlandığı genel bir iletişim protokolüdür. Uygulama katmanı, Sahayolu Mesaj Özellikleri (FMS) ve Düşük Katman Arabiriminden (*Lower Layer Interface*, LLI) oluşur. FMS, master-master (ana-ana) ve master-slave (ana-uydu) iletişimi için birçok haberleşme hizmeti tanımlarken LLI, çeşitli haberleşme ilişkilerini sağlar.



Şekil 2.1 PROFIBUS protokol yapısı PROFIBUS Technical Description (1999)

2.3.2. Fiziksel katman

PROFIBUS, fiziksel katmanda uygulamaya bağılı olarak üç değişik fiziksel profil (iletim ortamı) desteklemektedir: RS-485 iletim teknolojisi, PROFIBUS-PA için IEC 1158-2 iletim teknolojisi, Fiber optik iletim teknolojisi. Bu iletim teknolojilerinde, haberleşme hızı, kablo uzunluğuna bağılı olarak 9.6 kBit/s ile 12 Mbit/s arasında değişmektedir (Tablo 2.1). Tüm hattın devreye alınabilmesi için bütün cihazların aynı hızı kullanması gereklidir.

Tablo 2.1 İletim hızlarına dayalı olarak mesafe özellikleri.

Hız (kbit/sn)	9.6	19.2	93.75	187.5	500	1500	12000
Mesafe/Segment	1200 m	1200 m	1200 m	1000 m	400 m	200 m	100 m.

İletişim teknolojileri için kablo parametreleri, kablolama, hat sonlandırma ve fiş bağlantılarının detayları Profibus Technical Description (1999) ve IEC 61158 series, (2001)'de bulunabilir.

2.3.3. Veriyolu erişim ve iletişim protokolü

PROFIBUS iletişim profilleri, DP ve FMS, aynı (*uniform*) ortam erişim protokolünü kullanırlar. Erişim protokolü, OSI referans modelinin 2. katmanı tarafından gerçekleştirilir. Ayrıca veri güvenliği, iletim hizmetleri ve paketlerin kontrolü de bu katmanda gerçekleştirilmektedir. PROFIBUS protokolündeki katman 2, sahayolu veri bağı (*Fieldbus Data Link, FDL*) olarak adlandırılır. Bir istasyon veri göndermek istediğinde uygulanacak olan prosedür, ortam erişim kontrolü (*Medium Access Control, MAC*) tarafından belirlenir. PROFIBUS protokolü, MAC'ın iki temel ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanmıştır Profibus Technical Description (1999), Tranoris (2001). Bu ihtiyaçlar:

- Kompleks otomasyon sistemlerinin (master cihazlar) kendi aralarındaki haberleşmesinde her istasyona iletişim görevini yapacak kadar yeterli zaman sağlaması,

- Kompleks otomasyon sistemleri ile kendisine atanmış giriş çıkış üniteleri (slave) arasındaki veri transferinin çevrimsel ve gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmesi.

şeklinde özetlenebilir. Bundan dolayı, PROFIBUS erişim kontrolü, kompleks veriyolu istasyonlarının (master) birbirleri ile haberleşmesi için jeton aktarma prosedürünü (*token passing procedure*), basit giriş çıkış modülleri (slave) ile haberleşme için ise master–slave prosedürünü içerir.

Her master cihaz, jeton aktarma prosedürü sayesinde veriyoluna önceden tanımlanmış zaman aralığı kadar sahip olabilir. Veriyoluna erişim hakkı, bir master cihazdan diğerine özel bir paket olan jeton paketi vasıtasıyla aktarılır. Bu paket, mantıksal bir jeton halkasındaki (*token ring*) tüm master cihazları, önceden tanımlanmış olan maksimum jeton rotasyon süresi (*token rotation time*) içerisinde dolaşmalıdır. Bu süre, daha sonraki güncellemeler için tekrar konfigüre edilebilir. Jeton aktarma prosedürü, yalnız kompleks istasyonların kendi aralarındaki haberleşmelerinde kullanılır.

Master–slave prosedürü; o anda jetona sahip master cihaza, slave cihaz(lar)ına erişim hakkını tanır. Master, slave cihazına mesaj gönderebilir veya onun gönderdiği mesajı okur. Erişim sistemindeki bu prosedürler sayesinde, aşağıdaki konfigürasyonlar gerçekleştirilebilir ki bu yapı, sistem konfigürasyonuna büyük esneklik sağlar Profibus Technical Description (1999), Siemens (2001):

- Master-slave sistem (Mono-master sistemi).
- Master-master sistemi (Jeton aktarma prosedürü) (Slave yok).
- Bu iki sistemin karışımı.

Sistem konfigürasyonu istasyon adedi, istasyon adresi, giriş/çıkış verilerinin tanımı ve kullanılan veriyolu parametreleri ile tanımlanır. DP iletişim profili, iki farklı tipte master cihazı tanımlar:

- **DP Master Sınıf1 (DPM1):** Bu cihazlar, DP slave cihazlara tanımlı bir mesaj çevrimi içerisinde çevrimli olarak bilgi transfer eden PLC veya DP iletişim işlemcisi (*Communication Processor*, CP) takılmış PC sistemleri gibi merkezi kontrol cihazlarıdır.
- **DP Master Sınıf2 (DPM2):** Programlama cihazları, operatör panelleri veya konfigürasyon amaçlı kullanılan cihazlar bu kategoriye girer. Bu cihazlar, DP sisteminin devreye alınması sırasında bağlanan cihazları konfigüre etme, ölçülen değerleri ve parametreleri değerlendirme, cihaz durumunu isteme, programlama ve izleme amaçları için kullanılmaktadır.

Veriyolu sisteminin devreye girmesi sırasında aktif istasyonlardaki MAC'in görevi, bu mantıksal devreyi kurmaktır. MAC, normal işlem sırasında bozuk cihazların halkadan çıkarılmasına veya yeni cihazların sisteme dahil edilmesine izin verir. Bir istasyondaki adresleme hatası, jeton taşıma sırasındaki hatanın (birden fazla jeton paketi veya jeton paketinin kaybolması gibi) tespiti, vb. görevler de PROFIBUS ortam erişim kontrolünün görevleri arasındadır.

PROFIBUS katman 2, bağlantısız iletişim modunda çalışır. İki nokta arasındaki veri transferinin yanında birden fazla istasyona da veri gönderilebilir: Yayın (*Broadcast*) ve çoklu yayın (*Multicast*). Yayın iletişim, bir aktif istasyonun tüm aktif ve pasif istasyonlara teyitsiz veri göndermesidir. Çoklu yayın iletişim, bir aktif istasyonun tanımlı bir grup içindeki tüm aktif ve pasif istasyonlara teyitsiz veri göndermesidir.

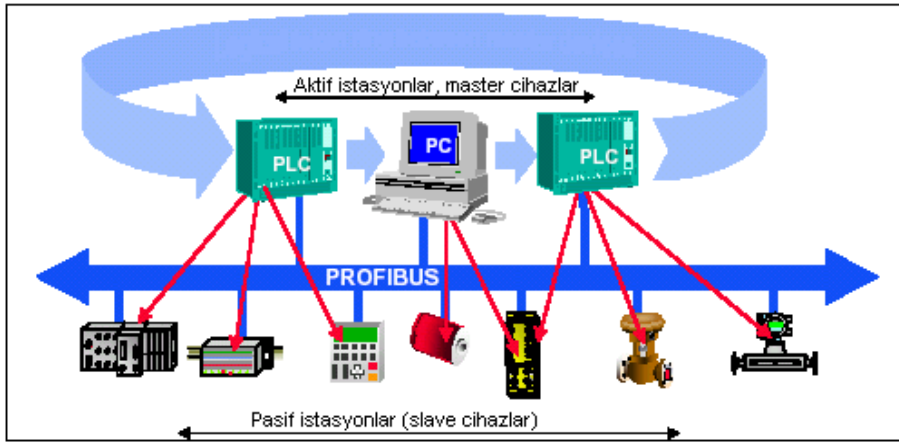
DP iletişim profilinde kontrol cihazı (master) ile slave cihazlar arasındaki çevrimsel veri transferi, başlangıçta bir kez belirlenir ve uygulama sonlandırılana kadar devam eder. DP, kullanıcı verisi için çevrimsel fonksiyonları kullanmasının haricinde teşhis ve alarmların değerlendirilmesi için çevrimsel olmayan iletişim fonksiyonlarını da destekler.

2.3.3.1. Jeton aktarımı

Jeton, bir master istasyondan diğer master istasyona nümerik olarak artan adres

sırasıyla aktarılır. En yüksek adresli istasyonun, jetonu en düşük adresli istasyona göndermesiyle de master cihazlar arasında bir mantıksal jeton halkası oluşturulur.

Şekil 2.2’de örnek olarak verilen sistemde, üç master cihaz (aktif istasyon) ile 7 slave cihaz (pasif istasyon) bulunmaktadır ve üç master istasyon mantıksal bir jeton halkası oluşturmaktadır. Bu halka içinde jeton, bir master cihazdan diğerine aktarılır. Aktif istasyon jeton paketini aldığı anda belirli bir süre master rolünü üstlenir. Master rolünü üstlenen istasyon, diğer master istasyonlar ile master-master veri transferi, tüm slave istasyonlarıyla da master-slave veri transferini gerçekleştirir.



Şekil 2.2 Örnek bir PROFIBUS konfigürasyonu.

2.3.3.2. Öncelikler

PROFIBUS ile kullanılan erişim metodu, “düşük” ve “yüksek” olarak isimlendirilen iki öncelikli bir yapı kullanır. Öncelik, paketin çerçeve kontrol (*Frame Control, FC*) baytı içerisinde tanımlanır. Genel olarak, jeton kabulünden sonra master istasyonun yapacağı işlem, yüksek öncelikli bir mesaj çevrimini gerçekleştirmektedir. Bu mesaj çevriminden sonra hala jeton tutma zamanı (*token holding time, T_{TH}*) mevcutsa, master istasyon sırasıyla sahip olduğu yüksek öncelikli ve düşük öncelikli mesaj çevrimlerini gerçekleştirir.

PROFIBUS erişim protokolü, her bir master istasyona, jeton tutma zamanından (T_{TH}) bağımsız olarak daima bir yüksek öncelikli mesaj çevrimini gerçekleştirmeye izin verir.

2.3.3.3.Çevrim ve sistem reaksiyon zamanları

PROFIBUS’da, erişim kontrolünü gerçeklemek için kullanılan jeton, bir istasyondan diğerine ortama bağlı olan tüm istasyonlar tarafından anlaşılabilir ve uyulan kurallara göre aktarılır. Bu kurallardan biri, MAC’in ana fonksiyonlarından olan jeton rotasyon zamanının kontrolüdür Tovar (1999a). Bu kontrol, jeton aktarma prosedürünün doğasını oluşturur. Daha önce de ifade edildiği gibi jeton aktarma prosedürü; mantıksal bir jeton halkasındaki master cihazların erişim hakkını kazanması ve erişim hakkını kazanan master cihazın veriyolundaki ilgili cihazlarla iletişimini tanımlar. Jeton rotasyon zamanı, aşağıdaki zaman kavramları vasıtasıyla açıklanabilir:

- T_{TR} : Hedef rotasyon zamanı (*Target rotation time*),
- T_{TH} : Jeton tutma zamanı (*Token holding time*),
- T_{RR} : Gerçek rotasyon zamanı (*Real rotation time*).

Jeton alındıktan sonra, jeton rotasyon zamanının ölçümü başlar. Bu ölçüm, bir sonraki jeton varışında eskir ve gerçek rotasyon zamanı (T_{RR}) ortaya çıkar. Bir PROFIBUS ağında minimum hedef rotasyon zamanı (T_{TR}) Denklem 2.1’de belirtilen değişkenlere göre önceden belirlenir.

$$\min T_{TR} = n_a * (T_{TC} + \text{yüksek } T_{MC}) + k * \text{düşük } T_{MC} + m_t * T_{MC} \quad (\text{Denklem 2.1})$$

n_a : master istasyon sayısı.

k : her jeton rotasyonun için kestirilen düşük öncelikli mesaj çevrim sayısı.

T_{TC} : jeton çevrim zamanı.

T_{MC} : mesaj çevrim zamanı.

m_t : her jeton rotasyonu için mesaj çevrimlerinin tekrar sayısı.

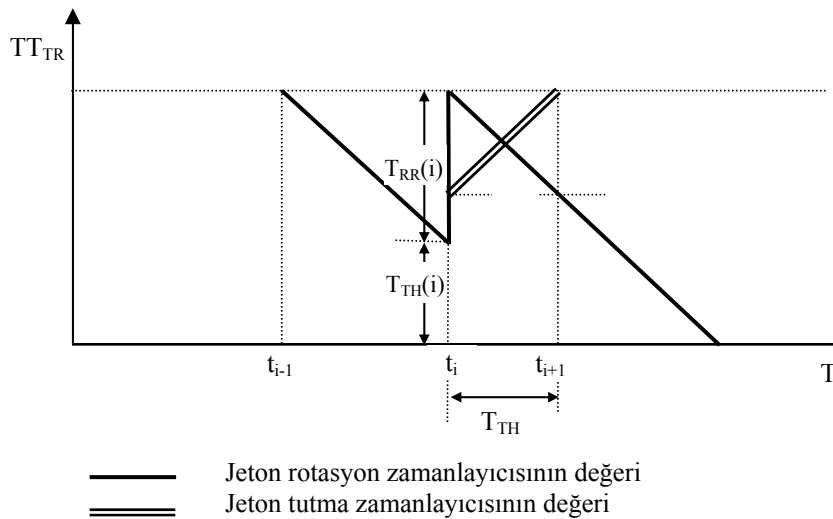
Denklem 2.1’e göre bulunan değer, tüm master istasyonlar için ortaktır ve aşağıdaki belirtilen şekliyle kullanılır IEC 61158 series (2001), Tovar (1999b):

Bir istasyon jetonu aldığı anda, T_{TH} zamanlayıcısına T_{TR} ve T_{RR} arasındaki fark pozitifse, bu fark değeri atanır. PROFIBUS, daha önce de ifade edildiği gibi iki farklı

kategoriye sahip mesaj tanımlar: Yüksek öncelikli mesaj ve düşük öncelikli mesaj. Master istasyon bu farklı öncelikli mesajların çevrimini aşağıdaki kurallara göre gerçekleştirir.

- T_{TH} değeri, hem jeton alımından hemen sonra hem de her mesaj çevriminin başında hesaplanır.
- T_{TH} değeri negatif olsa dahi bile bir yüksek öncelikli mesaj çevrimi, jeton alımından hemen sonra daima gerçekleşir.
- Diğer yüksek öncelikli mesaj çevrimleri T_{TH} değerinin pozitif olma durumuna göre gerçekleşirken düşük öncelikli mesaj çevrimleri yüksek öncelikli mesajlar yoksa gerçekleşir.
- Bir jeton rotasyon zamanı içerisinde bir master istasyonun jeton tutma zamanının tamamını kullanması durumunda, bu master istasyon, bir sonraki jeton çevriminde bir yüksek öncelikli mesajla sınırlandırılır.

T_{TR} , T_{RR} ve T_{TH} zamanlayıcıları arasındaki temel ilişki, Şekil 2.3’de verilmektedir.



Şekil 2.3 Jeton tutma zamanının türetimi IEC 61158 series (2001).

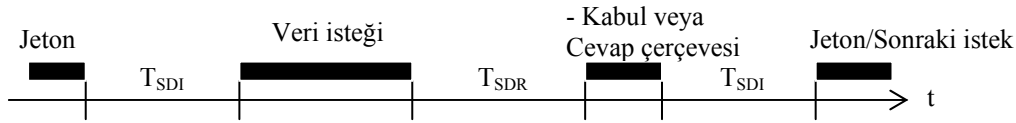
Jeton rotasyon zamanının hesaplanmasında önemli olan kavramlardan biri, mesaj çevrim zamanıdır (T_{MC}). Bir mesaj çevrimi, master cihazın aksiyon çerçevesi (istek veya gönder/istek çerçevesi) ile ilgili cevap vericinin kabul veya cevap çerçevesini içerir. Buna bağlı olarak, mesaj çevrim süresi de aksiyon çerçevesini göndermek ve

ilgili cevabı almak için ihtiyaç duyulan zamanı gösterir ve Denklem 2.2'ye göre hesaplanır.

$$T_{MC} = T_{S/R} + T_{SDR} + T_{A/R} + T_{ID} + 2 * T_{TD} \quad \dots\dots(\text{Denklem 2.2})$$

- $T_{S/R}$: gönder/iste çerçeve zamanı.
 $T_{A/R}$: kabul/cevap çerçeve zamanı.
 T_{SDR} : cevap verici istasyon gecikme zamanı.
 T_{ID} : boşluk zamanı.
 T_{TD} : transfer zamanı.

Kabul/cevap çerçevesi iletildikten sonra, ya jeton çerçevesi bir sonraki master cihaza gönderilecek ya da diğer bir mesaj çevrimi başlayacaktır. Bütün bu bilgilere göre bir mesaj çevrimi boyunca PROFIBUS dilimi üzerindeki işlem, Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4 Bir mesaj çevriminde PROFIBUS hattı üzerinde gerçekleştirilen işlemler.

Sistem kararlılığını sağlamak için kabul ya da cevap çerçevesi, önceden tanımlanan zaman içerisinde başlatan istasyona ulaşmalıdır. Bundan dolayı PROFIBUS slot zamanlayıcısı denilen izleme mekanizmasını kullanır. Slot zamanı içerisinde gönderilemeyen cevap ya da kabul çerçeveleri tekrarlanır. Ağın kurulum safhasında maksimum tekrar sayısı, master istasyonlarda tanımlanması gerekir. Bu değişken değeri de jeton rotasyon zamanını etkilemektedir (Denklem 2.1). Mesaj çevrim ve slot zamanlarının ayrıntılı bir analizi Tovar (1999b)'de sunulmuştur.

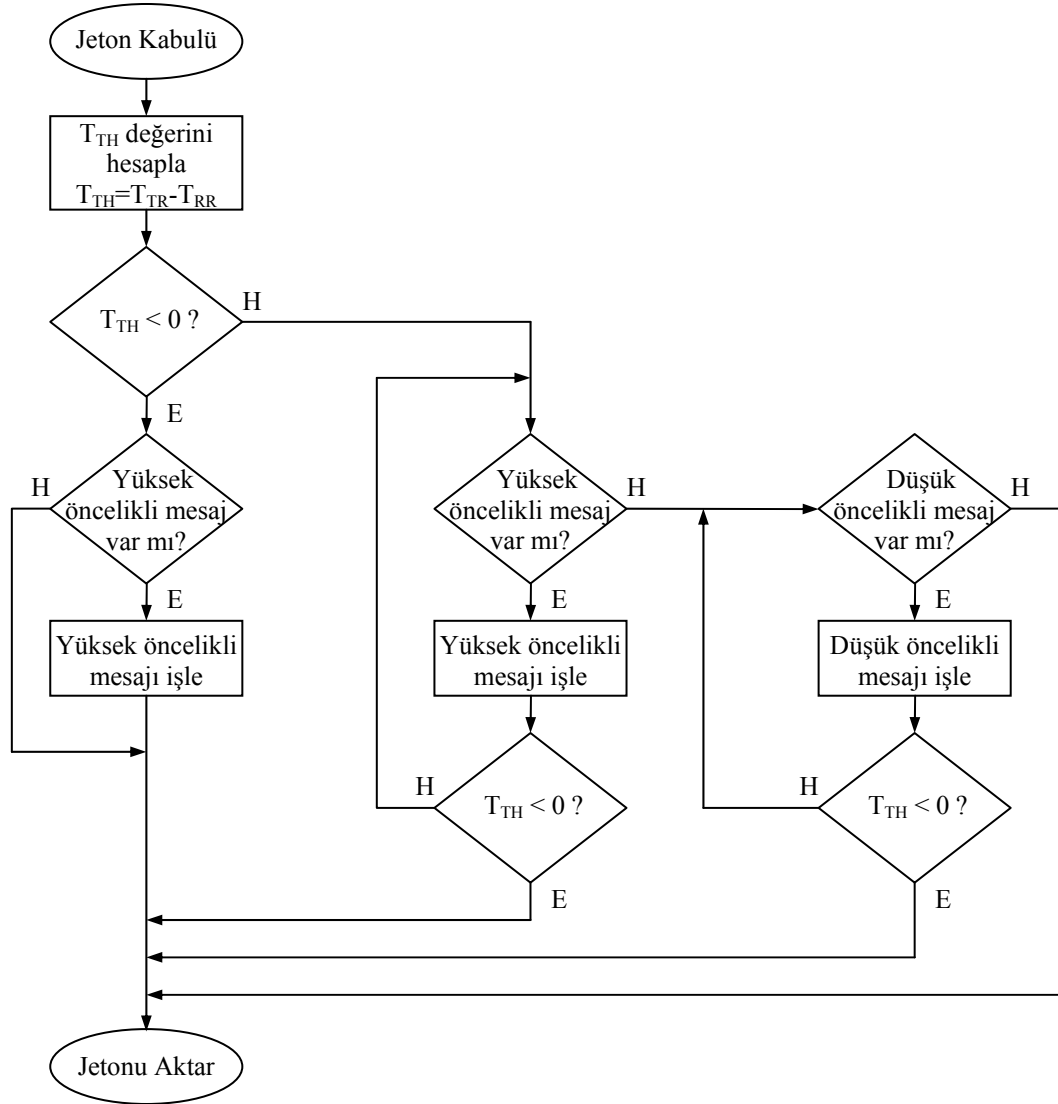
PROFIBUS protokolünde jeton rotasyon zamanını etkileyen diğer bir faktör, jeton çevrim zamanıdır (T_{TC}). Jeton çevrim zamanı (T_{TC}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T_{TC} = T_{TF} + T_{TD} + T_{ID} \quad (\text{Denklem 2.3})$$

- T_{TF} : çerçeve zamanı.
 T_{TD} : iletim gecikmesi.

T_{ID} : boşluk zamanı.

Bütün sistem zamanlarına göre, PROFIBUS ortam erişim protokolü Şekil 2.5'da verilen diyagrama göre gerçekleşir.

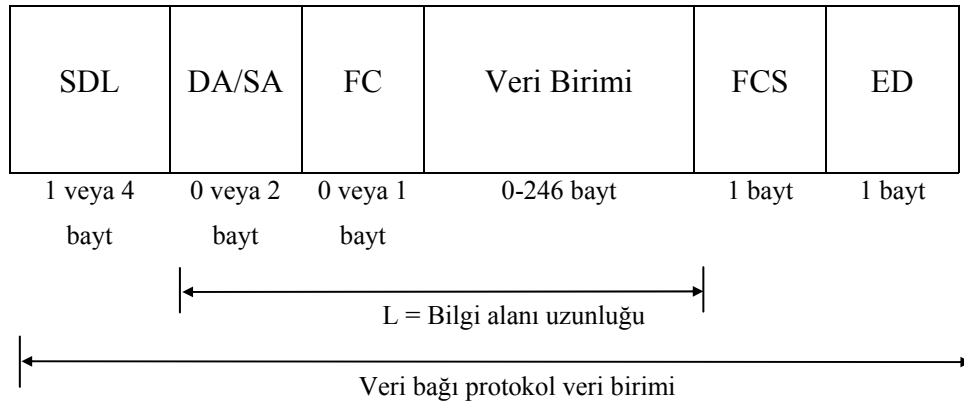


Şekil 2.5 PROFIBUS ortam erişim metodu Kwon (1997), Tovar (1999b).

2.3.3.4. Paket yapısı

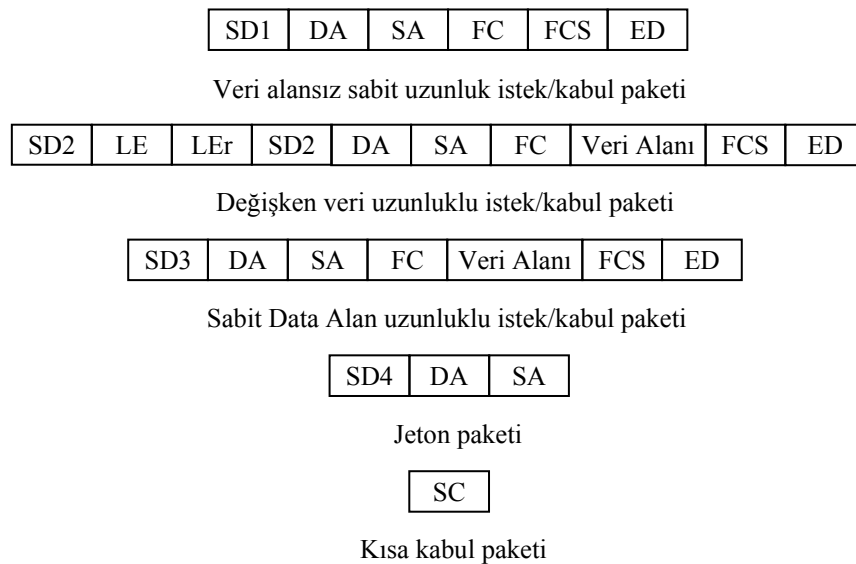
Veri bağı katman paketi genel olarak; bir başlangıç belirtici (*start delimiter*, SD) alanı, bilgi alanı (*information field*), çerçeve kontrol dizisi (*Frame Control Sequence*, FCS) ve bitiş belirticisinden (*End Delimiter*, ED) oluşur IEC 61158 series (2001),

Siemens (1999). Bilgi alanı ise üç farklı kısımdan oluşur: adres alanı, kontrol alanı ve kullanıcı verisinin taşındığı veri birimi. Bir PROFIBUS paketi, maksimum 255 bayttan oluşur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Veri bağı çerçeve biçimi.

Şekil 2.6’de sunulan çerçeve biçimi, Şekil 2.7’de verilen farklı paket yapılarının geliştirilmiş halini temsil eder. PROFIBUS, paket çeşitlerini birbirinden ayırt etmek için başlangıç belirticisini (*Start Delimiter*, SD) kullanır.



Şekil 2.7 PROFIBUS protokolünde kullanılan çerçeve çeşitleri.

SD alanı, iletişim esnasında kullanılan paketin türü ve yapısı hakkında bilgi verir. Örneğin, jeton aktarma prosedürünün üzerine kurulu olduğu jeton (çerçevesi) SD3

başlangıç belirticisi ile tanımlanırken, veri alansız sabit uzunluklu istek/kabul paketi SD1 başlangıç belirticisi ile tanımlanır.

Paket yapılarında bulunan alanların tanımı aşağıda özetlenmektedir:

- Başlangıç belirtici veri bağı (*Start delimiter data link, SDL*): Bu alan 1 veya 4 bayt büyüklüğe sahip olabilir. Değişken veri uzunluklu bir çerçeve için bu alan, bilgi alanı uzunluğunu (*Length-LE, Length repeat-LEr*) gösteren alanların eklenmesi ile 4 bayt olarak gösterilir.
- Hedef ve Kaynak istasyon adresleri (*Destination & Source address*): Kısa kabul paketi haricinde PROFIBUS protokolünde kullanılan tüm paketler, hedef ve kaynak adres alanları içerir. Jeton paketi, başlangıç belirtici alanı ve bu iki adres baytından oluşur. Jeton aktarımı, bu adresler vasıtasıyla gerçekleşir.

Bu adres baytları, master ve slave istasyonlar için toplam 127 adres tanımı (0'dan 126'ya) yapabilir. Zaman kritikli uygulamalarda 127 istasyondan maksimum 32'si master cihazlar tarafından kullanılabilir. Fakat zaman kritikli olmayan uygulamalarda tamamı master istasyonlar tarafından kullanılabilir. DP konfigürasyonunda en az 1 master istasyon (mono-master sistem) gerekli olduğundan, maksimum 126 slave istasyon adresine izin verilir.

Adres 127 (ilk yedi bitin 1 olması), yayın (*broadcast*) ve çoklu yayın (*multicast*) mesajları için global adresler olarak ayrılmıştır. Bu ikisi arasındaki seçim, özel veri bağı hizmeti vasıtasıyla yapılır.

Eğer 127'den daha fazla istasyonun adreslenmesi istenirse, adres baytlarının en anlamlı biti lojik 1'e kurulur. Lojik 1 değerine kurulan adres baytı için veri alanında 1 baytlık adres uzantı baytı tahsis edilir. Bu uzantı bayt(lar)ı, kontrol baytından hemen sonra gelir.

Düğüm, aldığı çerçevenin kendisine adreslenip adreslenmediğini anlamak için hedef adres alanını kontrol eder. Eğer adres baytlarındaki uzantı biti lojik

1'se, veri alanındaki uzantı baytları da kontrol edilir. Aksiyon çerçevelerinin (iste veya gönder/iste paketi) adres baytları, kabul veya cevap çerçevesinde yer değiştirilip geri gönderilir. Yani, kabul veya cevap çerçevesinin kaynak adresi, aksiyon çerçevesinin hedef adresini içerirken, hedef adresi de aksiyon çerçevesinin kaynak adresini içerir. Bu yapı adres uzantı alanları için de geçerlidir.

- Çerçeve kontrolü (*Frame Control*, FC): Bu bayt, 0 ya da 1 baytlık bir uzunluğa sahiptir. Çerçeve başlığındaki kontrol baytı, çerçeve çeşidini gösterir: Aksiyon çerçevesi ve kabul / cevap çerçevesi.

Ayrıca çerçeve kontrol baytı, hem mesajların çoğalması veya kaybolmasını önleyen fonksiyonlar, hem de kontrol bilgisi veya istasyon tipini gösteren fonksiyonlara sahiptir.

- Veri alanı: Veri alanı, bir adres ve kullanıcı veri alanlarını içerir. Adres alanı, adres baytlarındaki uzantı bitinin bir olması durumunda adres uzantı baytları olarak kullanılır. Bu ihtiyaç için veri alanından en çok 4 baytlık bir alan tahsis edilir. Adres uzantı baytları olmadığında bu alan da kullanıcı verisine dahil edilerek maksimum 246 baytlık bir veri alanı oluşur. Bu alan 0'dan (veri alansız çerçevelerde) 246 bayta kadar bir büyüklükte olabilir.
- Çerçeve kontrol dizisi (*Frame Check Sequence*, FCS): Bu alan 1 ya da 2 bayt uzunluğuna sahiptir ve bitiş belirticisinden hemen önce gelir.
- Bitiş belirticisi (*End delimiter*, ED): Bu alan 1 bayt uzunluğuna sahiptir ve paketin bittiğini ifade eder.

PROFIBUS'da bir karakter, 11 bitten (1 başlangıç biti, 8 veri biti, 1 eşlik biti ve 1 dur biti) oluşur. Hiçbir haberleşme olmadığı zaman hat gerilimi lojik 1 seviyesindedir. Başlangıç biti, hattın lojik "0" seviyesine düşmesi neden olur. Her paketin gönderilme talebinden önce en azından $33T_{\text{BIT}}$ 'lik (senkronizasyon zamanı)

durağan durum sağlanmalıdır. Bütün veriler, her bir karakter arasında boşluk olmadan gönderilir.

2.3.3.5. Veri iletim hizmetleri

Sahayolu veri bağı katmanı (FDL), veriyolu erişimi ve jeton rotasyon zamanını kontrol etmenin yanında, veri iletim hizmetlerinin sunulmasından da sorumludur. Bu iletim hizmetleri süreç kontrolü, fabrika otomasyonu, güç dağıtımı, bina otomasyonu, diğer ana süreç endüstrileri gibi uygulama alanlarındaki tüm ihtiyaçları karşılarlar. PROFIBUS, genel olarak dört adet veri iletim hizmeti sağlar IEC 61158 series (2001), Tovar (1999a), Tovar (1999b):

- Kabulsüz veri gönder (*Send data with no acknowledge, SDN*).
- Kabullü veri gönder (*Send data with acknowledge, SDA*).
- Cevaplı veri gönder ve iste (*Send and request data with reply, SRD*).
- Çevrimli cevaplı veri gönder ve iste (*Cyclic Send and request Data with reply, CSRD*).

SDN, bir master istasyondan veriyolu üzerindeki tüm istasyonlara yayın yapmak için kullanılan kabulsüz bir hizmettir. Diğer iletim hizmetleri ise başlatıcı (jetonu tutan master istasyon) ve cevap verici (slave veya jetona sahip olmayan master) arasındaki gerçek bir çift ilişki üzerine dayalıdır. Bu hizmetlerin önemli bir karakteristiği, hemen cevaplanması gereken bir cevaplı veya bir kabullü hizmet olmasıdır. “Hemen cevap (*immediate-response*)” özelliği, gerçek zamanlı veriyolu sistemleri için çok önemlidir Tovar (1999b).

SDA hizmeti, bir master istasyondan bir master ya da bir slave istasyonuna kabullü veri transferinde kullanılır. Adreslenen istasyon, başlatıcıya isteğini kabul ettiğini belirten bir kabul bilgisi gönderir.

SRD hizmeti, veriyolu tek bir mesaj çevrimi içerisinde iletir ve alır. SRD hizmetinde master, çıkış verilerini slave cihazına gönderir ve giriş verilerini (eğer slave cihazda

varsa) belirli bir zaman içinde alır. Eğer slave bir çıkış cihazı ise, kısa kabul paketi ile cevap verir.

CSRD hizmeti, birden fazla SRD hizmetinin periyodik olarak tekrarlanmasıdır. Bu hizmet için SRD hizmetlerinin bir dizisini tanımlayan bir seçim listesi (*poll list*) belirlenir. Bu listedeki her bir SRD hizmeti, farklı istasyonlarla veri transferi için kullanılabilir.

FMS iletişim profili belirtilen hizmetlerin tamamını kullanır. PROFIBUS-DP'nin uygulama katmanı (katman 7) tanımlanmamıştır. Fakat DP, protokol mimarisinde belirtilen kullanıcı arabirimindeki fonksiyonlar ile katman 2 arasındaki iletişim için SRD ve SDN hizmetleri sunar.

2.4. Sonuç

Endüstriyel kontrol uygulamalarında kullanılan cihazlar, birbirinden farklı gereksinimlere sahiptirler. Bundan dolayı, endüstriyel otomasyon projeleri belirli bir hiyerarşi içerisinde yürütülür.

“CIM modeli” ya da “otomasyon hiyerarşisi” olarak tanımlanan bu hiyerarşi, piramit biçiminde gösterilen ve birbirleriyle doğrudan ya da dolaylı olarak iletişimde bulunan dört seviyeden oluşur: Aktuatör-Sensör (piramidin en altındaki seviye), Saha, Hücre ve Yönetim.

Endüstriyel şirketler/organizasyonlar, otomasyon hiyerarşisinde bulunan her bir seviyenin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla farklı protokoller geliştirmişlerdir. Birbirleri ile yarışma halinde olan bu protokollerden bazıları, diğerlerine göre daha fazla ön plana çıkmıştır. PROFIBUS ve CAN protokolleri, saha seviyesinin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla ortaya atılan en başarılı protokoller olarak kabul edilmektedir, Özçelik (2002).

CIM mimarisinde, başlangıçtaki Ethernet protokolünün hücre seviyesinde kullanımındaki gerçek zamanlı iletişimleri destekleyememe, farklı trafik türleri için

gerekli olan servis kalitesini sunamama, geniş alan ağları oluşturamama gibi dezavantajlara sahip olması araştırmacıları hücre seviyesi için yeni arayışlara yönetmiştir. Bu sebeple Kunert vd. (1997), Özçelik (2002), Özçelik vd. (2004, 2006) bu aşamada ATM protokolünü önermişlerdir. Benzer şekilde, ATM protokolünün avantajlarının yanında kablosuz genişbant hizmeti veren WiMAX/IEEE 802.16 protokolü de İskefiyeli vd. (2007) tarafından önerilmiştir. Bu önerinin kapsamı bu tez çalışmasının ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Bölüm 5'te tasarımı ve performans analizi anlatılacak olan arabağlaşım cihazının PROFIBUS bölümü için varsayılan kabuller de aşağıda sonuç olarak özetlenmiştir:

- Arabağlaşım biriminin tasarımında, master'ın slave ile çalışmasının arabağlaşım biriminin tasarımını değiştirmemesinden dolayı birimdeki slave modeli üzerinde durulmamış sadece master modeli ele alınmıştır.
- PROFIBUS segmenti ile arabağlaşım birimi Master-Master iletişim kullanmaktadır.
- PROFIBUS veri iletiminde iletişim profili olarak DP profili ve veri iletim hizmeti olarak da SDN (Send Data with No-acknowledge – Geri Bildirimsiz Veri Gönderme) seçilmiştir.
- Arabağlaşım birimi tarafındaki tüm mesajlar yüksek önceliklidir.

BÖLÜM 3. KABLOSUZ KENTSEL ALAN AĞLAR

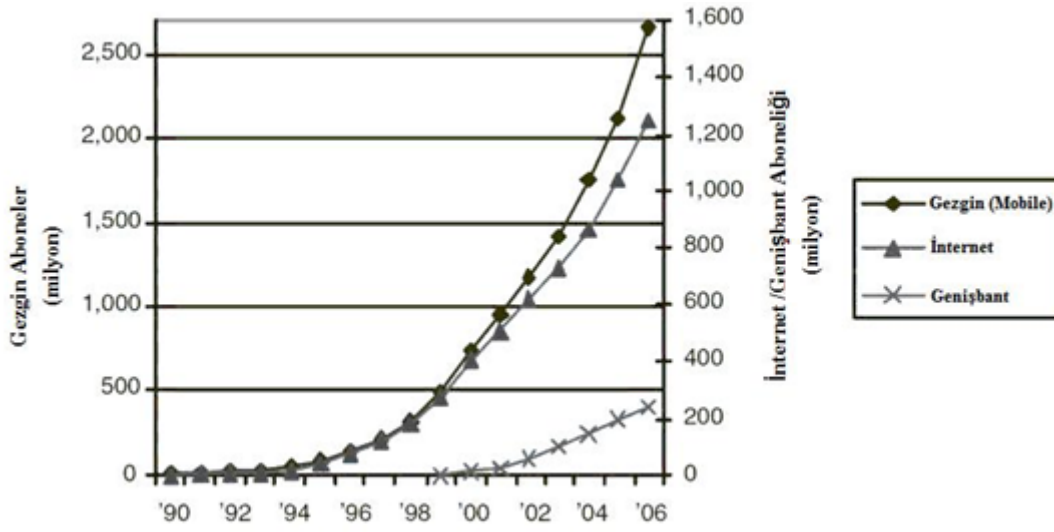
IEEE 802.16, WiMAX

3.1. Giriş

Teknolojinin hızla gelişmesi, insanların ihtiyaçlarını karşılamakta ve ihtiyaçlar karşılandıkça da yeni gereksinimleri doğurması aynı hızda olmaktadır. 1990'lı yılların başında cep telefonunun ülkemize kullanılmaya başlaması büyük bir gelişme olarak görüldü. Bir yere sabit kalmama ve her zaman telefon ile ulaşılabilirlik insanlar için büyük bir rahatlık olmuştu. Fakat o yıllarda kullandığımız cep telefonu teknolojisine baktığımızda bugünküne göre oldukça basit ve sadece ses trafiği taşımakta iken bugün görüntülü konuşma imkanı tanımaktadır.

Diğer yönde genel olarak kablolu çözüme sahip ağ teknolojilerine kablosuz özelliği ve hatta taşınabilirlik özelliği katılması sistemlerin kapsama alanı dahilinde özgürce dolaşım imkanı sağladı. Başlangıç olarak küçük bir alanda kablosuz hizmeti verilirken bugün kablosuz erişim şebekelerinde kentsel alanlardan bahsedilmektedir. Genişbant hizmeti, 50 km'lik kaplama alanı içerisinde 75 Mbps hızlarda sadece veri değil, ses ve görüntüyü de yüksek kalitede ve gelişmiş güvenlik seviyelerinde sağlanabilmektedir.

Genişbant kablosuz ağlar telekomünikasyon endüstrisinin iki önemli gelişim basamağı olan kablosuz ve genişbant kavramları üzerine oturmaktadır. Hem kablosuz hem de genişbandın hızlı bir pazar gelişimi mevcuttur. Kablosuz mobil servisler, 1996-2007 periyodunda 11 milyon kullanıcıdan 3 milyar kullanıcıya çıkmıştır ITU (2007a). Aynı dönemde internet ise milyar kullanıcı seviyelerine ulaşmıştır. Şekil 3.1'de Dünya'daki gezgin telefon, internet ve genişbant erişim sayıları gözükmemektedir ITU (2007b), WiMAXForum (2008a).



şekil 3.1. Dünya'daki gezgin telefon, internet ve genişbant erişim grafiği ITU (2007a,b)

İnternetin büyümesi yüksek hızlarda internet erişim servisleri ve paralelinde genişbandın yaygınlaşması ihtiyacını doğurmuş ve on yıl gibi kısa bir sürede de dünyadaki genişbant aboneliği neredeyse sıfırdan 200 milyon üzerine çıkmıştır.

Bu şartlar altında kablosuzun getirdiği avantajlarla genişbandın sunduğu yüksek performansın bir araya getirilmesi birçok endüstri araştırmacısına göre mümkün gözükmemektedir. Halihazırda kullanımda olan genişbant teknolojilerine baktığımızda burulmuş çift telefon kablosundan genişbant hizmeti veren DSL (Digital Subscriber Line) teknolojisi, koaksiyel kablo TV altyapısı üzerinden hizmet veren kablo modem teknolojisi kullanıcı pazarında yer almaktadır. Her iki teknoloji de 1990'ların sonunda kullanıma başlanmış ve birkaç Mbps hızlarda hizmet vermektedir. Gelişmiş sürümleriyle birkaç on mbps hızlara çıkması mümkündür. Dünyada 200 milyon üzerinde genişbant kullanıcı mevcut iken 2010 itibariyle bu sayı 400 milyonu aşması beklenmektedir. Genişbant için kablosuz çözümlerin bu büyümeyi hızlandıracağı muhtemeldir.

Bu gelişmelere karşılık uygulamalarda da gelişmeler olmaktadır. Bilgi, ticari iletişim, eğlence dünyasında genişbant kullanıcıları uygulamalarını sürdürmektedir. Genişbant erişim sadece hızlı internet gezintisi ve dosya transferi sağlamakla kalmayıp gerçek zamanlı ses ve video iletişimi, konferans görüşmesi ve etkileşimli oyunlar gibi birçok çoklu ortam uygulamalarını da sağlar. Ayrıca IP üzerinden telefon görüşmesi olan

VoIP (Voice over IP) imkanı da mevcuttur. FTTH (Fiber to the home) ve VDSL (Very high DSL) gibi daha gelişmiş teknolojiye sahip kullanıcılar HDTV, VoD ve video uygulamalarını kullanabilmektedir. Genişbant kullanımının yaygınlaşması ileride daha yeni uygulamaları da doğuracağı açıktır Andrews, vd. (2007).

3.2. Kablosuz İletişim

Kablosuz terimi, sinyallerin iletiminde iletim ortamı olarak kablo yerine radyo dalgalarını kullanmak anlamına gelmektedir. Kablosuz teknolojileri televizyonu açma-kapama işlemi kadar basit ya da otomasyon sistemindeki bir verinin satış elemanı tarafından uzak bir sahada kullanabilmesi kadar karmaşık uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Kablosuz ortamda herhangi bir bilginin, herhangi bir zamanda, herhangi bir yerde erişilebilir olması kablosuz iletişim sistemlerinin gelişmesini hızlandırmıştır.

Kablosuz iletişim sistemlerinin bazı karakteristik özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- **Hareketlilik:** Kablosuz sistemler kullanıcılara masalarından ya da istedikleri yerden bilgiye erişim imkanı sağlar.
- **Erişim:** Kablosuz iletişim sistemleri kullanıcılara nerede olurlarsa olsunlar daha iyi bir bağlanma ve erişebilirlik imkanı sağlar.
- **Basitlik:** Kablosuz iletişim sistemleri kablolu sistemlere göre daha hızlı ve kolay yerleştirme imkanı sunar. Kurulum daha basittir ve minimum aksama sözkonusudur.
- **Esneklik:** Kablosuz iletişim sistemleri esnektir. Kullanıcı iletişimi üzerinde tam kontrole sahiptir.
- **Kurulum Maliyeti:** Başlangıç maliyeti geleneksel telli ya da kablo sistemlere göre daha tercih edilebilir durumdadır. Kırsal alan, eski binalar, araçlar gibi iletişimin yapılamayacağı ya da çok maliyetli alanlarda kablosuz sistemler daha çok tercih edilir.
- **Düşük Servis Maliyetleri:** Kablosuz servis ücretleri hızla düşerek kablolu servis ücretlerine yaklaşmaktadır.

- **Genel Erişebilirlik:** Dünyanın birçok yerindeki kablosuz servis sağlayıcıları arasındaki dolaşım sistemi genel erişebilirliği geçerli kılmaktadır. Aynı zamanda dolaşım servisleri herhangi bir yerde bağlı kalmayı sağlama esnekliğine izin verir.
- **Akıllık:** Kablosuz iletişim sistemleri SMS ve MMS gibi akıllı servisleri destekler, Pareek (2006).

3.3. Kablosuz Genişbandın Gelişimi

Kablosuz genişbantın gelişimine baktığımızda sonuç geleneksel kablolu erişim teknolojilerine alternatif bulma arzusuna dayanır. Çeşitli firmalar tarafından birçok kablosuz erişim sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler performans kabiliyetlerine, protokollerine, kullanılan frekans spektrumlarına, desteklediği uygulamalara ve birçok diğer parametreye göre geniş bir yelpazede bulunmaktadır. Bunların bazıları ("*Project Angel*"- AT&T) ticari olarak yayılmamış ve başarılı olanları ise ticari olarak birkaç uygulamada kullanılmıştır. Kablosuz genişbant için firmaların bölünmesi ortak bir standart olmamasından kaynaklanmıştır. Fakat bir endüstri standardı olarak WiMAX bu durumu değiştirmektedir.

1998 yılında Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) 802.16 grubunu Kablosuz Kentsel Alan Ağı (WMAN) için bir standart geliştirmek üzere oluşturdu. Başlangıç olarak 10 GHz ile 66 GHz aralığındaki bantta fiber imkanı olmayan ve yüksek hızda bağlantı ihtiyacı olanlar için çözüm geliştirmek üzere çalışmalara başladılar. Bunun devamında IEEE 802.16 standardının günümüze kadar birçok versiyonu oluşturuldu ve halen çalışmalar da devam etmektedir Andrews, vd. (2007).

Bunlara paralel olarak Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından geliştirilen HiperMAN ve Kore tarafından geliştirilen WiBro (Wireless Broadband) çalışmaları da devam etmektedir.

Daha sonra bu üç ayrı grubun çalışmaları, WiMAX Forum çatısı altında birleşerek standardın gelişimi, ortak ürünlerin üretimi ve sertifikasyonu için birleştirilmiştir.

3.4. WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) sistemlerine giriş yapmadan öncelikle IEEE 802.16 standardına bakılmalıdır. IEEE 802 çalışma grupları yerel alan ağlar, kentsel alan ağlar, kişisel alan ağlar için uluslar arası standartlar belirleyen bir gruptur. Örneğin IEEE 802.3 Ethernet olarak bilinen bir standarttır. IEEE 802 projeleri genel olarak fiziksel katman iletimi ve ortam erişim mekanizmaları ile ilgilenir. IEEE 802 projeleri içinde kablosuz iletişim ile ilgili birçok kablosuz standart mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

- IEEE 802.11 Kablosuz Yerel Alan Ağları (WLAN)
- IEEE 802.15 Kablosuz Kişisel Alan Ağları (WPAN)
- IEEE 802.16 Kablosuz Kentsel Alan Ağları (WMAN)

Kablolu sistemlerdekinin aksine genişbant kablosuz erişim endüstrisindeki üreticiler ortak ve tek bir standarda uymak için yavaş ve isteksiz davrandılar. Birçok üretici piyasaya egemen olabilmek için kendi ürünlerini tasarladı. Bu aşamada piyasada bulunan birçok kablolu çözümlerdeki standartları kablosuz çözümler için uyarlayıp ürünlerini çıkardılar. Bunun sonucunda, piyasada hangi ürünün tercih edileceğinin yanında, ürünlerin daha pahalı ve daha yavaş bir gelişim içerisinde olma sıkıntısı ortaya çıktı. Çözüm olarak genişbant kablosuz erişim sektörü için IEEE, 802.16 çalışma grubunu oluşturdu.

Yukarıda da değinildiği üzere WiMAX, IEEE 802.16 ile standartlaşmış bir teknolojidir. Kablosuz internet erişimine büyük ilgi gösterilmesi ve mesafenin sınırlı olması son yıllarda kablosuz kentsel alan ağlarının ihtiyacı doğurdu. Başlangıç olarak sabit genişbant kablosuz erişim için 802.16 standardı geliştirildi. Bu standart T1, E1, xDSL gibi genişbant kablolu ağlara alternatif olarak geliştirildi. Bunun devamında standardın geliştirilmesi ile beraber göçebe ve gezgin özelliklerini taşıyan sürümleri sayesinde popülerliği arttı.

Kablolu bağlantının kurulumunun zor olduğu alanlarda kablosuz bir çözüm, kablolu çözümlere göre daha kolay, çabuk ve ekonomik olmaktadır. Örneğin, deniz kıyısında karadan uzakta kurulu olan bir platforma deniz altından kablo çekmek yerine kablosuz iletişim daha mantıklı olacaktır. Aynı zamanda bu platform belli bir süre sonra başka bir alana kaydırılmak istendiğinde kablosuz iletişim açısından ek bir maliyet doğurmayacaktır Chen (2008).

3.4.1. WiMAX forum

WiMAX Forum, endüstriye yol gösteren ve ticari olmayan bir organizasyondur. IEEE 802.16/ETSI HiperMAN standartları destekleyen genişbant kablosuz ürünlerin birlikte çalışabilmesini sağlamak için sertifikasyon işlemlerini yürütmektedir. Diğer bir amaç ise bu ürünlerin piyasaya çıkışlarını hızlandırmaktır. WiMAX Forum sertifikasını almış olan bir ürün sabit genişbant, göçebe ve gezgin servislerini destekliyor ve birbirleri ile uyum içinde çalışabilir anlamına gelmektedir. Aynı zamanda WiMAX Forum servis sağlayıcılar ve düzenleyicilerle birlikte çalışarak sertifikalı ürünlerin müşterilere ulaşmasını sağlar WiMAXForum (2008b).

WiMAX Forum'a 50'nin üzerinde üye ülke ve bu ülkelerden 500'ün üzerinde üretici firma ve servis sağlayıcı operatör firması vardır WiMAXForum (2008c), WiMAXForum (2008d)

WiMAX Forum'a Türkiye'den ise Türk Telekom A.Ş., Superonline, Aselsan, Borusan Telekom, Koç.net, Turbonet A.Ş. firmaları foruma üyedir. WiMAXForum (2008d)

3.4.2. WiMAX ve diğer genişbant teknolojiler

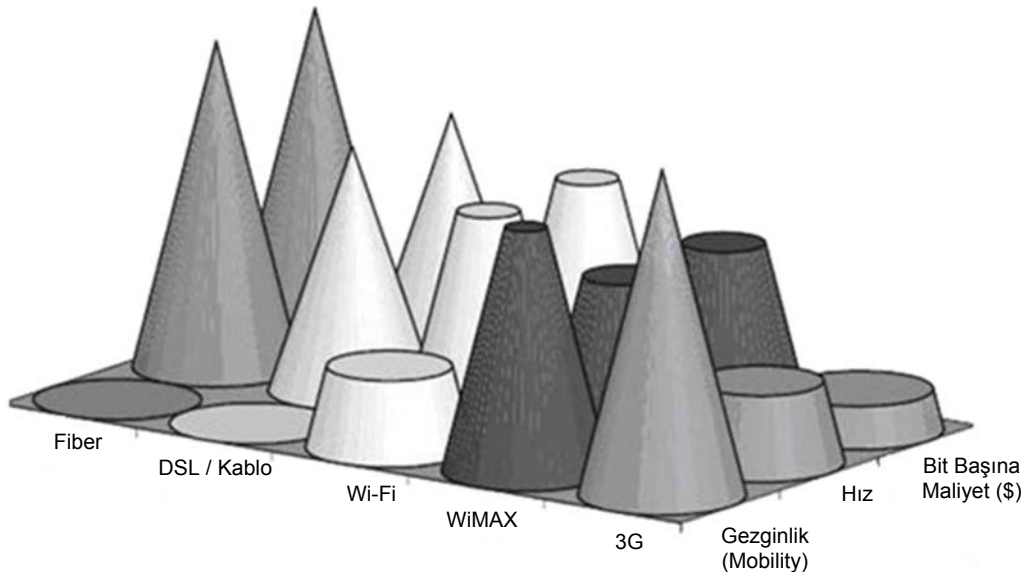
Standart bir Wi-Fi sistemi 54 Mbps bantgenişliğini 100 metrelik bir alanda 32 kadar kullanıcıya hizmet verirken, WiMAX benzer bantgenişliğini çok daha geniş bir alanda ve çok daha fazla kullanıcıya hizmet verebilmektedir. Bu sebeple kullanıcılar Wi-Fi hizmeti olan yerlerde daha hızlı bağlantı için Wi-Fi'yi tercih ederken, Wi-Fi hizmeti olmayan yerlerde ise WiMAX hizmetine geçiş yapacaklardır.

Diğer bir husus Wi-Fi daha kısa mesafelerde hizmet verdiği için daha düşük sinyal gücüne ihtiyaç duyar, bu da taşınabilir cihazlardaki enerji yönetimi için önemli bir husustur.

Genişbant internette, WiMAX kablosuz erişim teknolojisinin üçüncü nesil mobil için ciddi bir rakip olabileceği görüşü ile WiMAX'ın Wi-Fi'a karşı üstünlükleri tartışmalarına karşılık WiMAX ile Wi-Fi'ın bir rakip olmayıp birbirlerini tamamlayan teknolojiler oldukları da savunulmaktadır.

Ancak diğer bir yaklaşım da; 3G, Wi-Fi ve WiMAX'ın rakip değil birbirlerini tamamlayıcı teknolojiler olduğunun kabul edilmesidir. Tamamlayıcılığı bir örnekle anlatmak için şöyle bir senaryo düşünülebilir; bir son kullanıcı WiMAX kullanarak evinden internete bağlanmışken interaktif bir oyuna başlamış olabilir. Kullanıcı başka bir yere, örneğin bir alışveriş merkezi veya bir kafe'ye giderken oyununu 3G teknolojilerinden birini kullanarak sürdürebilir. Wi-Fi erişim alanlarının (kablosuz erişim noktalarının) olduğu alışveriş merkezine geldiğinde cihaz Wi-Fi'ı kullanabilir ve oradaki erişim noktalarını internete bağlamak için de WiMAX kullanılmış olabilir. Hatta orası bir açık mekansa mevcut durumda kullanıcı sabitken WiMAX'i direk olarak bile kullanabilir Küçükünsal (2006).

Sonuç olarak Şekil 3.2'de genişbant teknolojilerinin gezginlik (mobilité), hız ve ücret parametreleri açısından karşılaştırılması mevcuttur Reynolds (2005)



Şekil 3.2. Genişbant teknolojilerinin karşılaştırılması

3.4.3. WiMAX uygulama alanları

WiMAX, aşağıda belirtilen uygulama alanlarına sahiptir.

- Hücresel toplayıcı omurga
- Kablosuz servis sağlayıcılar için toplayıcı omurga
- Banka ağları
- Eğitim ağları
- Kamu güvenlik hizmetleri
- Kampus ağları
- Şantiye ağları
- Hizmet Gitmemiş Alanlar

WiMAX, hücresel servislerin işletiminde hücresel baz istasyonlarının santrallere bağlanmasında arabirim olarak kullanılabilir. Noktadan noktaya iletimde 50 km menzile ulaşan WiMAX bu aşamada bir çözüm olabilmektedir. İster WiMAX olsun, ister WiFi olsun kablosuz servis sağlayıcı hizmeti veren firmalar son noktadaki baz istasyonlarını merkeze WiMAX toplayıcı omurga üzerinden bağlayabilir. Diğer bir uygulama örneğinde bankalar aynı şehir içindeki şubeleriyle ya da para çekme üniteleri arasındaki haberleşmesinde WiMAX kullanabilmektedir.

Eğitim alanına baktığımızda aynı şehir ya da yerleşke içindeki okul binaları arasında interaktif bağlantı ile sanal sınıflar oluşturulabilmektedir. Kamu güvenliğindeki uygulamada ise sağlık, emniyet ve itfaiye hizmetleri bir alarm merkezinden kontrol edilebilmektedir. Ambulans, polis ve itfaiye araçları üzerinde bulunan WiMAX sistemleri ile merkeze bağlanarak tüm kontrol merkezden sağlanabilmektedir.

Bir başka uygulamada ise kıyı haberleşmesi ihtiyacı olan deniz içinde kurulmuş platformların WiMAX'i kullanmasıdır. Denizaltından kablo döşemek oldukça maliyetlidir. Diğer taraftan bu platformların sabit olmayıp yüzer olduğunu düşünürsek kablolu maliyeti oldukça artacaktır. Kampus alanı içindeki tüm binalar, açılan kameraları, mobil cihazlar WiMAX üzerinden merkezle haberleşerek internet vb. hizmetlerden faydalanabilmektedir. Geçici şantiye alanlarındaki ofislerde internet, güvenlik, haberleşme amacıyla kullanılabilir.

Kırsal ve hizmet gitmemiş alanlarda DSL ve kablo internet yerine kullanılabilir. WiMAXForum (2005a).

Bizim çalışmamızda ise, endüstriyel bir iletişim protokolü olan PROFIBUS segmentlerinin haberleşmesi için kullanılmaktadır. Çalışmada, uzak mesafede bulunan iki segmentin iletişim kurabilmesi için WiMAX bir omurga olarak tercih edilmiştir İskefiyeli (2007).

3.4.4. WiMAX standartları ve 802.16 ailesi

802.16 standardı, kablosuz kentsel alan ağlarda (WMAN) çoklu servisi sağlayan sabit noktadan çoklu noktaya (PMP) kablosuz genişbant erişim (BWA) sistemleri için fiziksel katman (PHY) ve ortam erişim kontrolü (MAC) hava arabirimini tanımlar.

WiMAX, IEEE 802.16 ile standartlaştırılmış ve bu standardın versiyonları Tablo 3.1'de verilmiştir IEEE 802.16 (2008).

Tablo 3.1. IEEE 802.16 standart sürümleri

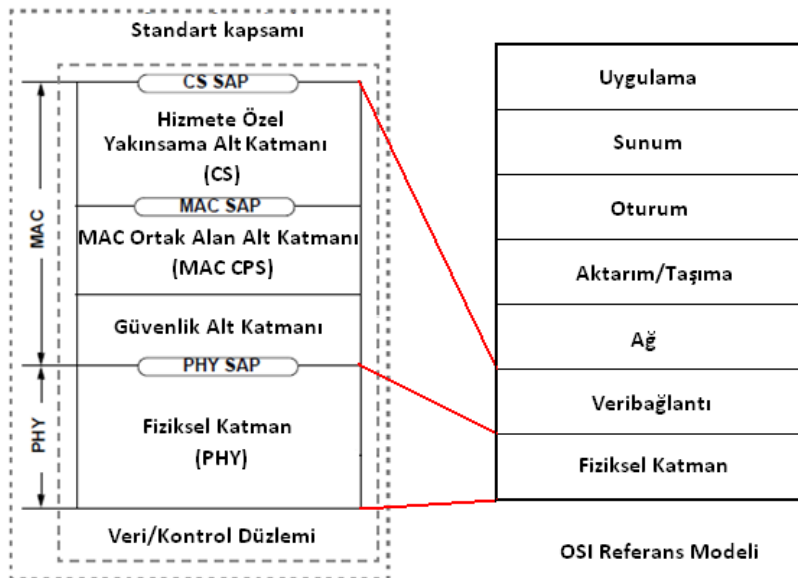
802.16	WiMAX, 10-64 GHz frekans aralığı
802.16a	WiMAX, 11 GHz altı frekans
802.16b	Lisanssız 5-6 GHz frekans aralığı
802.16c	10-66 GHz frekansları için sistem profillerinin tanımlanması
802.16d	WiMAX Forumu uygun olarak standart eklentileri
802.16-2004	802.16/.16a/.16d yerine çıkarılan standart. (OFDMA destekli)
802.16e	Gezgin WiMAX (120 km/h, FFT-128, 512, 1024, 2048)
802.16f	MIB Yönetimi eklentisi
802.16g	Yönetim düzlemi

WiMAX, sabit sistemler için IEEE 802.16-2004 ve gezgin sistemler için IEEE 802.16e-2005 olmak üzere iki önemli standarda sahiptir. Her ikisinin de standartlaşma süreci tamamlanmıştır. Şuan ise IEEE 802.16m sürümü daha yüksek bantgenişlikleri için geliştirilmektedir.

Standartlar arasındaki farklılıklara fiziksel katman altında detaylı olarak değinilecektir.

3.5. 802.16 Referans Modeli

802.16 standardının referans modeli, Şekil 3.3’de görülmektedir. Standart, OSI referans modeline göre Fiziksel katman (PHY) ve Ortam Erişim Kontrol katmanı (MAC) olmak üzere iki katmanı destekler. MAC katmanı ise üç alt katmana sahiptir ve bunlar, Hizmete Özel Yakınsama Alt Katmanı (CS), MAC Ortak Alan Alt Katmanı (MAC CPS) ile Güvenlik Alt Katmanıdır.



Şekil 3.3. 802.16 referans modeli

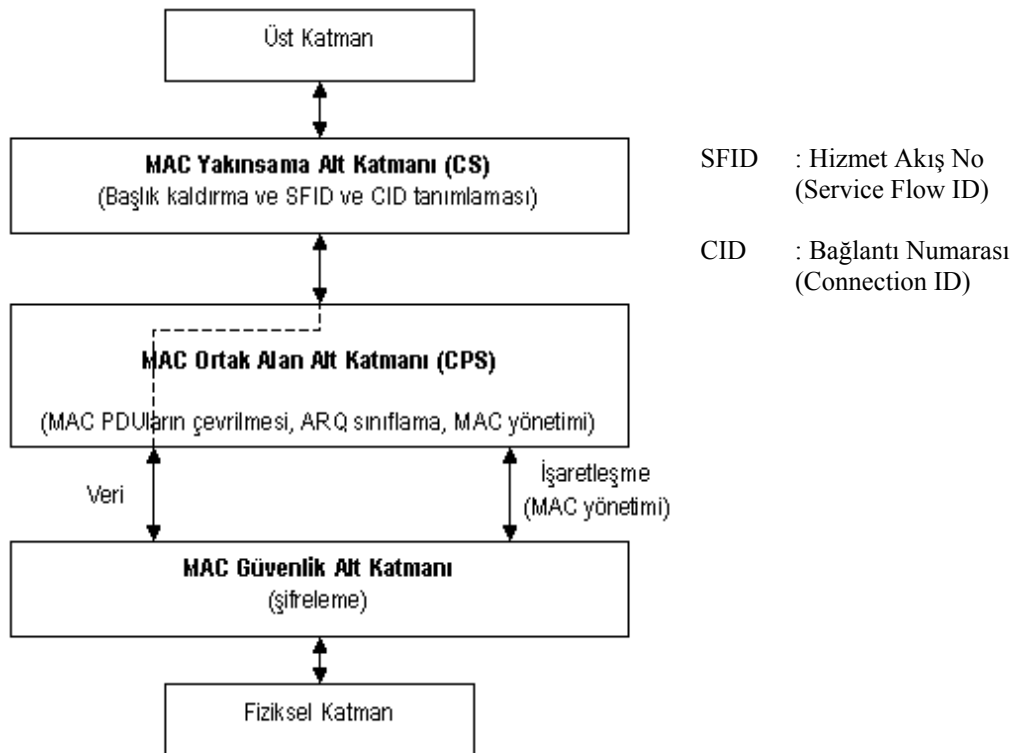
3.5.1. MAC katmanı

Fiziksel katmanın üzerinde bulunan Ortam Erişim Kontrol (Medium Access Control –MAC) katmanı ise, aynı fiziksel ortam üzerinden çeşitli bağlantıların kontrolünden ve çoğullamasından sorumludur. WiMAX MAC katmanının bazı önemli fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

- Üst katmandan alınan hizmet veri birimlerini (SDU-Service Data Unit) parçalayarak ya da birleştirerek MAC katmanının temel yapısı olan MAC protocol veri birimlerine (PDU-Protocol Data Unit) dönüştürülmesi

- MAC PDULARIN iletiminde kullanılacak olan uygun iletim profilinin ve güç seviyesinin seçilmesi
- Otomatik Tekrar Talebi (Automated Repeat Request – ARQ) kullanıldığında, herhangi bir hata durumunda tekrar iletimin yapılması
- QoS kontrolünü ile farklı veri ve sinyal taşıyıcılarına uyan MAC PDULARIN önceliğinin sağlanması
- Fiziksel kaynaklar üzerinden MAC PDULARIN sınıflandırılması
- Gezginlik yönetimi için üst katmanlara destek verilmesi
- Güvenlik ve anahtar yönetiminin sağlanması
- Enerji tasarrufu ve boşa durum işlemlerinin sağlanması

Şekil 3.4’de yukarıda değinilen fonksiyonların akışı görülmektedir.



Şekil 3.4. WiMAX MAC katmanı

Ağın üçüncü katmanı ile MAC katmanı arasında arabirim olan CS alt katmanı, üst katmandan veri paketlerini alır. Bu üst katman paketleri MAC SDU olarak adlandırılır. CS üst katman protokolünün yapısına bağlı olan başlık kaldırma ve adres haritalama gibi tüm işlemlerin gerçekleşmesinden sorumludur. CS, üst katman

protokolünü ve MAC ile PHY katmanları dışındaki gereksinimleri maskeleyen bir adaptasyon katmanı olarak düşünülebilir. CPS alt katmanı, SDU paketlerinin bölümlenerek (fragmentasyon) ya da birleştirilerek MAC PDU'ya dönüştürülmesi, MAC PDU'ların iletimi, QoS kontrolü ve ARQ gibi üst katmanlardan bağımsız olan bütün paket işlemlerini gerçekleştirir. Güvenlik alt katmanı ise şifreleme, yetkilendirme işlemlerinin yanında BS (Base Station–Baz İstasyon) ve SS (Subscriber Station–Abone İstasyon) arasında şifreleme anahtarlarının alışverişinin gerçekleşmesinden sorumludur.

3.5.1.1. Yakınsama alt katman

WiMAX yakınsama alt katmanı, birçok üst-katman protokolünü yakınsama alt katmanı seviyesinde desteklemektedir. CS, başlık sıkıştırma (compression) işleminden ayrı olarak, iletimde kullanılan PHY ve MAC bağlantılarının kimliğini gösteren SDU'ların üst katman adreslerini haritalamaktan da sorumludur. Bu fonksiyon, MAC ve PHY katmanlarında üst katman adreslerinin görünmemesinden dolayı gereklidir.

WiMAX MAC katmanı bağlantıya dayalıdır ve tek yönlü bağlantı tanımlayıcı (CID-Connection Identifier) ile BS ve SS arasında mantıksal bir bağlantı tanımlanır. UL (uplink-baz istasyonuna doğru) ve DL (downlink-aboneye doğru) bağlantıları için farklı CID'ler vardır. CID, eş MAC/PHY öğeleri arasındaki tek yönlü bağlantıyı tanımlayan, BS tarafından atanan, geçici ve dinamik bir 2. katman adresi olarak düşünülebilir. Üst katman adresinin CID'ya haritalanması sürecinde, CS hedef adres ile ilgili CID arasındaki haritalama izini saklar.

3.5.1.2. MAC ortak alan alt katman

IEEE 802.16 MAC bağlantıya dayalı bir yapıya sahiptir. Bütün hizmetler bir UL-MAP (Yukarı yönde bağlantı haritası – Uplink MAP) ya da DL-MAP (Aşağı yönde bağlantı haritası – Downlink MAP) üzerinde bir bağlantıya haritalanır. Bu haritalama işlemi; bantgenişliği talebi, hizmet kalitesi ve trafik parametrelerini ilişkilendirme, verinin uygun CS'ye iletimi ve yönlendirilmesi ile hizmetin yapısıyla

ilişkilendirilmiş bütün diğer eylemleri sağlayan bir mekanizmadır. Bağlantılar, 16 bitlik CID ile tanımlanır ve sürekli olarak atanmış ya da isteğe bağlı bir bantgenişliğine ihtiyaç duyabilir. CID, normalde bağlantısız olan IP gibi trafiklerin bağlantı tanımlayıcısı olarak kullanılır. Hedefi ve içerik bilgisini işaret ederek hizmet verir. Hem aşağı hem de yukarı yöndeki kanallarda kullanılmak üzere 16 bitlik CID toplamda 65536 adet bağlantıya imkan tanır.

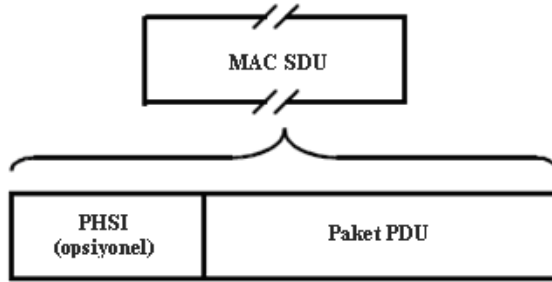
Her abone istasyonu (SS), 48 bitlik standart MAC adresine sahiptir ama bu MAC adresi CID'nin birincil adres olarak kullanılmasından dolayı sadece bir cihaz tanımlayıcı olarak hizmet vermektedir. MAC adresi başlangıç bağlantı işlemlerinde, yetkilendirme işlemlerinde kullanılmaktadır.

Bir ağa girerken, abone istasyonu her yönde **Temel bağlantı, Birinci Yönetim Bağlantısı ve İkinci Yönetim Bağlantısı** olmak üzere üç adet yönetim bağlantısına atanır. Bu üç bağlantı farklı yönetim seviyeleri tarafından kullanılan üç farklı QoS gereksinimlerini yansıtır. Bunlardan birincisi olan temel bağlantı kısa, zaman kritikli MAC ve RLC (Radio Link Control – Radyo Link Kontrolü) mesajlarının transferi için kullanılır. Birinci yönetim bağlantısı, yetkilendirme ve bağlantı kurulumunda kullanılan daha uzun, gecikmeye daha toleranslı mesajların transferinde kullanılır. İkinci yönetim bağlantısı, DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol–Dinamik İstemci Konfigürasyon Protokolü), TFTP (Trivial File Transfer Protocol–Bayağı Dosya Transfer Protokolü), SNMP (Simple Network Management Protocol–Basit Ağ Yönetim Protokolü) gibi standart temelli yönetim mesajlarının transferinde kullanılır. Bu yönetim bağlantılarına ilave olarak abone istasyonları sözleşmeli servisler için iletim bağlantılarına tahsis edilmiştir. İletim bağlantıları, farklı yukarı ve aşağı yöndeki QoS ve trafik parametreleri kolaylaştırmak için tek yönlüdür Eklund (2002), IEEE 802.16 (2004)

3.5.1.3. MAC hizmet veri birimi yapısı

IEEE 802.16 standardında başlık verisi bastırma işlemi isteğe bağlı olarak tanımlanmıştır. Sınıflandırılmış ve MAC bağlantısıyla ilişkilendirildikten sonra, üst katman PDU'lar Şekil 3.5'deki gibi MAC Hizmet Veri Birimi (SDU-Service Data

Unit) yapısında kılıflanabilir. 8 bitlik PHSI (Kullanıcı Verisi Başlık Bastırma İndeksi) alanı, ilişkilendirilen bağlantı için PHS (Kullanıcı Verisi Başlık Bastırma) kuralı tanımlanmış ise mevcuttur. Şayet PHSI değeri “0” ise PHS kuralı kullanılmamış anlamına gelmektedir.

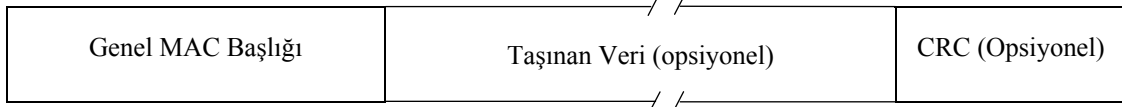


Şekil 3.5. MAC SDU yapısı IEEE 802.16 (2004)

3.5.1.4. MAC protokol veri birimi yapısı

MAC Protokol Veri Birimi (PDU-Protocol Data Unit), baz istasyonu (BS) ve abone istasyonların (SS) MAC katmanları arasında veri alışverişi yapılan veri birimidir. MAC PDU yapısı Şekil 3.6’da verilmiştir. Bütün PDU’lar türüne bağlı olarak sabit uzunluktaki MAC başlığına sahiptir. Başlığın ardından taşınan veri kısmı gelir. Şayet parçalara ayrılmış veri taşınıyorsa taşınan veri kısmında ilave alt başlıklar da bulunabilir. Taşınan veri değişken uzunlukta olabilir. Bu sebeple MAC PDU uzunluğu (başlık, taşınan veri ve varsa CRC kısmı) başlık içinde belirtilir. MAC PDU, CRC (Cyclic Redundancy Check – Çevrimsel Artıklık Kodlaması) kısmını da hata sezme amacıyla içerebilir.

İki tip başlık yapısı mevcuttur. Bunlar genel başlık ve bantgenişliği talep başlığıdır. Bantgenişliği talep MAC PDU’sunda taşınan veri alanı boştur. Diğer MAC PDU’ları yönetim mesajlarını yada CS (Yakınsama Altkatmanı) verisini içerir. Bu iki başlık, başlık içinde bulunan BT (Başlık tipi) alanındaki değer ile birbirinden ayrılır. BT=0 genel başlığı tanımlarken BT=1 ise bantgenişliği talep başlığını tanımlamaktadır.



Şekil 3.6. MAC PDU yapısı

3.5.1.5. Genel MAC başlık yapısı

Genel MAC başlığı yapısı Şekil 3.7’de verilmiştir. Başlıktaki alanların açıklamaları da Tablo 3.2’de açıklanmıştır IEEE 802.16 (2004).

BT=1(1)	ŞK=0(1)	Tip(6)	GAA (1)	CG (1)	ŞAS (2)	RZV (1)	Boy (3)
Boy (8)			Bağlantı No (8)				
Bağlantı No (8)			BDS (8)				

Şekil 3.7. Genel MAC başlığı

Tablo 3.2 Genel MAC başlığı alanları

Adı	Boyutu	Açıklama
BT	1	Başlık Tipi 0= Genel Başlık, 1= Bantgenişliği Talep Başlığı
ŞK	1	Şifreleme Kontrol 0= Taşınan veri şifrelenmemiş 1= Taşınan veri şifrelenmiş
Tip	6	Bu alan altbaşlıkları varsa onları ifade ediyor.
GAA	1	Extended Subheader Field – Genişletilmiş Altbaşlık Alanı 0= GAA yok 1= GAA mevcut
CG	1	CRC göstergesi 0= CRC yok 1=CRC mevcut
ŞAS	2	Şifreleme Anahtar Sırası ŞK=1 ise anlam ifade ediyor. ŞK’de kullanılan indeks bilgisi
Boy	11	Boy. MAC başlığı ve varsa CRC dahil tüm PDU boyu.
Bağlantı No	16	Bağlantı tanımlayıcısı 65536 adede kadar bağlantı yapılabilir
BDS	8	Başlık Denetim Sırası Başıktaki hataları sezmede kullanılıyor.

3.5.1.6. Bantgenişliği talep başlığı

Bantgenişliği Talep Başlığı Şekil 3.8’de verilmiştir. Başlıktaki alanların açıklamaları ise Tablo 3.3’de açıklanmıştır. Şayet SS aşağı yönde bir bantgenişliği talep başlığı içeren bir PDU alırsa bu PDU’yu kabul etmeyip atar IEEE 802.16 (2005).

BT=1(1)	ŞK=0(1)	Tip(3)	BGT (Bantgenişliği Talebi) (11)
		BGT (8)	Bağlantı No (8)
		Bağlantı No (8)	BDS (8)

Şekil 3.8. Bantgenişliği talep başlığı

Bantgenişliği Talebi aşağıdakizelliklere sahip olmalıdır:

- Başlık boyu her zaman 6 byte olmalıdır
- ŞK alanı 0 (0= Şifreleme yok) olmalıdır
- Bağlantı No, bağlantı için yukarı yönde bantgenişliği talebinde bulunduğunu göstermeli
- BGT (Bantgenişliği Talebi) alanı talep edilen byte sayısını göstermeli
- Bantgenişliği talebi için izin verilen tipler; artış için “000” ve kümelemek için “001” dir.

Tablo 3.3. Bantgenişliği istek başlığı alanları

Adı	Boyutu (Bit)	Açıklama
BT	1	Başlık tipi her zaman 1 olmalıdır
şK	1	Her zaman 0 (0= şifreleme yok) olmalıdır
Tip	3	Bantgenişliği talep başlığının tipini gösterir.
BGT	19	Bantgenişliği Talebi. abone tarafından yukarı yönde bantgenişliği talebinin byte olarak sayısı. BGT bağlantı no içindir
Bağlantı No	16	Bağlantı tanımlayıcısı
BDS	8	Başlıktaki hatayı sezmede kullanılır

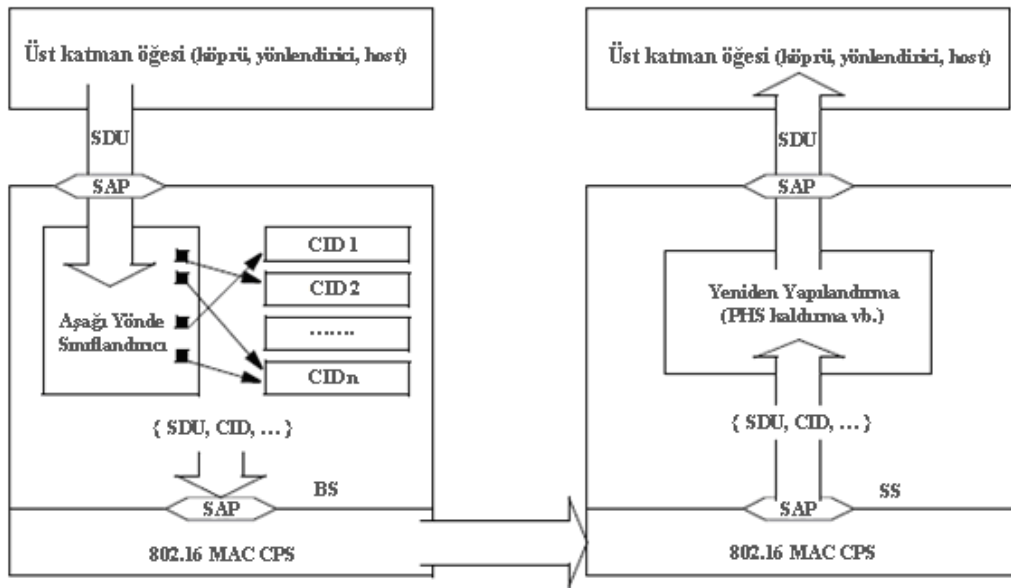
3.5.1.7. Sınıflandırma

Sınıflandırma, özel taşıma bağlantısı üzerindeki MAC çiftleri arasında iletim için MAC SDU'ların haritalanması işlemidir. Haritalandırma işlemi MAC SDU'yu taşıma bağlantısı ile ilişkilendirir ve aynı zamanda bu bağlantının servis akış karakteristiği ile de ilişki kurar.

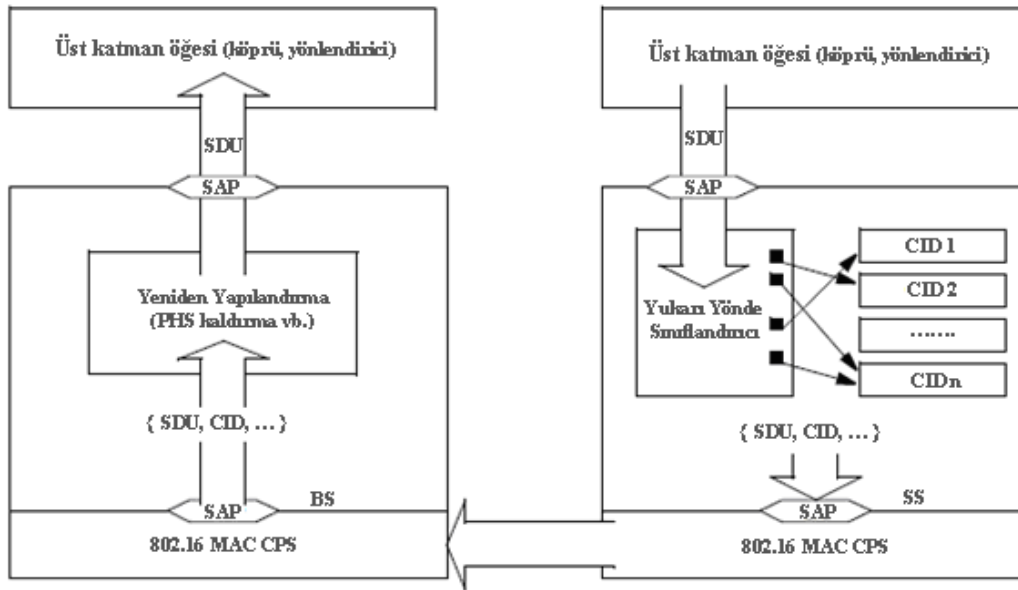
Sınıflandırıcı IEEE 802.16 ağına giren her pakete uygulanan karşılaştırma kriterleridir ve hedef IP adresi gibi kriterlerden, sınıflandırma önceliğinden, CID'ye (connection identifier-bağlantı no) verilen referanstan oluşur. Eğer bir paket, belirlenen kritere göre karşılaştırılmışsa SAP üzerinden CID ile tanımlanmış bağlantıya teslim edilir.

Sınıflandırıcı önceliği, sınıflandırıcının paketler üzerindeki uygulamalarının sıralanmasında kullanılır.

Sınıflandırma işlemi hem yukarı yönde hem de aşağı yönde olmaktadır. Aşağı yöndeki sınıflandırma BS tarafından, yukarı yöndeki sınıflandırma ise SS tarafından yapılır. şekil 3.9 ve şekil 3.10 sınıflandırma aşamalarını aşağı ve yukarı yönde göstermektedir.



Şekil 3.9. Aşağı yönde sınıflandırma ve CID haritalama



Şekil 3.10. Yukarı yönde sınıflandırma ve CID haritalama

3.5.1.8. Servis sınıfları

WiMAX MAC katmanı tasarımının önemli bir kısmı ise sağladığı servis sınıflarıdır. WiMAX QoS (Quality of Service-Hizmet Kalitesi) tasarımındaki temel fikirleri DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification-Kablo sistem üzerinden

veri aktarım arabirim belirtileri) kablo modem standardını baz almıştır, Shrivastav (2003). Güçlü QoS kontrolü bütün aşağı ve yukarı yöndeki bağlantıların hizmetini sunan BS tarafından kontrol edilen bağlantıya dayalı MAC mimarisi sayesinde başarılmıştır. Herhangi bir veri iletişimi yapılmadan önce BS ve SS *bağlantı* adı verilen tek yönlü mantıksal bağı iki eşdüzey MAC katmanı arasında kurar. Her bağlantı, veri iletimi için geçici bir adres gibi hizmet veren CID (Connection Identifier – Bağlantı tanımlayıcı) ile tanımlanır.

WiMAX, SF (Service Flow-Servis akışı) kavramını da tanımlar. Servis akışı, paketlerin QoS parametreleri ile tek yönlü ve SFID (Service Flow ID – Servis akışı kimliği) ile tanımlanmış akıştır. QoS, trafik önceliği, maksimum devamlı trafik hızı, maksimum patlama hızı, minimum kabul edilebilir hız, zamanlama tipi, ARQ (Automatic Repeat Request – Otomatik yeniden gönderme) tipi, maksimum gecikme, kabul edilebilir sapma, SDU tipi ve boyutu, kullanılan bantgenişliği istek mekanizması, iletim PDU yapısı kuralları, vb. parametreleri içerebilir.

Geniş bir uygulama alanına destek verebilmek için WiMAX, bağlantı üzerindeki veri iletişimde baz istasyonunun MAC sınıflandırıcısı tarafından desteklenen beş adet hizmet sınıfı tanımlamaktadır. Bunlar *UGS*, *rtPS*, *nrtPS*, *BE*, *ErtPS* olarak isimlendirilir.

- **UGS**: UGS (Unsolicited Grant Services-Talepsiz Tahsisat Servisi) servisi sabit uzunluktaki veri paketlerine sabit hızda (CBR – Constant Bit Rate) bir hizmet verebilmek üzere tasarlanmıştır. Bu hizmeti kullanan uygulamalarına baktığımızda T1/E1 benzetimi ve VoIP-sessizlik bastırmasız örnekleri görülebilir. Bu servisi tanımlayan zorunlu olan servis akış parametreleri maksimum sürdürülebilir trafik hızı, maksimum gecikme, tolere edilmiş seğirme (jitter) ve talep/iletim kuralıdır.
- **rtPS**: rtPS (Real-time Polling Services – Gerçek Zamanlı Yoklama Servisi) servisi, belli bir periyotta değişken boyutlu veri paketleri üreten MPEG video gibi gerçek zamanlı hizmet akışları için tasarlanmıştır. Bu servisi tanımlayan zorunlu olan servis akış parametreleri minimum rezerve edilmiş trafik hızı,

maksimum sürdürülebilir trafik hızı, maksimum gecikme ve talep/iletim kuralıdır.

- **nrtPS**: nrtPS (Non-real-time Polling Services – Gerçek Zamanlı Olmayan Yoklama Servisi) servisi garanti edilmiş minimum hızda değişken büyüklükte veri paketleri kabulüne ihtiyaç duyan FTP gibi gecikmeye toleranslı veri dizileri için tasarlanmıştır. Bu servisi tanımlayan zorunlu olan servis akış parametreleri minimum rezerve edilmiş trafik hızı, maksimum sürdürülebilir trafik hızı, trafik önceliği ve talep/iletim kuralıdır.
- **BE**: BE (Best Effort – Elinden Geleni Veren) servisi minimum servis seviyesi garantisine ihtiyaç duymayan Web taraması gibi veri dizileri için tasarlanmıştır. Bu servisi tanımlayan zorunlu olan servis akış parametreleri maksimum sürdürülebilir trafik hızı, trafik önceliği ve talep/iletim kuralıdır.
- **ertPS**: ertPS (Extended Real-time Polling Service – Genişletilmiş Gerçek Zamanlı Yoklama Servisi) servisi, değişken veri hızlarına sahip fakat veri hızı ve gecikmesi garanti edilme ihtiyacı olabilen VoIP-sessizlik bastırma gibi gerçek zamanlı uygulamalar için tasarlanmıştır. Bu servis sadece IEEE 802.16e-2005 tanımlanmıştır Andrews (2007)

Servis sınıfları, tanımlanacak parametreler ve uygulama örnekleri ile birlikte aşağıdaki Tablo 3.4’de özetlenmiştir:

Tablo 3.4 WiMAX'ta desteklenen servis sınıfları

Servis Sınıfı	Tanımlanan QoS Parametreleri	Uygulama Örnekleri
UGS	Maksimum sürdürülebilir hız Maksimum gecikme toleransı Seğirme toleransı	VoIP (Sessizlik bastırmasız)
rtPS	Minimum rezerve edilmiş hız Maksimum sürdürülebilir hız Maksimum gecikme toleransı Trafik önceliği	Ses ve video kesintisiz iletimi, kodlanmış MPEG
nrtPS	Minimum rezerve edilmiş hız Maksimum sürdürülebilir hız Trafik önceliği	FTP
BE	Maksimum sürdürülebilir hız Trafik önceliği	Web tarama, veri transferi
ertPS	Minimum rezerve edilmiş hız Maksimum sürdürülebilir hız Maksimum gecikme toleransı Seğirme toleransı Trafik önceliği	VoIP (Sessizlik bastırmalı)

3.5.1.9. Güvenlik katmanı

Güvenlik katmanı abonelere genişbant kablosuz ağlarda gizlilik, kimlik doğrulama, yetkilendirme hizmetlerini sağlar. Bu hizmetleri SS ile BS arasındaki bağlantıda taşınan MAC PDU'lara şifreleme işlemini uygulayarak yapar. Diğer taraftan güvenlik katmanı operatörlere hizmet hırsızlığı karşısında güçlü bir koruma da sağlar. BS, ilgili ağa karşı kimliği doğrulanmamış erişimleri bu ağa olan hizmet akışlarını koruyarak engeller. Güvenlik alt katmanı, yetkilendirilmiş sunucu/istemci anahtar yönetimini kullanır. Burada BS sunucu, SS ise istemci konumundadır ve BS, SS istemcilerine anahtarın dağıtımını kontrol eder. Ayrıca basit güvenlik mekanizmaları anahtar yönetim protokolüne sayısal sertifikasyon tabanlı SS cihaz yetkilendirme metodu eklenerek kuvvetlendirilmiştir IEEE 802.16 (2005).

3.5.2. Fiziksel katman

802.16 standardı 10-66 GHz'de çalışan fiziksel katman özelliklerine sahiptir. Bu 10-66 GHz hava arayüzü WirelessMAN-SC hava arayüzü olarak bilinen tekli taşıyıcı modülasyonunu esas almıştır.

10-66 GHz lisanslı bandı, kısa dalgaboyuna sahip olduğundan görüş hattında (LOS-Line of Sight) kullanılması zorunludur. Bu bantta çokyolluluk (multipath) yok denecek seviyededir. Fiziksel ortamda kullanılan kanallar geniştir. 25 veya 28 MHz genişliği örnek olarak verilebilir. Veri hızına baktığımızda 120 Mbps üzeri değerlere ulaşılabilmektedir. Bu sebeple noktadan çoklu noktaya erişimle dağıtım olan uygulamalar için 802.16 uygun seçenektir IEEE 802.16 (2001)

PMP (Noktadan Çoklu Noktaya – Point to Multipoint) mimariden dolayı BS, zaman dilimlerini (time slots) seri olarak her bir SS'e TDM sinyali ile iletir. Yukarı yöndeki (uplink) erişim TDMA ile yapılır. Diğer bir konu ise çiftleme (duplexing) durumudur. Çiftleme yöntemlerinden biri uplink ve downlink yönünde aynı kanalı paylaşan fakat eşzamanlı iletim yapmayan Zaman Bölmeli Çiftleme (TDD)'dir. Diğeri ise uplink ve downlink yönünde ayrı kanalları kullanan ve eşzamanlı yada eşzamansız iletim yapan Frekans Bölmeli Çiftleme (FDD)'dir. Eğer FDD yarı-çift yönlü (half-duplex) olursa eşzamansız iletim olur. Fakat bu dezavantaj maliyeti düşürmesi ile avantaja dönüşebilir. TDD ve FDD her ikisi de uyarlamalı modülasyon ve kodlamayı destekler.

Yapılan düzeltmelerin ardından 802.16 standardı 802.16a versiyonu tanımlanmıştır. Getirilen yenilik, 2-11 GHz frekans bandında aynı ortam erişim mekanizmasıyla yeni bir fiziksel katman özelliği elde edilmesidir.

802.16-2004 standardı, 802.16-2001, 802.16a-2003 ve 802.16c-2002 standartlarının gözden geçirilmiş ve birleştirilmiş halidir. Ortam erişim kontrolü (MAC) esasen noktadan-çoklu noktaya (PMP) mimarisini desteklerken örgü (mesh) topolojisini de opsiyonel olarak desteklemektedir. Çoklu fiziksel katman özelliklerini destekleyecek şekilde yapılandırılmıştır. 10-66 GHz frekansları için PHY tekli taşıyıcı

modülasyonu esas alır. 11 GHz frekansının altındaki direk görüş hattında olmayan (NLOS) uygulamalarda ise üç alternatif vardır. Bunlar:

- WirelessMAN-SCa : Tekli taşıyıcı modülasyonu kullanır
- WirelessMAN-OFDM :256 taşıyıcılı Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama ve erişim mekanizması olarak TDMA kullanır. Daha ziyade lisanssız bant kullanımı içindir.
- WirelessMAN-OFDMA : 2048 taşıyıcılı Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim kullanır. Çoklu erişim, her bir alıcı için çoklu taşıyıcı kümelerinin adreslenmesiyle sağlanır. Yayılım ihtiyacından dolayı gelişmiş anten sistemleri gerekir ve bunu destekler Eklund (2002).

11 GHz altındaki frekanslarda, uzun dalga boyundan dolayı görüş hattı (LOS) zorunlu değildir ve çokyolluluk uygulanabilir seviyededir. Desteklenen yarı görüş hattı (near-LOS) ve görüş hattı olmayan (NLOS) senaryolarında ileri güç yönetim teknikleri, girişim engelleme/hafifletme ve çoklu anten kullanımı gibi ek fiziksel katman fonksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

11 GHz altındaki lisanssız frekanslar (5-6 GHz), lisanslı frekanslardaki fiziksel özelliklere benzerdir. Fakat lisans dışının doğasının getirmiş olduğu girişim ve birarada çalışma konuları limitlerde sıkıntılar oluşturmaktadır. Girişimi sezme ve önlemek işlemleri için dinamik frekans seçimi (DFS) gibi mekanizmalar PHY ve MAC katmanlarına ilave edilmiştir.

Tablo 3.5’de yukarıda anlatılan standart versiyonlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.5. Farklı standartların karşılaştırılması Rohde&Schwarz (2006)

Parametre	802.16a	802.16b	802.16	802.16 – 2004	802.16e	WiBRO
FFT Büyüklüğü	64	(1)	256	2048	2048, 1024, 512, 128	1024
Kullanıcı Kapasitesi	52	1	200	1680/1728	Çeşitli	864 / 840
Pilot Kapasitesi	4	0	8	166/192	Çeşitli	96
Bant Genişliği	20 Mhz (Turbo 40 MHz)	11 MHz	1,25 MHz ile 28 MHz arası	1,25 MHz ile 28 MHz arası	1,25 MHz ile 28 MHz arası	8,75 MHz
Modülasyon	BPSK QPSK 16QAM 64QAM	BPSK QPSK DBPSK DQPSK	BPSK QPSK 16QAM 64QAM	QPSK 16QAM 64QAM	QPSK 16QAM 64QAM	QPSK 16QAM 64QAM
Çoğullama	TDD	TDD	TDD/FDD	TDD/FDD	TDD/FDD	TDD
Koruma Periyodu	1/4	N/A	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/8
Frekans Üzerinden Çoklu Kullanıcı (1 sembol zamanda)	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet
Zaman Üzerinden Çoklu Kullanıcı (1 Kanalda)	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet
MIMO	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet

3.5.2.1. Lisanslı ve lisanssız bantlar arasındaki farklar

Lisanslı ve lisanstan muaf WiMAX çözümleri, fiziksel katmanda (Physical Layer-PHY) dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) kullanan IEEE 802.16-2004 standardını esas alır. OFDM, abone istasyonlarının sinyal gürültü oranını (SNR) artırma, girişimi minimize etme ve bina dışı ortamlarda esneklik geliştirme gibi faydalar sağlar. Çift yönlülük (duplexing), baz istasyonuna doğru (uplink) ve aboneye doğru (downlink) veri iletimi için iki yönde kanallar oluşturma yöntemine başvurur.

TDD (Time Division Duplex-Zaman Bölmeli Çiftleme) ve FDD (Frequency Division Duplex-Frekans Bölmeli Çiftleme) her ikisi birden 802.16-2004 standardı tarafından desteklenir. Lisanstan muaf çözümler TDD kullanırken lisanslı çözümler FDD

kullanır. FDD, gönderme için bir kanal ve alma için bir kanal olmak üzere, girişimi minimize eden ayrılmış iki kanal çiftini kullanır. Pek çok FDD bandı ses için tahsis edilir çünkü FDD'nin iki yönlü mimarisi en az gecikme ile yürütülebilecek ses taşımalarını mümkün kılar. FDD yine de sisteme ilave komponentler ekler ve bu yüzden maliyetler artar.

TDD, kanal çiftinin düzenleme kısıtlamalarından dolayı uygun olmadığı veya lisanstan muaf frekansların kullanılabildiği ortamlarda yararlı olur. TDD hem yukarı hem de aşağı yönde iletimler için tek bir kanala sahiptir. TDD bir sistem, trafik miktarına bağlı olarak baz istasyonuna doğru (upstream) ve aboneye doğru (downstream) veri akış bantgenişliğini dinamik olarak tahsis edebilir. Bu asimetrik transfer, büyük miktarlarda verinin abone yönünde çekilebildiği internet trafiği için çok uygundur.

TDD ve FDD farklı bantlar ve farklı çift yönlülük teknikleri kullandıklarından dolayı birlikte çalışmazlar. TDD ve FDD'nin karşılaştırmaları Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. TDD ve FDD karşılaştırılması Küçükünsal (2006)

	TDD	FDD
Tanımı	<ul style="list-style-type: none"> Lisanstan muaf çözümlerde kullanılan bir çift yönlülük tekniği ve hem baz istasyonu yönünde hem de abone yönünde tek bir kanal kullanımı 	<ul style="list-style-type: none"> Lisanslı çözümlerde frekans kanalının bir çiftini (biri baz istasyonu yönü diğeri abone yönü için) kullanan bir çift yönlülük teknolojisi
Avantajlar	<ul style="list-style-type: none"> Eşlenmiş bir frekans gerektirmediği için geliştirilmiş esneklik Akıllı anten teknolojileri ile eşleştirmek daha kolay Asimetrik 	<ul style="list-style-type: none"> Ses için kanıtlanmış teknoloji Simetrik trafik için tasarım Güvenlik zamanı gerekmiyor
Dezavantajlar	<ul style="list-style-type: none"> Gönderme ve alma aynı zamanda yapılamıyor 	<ul style="list-style-type: none"> Frekansın çiftlenmediği yerlerde yayılamıyor Frekans genellikle lisanslı Frekans satın alınmasıyla ilgili olarak daha yüksek maliyet
Kullanımı	<ul style="list-style-type: none"> Asimetrik veri uygulamaları Değişen trafik seyri RF verimliliğinin maliyetten daha önemli olduğu durumlar 	<ul style="list-style-type: none"> Tahmin edilebilir trafik seyri Ekipman maliyetinin RF verimliliğinden daha önemli olduğu durumlar

3.5.2.2. Uyarlamalı modülasyon ve kodlama

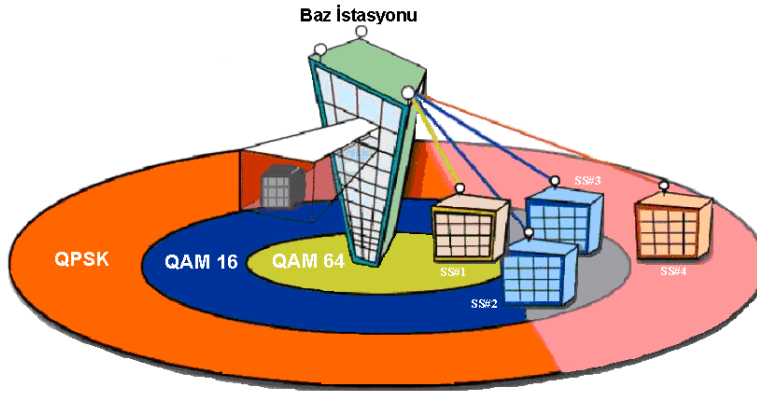
WiMAX sistemleri kanaldaki dalgalanmaları (fluctuation) avantaj hale dönüştürmek için Uyarlamalı Modülasyon ve Kodlama (AMC-Adaptive Modulation and Coding) kullanır. Kanal verimi yüksek seviyede ise mümkün olan en yüksek hızda veri iletilirken, kanal verimi düşük seviyede ise veri kaybına uğramamak için daha düşük hızlarda veri iletilir. Düşük veri hızları QPSK gibi küçük işaret kümeleri ile 1/2 katlamalı (convolutional) ya da turbo kod gibi düşük hata düzeltme oranları kullanılarak elde edilir. Yüksek veri hızları ise 64-QAM gibi geniş işaret kümeleri ile 3/4 katlamalı (convolutional) ya da turbo kod gibi daha az güçlü hata düzeltme kodları kullanılarak edilir. Diğer bir ifade ile baz istasyona yaklaştıkça kanal kalitesi artacağından ve hata oranı düşeceğinden dolayı hem daha yüksek veri hızı için gerekli modülasyon, hem de hata düzeltme oranı olarak daha yüksek bir oran seçilir. Bu kod oranı ise toplam bilginin ne kadarının yararlı bilgi olduğu anlamına gelir. Örneğin k/n kod oranı kullanılan modülasyonda k adet bit yararlı bilgi iken n-k bit ise artık bilgidir Andrews (2007), IEEE 802.16 (2005).

Verimi yüksek tutabilmek için UMK (Uyarlamalı Modülasyon ve Kodlama) kontrolörü uygun modülasyon türü ve kod oranını belirler. IEEE 802.16e-2005 standardında yukarı ve aşağı yöndeki bağlantılar için tanımlanmış modülasyon türleri QPSK, 16-QAM ve 64-QAM'dir IEEE 802.16 (2005)

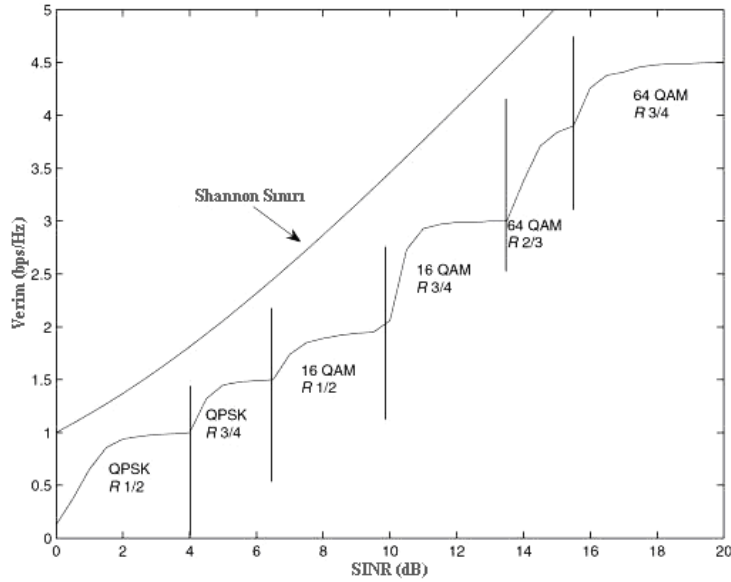
QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) Dördün Faz Kaydırmalı Kiplenim, girişteki bitlerin ikiyeşerli gruplar halinde alındığı, her bit grubunun da doksanar derece (0 , $\pi/2$, π veya $3\pi/2$) faz farkı olan taşıyıcı sinüs dalgasıyla temsil edildiği kiplenim yöntemidir.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) Dördün Genlik Kiplenimi, birini kosinüs biçimli, diğerini sinüs biçimli taşıyıcılara bindirerek aynı bandın iki kez kullanılmasını sağlayan analog veya sayısal kiplenim yöntemidir. Sırasıyla 16 ve 64 boyutlu işaret uzayı kullanan 16-QAM ve 64-QAM yöntemleri yaygın olarak kullanılan sayısal kiplenim yöntemleridir. IEEE 802.16 (2001).

Şekil 3.11’de mesafeye bağlı olarak kullanılan modülasyonlar görülmektedir. Baz istasyona yaklaştıkça daha yüksek hızlara imkan tanıyan QAM modülasyonu kullanılırken, baz istasyondan uzaklaştıkça daha güçlü fakat daha yavaş olan QPSK tercih edilir. Şekil 3.12’de ise kullanılan modülasyon ve kod oranlarının SINR-Verim grafiği verilmiştir. Burada hangi SINR aralıklarında hangi modülasyon ve oranının kullanıldığı ve bu aralıktaki verimi gösterilmiştir Andrews (2007).



Şekil 3.11. Mesafeye bağlı olarak modülasyon seçimi



Şekil 3.12. Kullanılan modülasyona göre SINR-Verim grafiği

3.6. Sonuç

Kablosuz iletişim sistemlerinin getirdiği hareketlilik, kolay erişim, basitlik, esneklik, kurulum maliyeti, servis maliyeti gibi bazı karakteristik özelliklerinin avantajı Bayılmış (2006), İskefiyeli vd. (2007) gibi birçok çalışmada kullanılabilirliğini göstermiştir.

WiMAX, hücresel servislerin işletiminde hücresel baz istasyonların santrallere bağlanmasında arabirim olarak kullanılabilir. Noktadan noktaya iletimde 50 km menzile ulaşan WiMAX bu aşamada bir çözüm olabilmektedir. İster WiMAX olsun, ister WiFi olsun kablosuz servis sağlayıcı hizmeti veren firmalar son noktadaki baz istasyonlarını merkeze WiMAX toplayıcı omurga üzerinden bağlayabilir.

IEEE 802.16 protokolünün ilk versiyonlarında alıcı ve verici istasyonlar sabit ve görüş hattında iken; göçebe ve gezgin versiyonlarıyla alıcı ve verici istasyonların sabit ve görüş hattında olma zorunluluğu ortadan kalkmıştır. IEEE 802.16e versiyonu tamamen gezgin olan versiyondur ve baz istasyondan baz istasyona aktarılma özelliğine de sahiptir.

Kablolu bağlantının kurulumunun zor olduğu alanlarda kablosuz bir çözüm, kablolu çözümlere göre daha kolay, çabuk ve ekonomik olmaktadır. Örneğin, deniz kıyısında karadan uzakta kurulu olan bir platforma deniz altından kablo çekmek yerine kablosuz iletişim daha mantıklı olacaktır. Aynı zamanda bu platform belli bir süre sonra başka bir alana kaydırılmak istendiğinde kablosuz iletişim açısından ek bir maliyet doğurmayacaktır. Diğer bir uygulama örneğinde bankalar aynı şehir içindeki şubeleriyle ya da para çekme üniteleri arasındaki haberleşmesinde WiMAX kullanabilmektedir.

Geniş bir uygulama alanına destek verebilmek için WiMAX, bağlantı üzerindeki veri iletiminde baz istasyonunun MAC sınıflandırıcısı tarafından desteklenen beş adet hizmet sınıfı tanımlanmaktadır. Bunlar *UGS*, *rtPS*, *nrtPS*, *BE*, *ErtPS* olarak isimlendirilir.

Sistemin modellenmesinde WiMAX açısından bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller aşağıda listelenmiştir:

- Gezgin uygulamaları da destekleyebilmesi açısından IEEE 802.16e versiyonu tercih edilmiştir.
- Uyarlamalı modülasyon ve kodlama tekniğini kullanan WiMAX, sinyal kalitesine göre modülasyon ve kodlama türünü bir alt ya da bir üst türe geçiş yaparak servis kalitesini sağlamaktadır. Bu sebeple 10-18 dB aralığındaki SNR ortamı için QPSK, 18-22 dB aralığındaki SNR ortamı için 16-QAM, 22 dB ve üzeri SNR ortamı için 64-QAM kullanılmaktadır (Ramachandran, 2004). Çalışmamızda 16-QAM modülasyon ve kodlama türü seçilerek benzetim yapılmıştır.
- Servis sınıfı olarak USG servis sınıfı tercih edilmiştir. UGS servisi sabit uzunluktaki veri paketlerine sabit hızda (CBR) bir hizmet verebilmek üzere tasarlanmıştır. PROFIBUS protokolünün gerçek zamanlı ihtiyaçlarını karşılayıp karşılayamayacağı incelenmiş ve sonuçlar bölümünde konu irdelenmiştir.
- Abone istasyonun, baz istasyona bağlantı aşamasında geçen durumlar ve gecikmeler dikkate alınmamış ve sistem normal durumdaki şartlarda incelenmiştir.

BÖLÜM 4. MODELLEME VE PETRİ AĞLAR

4.1. Giriş

Belirli bir amaç için birlikte hareket eden elemanların bütünü sistem olarak tanımlanır. Sistemin genel karakteristiklerinin gösterilimi de sistemin modeli olarak ifade edilir. Bir sistemin ya da sürecin matematiksel, algoritmik ya da davranışsal karakteristiklerinin gösterilmesi de modelleme olarak isimlendirilir. Bir sistemin üretim safhasında, ürünle ilgili problemlerin incelenmesi için gerçek model, fiziksel model ya da analitik model üzerinden çalışma yapılır. Gerçek model ile elde edilen sonuçlar modellenmiş sistem yöntemine göre daha doğrudur ve istenen çözüm yöntemidir. Fakat, gerçek sistem donanımının mevcut olmadığı durumlarda, sonuç elde etmek zordur. Bu sebeple planlama ve tasarım aşamaları için model oluşturmak gerçek sistem yaklaşımına göre daha uygundur.

Sistemi değerlendirmenin alternatif yolu, sistemin nasıl çalışacağı konusunda bir takım varsayımlar geliştirmektir. Genellikle matematiksel, mantıksal veya davranışsal ilişki biçiminde olan bu varsayımlar, ilgili sistemin istenen davranış biçimini sağlayacak bir model oluşmasını sağlar. Bu aşamada model iki biçimde gösterilebilir: Fiziksel ve matematiksel/mantıksal model. Modelleme vasıtasıyla çalışılan sistemlerin amacı, gerçek bir nesneyi imal etmeden sistemin anlaşılmasına, tasarlanmasına, çalışmasına, analizine ve kontrolüne yardım etmektir. Fiziksel bir model ile çalışmak bir prototip ya da özel amaçlı donanım sisteminin inşa edilmesini gerektirir ki bu yöntem zaman alıcı, pratik olmayan ve maliyetlidir. Bu sebeple matematiksel/mantıksal model yöntemi başarımlı değerlendirme için hızlı, pratik ve daha az maliyetlidir, Özçelik (2002).

Modern teknoloji sıradan ya da kısmi diferansiyel denklemlerle kolaylıkla tanımlanamayan dinamik sistemleri ortaya çıkartmıştır. Bu sistemlere üretim sistemleri, iletişim ağları, trafik ve lojistik sistemleri, askeri komuta ve kontrol

sistemleri ve diğer modern medeniyet için çok önemli olan işlemsel öğeler örnek olarak verilebilir. Sistemlerin zamandaki değişimi, bir sürecin ayrılış ya da varışı, bir görevin ya da mesajın tamamlanması gibi çeşitli ayrık olayların zamanla karmaşık etkileşimlerine bağlıdır. Bu tarz dinamik sistemlerin durumu sürekli değişim yerine sadece bu ayrık anlık zamanlarda değişir. Bunun gibi insan yapımı sistemlere “*Ayrık Olaylı Sistemler-AOS*”(Discrete Event Systems-DES) denir.

Birçok farklı tipte ayrık olaylı sistem olmasına rağmen, bunlar ortak karakteristikleri paylaşırlar:

- **Olaya Dayalı (Event Driven):** Bir ayrık olaylı dinamik sistem ardışık olaylar dizisi gibi gözükebilir. Bir olayın bitişi, bir ya da daha fazla yeni olayı başlatabilir. Ayrıca, olayların oluş sırası benzersiz olmak zorunda değildir.
- **Koşut zamanlı (Concurrent):** Birçok olay eşzamanlı bir durumda olabilir. Örneğin, bir esnek imalat sisteminde birçok iş istasyonu raf parçalarına aynı zamanda işlem yapıyor olabilir.
- **Eşzamansız (Asynchronous):** Sistem olaylarının gelişmesi düzensizdir. Bu birçok değişken işlem yordamlarına ve işlem zamanlarına sebep olabilir.
- **Kilitlenme(Deadlock):** Bir AOS özel bir duruma ulaştığında, sistemin gelişimi durur. İyi tasarlanmış bir sistem bu kilitlenme durumunu sezebilmeli ve çözüm üretebilmelidir.
- **Çarpışma (Conflict):** Bu durum iki veya daha fazla işlemin aynı kaynağı aynı zamanda kullanmak istediği durumlarda ortaya çıkar. Örneğin, sunucu-istemcili sistemlerde iki veya daha fazla istemcinin belirli bir sunucuya bağlanma ihtiyacı olabilir Wang (1998).

4.2. Formal (Biçimsel) Modelleme

Sonlu Durum Makinaları'nın (SDM) biçimsel modeli 1950'lerin başlarında hesaplama karmaşıklığı olan problemlerin çözümünde, bağımsız olarak tümleşik ve ardışıl devrelerin tasarımında kullanım için geliştirilmiştir. SDM'ların birçok uygulaması olduğu gibi, birçok temel model çeşidi de vardır.

Biçimsel modelleme araçlarının yeterliliğinin değerlendirilmesinde üç ana kriter vardır:

- Modelleme gücü
- Analitik gücü
- Tanımlama sadeliği

Modellemenin esas amacı analitik güçte kazanç sağlamaktır. Modeldenmiş sistemi analiz etmek modellenmemiş sisteme göre daha kolaydır Holzmann (1991).

4.3. Protokol Modelleme

Protokol mühendisliğinde gerçekleştirme ve performans analizi önemli kısımlardandır. Protokol gerçekleştirmedeki amaç protokol geliştirme aşamasında hataları bulma ve düzeltme, kilitlenmeleri (deadlock) ve işletilemeyen durumları maksimum seviyede önlemektir. Gerçekleştirme aşamasında, protokol öncelikle biçimsel olarak tanımlanır ve ardından doğru teknikler, analiz ve protokolün özneliklerinin gerçekleştirilmesinde kullanılır.

Performans analizi protokolün çalışma mekanizmasının incelenmesinde kullanılır ve protokol modelinin temelinde önemli parametreler ile protokolün ana fonksiyonlarının yürütülmesi de sistem benzetimidir. Aynı zamanda benzetim, protokolün biçimsel tanımlamasının bir çeşididir.

Protokol gerçekleştirme ya da performans analizi biçimsel tanımlamayı gerektirir. Ama pratikte, bu tanımlamalar her zaman geliştirilme aşamasında biçimsel olmayan tanımlanma (Çince, İngilizce metni gibi) üzerinde farklı araçlarla ayrı ayrı

yapılmıştır. Bu yüzden bu iki biçimsel tanımlama arasındaki tutarlılık, içsel (temel) hatalardan (belirsizlik, düşük etki, eksik mantık vs) dolayı biçimsel olmayan tanımlamalarda garanti edilemez Guoqing (2005).

Denetlemek (validate), doğrulamak (verify) ya da gerçeklemek (implement) için protokol modelleme problemi artık problemlere pratik çözüm getiren geliştirme seviyelerine çıkmıştır.

Melez (hybrid) yaklaşımların genelleştirilmesi kesinlikle bir hata değildir. Sonunda, erişebilirlik analizinin programa karşı üstünlüğü ya da tersi iddialar onların otomatikleştirilmiş metot terimlerindeki göreceli kabiliyetlerine bağlı olacaktır.

Bilgisayar sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılan biçimsel metotlar sistem özelliklerini tanımlayan matematiksel tabanlı tekniklerdir.

Bir metot eğer matematiksel temeli varsa ve biçimsel tanımlama diliyle ifade edilmişse biçimsel (formal) denilir. Bu temel; tutarlılık ve tamlık (completeness), daha geçerli bir belirtim (specification), gerçekleştirme (implementation) ve doğruluk (correctness) gibi kavramların tanımlanmasında kesinlik anlamı sağlar, Dursun (1993).

Modelleme seviyesinde Petri ağlardan başlayıp, özdevinir kuram (otomata teori) ve biçimsel diller üzerinden geliştirilen programlara kadar sistemin eşdeğerine yakın araçlar vardır. Araç seçiminde kişilerin geçmişteki birikimleri etkili olmaktadır, Danthine (1980).

Biçimsel metotlardan biri de ağ tabanlı yaklaşımlardır. Bu yaklaşım sistemin koşut zamanlı modelinin, ağ içindeki bir düğümden diğerine hangi verinin hangi şartlarda akışını gösterecek şekilde ifade eden bir ağ yapısı ile modellenmesidir. Bu yapıya en güzel örnek Petri ağlardır.

Protokol modelleme tekniklerinde üç metot izlenir: Petri ağlar, biçimsel diller ve programlama dilleri.

Petri ağlar koşut zamanlılığı güzel bir şekilde ifade eder ve yüksek seviyede protokolün kontrol akışının modelini sağlar. İyi yapılandırılmış, modüler tasarıma, azaltılmış kurallara sahip, matematiksel temelli, arzu edilen birçok özelliği analiz edebilen özelliklerine sahiptir.

Biçimsel dilbilgisi, kesin anlama sahip kelime ya da sembolleri kullanan bir dildir. Protokol tanımlamada kullanılan standartlaşmış biçimsel dilbilgilerinden biri LOTOS'dur. LOTOS, protokoldeki tüm olayları veri akışını da içerecek şekilde ifade edebilir. Fakat LOTOS dilinin okuması ve anlaşılması zordur ve tasarımcıya tasarım aşamalarında yol göstermez.

Programlama dilleri, protokolleri yüksek seviyeli bir program ile gösterebilirler. İyi yazılmış programlar hassas, iyi yapılandırılmış ve anlaşılırdır. Programlama dilleri, sayıları, veri yapılarını ve değişkenleri ifade etmekte kullanışlı iken, senkronizasyon ve koşut zamanlılık gibi kavramları kapsayan kontrol yapılarını ifade etmekte daha az kabiliyete sahiptirler. Biçimsel dilbilgisi gibi programlama dilleri de bütün aşamalarda tasarımcıya protokolü görsel ve sezgisel olarak ifade ettirmezken, katı söz dizimine (syntax) zorlar, Behki (1989).

Sonuç olarak; matematiksel ve grafiksel modelleme aracı olan Petri ağlar, senkronizasyon, koşutzamanlılık, kilitlenme önleyebilme özellikleri ile biçimsel tanımlamalarda kullanılmaktadır.

4.4. Petri Ağlar

Petri ağlar, durumlar ve olaylar arasında varolan ilişkileri anlatmak için genel amaçlı bir matematiksel araç tanımlayan Carl A. Petri'den doğmuştur. Bu çalışma 1960-1962 yılları arasında, "Kommunikaton mit Automaten" (Communication with Automata-Özdevinir ile İletişim) adlı doktora tezinde geliştirilmiştir. Çalışmasında bir bilgisayarın asenkron birimleri iletişim teorisi geliştirmiş ve özellikle olaylar arasındaki nedensel ilişki üzerinde durmuştur. Bu tarihten itibaren, Petri ağlar büyük bir gelişim içinde olmuş ve eşzamanlama (senkronizasyon), eşzamansız (asenكرون) olaylar, ardışıl işlemler, koşutzamanlı işlemler, çakışmalı-çelişkili durumlar, kaynak

paylaşımı vb. özelliklerin modellenmesinde kullanılmıştır. Bu özellikler ayrık olaylı sistemleri karakterize eder ki bu ve diğer faktörler Petri ağların çeşitli tipteki ayrık olaylı sistemlerin modellenmesinde kullanılabilir bir araç ve teknoloji olduğunu gösterir.

İletişim protokolleri, Petri ağların sistemin temel özelliklerinin gösterilmesi ve belirtilmesinde kullanıldığı bir diğer alandır. Petri ağların canlılık ve güvenilirlik özellikleri iletişim protokollerini doğrulamada sıklıkla kullanılır, Petri (1962), Murata (1989), Wang (1998), Çayır (2004).

Petri ağı modelleri kontrol alanında, benzetimde ve performans analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Avantajlarına bakıldığında;

- Sistem çıkmazı, kilitleme ve kararsızlık gibi istenmeyen durumlar için sistemi kontrol edebilme yeteneği bulunması,
- Birçok sistem için benzetim yapılmaksızın performans analizi yapılabilmesi. Üretim alanları, kaynak kullanımı, güvenilirlik ve performans ölçümünün yapılabilmesi,
- Gerçek-zaman görüntüsüne izin veren durum bilgisi. Yani hangi zamanda sistemin ne durumda olduğunu öğrenilebilme kolaylığı görülmektedir.

Petri ağı günümüzde ayrık olaylı sistemlerin tasarımı için matematiksel ve grafiksel özelliklere sahip güçlü bir araç olarak görülmektedir, Çalışkan (2003).

4.4.1. Sonlu durum makineleri ve Petri ağı farkı

Bir Petri ağı, süreç içindeki bilgi akışına ilişkilendirilmiş durumların detaylandırılmış modelini sağlar. Diğer bir ifade ile bir akış diyagramı ya da bir doğal dil tanımlamasına benzemektedir. Petri ağlar bir jeton makinesi ve bir SDM gibi eşdeğerdir. Durumlar koşullardan türetilmişlerdir. Bu nedenle, SDM protokol tasarımının ilk başlangıcında kullanım için en iyi araç değildir. Bu aşamada son tasarım hali klasik ya da daha kompakt SDM ile tanımlanmış iken, Petri ağı modeli daha kullanışlı olmaktadır, Danthine (1980).

4.4.2. Basit Petri ağlar

Basit Petri ağlar dörtlü elemandan oluşmaktadır.

$$PN = (P, T, I, O) \quad (\text{Denklem 4.1})$$

Burada,

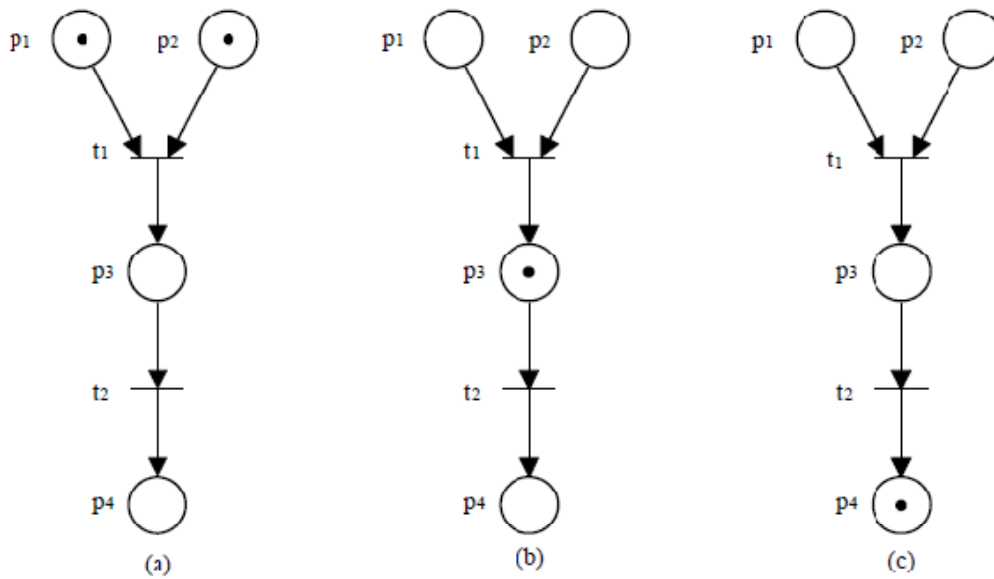
- $P = \{ p_1, \dots, p_n \}$ durumların sonlu kümesini,
- $T = \{ t_1, \dots, t_m \}$ geçişlerin sonlu kümesini,
- I, P 'den T 'ye doğru yönlü kirişleri ile ilgili $P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ giriş haritalamasını
- O, T 'den P 'ye doğru yönlü kirişler ile ilgili $P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ çıkış haritalamasını gösterir.

P (*durum-place*) ve T (*geçiş-transition*) ayrık kümelerdir ve $P \cup T$ 'nin herhangi bir üyesi düğüm olarak adlandırılır. Petri ağlar bağlı olarak kabul edilir. Bu bağlı ifadesi herhangi iki düğüm arasında en az bir yol vardır anlamına gelmektedir. Genel olarak P 'ler sistemdeki durumları ifade etmekte kullanılırken, T 'ler ise bir durumdan diğer duruma olan geçişleri kontrol eder.

Petri ağlar modelin nasıl çalıştığını anlayabilmemize yardımcı olan grafiksel şekilde gösterilebilir. Petri ağ grafi çemberleri durumların ve çubukları da geçişlerin gösteriminde kullanır. Giriş ve çıkış fonksiyonları iki tip düğüm arasında yönlendirilmiş kiriş ile ifade edilir. Bir kiriş durumdan kirişe doğru yönlendirilmiş ise bu durum geçiş için giriş durumudur. Benzer şekilde bir kiriş geçişten duruma doğru yönlendirilmiş ise bu durum geçişin çıkış durumu olacaktır.

İşaretlenmiş Petri ağ ek bir eleman olarak *jeton (token)* içerir. Jetonlar durumlarda bulunur, kirişler üzerinden hareket eder ve akışları geçişler tarafından kontrol edilir. Grafiksel olarak noktalar ile gösterilir. Petri ağın *işaretlemesi* $M(p)$ bulunduğu durumdaki jeton sayısını gösteren pozitif tamsayı olan bir haritalamadır. İşaretlenmiş bir Petri ağ beşli elemandan oluşur.

$$PN = (P, T, I, O, M) \quad (\text{Denklem 4.2})$$



Şekil 4.2. Basit bir Petri ağının ateşlemesi: (a) başlangıç işaretlemesi (b) t1'in ateşlemesinden sonraki işaretleme (c) t2'nin ateşlemesinden sonraki işaretleme Uzam (1998).

4.4.3. Petri ağlarının özellikleri

Petri ağlar grafiksel ve matematiksel araçlar olduğu üzere birçok özelliği vardır Murata (1989). Bunlardan bazıları aşağıda özetlenecektir:

- **Erişebilirlik (Reachability):** Aktive olan bir geçişin ateşlenmesi işaretlemeyi değiştirir. Şayet M_0 'dan M_i 'ye dönüşüm yapan bir ateşleme dizisi varsa, M_i işaretlemesi için başlangıç işaretlemesi olan M_0 'dan erişilebilir denir.
- **Sınırlılık (Boundedness):** Şayet başlangıç işaretlemesi M_0 'dan erişilebilen her işaretleme için, her bir durumdaki jeton sayısı 'k' sonlu sayısını aşmıyorsa, Petri ağı k-sınırlı ya da sınırlı denir.
- **Güvenlilik (Safeness):** Şayet bütün durumları güvenli ise Petri ağı güvenli denir. Eğer bir durum bir jetondan fazla jeton içermiyorsa bu duruma güvenli denir. Diğer bir ifade ile eğer Petri ağı 1-sınırlı ise güvenlidir.

- **Korunumluluk (Conservativeness):** Eğer tüm durumlarındaki jetonların toplam sayısı tüm erişilebilir işaretlemeler için sabitse bu Petri ağı korunumlu denir.
- **Canlılık (Liveness):** Eğer Petri ağın tüm işaretlemeleri için, ağı bir işaretleme taşıyacak geçişi aktive eden bir ateşleme dizisi varsa bu geçiş canlıdır denir. Eğer Petri ağ canlı ve model doğru ise, bu sistemde kilitlemenin olmadığını gösterir.
- **Tersinebilirlik (Reversibility):** Eğer başlangıç işaretleme M_0 her işaretlemeden ulaşılabilir ise bu Petri ağı tersinebilir denir.

4.4.4. Petri ağları

Carl A. Petri'nin çalışmasında zaman kavramı açık olarak belirtilmemiştir. Fakat dinamik sistemlerin performans değerlendirmesinde ve zaman çizelgeleme problemlerinde zaman gecikmesi ihtiyaç olmuştur. Bu zaman gecikmesi, durumlarda (P-timed) olabildiği gibi geçişlerde de (T-timed) olabilmektedir. Gecikme net bir şekilde belli ise Deterministik Zamanlı Petri ağlar ya da gecikme net bir şekilde belli değil de olasılıkla tanımlanmışsa Stokastik Petri ağlar olarak adlandırılır.

Bir Stokastik Petri ağ (SPA), her geçişi bir geçişin ateşlenmesinin aktivasyonundaki gecikmeyi ifade eden bir üssel dağılımlı rastgele değişkenle ilişkilendirilmiştir. Bu durumda birçok geçiş eş zamanlı olarak aktive olur. Burada ise en kısa gecikmeye sahip olan geçiş ilk önce ateşlenir.

SPA'nın genişletilmiş bir sınıfı olan Genelleştirilmiş Stokastik Petri ağlarda (GSPA) iki tip geçiş vardır. Bunlar doğrudan (direkt) geçiş ve zamanlı geçiştir. Zamanlı geçişler SPA'daki gibi üssel dağılımlı ateşleme oranına sahip zamanlı geçiş iken, doğrudan ateşlemeli geçişler de ateşleme gecikmesi olmadan şartlar sağlandığı anda direk ateşleme yapılan geçiş tipidir Murata (1989).

Bazı sistemlerde aynı kaynakları kullanan iki veya daha fazla bağımsız alt sistem olabilir. Küçük sistemler için bu gibi durumlar çok önemli olmazken, çok daha fazla

alt sistemin aynı kaynakları kullanıldığı düşünülürse ağ yapısının ne kadar büyüyeceği ve okunmasının, analiz edilmesinin ne kadar karmaşık olacağı ortadadır. Bu sebeple benzer özellikteki alt sistemleri aynı yapıda modelleyen ve her bir süreci farklı bir renkle ifade eden alt sistemlerin birleştirilmesiyle oluşan Petri ağ yapısına da Renkli Petri ağlar denir Jensen (1992).

4.4.5. Protokol doğrulama ve erişebilirlik analizi

Protokol gerçekleştirme yaklaşımlarında erişebilirlik analizinin büyük önemi vardır. Erişebilirlik analizi, bir katmandaki iki veya daha fazla varlığın bütün olası etkileşimlerini etraflıca araştırılması üzerine temellendirilmiştir. Sistemin birleşik ya da genel durumları, birlikte çalışan protokol öğelerinin (entity) durumları ile onları bağlayan daha düşük katmandaki durumların kombinasyonu olarak tanımlanır. Verilen başlangıç durumundan, birçok yeni genel duruma yol açan, mümkün olan tüm geçişler (transitions) (kullanıcı komutları, zaman aşımaları, mesaj varışları) oluşturulur. Bu süreç yeni bir durum üretilmeyene (bazı geçişler, durumları mevcut olan bir duruma yönlendirebilir) kadar her yeni üretilmiş durum için uygulanır Danthine (1980).

Erişebilirlik analizi ile sistemde kilitlenme olup olmadığı ve sistemin canlılığı gibi özellikler sorgulanır. Erişebilirlik analizi, sistemin çok geniş olduğu durumlarda çok karmaşık bir hal alabilir. Başlangıç durumundan sonraki ateşlemeler ile erişilen durum sayısı katlanarak artabilir.

4.5. Petri Ağ Benzetim Programları

Petri Ağlar için GreatSPN, TimeNet, Cptool, MatLab Toolbox ve HPSim gibi birçok benzetim programı mevcuttur. Bunların listesine Petri Nets (2009) kaynağından erişilebilir. Birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları mevcut olan bu programlardan HPSim Petri ağ benzetim programı, gerek kullanım kolaylığı, gerek benzetimi anlık izleme ve sonuçları gösterme kabiliyeti ile çalışmamızda tercih edilmiştir.

HPSim, Petri ağların hem grafiksel hem de sezgisel tarzda tasarım ve benzetimi için geliştirilmiştir. HPSim benzetim yazılımı, basit, zamanlı ve stokastik Petri ağları destekler. Ağın büyüklüğü ve karmaşıklığı kullanılan bilgisayarın kapasitesi ile sınırlıdır. Örneğin, PII, 300 MHz işlemciye, 128 MB RAM'e sahip bir PC ile 1000 adet nesneye sahip bir ağ tasarlanabilir ve benzetimi yapılabilir.

Benzetim, jeton oyunu animasyonu şeklinde görselleştirilebilmektedir. Bu işlem adım adım ya da sürekli kipte yürütülebilir. Ayrıca hızlı kip ile benzetimin sonuçlarına direkt ulaşılabilir HPSim (2009)

HPSim benzetim programının arayüzü Şekil 4.3'te görülmektedir. Burada ortada bulunan alan tasarım alanıdır. *a bloğunda* seçilen herhangi bir nesnenin özellikleri belirtilmektedir. *b bloğunda* benzetim aşamasının nasıl yürütüleceği (adım adım, normal, hızlı benzetim) ve sıfırlama işlemleri mevcuttur. *c bloğunda* benzetim aşamasında o anda hangi işlemlerin yapıldığı belirtilmektedir. *d bloğunda* nesne paleti bulunmaktadır. *e bloğunda* ise benzetim aşamasında benzetim ile ilgili bilgiler (adım sayacı, zaman vb.) verilmektedir.

The screenshot displays the HPSim simulation environment. The main window shows a Petri net diagram with various places (P0-P14) and transitions (T0-T19). A control panel on the left includes a play button (labeled 'b'), a pause button, and a stop button. A status window at the top right shows simulation parameters: Step: 149 / Time: 42, Enable: T3, and start times for transitions T14, T21, T29, T36, T44, and T45. A property table at the bottom left is highlighted with a red box (labeled 'a'). A red box at the top right (labeled 'c') contains simulation controls, and another red box at the top right (labeled 'd') contains a toolbar.

Property	Value
Name	T44
Size	Normal
Show Name	TRUE
Show Delay	TRUE
Time Mode	Exponential
Initial Delay	3
Range Delay	0
Current Delay	1
Tolerance Fired	0

Step: 149 / Time: 42
 Enable: T3
 Start Timer: T14
 Start Timer: T21
 Start Timer: T29
 Start Timer: T36
 Start Timer: T44
 Start Timer: T45
 Position: P6 decr. 1 token(s)
 Position: P5 incr. 1 token(s)
 Position: P2 incr. 1 token(s)
 Position: P7 incr. 1 token(s)

Şekil 4.3. HPSim benzetim programı arayüzü

4.5. Sonuç

Petri Ağların haberleşme protokollerinde kullanılabilirliği Park (1996), Lin (1997), Zhou (1998), Marsan (2000), Heindl (2001), Zhou (2006) alışmalarında görülmektedir. Bu sebeple çalışmamızda biçimsel modelleme olarak Petri ağlar seçilmiştir. Yukarıda verilen çalışmalarda da görüleceği zeri *Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağlar*, stel dağılımlara ve sabit zaman gecikmelerine olanak verdiğinden dolayı protokol modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır ve çalışmamızda da GSPA tercih edilmiştir. Ayrıca çalışmada, benzetim yazılımı olarak da HPSim yazılımı tercih edilmiştir.

BÖLÜM 5. PROFIBUS/802.16 (WiMAX) ARABAĞLAŞIM ELEMANININ TASARIMI VE MODELLENMESİ

5.1. Giriş

Geleneksel LAN'lerden türetilen sahayollarının ortak problemi, sınırlı mesafeye sahip olmalarıdır. Uluslararası standartlarla (IEC61158) tanımlanmış sahayollarından olan PROFIBUS protokolü, 9,6 kbit/sn ile 12 Mbit/sn arasındaki hızlarda 100 m ile 1200 m'lik bir mesafeye izin verir. (IEC61158). Bu yapı, özellikle daha geniş mesafeye sahip endüstriyel uygulamalarda birden fazla PROFIBUS segmentinin (diliminin) kullanılması gerekliliğini ortaya çıkartır.

Merkezi yönetim (izleme, teşhis, ağ yönetimi, vb.) için uzak mesafelerdeki PROFIBUS segmentlerinin birbirine bağlanması ve bunların hem kendi aralarında hem de CIM mimarisindeki hücre seviyesiyle iletişimi durumunda ortaya çıkan problemlere örnek olarak gerçek zamanlı veri iletiminin sağlanması verilebilir.

Bu problemin çözümü için Kunert (1997), birbirinden bağımsız PROFIBUS dilimlerinin ATM üzerinden uzak köprü ve çok-portlu köprü kullanarak çözüm önermiştir. Çalışmasında matematiksel bağıntılar kullanmış ve tasarım aşamasına girilmemiştir. Diğer bir çalışmada Tranoris (2001), bilgisayara takılan PROFIBUS ve ATM kartları ile yazılımsal olarak arabağlaşımı yapmıştır. Özçelik (2002), çalışmasında PROFIBUS-ATM arabağlaşım elemanını sadece bir gecikme elemanı olarak değil, detaylandırılmış şekliyle tasarlamış ve performans analizini yapmıştır.

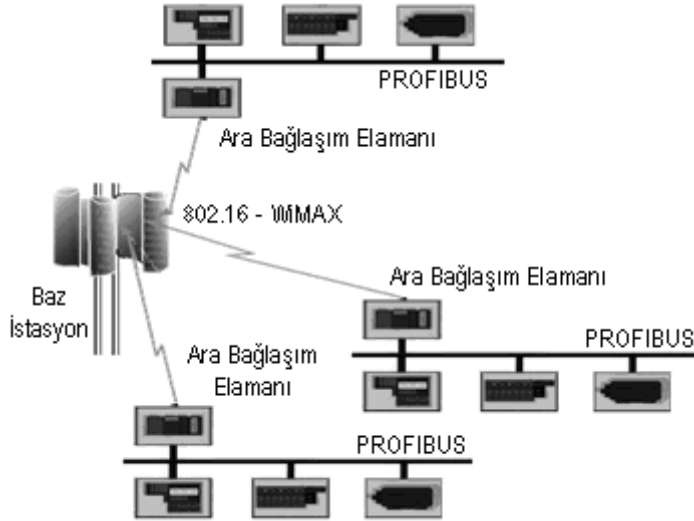
Ayrıca, kablosuz uygulamaların yaygınlaşması otomasyon sistemlerinde de kablosuz yapıların uygulanabilirliği üzerine çalışmalar da mevcuttur. Bayılmış (2006), çalışmasında CAN segmentlerinin IEEE 802.11 kablosuz LAN üzerinden arabağlaşımını önermiştir. Willig (2003) ve Lee (2001), PROFIBUS segmentlerinin IEEE 802.11 kablosuz LAN üzerinden arabağlaşımını önermişlerdir.

Yukarıdaki çalışmalar incelendiğinde PROFIBUS için uzak mesafede kablosuz genişbant hizmeti veren bir çalışma yapılmamıştır. Çalışmamızda, ATM protokolünün avantajlarını barındıran ve aynı zamanda kablosuz genişband protokolü olan 802.16 protokolünün kullanımı önerilmektedir. WiMAX-802.16 protokolü ATM hizmet sınıflarını desteklemenin yanında kablosuz özelliği ile de gezgin segmentler için büyük bir avantaj sağlayacaktır. Bu açıdan farklı lokasyonlardaki PROFIBUS segmentleri WiMAX üzerinden kablosuz bir iletim ortamından istenilen iletim hızları sağlanarak birbirleriyle haberleşebilecektir.

Ayrıca ATM protokolünün çerçeve yapısı dikkate alınır 53 bayt olan maksimum boyut için 48 baytlık bir veri taşıma kapasitesi mevcuttur. Dolayısıyla 48 baytı aşan PROFIBUS paketleri için ATM üzerinden iletim için bölümlenme (fragmentasyon) yapılması gerekmektedir. Oysa, 802.16 protokolünün çerçeve yapısına bakıldığında 2048 bayta kadar çıkabilen bir kapasite vardır. Böylece PROFIBUS paketleri bölümlenme ihtiyacı olmadan kapsülleme metodu ile direk 802.16 protokolü çerçevesindeki veri alanına yerleştirilebilir (Şekil 5.5).

5.2. PROFIBUS Segmentlerinin IEEE 802.16 Üzerinden Arabağlaşım

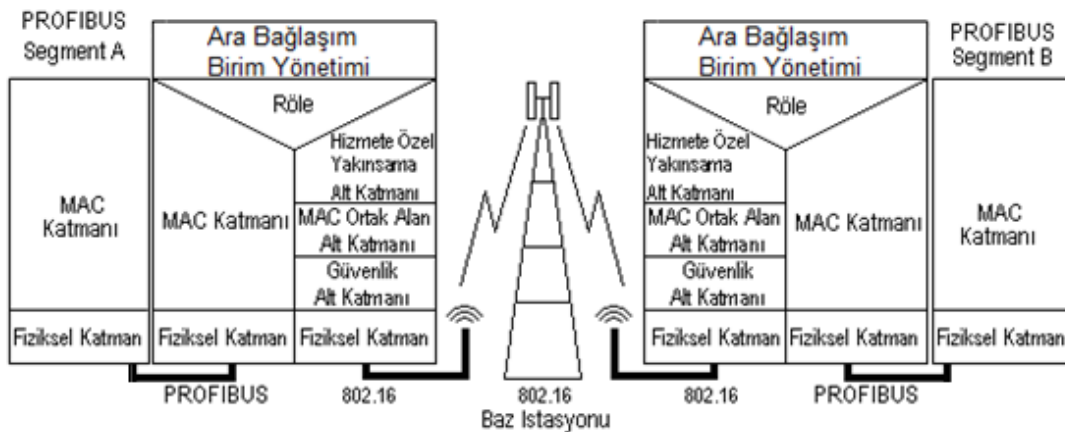
Bu tezde, farklı lokasyonlardaki sahayolu sistemlerinin birbiriyle iletişimi için IEEE 802.16 (WiMAX) kablosuz genişband sisteminin kullanılması önerilmiştir. WiMAX, sahayolu sistemlerinin mesafe problemi, merkezi yönetimi ve son zamanlarda otomasyon uygulamalarında kablosuz sistemlerin yaygın olarak kullanılmasına alternatif bir omurga çözümü olarak önerilmektedir. Şekil 5.1 farklı lokasyonlardaki PROFIBUS segmentlerinin WiMAX ile bağlantısını göstermektedir. Şekil 5.1’de de görüleceği gibi IEEE 802.16 ağına bağlanmış çoklu arabağlaşım birimleri mevcuttur. Bu arabağlaşım birimleri PROFIBUS segmentlerini bağımsız (otonom) çalışacak şekilde birbirine bağlamaktadır. Yani her segment kendi jetonuna ve kendi jeton tutma süresine sahiptir. Diğer taraftan da farklı segmentlerin uygulama gereği birbiriyle iletişimi için de bir geçit cihazı olarak görev üstlenmektedir. Benzer yapı Kunert, vd. (1997) çalışmasında ATM protokolü için önerilmiştir.



Şekil 5.1. PROFIBUS segmentlerinin IEEE 802.16 (WiMAX) ile arabağlaşımı

5.3. PROFIBUS/IEEE 802.16 (WiMAX) Arabağlaşım Biriminin Tasarımı

Arabağlaşım biriminden beklenen fonksiyon PROFIBUS segmentleri arasında verileri saydam olarak aktarmaktır. PROFIBUS ve WiMAX katmanlı mimaride OSI'nin sadece ilk iki katmanını desteklemelerinden dolayı, arabağlaşım biriminin genelde köprü cihazının özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Dolayısıyla bu arabağlaşım biriminin OSI katmanlı mimarisi Şekil 5.2'de verilen şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 5.2. Arabağlaşım birimi protokol mimarisi

Arabağlaşım biriminin, farklı kapsama ve uygulama alanlarına sahip olan bu iki ağ sistemini saydam bir yapıda birbirine bağlayabilmesi, uyumsuz yönlerine çözüm

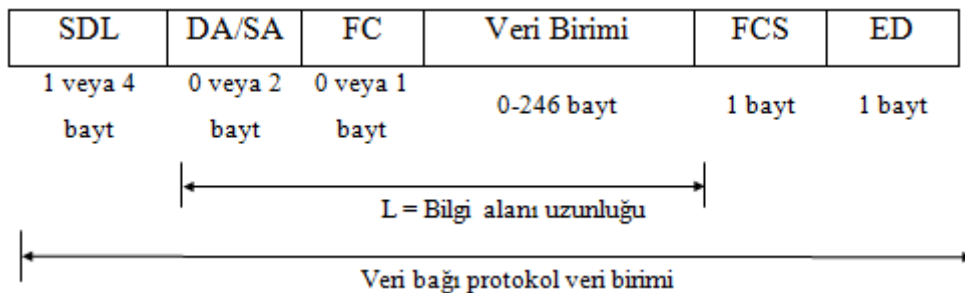
getirmesi gerekmektedir. Arabağlaşım biriminin tasarımında dikkate alınması gereken bu uyumsuz yönler, Bölüm 2 ve Bölüm 3'deki bilgilere bağlı olarak aşağıda tekrar özetlenecektir.

- Servis kaliteli/bağlantılı hizmet metodu:

IEEE 802.16 protokolü servis kaliteli-bağlantılı bir hizmet metodu kullanırken, PROFIBUS protokolü bağlantısız bir hizmet metodu kullanmaktadır. IEEE 802.16 protokolü, ATM protokolündeki CBR'ye (Constant Bit Rate-Sabit Veri Hızı) karşılık gelen UGS (Unsolicited Grand Service-Talepsiz Tahsisat Servisi) servis sınıfı kullanılabilir. UGS'nin avantajı gerçek zamanlı uygulamalar için sabit bir veri hızına sahip olması ve bağlantı süresince bu hizmetin sabit kalmasıdır. PROFIBUS uygulamaları planlanırken uzak PROFIBUS segmentlerinin birbirleri arasında bağlantı tanımlanmalıdır. Bu sebeple bunlar arasındaki bağlantı kurulmuştur.

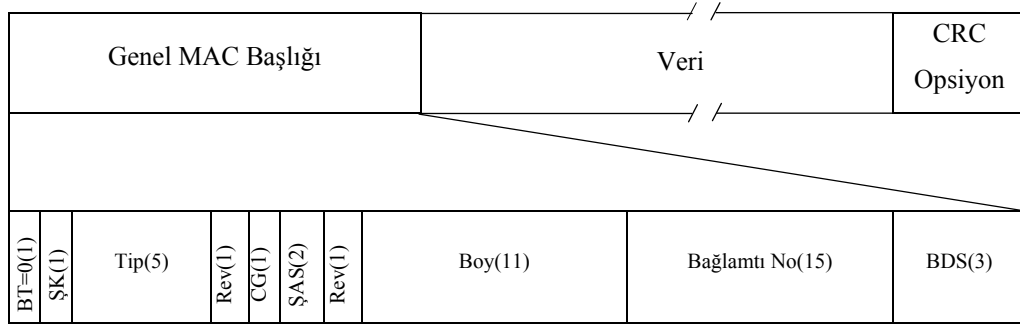
- IEEE 802.16 çerçeve ve PROFIBUS paket yapısının ve boyutlarının farklı olması:

Şekil 5.3'de PROFIBUS için paket yapısı görülmektedir. Bölüm 2'de de ifade edildiği gibi PROFIBUS farklı çerçeve yapılarına (sabit ve değişken uzunluklu paket ve veri alansız paket) sahiptir ve PROFIBUS paket uzunluğu maksimum 255 bayt olabilir.

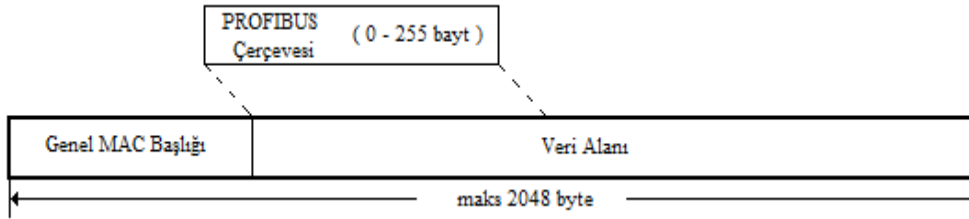


Şekil 5.3. PROFIBUS paket yapısı

Şekil 5.4'te IEEE 802.16 için çerçeve yapısı görülmektedir. Bölüm 3'de de ifade edildiği gibi IEEE 802.16 için çerçeve boyutu maksimum 2048 bayt olabilmektedir.



Şekil 5.4. IEEE 802.16 çerçeve yapısı



Şekil 5.5. PROFIBUS çerçevelerinin IEEE 802.16 MAC PDU ile kapsüllemesi

Her iki yapının özelliklerine baktığımızda IEEE 802.16 protokolü çerçeve yapısı, PROFIBUS protokolü paket yapısı için yeterince boş alan barındırmaktadır ve bu sebeple herhangi bir bölümlenme, alan eklenmesine/çıkarılmasına gerek kalmamaktadır. Bu yüzden her iki uç birimin de PROFIBUS segmenti olduğundan ve IEEE 802.16 protokolünün sadece omurga vazifesi göreceğinden dolayı PROFIBUS paketindeki veriyi ayırmaya gerek yoktur. PROFIBUS paketi, IEEE 802.16 çerçevesi ile Şekil 5.5'teki gibi kapsüllenebilir. UGS servis sınıfında paket boyutu değişmemektedir. Bu sebeplerden dolayı tasarlanacak olan arabağlaşım biriminde kapsülleme metodu kullanılabilir. Şekil 5.5'te de görüleceği üzere PROFIBUS çerçeveleri (0-255 byte) kapsülleme metodu ile uzak PROFIBUS segmentine ulaştırılır.

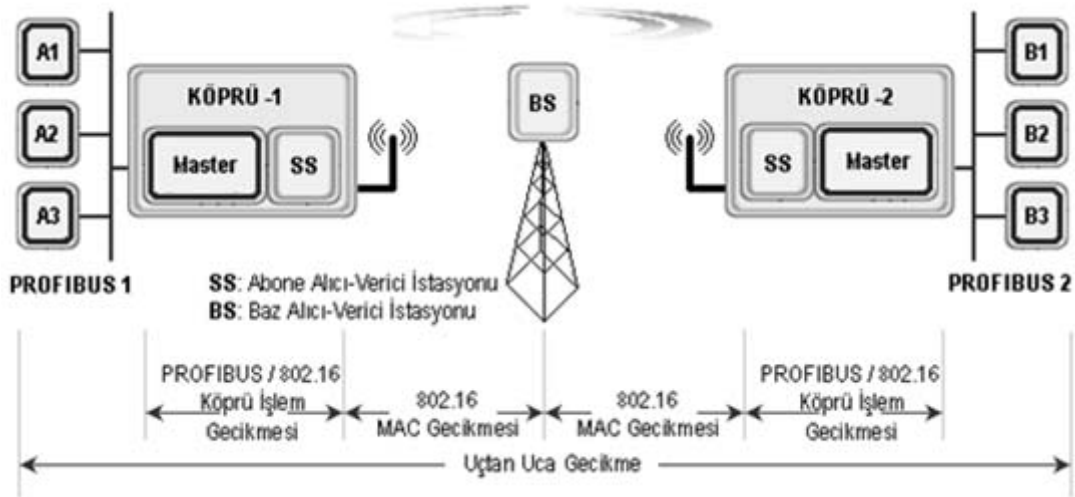
- Farklı ortam erişim kontrol tekniği ve topolojiye sahip olma:
IEEE 802.16 kablosuz topolojiye dayalı “Merkezi ortam erişim kontrolü” kullanırken, PROFIBUS protokolü, “Master-Slave yapıda jeton aktarma prosedürüne dayalı deterministik bir ortam erişimi” kullanır.
- PROFIBUS tarafında yerleştirilmiş port/birimin rolü:
Arabağlaşım biriminin bir portu saha veriyolundadır ve bir saha veriyolu istasyonu gibi davranır. Diğer port ise IEEE 802.16 baz istasyonuna bağlıdır ve abone istasyonu olarak davranır.

Tüm bu uyumsuzluklar, saydam-kapsüllemeli yerel köprü kabiliyetlerine sahip KAB (Kablosuz arabağlaşım birimi) ile çözülebilir. Bu birimin modeli bir sonraki bölüm içerisinde detaylandırılacaktır.

Tasarlanacak arabağlaşım birimi, yukarıda belirtilen uyumsuzluklar ve Şekil 5.6’da verilen genel sistem yapısı düşünülerek Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağ ile modellenecektir. Bu sistemde PROFIBUS segmentleri otonomdur. Aynı segment için üretilen mesajlarda sadece PROFIBUS zaman gereksinimleri kullanılabilir. A1’den A2’ye ya da B1’den B2’ye olan mesajlar buna örnek olarak verilebilir. A segmentindeki KAB, B segmentindeki KAB’nin IEEE 802.16 adresini bilmek zorundadır. Otonom PROFIBUS segmentlerinin IEEE 802.16 üzerinden iletişimi için üretilen mesajlarda (A1’den B1’e ya da B2’den A3’e) ise uçtan uca farklı zaman parametreleri devreye girer.

Bu parametreler aşağıda detaylandırılmıştır:

- T_{BK} : Bağlantı kurulum süresi: Bağlantı kurulum süresi, başlangıçta arabağlaşım biriminin WiMAX baz istasyonuna bağlantı kurması için geçen süredir. Tasarımda bağlantı kurulduktan sonraki durumlar ele alındığından bu süre dikkate alınmamış ve 0 msn kabul edilmiştir.
- T_{MC-A} : A’dan Köprü Master’a mesaj çevrimi: A_n ($n=1,2,3$) istasyonu ile arabağlaşım birimi master istasyonu arasında geçen mesaj çevrim süresidir.



Şekil 5.6 Genel sistem yapısı

- T_{MC-B} : Köprü Master'dan B'ye mesaj çevrimi: Arabağlaşım birimi master istasyonu ile B_n ($n=1,2,3$) istasyonu arasında geçen mesaj çevrim süresidir.
- T_{KG} : Köprü işlem gecikmesi: Arabağlaşım birimindeki köprü işlemi gecikmesidir. Bu gecikmeye, köprü giriş ve çıkış tamponlarındaki ve köprü işlem süresi dahildir. Köprü işlem süresi PROFIBUS paketlerinin IEEE 802.16 çerçevesi içine kapsüllemesi için geçen süredir. Aynı süre kapsüllemiş paketin ayrıştırılması içinde geçerlidir.
- T_{MAC} : MAC gecikmesi: Arabağlaşım birimi abone istasyonu ile WiMAX baz istasyonu arasındaki yayılım gecikmesi ve baz istasyon MAC işlem süresi toplamıdır.

T_{MC-A} ve T_{MC-B} Denklem 5.1'de verilen mesaj çevrim süreleridir. Buna göre sistemin uçtan-uca gecikmesi;

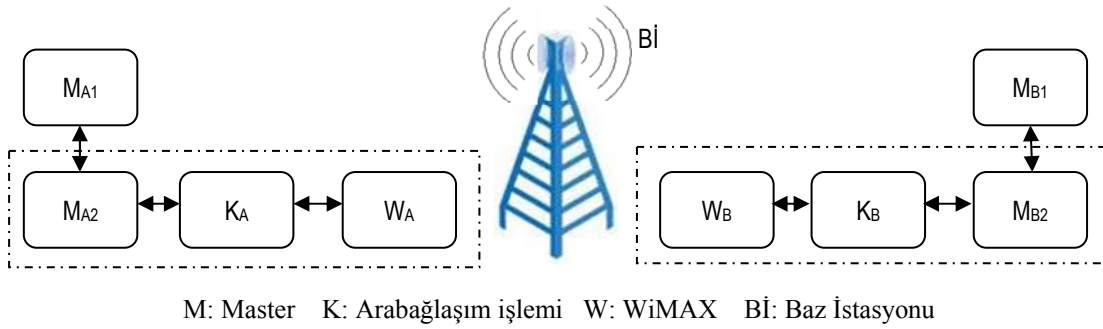
$$T_{MC} = T_{BK} + 2.T_{MC-A} + 4.T_{KG} + 2.T_{MAC} + 2.T_{MC-B} \quad (\text{Denklem 5.1})$$

ile hesaplanır.

5.4. PROFIBUS/IEEE 802.16 (WiMAX) Arabağlaşım Birimi Petri Ağ Modeli

Şekil 5.7, Şekil 5.6’da verilen genel sistem yapısının Petri ağ modeline karşılık gelen blok diyagramını gösterir. PROFIBUS, IEEE 802.16 ve Arabağlaşım birimi blokları ileriki bölümlerde detaylandırılacaktır.

M_{A2} , W_A ve K_A sırasıyla arabağlaşım biriminin sol ve sağ giriş-çıkışlarındaki PROFIBUS ve WiMAX birimlerini ve arabağlaşım işleminin yapıldığı birimleri göstermektedir. M_{A1} ise yerelde bulunan aktif cihazdır, yani master istasyondur. B tarafı içinde aynı özellikler geçerlidir.

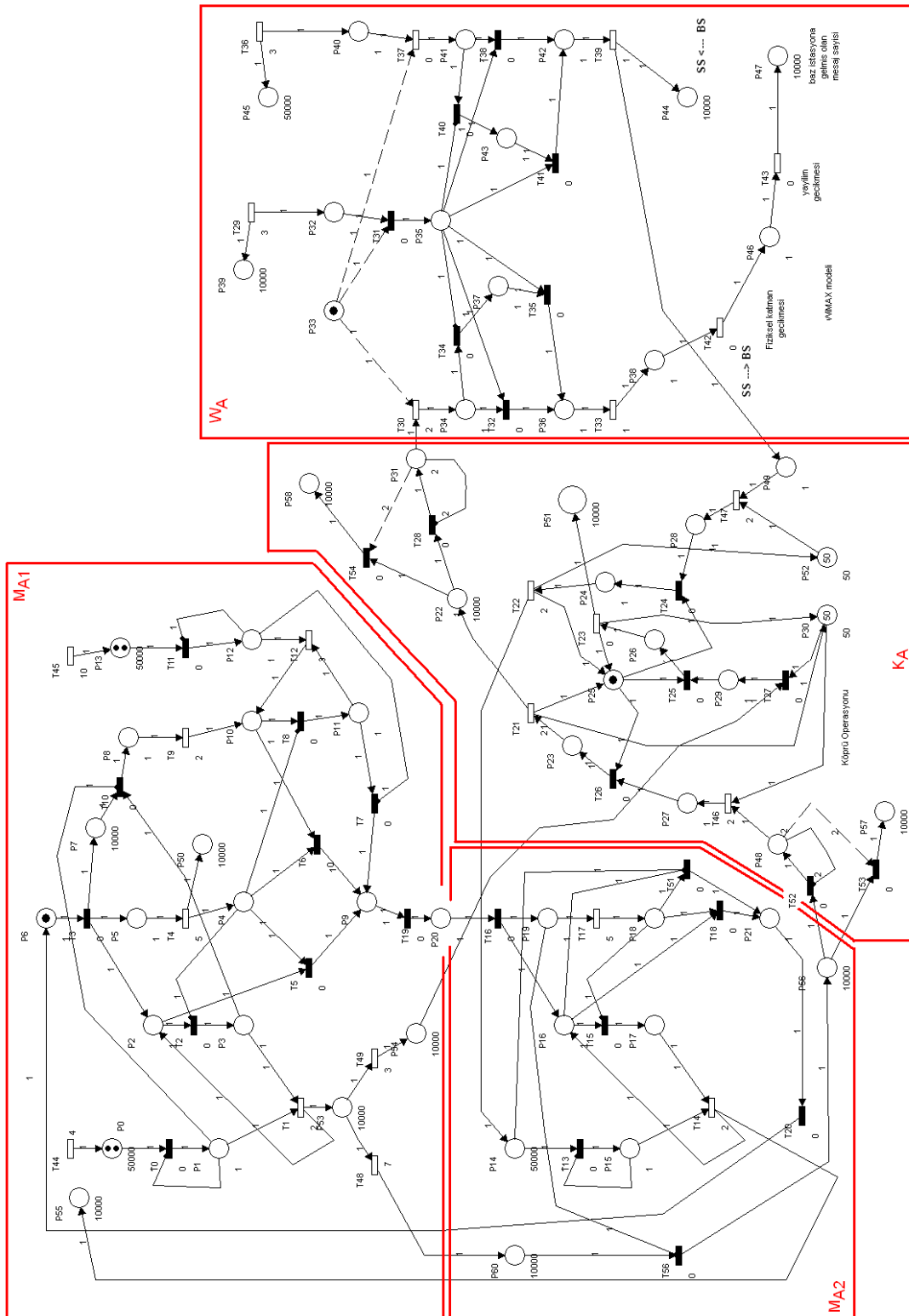


Şekil 5.7. Modelin genel blok diyagramı

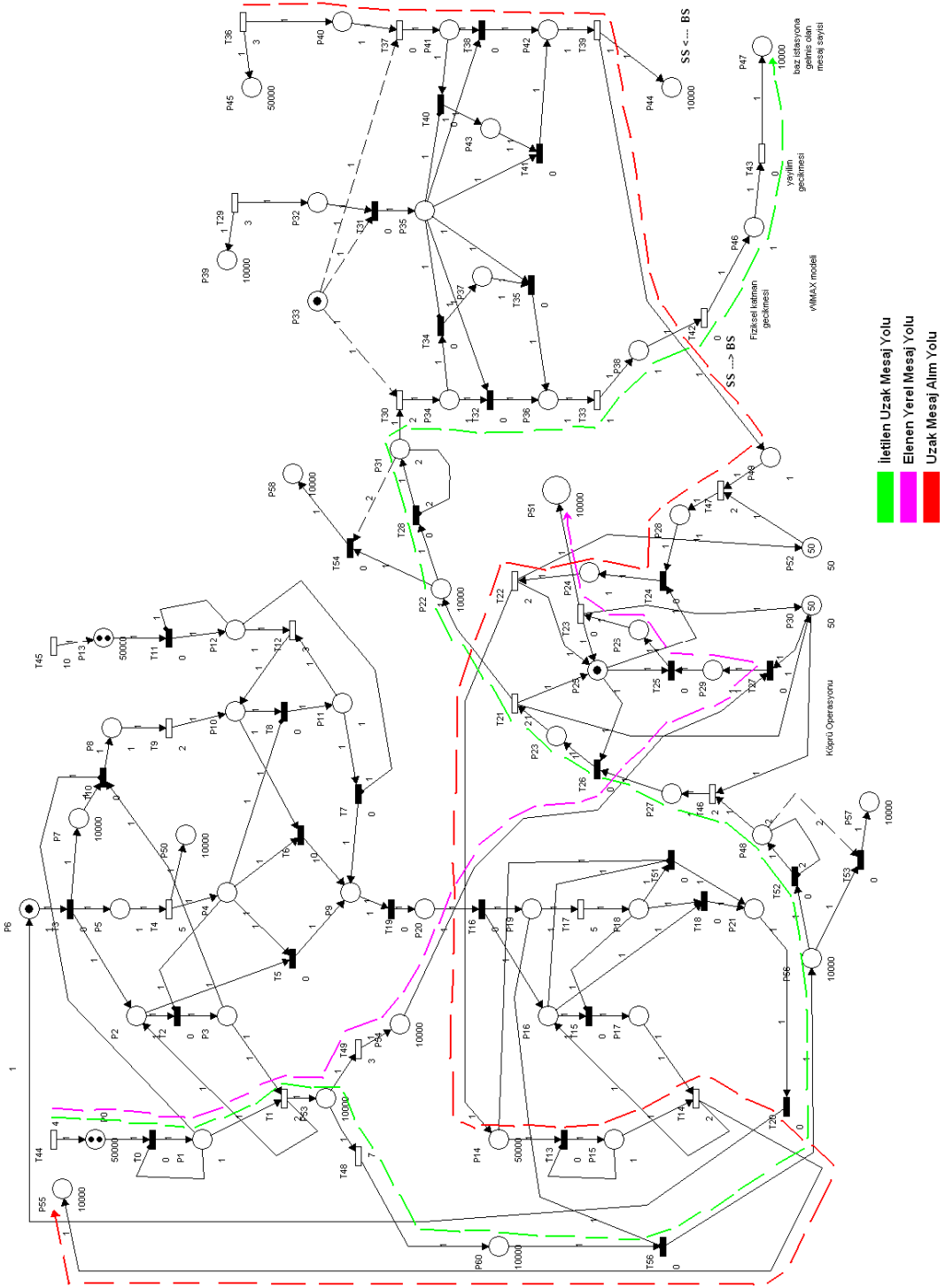
Yukarıdaki modele göre her bloğun Petri Ağları ile modellenmiş halinin baz istasyona kadar olan bölümü, Şekil 5.8’de bir bütün halinde ve ayrıca Şekil 5.9’da da paketlerin iletim güzergahları belirtilerek verilmiştir. Aynı model yapısı Bİ’den, B segmentine kadar da aynı yapıda olacaktır.

Modelleme yapılırken arabağlaşım elemanın Profibus ayağındaki mesajların tümü yüksek öncelikli olarak kabul edilmiş ve bu sebeple modelin bu kısmında düşük öncelikli mesajlar irdelenmemiştir. Burada arabağlaşım birimini Petri ağ kavramıyla modellenmesinden dolayı PROFIBUS’ın kendi içerisindeki iletişimi dikkate alınmamış, dolayısıyla PROFIBUS segmentindeki slave modeli gösterilmemiştir.

Şekil 5.9’da yeşil hat Profibus-Köprü-Wimax güzergahında, kırmızı hat ise Wimax-Köprü-Profibus güzergahında iletilen yüksek öncelikli mesajları gösterirken, pembe hat ise PROFIBUS tarafından arabağlaşım biriminin girişine gelen yerel mesajların elenmesini göstermektedir



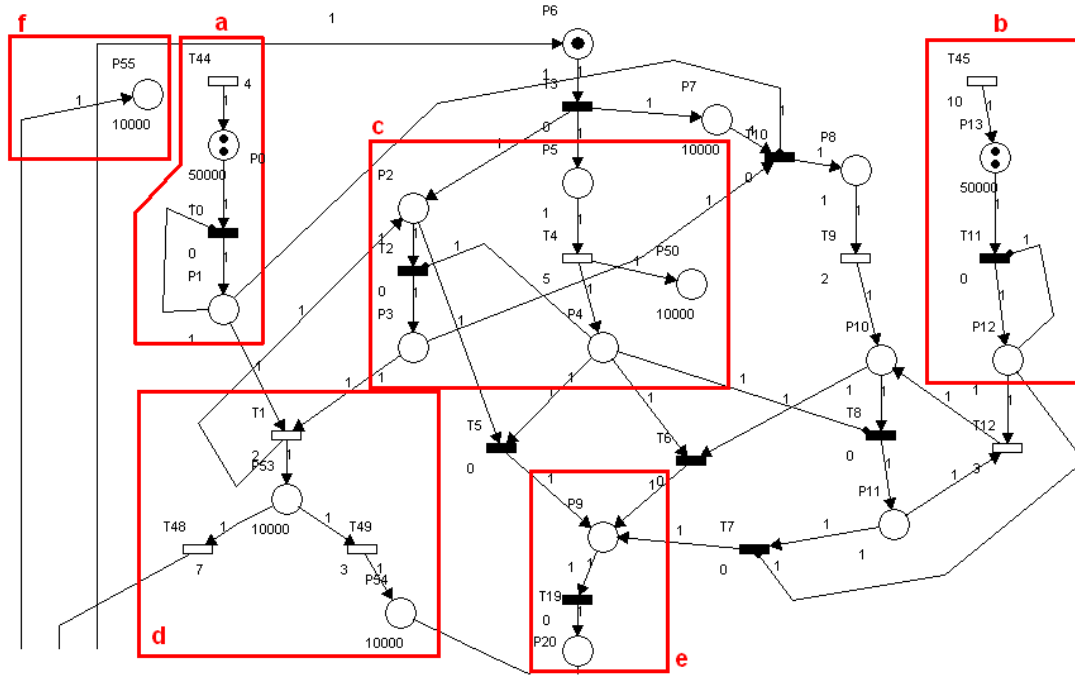
Şekil 5.8. Sistemin Petri ağıları modeli



Şekil 5.9. Paketlerin izlediği yollar

5.4.1. Birinci master istasyonun Petri ağ modeli

PROFIBUS protokolünde ortam erişimi jeton mekanizması ile gerçekleşmektedir. Master istasyon, jetona sahip olduğu andan itibaren jeton tutma süresi zamanlayıcısı başlar ve ilk olarak yüksek öncelikli mesajlar süre dahilinde iletilir. Yüksek öncelikli mesajların iletiminin tamamlanmasının ardından süre mevcutsa düşük öncelikli mesajların iletimine geçilir ve süre dolupunda jeton bir sonraki master istasyona aktarılır. Bu yapının akış diyagramı Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

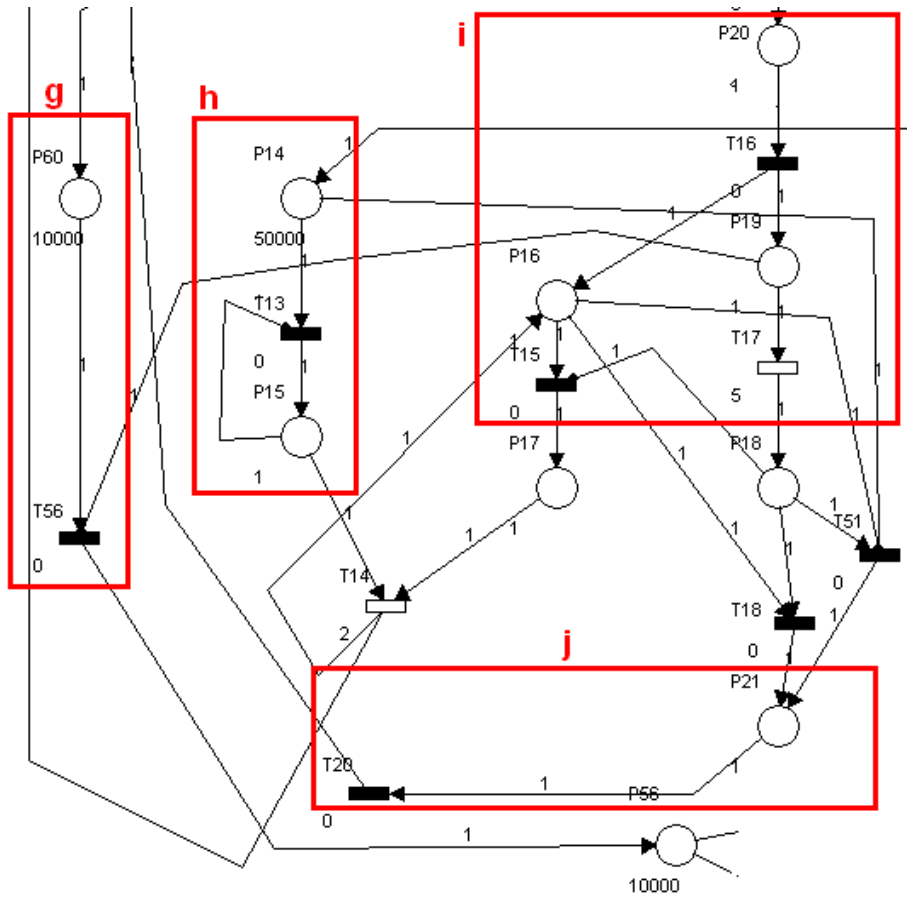


Şekil 5.10. M_{A1} bloğunun iç yapısı

Şekil 5.10'da, Şekil 5.8'deki M_{A1} bloğunun iç yapısını gösterilmektedir. Bu blok PROFIBUS protokolünün Petri ağlar ile modellenmiş halidir. Burada **a bloğu** yüksek öncelikli mesajların üretilmesini, **b bloğu** düşük öncelikli mesajların üretilmesini, **c bloğu** jetona sahip olma ve jeton tutma süresinin işlenmesini, **d bloğu** yüksek öncelikli mesajların iletilmesinde ne kadarının yerel, ne kadarının uzak mesaj olduğunun ayarlanmasını, **e bloğu** jeton tutma süresi dolup bir sonraki master istasyona jetonun aktarılmasını ve **f bloğu** da karşı segmentten gelen mesajları göstermektedir.

P6 durumu master istasyona jetonun geldiğini, P5 durumu da master istasyonun jetona T4 geçişi süresince (jeton tutma süresince) sahip olduğunu belirtmektedir. İletilecek yüksek öncelikli mesajlar bittiğinde (P1 durumu boş ise), düşük öncelikli mesajların iletimi jeton tutma süresi dolana ya da düşük öncelikli mesajların iletimi bitene kadar devam eder. Jeton tutma süresi dolduğunda T4 geçişi ateşlenir ve jeton bir sonraki master istasyona verilmek üzere P4 durumuna aktarılır. P53 durumu yüksek öncelikli mesajların iletileceği durumunu ve bu mesajlardan ne kadarı yerel mesaj (T49), ne kadarı uzak mesaj (T48) olduğunu göstermektedir. T1 ve T12 geçişleri sırasıyla yüksek ve düşük öncelikli mesajların işlem süresini belirtmektedir.

5.4.2. Kablosuz arabirimin PROFIBUS ayağı Petri ağı modeli



Şekil 5.11. M_{A2} bloğunun iç yapısı

Şekil 5.11’de, Şekil 5.8’deki M_{A2} bloğunun iç yapısını gösterilmektedir. Bu blok kablosuz arabirimin PROFIBUS ayağı olarak tasarlanmıştır. Köprü iletimindeki tüm

mesajlar yüksek öncelikli kabul edildiğinden buradaki PROFIBUS modelinde düşük öncelikli mesajlar için olan kısım dikkate alınmamıştır.

Şekildeki *g bloğunda* M_{A1} PROFIBUS master cihazından gelen karşı segmente iletilecek uzak mesajların alımı yapılmaktadır. *h bloğunda* kablosuz arabirimine karşı segmentten gelen mesajların M_{A1} PROFIBUS master cihazı tarafına iletilecek olan mesajların alımı yapılırken, *i bloğunda* ise PROFIBUS jetonunun arabağlaşım biriminde olması durumunda jeton tutma işlemi, süresi ve aktarılması işlemleri yapılmaktadır. *j bloğunda* da jetonun diğer PROFIBUS master istasyona aktarım işlemi gerçekleştirilmektedir.

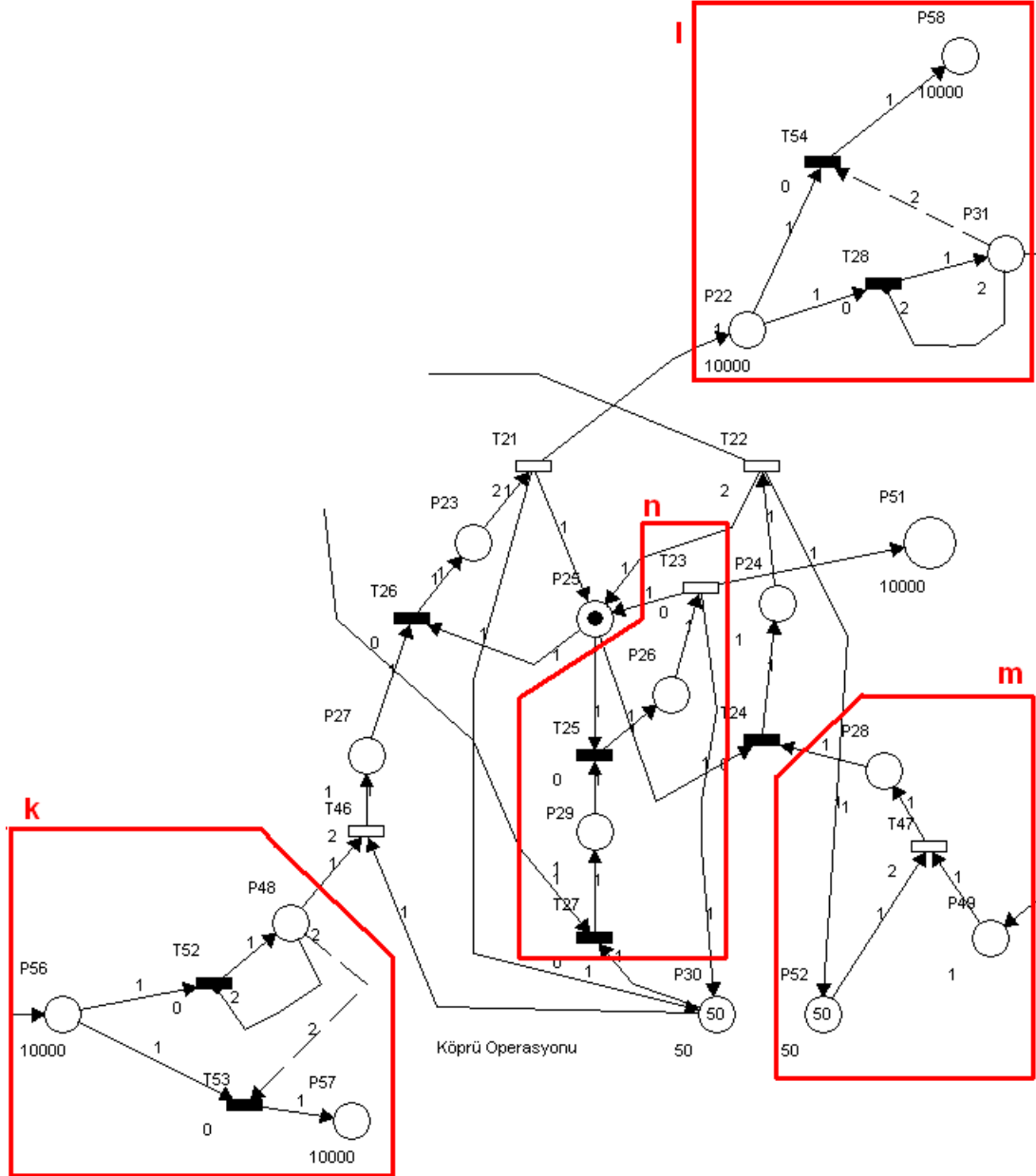
P20 durumu jetonun M_{A2} 'ye geldiğini ve jetonun tutma süresinin başladığını, P14 durumu kablosuz arabirime karşı segmentten gelen mesajları, T14 geçişi yüksek öncelikli mesajların işlem süresini, P21 durumu jeton tutma süresinin dolduğunu ve jetonun M_{A1} 'e aktarılmasını, P56 durumu da kablosuz arabirimde PROFIBUS mesajlarının köprü giriş tamponuna geldiğini göstermektedir.

5.4.3. Kablosuz arabirimin köprü işlem Petri ağ modeli

Şekil 5.12'de, Şekil 5.8'deki K_A bloğunun iç yapısı görülmektedir. Bu blok kablosuz arabirimin köprü işlem kısmı olarak tasarlanmıştır. Şekildeki *k bloğunda* köprüye PROFIBUS ayağından gelen mesajlar için tasarlanan giriş tamponu, *l bloğunda* köprüden 802.16 (WiMAX) ayağına giden mesajlar için tasarlanan çıkış tamponu ve *m bloğunda* WiMAX tarafından gelen mesajlar için giriş birimi gözükmektedir. Köprü işleminde karşı tarafa iletilmeyecek olan yerel mesajların elenmesi için gerekli olan işlemler *n bloğunda* yapılmaktadır.

P25 durumu, köprü işleminde boşta olma durumunu kontrol eder. Her işlem yapılırken buradaki jeton (Petri Ağ jetonu) alınır ve işlem bittiğinde tekrar bu duruma jeton iade edilir. P56 durumu köprüye PROFIBUS ayağı tarafından gelen mesajları, P48 durumu bu girişteki tamponu, P57 durumu tampondan taşan mesajları, P51 durumu köprü işlemi sonucunda köprüden atılacak olan yerel mesajları, T23 geçişi de bu atma işlemini, P22 durumu köprüden WiMAX ayağına gidecek olan

mesajları, P31 durumu bu yöne iletilen mesajları, P58 de bu yönde tampondan taşan mesajları göstermektedir.

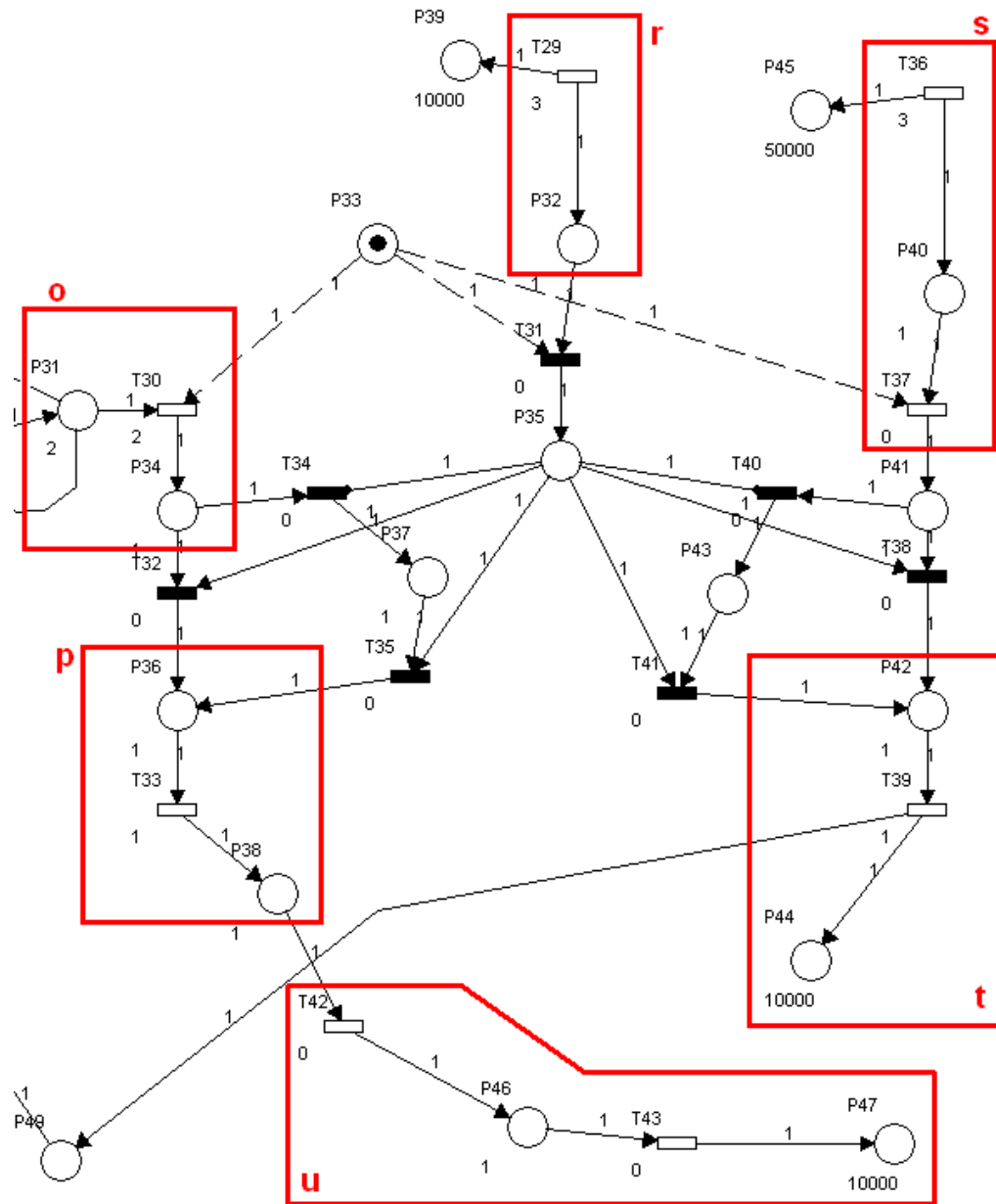


Şekil 5.12. K_A bloğunun iç yapısı

5.4.4. Kablosuz arabirimin WiMAX ayak Petri ağ modeli

Şekil 5.13’de, Şekil 5.8’deki W_A bloğunun iç yapısını görülmektedir. Bu blok kablosuz arabirimin WiMAX kısmı olarak tasarlanmıştır. WiMAX-IEEE 802.16 protokolü modellenirken, servis sınıflarından sabit bit hızını garanti eden UGS servis

sınıfı seçilmiştir. Şekildeki *o bloğunda* kablosuz arabirimdeki köprüden WiMAX ayağına gelen mesajları, *p bloğunda* gelen mesajların ilgili MAP bilgisine göre fiziksel katmana ve oradan da baz istasyona yollanmasını, *r bloğunda* ilgili bağlantı için gelen MAP mesajının gelme işlemini, *s bloğunda* baz istasyondan kablosuz arabirimde WiMAX ayağına gelen mesajları, *t bloğunda* baz istasyondan gelen mesajların köprüye iletilmesini ve *u bloğunda* da baz istasyona giden mesajları göstermektedir.



Şekil 5.13. W_A bloğunun iç yapısı

P40 durumu baz istasyondan kablosuz arabirime gelen mesajları, P32 durumu mesajların iletim adresini gösteren MAP mesajının gelmesini, P31 durumu kablosuz arabirimdeki köprüden WiMAX'e iletilen mesajları, P36 ve P42 durumları iletilecek mesajların hazırlığını, T33 ve T39 geçişleri mesajların iletim işlemlerini, T42 geçişi fiziksel katman gecikmesini, T43 geçişi yayılım gecikmesini, P47 durumu da kablosuz arabirimden baz istasyona iletilen mesajları göstermektedir.

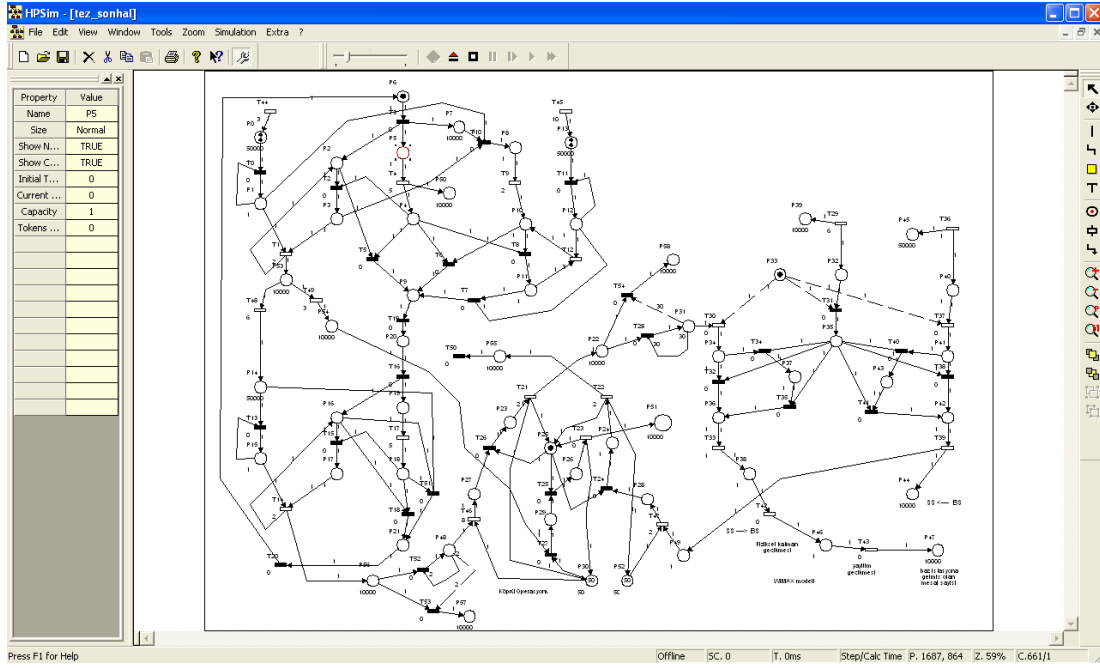
5.5. Modelleme Ortamı

Bölüm 4'te Petri ağlar ve kullanılan benzetim ortamı HPSim hakkında bilgiler verilmiştir. Şekil 5.14'te çalışmanın HPSim benzetim ortamındaki durumu gösterilmektedir.

Arabağlaşım biriminin tasarımındaki kabuller incelendiğinde aşağıdaki maddeler sıralanabilir:

- Arabağlaşım birimi her iki yönde de işlem yapmaktadır. Hem WiMAX-PROFIBUS yönüne hem de PROFIBUS-WiMAX yönüne veri transferi mevcuttur.
- Arabağlaşım biriminin tasarımında, masterın slave ile çalışmasının arabağlaşım biriminin tasarımını değiştirmemesinden dolayı birimdeki slave modeli üzerinde durulmamış sadece master modeli ele alınmıştır. Bunun yanında, PROFIBUS segmenti ile arabağlaşım birimi Master-Master iletişim kullanmaktadır.
- PROFIBUS veri iletiminde iletişim profili olarak DP profili ve veri iletim hizmeti olarak da SDN (Send Data with No-acknowledge – Geri Bildirimsiz Veri Gönderme) seçilmiştir.
- Arabağlaşım birimi tarafındaki tüm mesajlar yüksek önceliklidir.
- Her iki uç sistemin de PROFIBUS olması sebebiyle köprüde protokol dönüşümü yapılmamış, PROFIBUS paketi WiMAX çerçevesinin içine kapsülleme metodu ile yerleştirilmiştir.
- WiMAX protokolünde servis sınıfı olarak sabit veri hızı sağladığından dolayı UGS servis sınıfı seçilmiştir. Ayrıca yukarı ve aşağı yöndeki trafik oranı eşit kabul edilmiştir.

- M_{A1} tarafında üretilen mesajlar;
 - %30 yerel, %70 uzak mesaj
 - %50 yerel, %50 uzak mesaj
 - %70 yerel, %30 uzak mesaj
- olarak üç kabule göre benzetim yapılmıştır.



Şekil 5.14. HPSim benzetim ortamı

5.6. Benzetim Sonuçları ve Performans Analizi

Benzetim aşamasında köprünün çıkış tampon boyutunun, köprünün giriş tampon boyutunun, köprüdeki PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin ve master istasyonun jeton tutma süresinin sistem üzerindeki etkileri değişik yerel ve uzak mesaj oranları altında incelenmiştir. Uzak ve yerel mesaj oranları; %30 uzak-%70 yerel mesaj, %50 uzak-%50 yerel mesaj ve %70 uzak-%30 yerel mesaj olarak seçilmiştir.

Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi Tablo 5.1 ve Şekil 5.15'te, köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi Tablo 5.2 ve Şekil 5.16'da, köprü PROFIBUS ayağını jeton tutma süresinin sisteme etkisi Tablo 5.3 ve Şekil 5.17'de ve birinci

master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi Tablo 5.4 ve Şekil 5.18’de benzetim sonuçlarının tablosal ve grafiksel gösterimi verilmiştir.

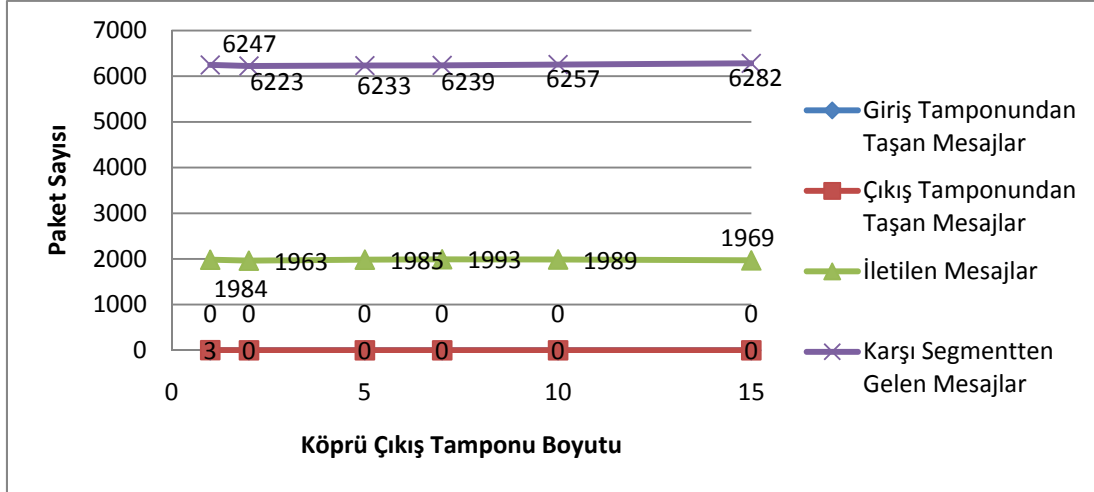
5.6.1. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi

Köprü çıkış tampon boyutu (P31) 1 mesajdan başlatılıp 15 mesaja kadar çıkartılmış ve neticesinde giriş tamponundan taşan mesaj sayısı, çıkış tamponundan taşan mesaj sayısı, iletilen mesaj sayıları ve karşı segmentten gelen mesaj sayıları benzetim sonucunda %30U-%70Y, %50U-%50Y ve %70U-%30Y durumlarına göre sırasıyla Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’teki sonuçlar ve bu sonuçlardan da sırasıyla Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’deki grafikler elde edilmiştir.

Tablo 5.1. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Çıkış Tampon Boyutu	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
1	0	3	1984	6247
2	0	0	1963	6223
5	0	0	1985	6233
7	0	0	1993	6239
10	0	0	1989	6257
15	0	0	1969	6282

Master istasyonda üretilen mesajların %30 uzak %70 yerel mesaj olması durumunda; çıkış tampon boyutunun 1 ile 15 mesaj arasında değiştirilirken giriş tampon boyutu 5 mesaj için sabit tutulmuştur. Bu tampon boyutlarına göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.1’de ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.15’te gösterilmiştir. Çıkış tampon boyutunun 1 mesaj olması durumunda çıkış tamponundan mesaj taşması olurken, diğer durumlarda herhangi bir taşma olmamıştır. Tampon boyutunun artması iletilen ya da gelen mesaj sayısını etkilememiş, ortalama değerler açısından sabit kalmıştır.

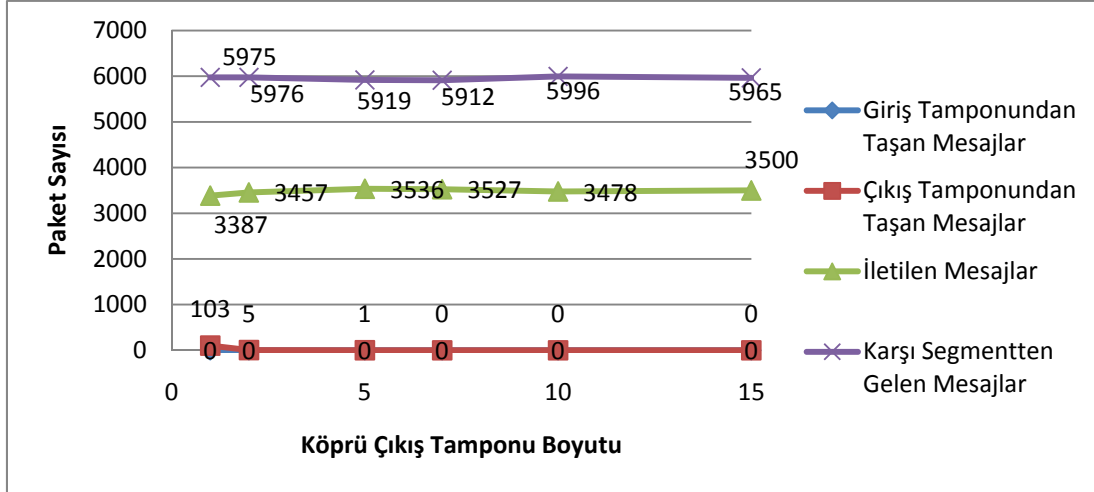


Şekil 5.15. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Master istasyonda üretilen mesajların %50 uzak %50 yerel mesaj olması durumunda; çıkış tampon boyutu 1 ile 15 mesaj arasında değiştirilirken giriş tampon boyutu 5 mesaj için sabit tutulmuştur. Bu tampon boyutlarına göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.2’de ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.16’da görülmektedir. Çıkış tampon boyutu 1 mesaj olması durumunda çıkış tamponundan mesaj taşması maksimum olurken, tampon boyutu arttıkça taşma azalmış ve 5’ten büyük olan diğer durumlarda herhangi bir taşma olmamıştır. Tampon boyutunun artması iletilen ya da gelen mesaj sayısını taşan mesajlar haricinde etkilememiş, ortalama değerler açısından sabit kalmıştır.

Tablo 5.2. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Çıkış Tampon Boyutu	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
1	0	103	3387	5975
2	0	5	3457	5976
5	0	1	3536	5919
7	0	0	3527	5912
10	0	0	3478	5996
15	0	0	3500	5965

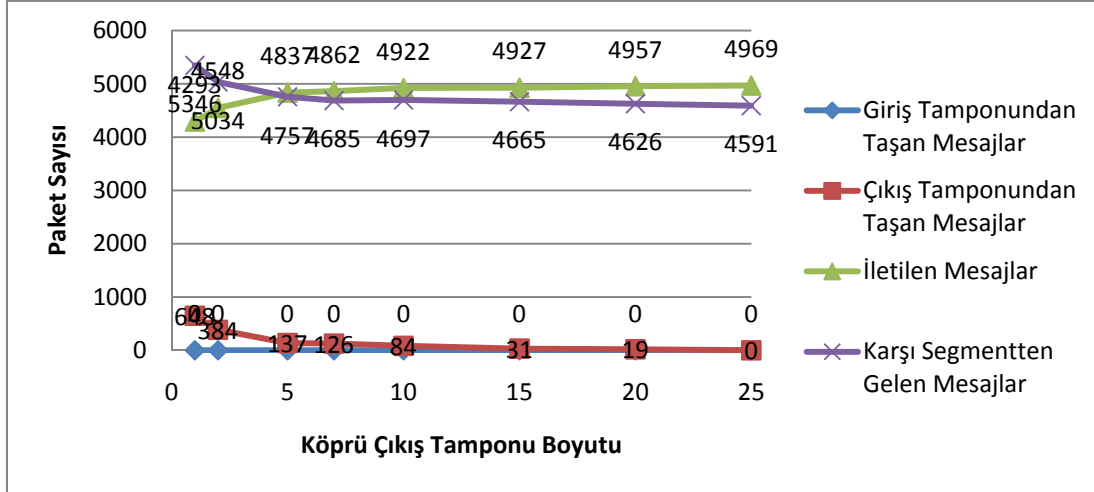


Şekil 5.16. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Master istasyonda üretilen mesajların %70 uzak %30 yerel mesaj olması durumunda; çıkış tampon boyutu 1 ile 25 mesaj arasında değiştirilirken giriş tampon boyutu 5 mesaj için sabit tutulmuştur. Bu tampon boyutlarına göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.3’de ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.17’de görülmektedir. Çıkış tampon boyutu 25 mesaj olana kadarki durumlarda çıkış tamponundan mesaj taşması olurken, tampon boyutu arttıkça taşma azalmış ve 25’ten büyük olan diğer durumlarda herhangi bir taşma olmamıştır. Tampon boyutunun artması iletilen ya da gelen mesaj sayısını taşan mesajlar haricinde etkilememiş, ortalama değerler açısından sabit kalmıştır.

Tablo 5.3. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Çıkış Tampon Boyutu	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
1	0	648	4293	5346
2	0	384	4548	5034
5	0	137	4837	4757
7	0	126	4862	4685
10	0	84	4922	4697
15	0	31	4927	4665
20	0	19	4957	4626
25	0	0	4969	4591

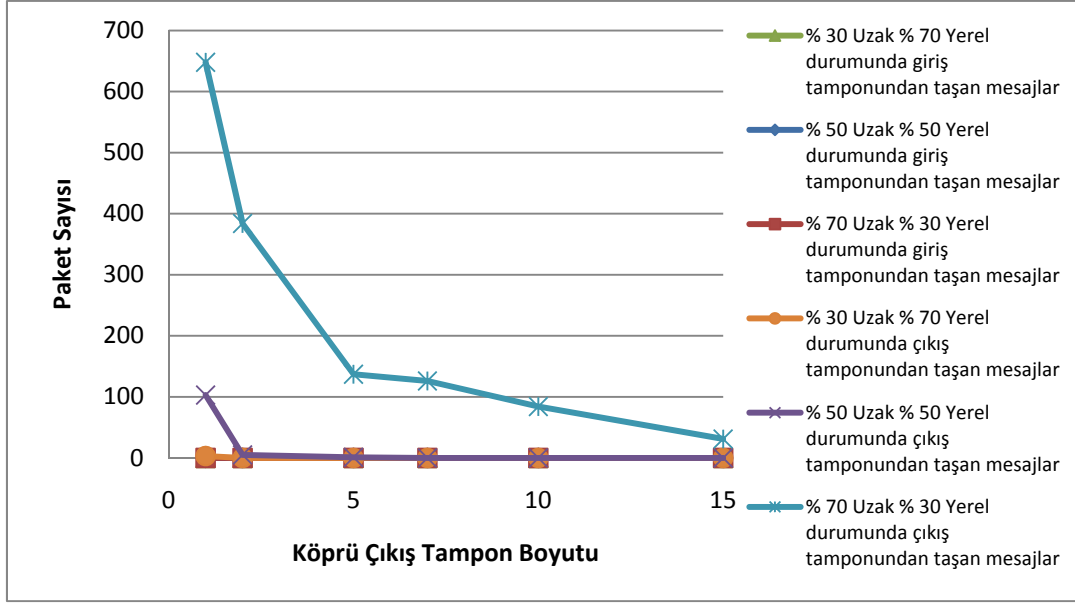


Şekil 5.17. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Tablo 5.4'te ve Şekil 5.18'de köprü çıkış tampon boyutunun değişiminin üç trafik durumuna göre giriş ve çıkış tamponlarından taşan mesajlar görülmektedir. Giriş tampon boyutu 5 mesaj olarak sabit tutulurken, çıkış tampon boyutu değiştirilmiştir. Üç trafik durumunda da 5 mesaj tampon boyutu, giriş tamponu için yeterli gelmiş ve herhangi bir taşma görülmemiştir. Fakat uzak mesaj oranı %30'dan %70'e yükseldikçe trafik yoğunluğu arttığından çıkış tampon boyutu ihtiyacı da artmıştır. Tablodaki çıkış tamponundan taşan mesaj değerleri incelendiğinde çıkış tamponu için 25 mesajlık bir tampon boyutunun yeterli olduğu görülmüştür.

Tablo 5.4. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)

Köprü Çıkış Tampon Boyutu	%30 Uzak %70 Yerel durumunda giriş tamponundan taşan mesajlar	%50 Uzak %50 Yerel durumunda giriş tamponundan taşan mesajlar	%70 Uzak %30 Yerel durumunda giriş tamponundan taşan mesajlar	%30 Uzak %70 Yerel durumunda çıkış tamponundan taşan mesajlar	%50 Uzak %50 Yerel durumunda çıkış tamponundan taşan mesajlar	%70 Uzak %30 Yerel durumunda çıkış tamponundan taşan mesajlar
1	0	0	0	3	103	648
2	0	0	0	0	5	384
5	0	0	0	0	1	137
7	0	0	0	0	0	126
10	0	0	0	0	0	84
15	0	0	0	0	0	31
20	0	0	0	0	0	19
25	0	0	0	0	0	0



Şekil 5.18. Köprü çıkış tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)

5.6.2. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi

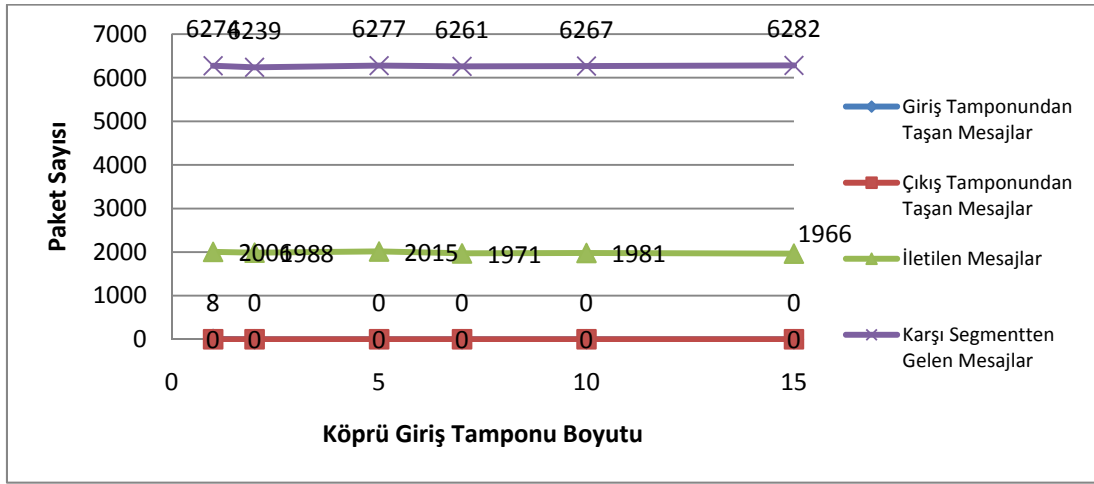
Köprü giriş tampon boyutu (P48) 1 mesajdan başlatılıp 15 mesaja kadar çıkartılmış ve neticesinde giriş tamponundan taşınan mesaj sayısı, çıkış tamponundan taşınan mesaj sayısı, iletilen mesaj sayıları ve karşı segmentten gelen mesaj sayıları benzetim sonucunda %30U-%70Y, %50U-%50Y ve %70U-%30Y durumlarına göre sırasıyla Tablo 5.5, Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’teki sonuçlar ve bu sonuçlardan da sırasıyla Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’deki grafikler elde edilmiştir.

Tablo 5.5. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Giriş Tampon Boyutu	Giriş Tamponundan Taşınan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşınan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
1	8	0	2006	6274
2	0	0	1988	6239
5	0	0	2015	6277
7	0	0	1971	6261
10	0	0	1981	6267
15	0	0	1966	6282

Master istasyonda üretilen mesajların %30 uzak %70 yerel mesaj olması durumunda; giriş tampon boyutu 1 ile 15 mesaj arasında değiştirilirken çıkış tampon boyutu 5

mesaj için sabit tutulmuştur. Bu tampon boyutlarına göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.5’de ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Giriş tampon boyutu 1 mesaj olması durumunda giriş tamponundan mesaj taşması olurken diğer durumlarda herhangi bir taşma olmamıştır. Tampon boyutunun artması iletilen ya da gelen mesaj sayısını etkilememiş, ortalama değerler açısından sabit kalmıştır.

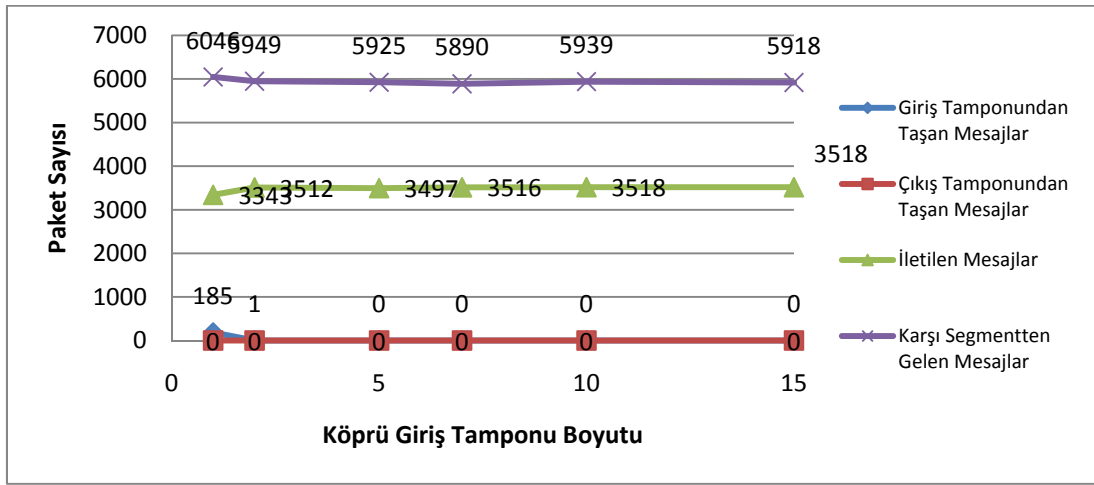


Şekil 5.19. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Master istasyonda üretilen mesajların %50 uzak %50 yerel mesaj olması durumunda; giriş tampon boyutu 1 ile 15 mesaj arasında değiştirilirken çıkış tampon boyutu 5 mesaj için sabit tutulmuştur. Bu tampon boyutlarına göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.6’da ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.20’de görülmektedir. Giriş tampon boyutu 1 ve 2 mesaj olması durumunda giriş tamponundan mesaj taşması olurken diğer durumlarda herhangi bir taşma olmamıştır. Tampon boyutunun artması iletilen ya da gelen mesaj sayısını etkilememiş ortalama değerler açısından sabit kalmıştır.

Tablo 5.6. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Giriş Tampon Boyutu	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
1	185	0	3343	6046
2	1	0	3512	5949
5	0	0	3497	5925
7	0	0	3516	5890
10	0	0	3518	5939
15	0	0	3518	5918

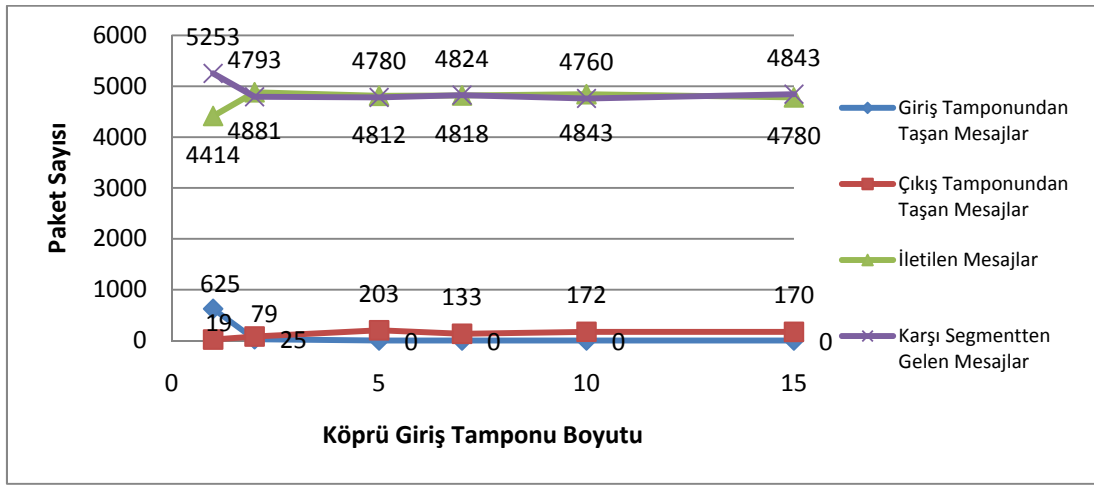


Şekil 5.20. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Master istasyonda üretilen mesajların %70 uzak %30 yerel mesaj olması durumunda; giriş tampon boyutu 1 ile 15 mesaj arasında değiştirilirken çıkış tampon boyutu 5 mesaj için sabit tutulmuştur. Bu tampon boyutlarına göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.7’de ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.21’de görülmektedir. Giriş tampon boyutu 1 ve 2 mesaj olması durumunda giriş tamponundan mesaj taşması olurken diğer durumlarda herhangi bir taşma olmamıştır. Çıkış tamponunda görülen taşma ise çıkış tamponunun 5 mesaj ile sabit tutulmasından kaynaklanmaktadır. Tampon boyutunun artması iletilen ya da gelen mesaj sayısını etkilememiş ortalama değerler açısından sabit kalmıştır.

Tablo 5.7. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Giriş Tampon Boyutu	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
1	625	19	4414	5253
2	25	79	4881	4793
5	0	203	4812	4780
7	0	133	4818	4824
10	0	172	4843	4760
15	0	170	4780	4843

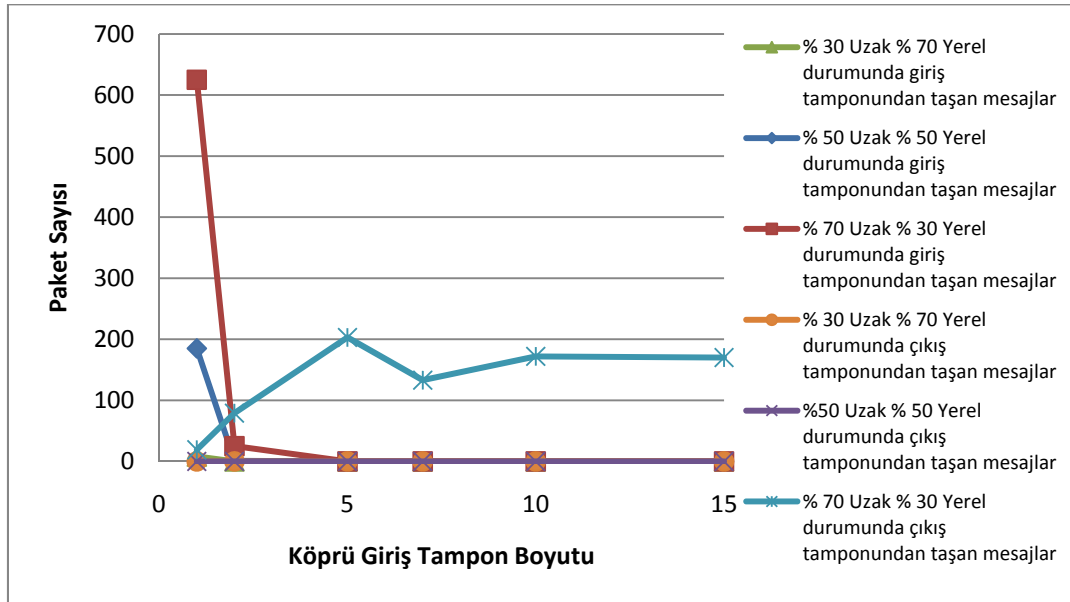


Şekil 5.21. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Tablo 5.8’de ve Şekil 5.22’de köprü giriş tampon boyutunun değişiminin üç trafik durumuna göre giriş ve çıkış tamponlarından taşan mesajlar görülmektedir. Çıkış tampon boyutu 5 mesaj olarak sabit tutulurken, giriş tampon boyutu değiştirilmiştir. Üç trafik durumunda da 5 mesaj tampon boyutu, giriş tamponu için yeterli gelmiş ve herhangi bir taşma görülmemiştir. Çıkış tamponundan taşan mesajlar ise tampon boyutunun 5 mesaj olarak sabit tutulmasından kaynaklanmaktadır. Çıkış tamponunun sisteme etkisi bölümünde trafik yoğunluğunun arttığı durumlarda tampon boyutunun 25 mesajlık olması gerektiği belirtilmişti. Uzak mesaj oranı %30’dan %70’e yükseldikçe trafik yoğunluğu arttığından 1 ve 2 mesajlık giriş tampon boyutu ihtiyacı karşılayamamaktadır. Tablodaki giriş tamponundan taşan mesaj değerleri incelendiğinde giriş tamponu için 5 mesajlık bir tampon boyutunun yeterli olduğu görülmektedir.

Tablo 5.8. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)

Köprü Giriş Tampon Boyutu	%30 Uzak %70 Yerel durumunda giriş tamponundan taşan mesajlar	%50 Uzak %50 Yerel durumunda giriş tamponundan taşan mesajlar	%70 Uzak %30 Yerel durumunda giriş tamponundan taşan mesajlar	%30 Uzak %70 Yerel durumunda çıkış tamponundan taşan mesajlar	%50 Uzak %50 Yerel durumunda çıkış tamponundan taşan mesajlar	%70 Uzak %30 Yerel durumunda çıkış tamponundan taşan mesajlar
1	8	185	625	0	0	19
2	0	1	25	0	0	79
5	0	0	0	0	0	203
7	0	0	0	0	0	133
10	0	0	0	0	0	172
15	0	0	0	0	0	170



Şekil 5.22. Köprü giriş tampon boyutunun sisteme etkisi (Toplu)

5.6.3. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi

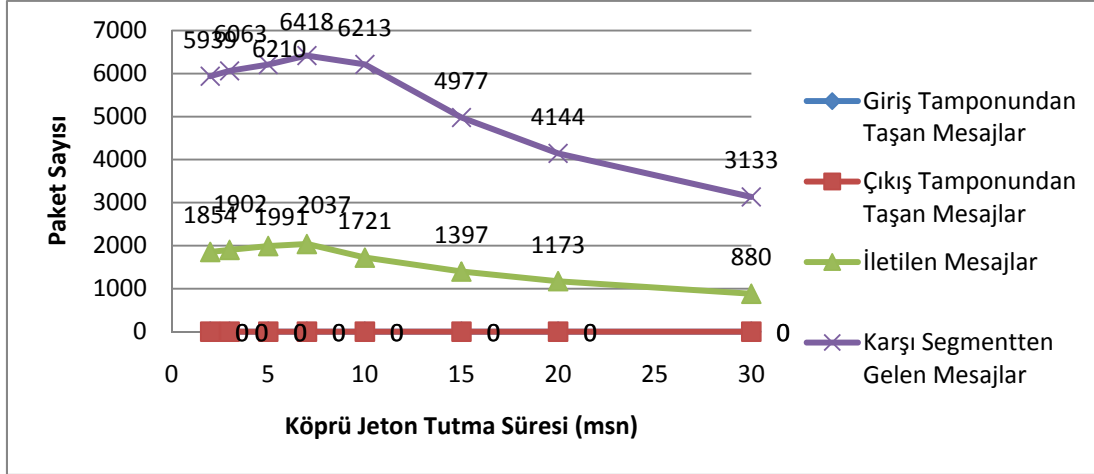
Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi (T17) 2 msn değerinden başlatılıp 30 msn değerine kadar çıkartılmış ve neticesinde giriş tamponundan taşan mesaj sayısı, çıkış tamponundan taşan mesaj sayısı, karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesaj sayıları benzetim sonucunda %30U-%70Y, %50U-%50Y ve %70U-%30Y durumlarına göre sırasıyla Tablo 5.9, Tablo 5.10 ve Tablo 5.11'deki sonuçlar

ve bu sonuçlardan da sırasıyla Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’deki grafikler elde edilmiştir.

Master istasyonda üretilen mesajların %30 uzak %70 yerel mesaj olması durumunda; köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi 2 msn ile 30 msn değerleri arasında değiştirilirken master istasyonun jeton tutma süresi 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu da 30 mesaj olarak sabit tutulmuştur. Bu değerlere göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.9’da ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.23’te görülmektedir. Herhangi bir taşma olmaması için giriş ve çıkış tamponları minimum değerlerinde tutulduğundan bu tamponlarda herhangi bir taşma olmadığı izlenmiştir. Köprü jeton tutma süresinin artması başlangıçta iletilen ve gelen mesajlarda artış sağlarken 7-10 msn aralığından sonra azalma görülmüştür. Buradaki sebep köprünün jetona master istasyondan daha fazla süreye sahip olup master istasyonun ürettiği mesajları iletememesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.9. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Köprü Jeton Tutma Süresi	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
2	0	0	1854	5939
3	0	0	1902	6063
5	0	0	1991	6210
7	0	0	2037	6418
10	0	0	1721	6213
15	0	0	1397	4977
20	0	0	1173	4144
30	0	0	880	3133



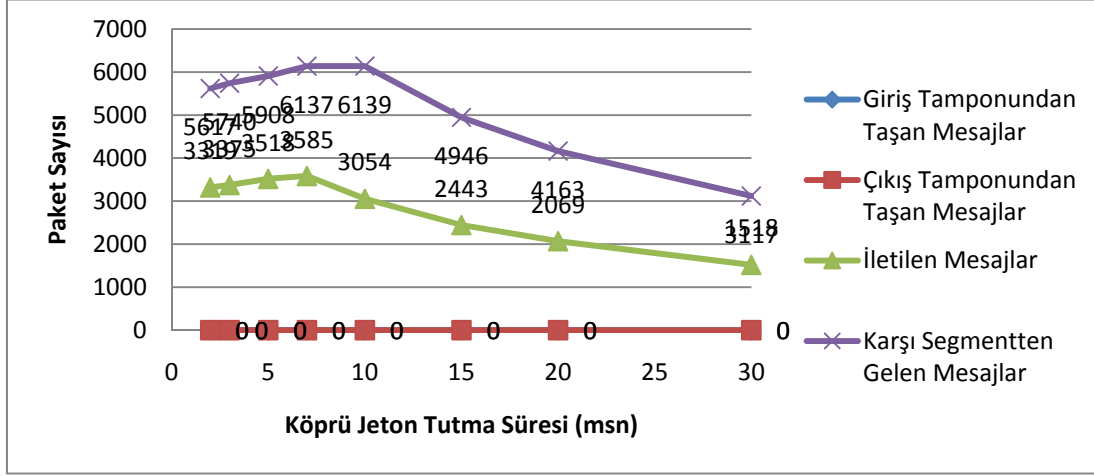
Şekil 5.23. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Tablo 5.10. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Köprü Jeton Tutma Süresi	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
2	0	0	3319	5617
3	0	0	3375	5740
5	0	0	3518	5908
7	0	0	3585	6137
10	0	0	3054	6139
15	0	0	2443	4946
20	0	0	2069	4163
30	0	0	1518	3117

Master istasyonda üretilen mesajların %50 uzak %50 yerel mesaj olması durumunda; köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi 2 msn ile 30 msn değerleri arasında değiştirilirken master istasyonun jeton tutma süresi 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu da 30 mesaj olarak sabit tutulmuştur. Bu değerlere göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.10'da ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.24'te görülmektedir. Herhangi bir taşma olmaması için giriş ve çıkış tamponları minimum değerlerinde tutulduğundan, bu tamponlarda herhangi bir taşma olmadığı izlenmiştir. %50 uzak %50 yerel mesaj olma durumunda da köprü jeton tutma süresinin artması başlangıçta iletilen ve gelen mesajlarda artış sağlarken 7-10 msn aralığından sonra azalma

görülmüştür. Buradaki sebep, köprünün jetona master istasyondan daha fazla süreye sahip olup master istasyonun ürettiği mesajları iletememesinden kaynaklanmaktadır.



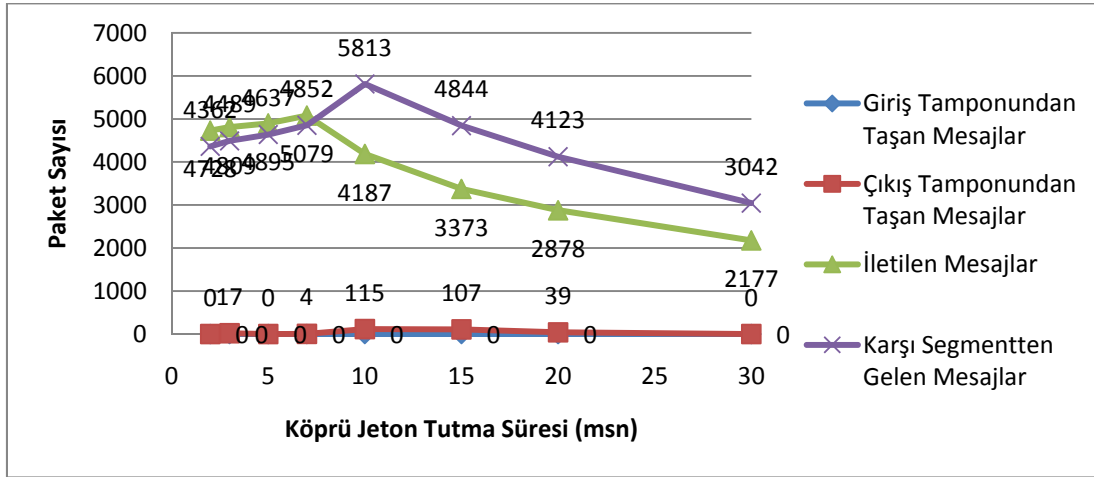
Şekil 5.24. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Tablo 5.11. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Köprü Jeton Tutma Süresi	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
2	0	0	4728	4362
3	0	17	4809	4489
5	0	0	4895	4637
7	0	4	5079	4852
10	0	115	4187	5813
15	0	107	3373	4844
20	0	39	2878	4123
30	0	0	2177	3042

Master istasyonda üretilen mesajların %70 uzak %30 yerel mesaj olması durumunda; köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi 2 msn ile 30 msn değerleri arasında değiştirilirken master istasyonun jeton tutma süresi 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu da 30 mesaj olarak sabit tutulmuştur. Bu değerlere göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.11’de ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.25’te görülmektedir. Köprü jeton tutma süresinin artması başlangıçta iletilen ve gelen mesajlarda artış sağlarken 7-10 msn aralığından sonra azalma görülmüştür. Buradaki sebep köprünün

jetona master istasyondan daha fazla süre sahip olup master istasyonun ürettiği mesajları iletememesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca %70 uzak %30 yerel mesaj durumunda köprü trafiği yoğun olduğundan çıkış tamponundan taşmalar gözükmemektedir. Bu taşmalar 100 mesaj değerinden de büyük olabilmektedir. Bu durumla uzak mesaj oranının yüksek olmasıyla köprü trafiğinin artmasından kaynaklanmaktadır.

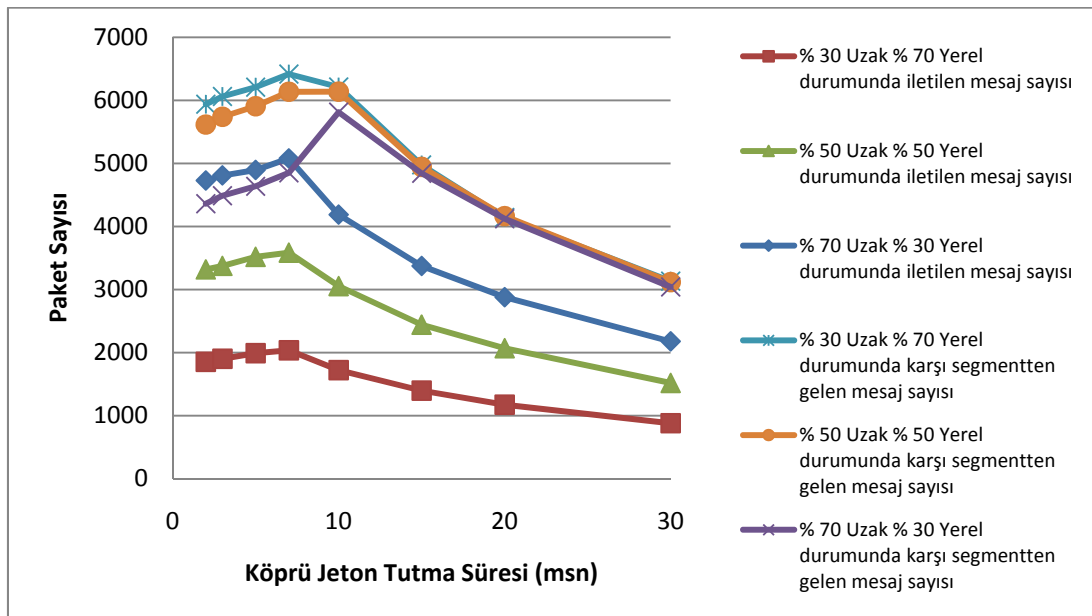


Şekil 5.25. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Tablo 5.12’de ve Şekil 5.26’da köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin değişiminin üç trafik durumuna göre karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların değerleri görülmektedir. Giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu 30 mesaj olarak sabit tutulurken, master istasyon jeton tutma süresi de 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Üç trafik durumunda da 7 msn jeton tutma süresinin üzerine çıktığında iletilen ve gelen mesajların sayılarında azalma görülmüştür. Ayrıca giriş tamponunda herhangi bir taşma görülmezken, çıkış tamponunda %70 uzak %30 yerel mesaj durumunda taşmalar gözlenmiştir. Bu sebeple uzak mesaj oranının yüksek olduğu durumlarda köprü jeton tutma süresinde yüksek tutulmaması gerektiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; verilen değerler için köprü jeton tutma süresinin 7 msn değerinin üzerine çıkmaması gerektiği çıkarılabilir.

Tablo 5.12. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)

Köprü Jeton Tutma Süresi	%30 Uzak %70 Yerel durumda iletilen mesaj sayısı	%50 Uzak %50 Yerel durumda iletilen mesaj sayısı	%70 Uzak %30 Yerel durumda iletilen mesaj sayısı	%30 Uzak %70 Yerel durumda karşı segmentten gelen mesaj sayısı	%50 Uzak %50 Yerel durumda karşı segmentten gelen mesaj sayısı	%70 Uzak %30 Yerel durumda karşı segmentten gelen mesaj sayısı
2	1854	3319	4728	5939	5617	4362
3	1902	3375	4809	6063	5740	4489
5	1991	3518	4895	6210	5908	4637
7	2037	3585	5079	6418	6137	4852
10	1721	3054	4187	6213	6139	5813
15	1397	2443	3373	4977	4946	4844
20	1173	2069	2878	4144	4163	4123
30	880	1518	2177	3133	3117	3042



Şekil 5.26. Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)

5.6.4. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi

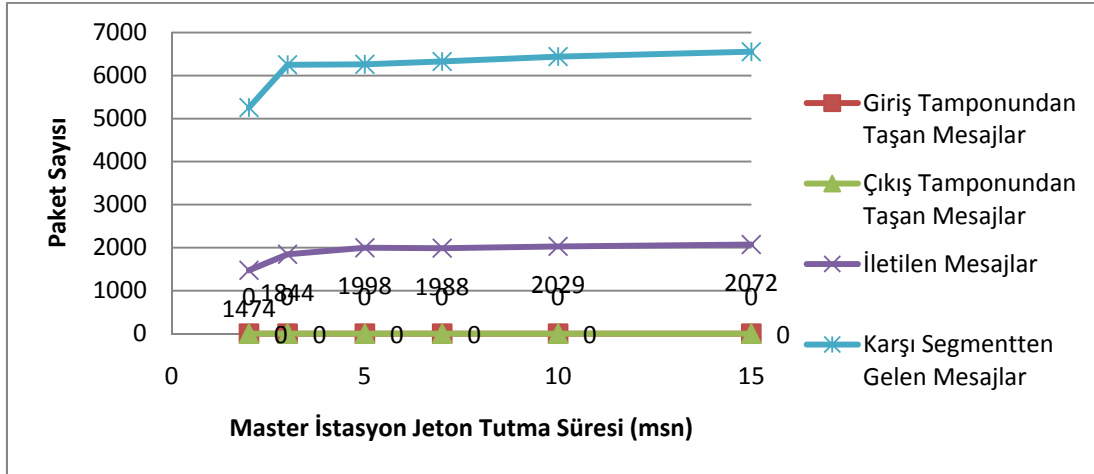
Köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi (T4) 2 msn değerinden başlatılıp 15 msn değerine kadar çıkartılmış ve neticesinde giriş tamponundan taşan mesaj sayısı, çıkış tamponundan taşan mesaj sayısı, karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesaj sayıları benzetim sonucunda %30U-%70Y, %50U-%50Y ve %70U-

%30Y durumlarına göre sırasıyla Tablo 5.13, Tablo 5.14 ve Tablo 5.15'teki sonuçlar ve bu sonuçlardan da sırasıyla Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'daki grafikler elde edilmiştir.

Master istasyonda üretilen mesajların %30 uzak %70 yerel mesaj olması durumunda; master istasyonun jeton tutma süresi 2 msn ile 15 msn değerleri arasında değiştirilirken, köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu da 30 mesaj olarak sabit tutulmuştur. Bu değerlere göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.13'te ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.27'de görülmektedir. Herhangi bir taşma olmaması için giriş ve çıkış tamponları minimum değerlerinde tutulduğundan, bu tamponlarda herhangi bir taşma olmadığı izlenmiştir. Master istasyon jeton tutma süresinin artması iletilen ve gelen mesajlarda 2-3 msn aralığında hızlı bir artış sağlarken, 5 msn değerinden sonra iletilen mesajlar için artış küçük değerlerle olmuştur.

Tablo 5.13. Birinci master istasyon jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Master İstasyon Jeton Tutma Süresi	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
2	0	0	1474	5258
3	0	0	1844	6252
5	0	0	1998	6261
7	0	0	1988	6327
10	0	0	2029	6442
15	0	0	2072	6554

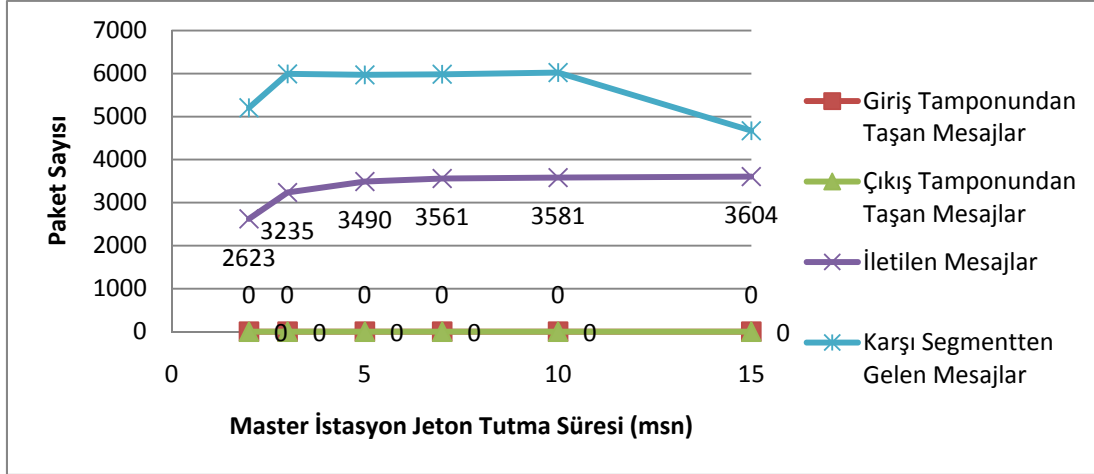


Şekil 5.27. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%30U-%70Y)

Master istasyonda üretilen mesajların %50 uzak %50 yerel mesaj olması durumunda; master istasyonun jeton tutma süresi 2 msn ile 15 msn değerleri arasında değiştirilirken, köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu da 30 mesaj olarak sabit tutulmuştur. Bu değerlere göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.14'te ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.28'de görülmektedir. Herhangi bir taşma olmaması için giriş ve çıkış tamponları minimum değerlerinde tutulduğundan bu tamponlarda herhangi bir taşma olmadığı izlenmiştir. Master istasyon jeton tutma süresinin artması iletilen ve gelen mesajlarda 2-3 msn aralığında hızlı bir artış sağlarken, 5 msn değerinden sonra iletilen mesajlar için artış küçük değerlerle olmuştur.

Tablo 5.14. Birinci master istasyon jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Master İstasyon Jeton Tutma Süresi	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
2	0	0	2623	5206
3	0	0	3235	5992
5	0	0	3490	5970
7	0	0	3561	5984
10	0	0	3581	6023
15	0	0	3604	4671



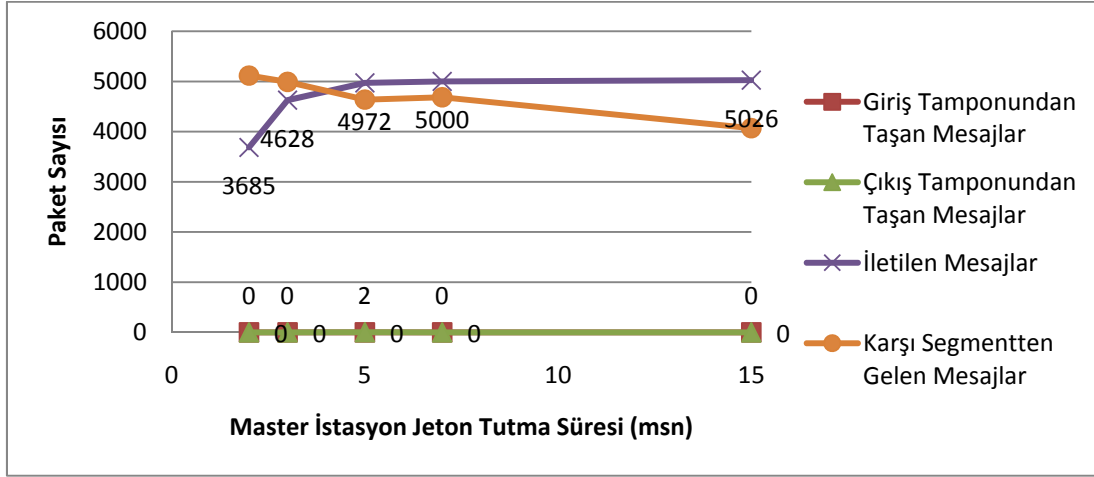
Şekil 5.28. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%50U-%50Y)

Tablo 5.15. Birinci master istasyon jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Master İstasyon Jeton Tutma Süresi	Giriş Tamponundan Taşan Mesajlar	Çıkış Tamponundan Taşan Mesajlar	İletilen Mesajlar	Karşı Segmentten Gelen Mesajlar
2	0	0	3685	5117
3	0	0	4628	4990
5	0	2	4972	4638
7	0	0	5000	4685
10	0	0	5040	4769
15	0	0	5026	4070

Master istasyonda üretilen mesajların %70 uzak %30 yerel mesaj olması durumunda; master istasyonun jeton tutma süresi 2 msn ile 15 msn değerleri arasında değiştirilirken, köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu da 30 mesaj olarak sabit tutulmuştur. Bu değerlere göre tamponlardan taşan mesajların yanında karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların sayıları ölçülmüştür. Değerler Tablo 5.15'te ve bu duruma karşılık gelen grafik ise Şekil 5.29'da görülmektedir. Herhangi bir taşma olmaması için giriş ve çıkış tamponları minimum değerlerinde tutulduğundan giriş tamponunda herhangi bir taşma olmadığı, sadece çıkış tamponu için bir durumda taşma olduğu gözlemlenmiştir. Master istasyon jeton tutma süresinin artması iletilen mesajlarda 2-3 msn aralığında hızlı bir artış sağlarken, 5 msn değerinden sonra artış küçük değerlerle olmuştur. Gelen mesajlar master istasyon jeton tutma süresi arttıkça düştüğü gözlemlenmiştir. Buradaki sebep; yüksek orandaki uzak mesaj trafiğinde köprünün jeton tutma süresinin, master

istasyon jeton tutma süresinden farkının artmasıyla köprünün yeterli iletim zamanına sahip olmamasıdır. Bu sebeple yüksek orandaki uzak trafiklerinde 5-7 msn aralığında bir jeton tutma süresi uygun olacaktır.

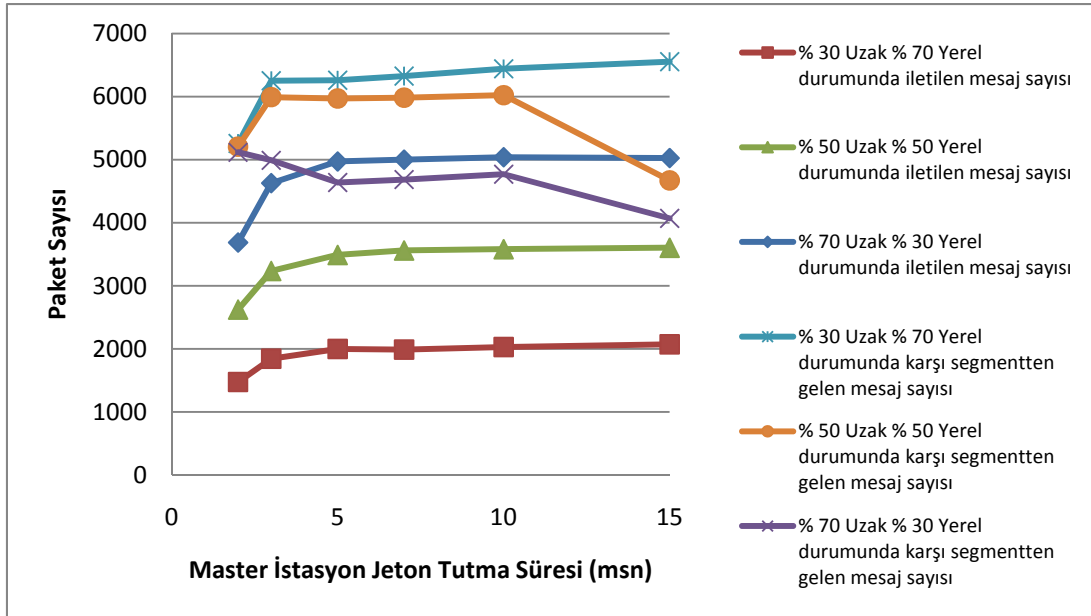


Şekil 5.29. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (%70U-%30Y)

Tablo 5.16’da ve Şekil 5.30’da master istasyonun jeton tutma süresinin değişiminin üç trafik durumuna göre karşı segmente iletilen ve karşı segmentten gelen mesajların değerleri görülmektedir. Giriş tampon boyutu 5 mesaj, çıkış tampon boyutu 30 mesaj olarak sabit tutulurken, köprü PROFIBUS ayağının jeton tutma süresi de 5 msn olarak sabit tutulmuştur. Üç trafik durumunda da master istasyon jeton tutma süresinin artması ile iletilen mesajların arttığı gözlemlenmiştir. Fakat bu artış değerleri 7 msn’den sonra küçük değerlerde olmuştur. Aynı süreçte gelen mesajlarda da artış gözlemlenirken 10 msn’den sonraki değerlerde gelen mesaj sayılarında, özellikle uzak mesaj trafiğinin arttığı durumlarda, bir azalma söz konusudur. Buna sebep olarak master istasyonun jeton tutma süresinin yükselmesi ile köprü PROFIBUS jeton tutma süresi arasındaki farkın arttığı durumlarda köprü iletimi için yeterli jeton tutma süresi olmaması gösterilebilir. Ayrıca giriş tamponunda herhangi bir taşma görülmezken, çıkış tamponunda %70 uzak %30 yerel mesaj durumunda bir taşma gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; Tablo 5.16’daki değerleri ve Şekil 5.30’daki grafikleri incelediğimizde, master istasyon jeton tutma süresinin 5-10 msn aralığında bir değerde seçebileceğimiz çıkarılabilir.

Tablo 5.16. Birinci master istasyon jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)

Master İstasyon Jeton Tutma Süresi	%30 Uzak %70 Yerel durumda iletilen mesaj sayısı	%50 Uzak %50 Yerel durumda iletilen mesaj sayısı	%70 Uzak %30 Yerel durumda iletilen mesaj sayısı	%30 Uzak %70 Yerel durumda karşı segmentten gelen mesaj sayısı	%50 Uzak %50 Yerel durumda karşı segmentten gelen mesaj sayısı	%70 Uzak %30 Yerel durumda karşı segmentten gelen mesaj sayısı
2	1474	2623	3685	5258	5206	5117
3	1844	3235	4628	6252	5992	4990
5	1998	3490	4972	6261	5970	4638
7	1988	3561	5000	6327	5984	4685
10	2029	3581	5040	6442	6023	4769
15	2072	3604	5026	6554	4671	4070



Şekil 5.30. Birinci master istasyonun jeton tutma süresinin sisteme etkisi (Toplu)

5.7. Sonuç

ATM protokolünün çerçeve yapısı dikkate alınırca 53 bayt olan maksimum boyut için 48 baytlık bir taşıma kapasitesi mevcuttur. Dolayısıyla 48 baytı aşan PROFIBUS paketleri için ATM üzerinden iletim için bölümlenme (fragmentasyon) yapılması gerekmektedir. Oysa, 802.16 protokolünün çerçeve yapısına bakıldığında 2048 bayta kadar çıkabilen bir kapasite vardır. Böylece PROFIBUS paketleri bölümlenme ihtiyacı

olmadan kapsülleme metodu ile direk 802.16 protokolü çerçevesindeki veri alanına yerleştirilebilir

Benzetim sonuçlarında köprü çıkış tampon boyutu, köprü giriş tampon boyutu, master istasyon jeton tutma süresi ve köprü PROFIBUS ayağı jeton tutma süresi incelenmiştir.

Köprü çıkış tampon boyutu için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre benzetim yapılmış olup sonuçları Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te, bu sonuçlara göre grafikleri de Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de verilmiştir. Bu değerlere göre çıkış tamponunun özellikle uzak mesaj oranının arttığı durumlarda yüksek tutulması gerektiği ve değer olarak 25 mesajlık bir tampon boyutunun yeterli olacağı görülmüştür.

Köprü giriş tampon boyutu için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre benzetim yapılmış olup sonuçları Tablo 5.5, Tablo 5.6 ve Tablo 5.7'de, bu sonuçlara göre grafikleri de Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilmiştir. Bu değerlere göre giriş tamponunun özellikle uzak mesaj oranının arttığı durumlarda yüksek tutulması gerektiği ve değer olarak 5 mesajlık bir tampon boyutunun yeterli olacağı görülmüştür.

Köprü PROFIBUS ayağı jeton tutma süresi için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre benzetim yapılmış olup sonuçları Tablo 5.9, Tablo 5.10 ve Tablo 5.11'de, bu sonuçlara göre grafikleri de Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir. Üç trafik durumunda da 7 msn jeton tutma süresinin üzerine çıkıldığında iletilen ve gelen mesajların sayılarında azalma görülmüştür. Ayrıca giriş tamponunda herhangi bir taşma görülmezken, çıkış tamponunda %70 uzak %30 yerel mesaj durumunda taşmalar gözlenmiştir. Bu sebeple uzak mesaj oranının yüksek olduğu durumlarda köprü jeton tutma süresinde yüksek tutulmaması gerektiği izlenmiştir. Sonuç olarak; verilen değerler için köprü jeton tutma süresinin 7 msn değerinin üzerine çıkmaması gerektiği çıkarılabilir.

Master istasyon jeton tutma sürüsü için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre benzetim yapılmış olup sonuçları Tablo 5.13, Tablo 5.14 ve Tablo 5.15'te, bu sonuçlara göre grafikleri de Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da verilmiştir. Üç trafik durumunda da master istasyon jeton tutma süresinin artması ile iletilen mesajların arttığı gözlemlenmiştir. Fakat bu artış değerleri 7 msn'den sonra küçük değerlerde olmuştur. Aynı süreçte gelen mesajlarda da artış gözlemlenirken 10 msn'den sonraki değerlerde gelen mesaj sayılarında, özellikle uzak mesaj trafiğinin arttığı durumlarda, bir azalma söz konusudur. Buna sebep olarak master istasyonun jeton tutma süresinin yükselmesi ile köprü PROFIBUS jeton tutma süresi arasındaki farkın arttığı durumlarda köprü iletimi için yeterli jeton tutma süresi olmaması gösterilebilir. Ayrıca giriş tamponunda herhangi bir taşma görülmezken, çıkış tamponunda %70 uzak %30 yerel mesaj durumunda bir taşma gözlenmiştir. Sonuç olarak; Tablo 5.16'daki değerleri ve Şekil 5.30'daki grafikleri incelediğimizde, master istasyon jeton tutma süresinin 5-10 msn aralığında bir değerde seçebileceğimiz çıkarılabilir.

Ayrıca uzak-yerel mesaj oranının yüksek jeton tutma süresi, düşük tampon boyutu gibi durumlarda yüksek olmaması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple mesaj trafik hızının yüksek olduğu durumlarda uzak mesaj oranının %70'den küçük olması gerektiği çıkarılabilir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bir arabağlaşım birimi seçmeli çerçeve yeniden iletim fonksiyonunu sağlamalı ve benzer ya da benzer olmayan sistemler arasındaki haberleşmeye imkan tanıyan işlemlere arabirim olmalıdır. Bu çalışmada yeni bir arabağlaşım birim mimarisi otonom PROFIBUS sistemlerini bağlamak üzere oluşturulmuştur. Bu mimari aracılığıyla PROFIBUS ağları IEEE 802.16 kablosuz omurgasına bağlanabilecek ve fiziksel ve kablolu kısıtlamalardan kurtulacaktır. Arabağlaşım biriminin uyumsuz servislerin çözümü için saydam-çevrimli uzak köprüye ihtiyacı vardır. Köprü, PROFIBUS segmentlerinde oluşan trafiği kapsülleme tekniğiyle IEEE 802.16 kablosuz kentsel alan ağına entegre etmede kullanılır. Endüstriyel alanda kolay kullanımı düşünülürse, PROFIBUS düğümleri bu arabağlaşım birimi sayesinde uygulamalarda daha esnek kullanılabilir ve uzaktan erişim imkanı artırılmış olur.

Ayrıca, PROFIBUS segmentlerinin ATM protokolü üzerinden haberleşmesi için yapılan çalışmada ATM protokolünün maksimum 48 baytlık bir veri alanı olması sebebiyle, 48 bayttan büyük PROFIBUS paketlerin bölümlenmesi (fragmentasyon) gerekmektedir. ATM protokolünün çerçeve yapısı dikkate alınır 53 bayt olan maksimum boyut için 48 baytlık bir veri taşıma kapasitesi mevcutken, PROFIBUS protokol yapısı 255 baytlık bir çerçeve yapısına sahiptir. Dolayısı ile 48 baytı aşan PROFIBUS paketleri için ATM üzerinden iletim için bölümlenme (fragmentasyon) yapılması gerekmektedir, 802.16 protokolünün çerçeve yapısına bakıldığında 2048 bayta kadar çıkabilen bir kapasite vardır. Böylece PROFIBUS paketleri bölümlenme ihtiyacı olmadan kapsülleme metodu ile direk 802.16 protokolü çerçevesindeki veri alanına yerleştirilebilir.

Kablosuz iletişim sistemlerinin getirdiği hareketlilik, kolay erişim, basitlik, esneklik, kurulum maliyeti, servis maliyeti gibi bazı karakteristik özelliklerinin avantajı birçok

çalışmada kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca WiMAX, hücresel servislerin işletiminde hücresel baz istasyonların santrallere bağlanmasında arabirim olarak kullanılabilir. Noktadan noktaya iletimde 50 km menzile ulaşan WiMAX bu aşamada bir çözüm olabilmektedir. İster WiMAX olsun, ister WiFi olsun kablosuz servis sağlayıcı hizmeti veren firmalar son noktadaki baz istasyonlarını merkeze WiMAX toplayıcı omurga üzerinden bağlayabilir. IEEE 802.16 protokolünün ilk versiyonlarında alıcı ve verici istasyonlar sabit ve görüş hattında iken; göçebe ve gezgin versiyonlarıyla alıcı ve verici istasyonların sabit ve görüş hattında olma zorunluluğu ortadan kalkmıştır. IEEE 802.16e versiyonu tamamen gezgin olan versiyondur ve baz istasyondan baz istasyona aktarılma özelliğine de sahiptir.

Kablolu bağlantının kurulumunun zor olduğu alanlarda kablosuz bir çözüm, kablolu çözümlere göre daha kolay, çabuk ve ekonomik olmaktadır. Örneğin, deniz kıyısında karadan uzakta kurulu olan bir platforma deniz altından kablo çekmek yerine kablosuz iletişim daha mantıklı olacaktır. Aynı zamanda bu platform belli bir süre sonra başka bir alana kaydırılmak istendiğinde kablosuz iletişim açısından ek bir maliyet doğurmayacaktır. Diğer bir uygulama örneğinde bankalar aynı şehir içindeki şubeleriyle ya da para çekme üniteleri arasındaki haberleşmesinde WiMAX kullanabilmektedir.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı gerçek zamanlı hizmet sınıfına sahip IEEE 802.16 WiMAX protokolü omurga olarak tercih edilmiştir.

Kullanılacak arabağlaşım cihazının türü; birbirine bağlanacak sistemlerin ihtiyaçlarına, sistemlerin karakteristiklerine ve sistemlerin bağlantılarının teknolojik olarak mümkün olup olmadığına bakılarak seçilir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında köprü olarak ifade edilen bu yapı günümüz gerçeklemelerinde geçit olarak tanımlanmaktadır.

IEEE 802.16 protokolü ve sahayolu sistemlerinin, OSI referans modelinin 3. katmanını desteklememesi nedeniyle, en uygun arabağlaşım cihazı geçit-arabağlaşım cihazı olacaktır. Arabağlaşım birimi, benzer ya da benzer olmayan LAN'lara bağlı olan istasyonların mantıksal olarak aynı LAN'daymış gibi birbirleriyle

haberleşmelerine izin veren bir arabağlaşım cihazıdır. Bu özellik, sahayolu sistemleri ile IEEE 802.16 arasındaki iletişimi sağlamak için bir arabağlaşım biriminin kullanılabilceğini gösterir.

Protokol mühendisliğinde gerçekleştirme ve performans analizi önemli kısımlardandır. Protokol gerçekleştirmedeki amaç protokol geliştirme aşamasında hataları bulma ve düzeltme, kilitlenmeleri (deadlock) ve işletilemeyen durumları maksimum seviyede önlemektir. Gerçekleştirme aşamasında, protokol öncelikle biçimsel olarak tanımlanır ve ardından doğru teknikler, analiz ve protokolün özneliklerinin gerçekleştirilmesinde kullanılır.

Petri ağlar koşut zamanlılığı güzel bir şekilde ifade eder ve yüksek seviyede protokolün kontrol akışının modelini sağlar. İyi yapılandırılmış, modüler tasarıma, azaltılmış kurallara sahip, matematiksel temelli, arzu edilen birçok özelliği analiz edebilen özelliklerine sahiptir.

İletişim protokolleri, Petri ağların sistemin temel özelliklerinin gösterilmesi ve belirtilmesinde kullanıldığı bir diğer alandır. Petri ağların canlılık ve güvenilirlik özellikleri iletişim protokollerini doğrulamada sıklıkla kullanılır.

Petri ağı modelleri kontrol alanında, benzetimde ve performans analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Avantajlarına bakıldığında;

- Sistem çıkmazı, kilitlenme ve kararsızlık gibi istenmeyen durumlar için sistemi kontrol edebilme yeteneği bulunması,
- Birçok sistem için benzetim yapılmaksızın performans analizi yapılabilmesi. Üretim alanları, kaynak kullanımı, güvenilirlik ve performans ölçümünün yapılabilmesi,
- Gerçek-zaman görüntüsüne izin veren durum bilgisi. Yani hangi zamanda sistemin ne durumda olduğunu öğrenilebilme kolaylığı görülmektedir.

Petri ağı günümüzde ayrık olaylı sistemlerin tasarımı için matematiksel ve grafiksel özelliklere sahip güçlü bir araç olarak görülmektedir.

Petri Ağların haberleşme protokollerinde kullanılabilirliği birçok çalışmada görülmektedir. Bu sebeple çalışmamızda biçimsel modelleme olarak Petri ağlar seçilmiştir. Yukarıda verilen çalışmalarda da görüleceği üzere *Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağlar*, üstel dağılımlara ve sabit zaman gecikmelerine olanak verdiği için dolayı protokol modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır ve çalışmamızda da GSPA tercih edilmiştir. Ayrıca çalışmada, benzetim yazılımı olarak da HPSim yazılımı tercih edilmiştir.

Modelleme yapılırken, segmentte master istasyon olarak bir aktif cihaz ve arabağlaşım biriminin PROFIBUS ayağı ile iki master cihaz bulunmaktadır. Bunun yanında jeton paylaşımı otonom yapı tercih edildiğinden bu iki cihaz arasında olmaktadır. Ayrıca IEEE 802.16-WiMAX protokolü modellenirken servis sınıfı olarak UGS servis sınıfı seçilmiştir. UGS servis sınıfında, ATM protokolündeki CBR servis sınıfına benzer yapıda ilgili bağlantıya atanmış sabit bir veri transfer hızı mevcuttur.

Benzetim sonuçlarında geçit çıkış tampon boyutu, geçit giriş tampon boyutu, master istasyon jeton tutma süresi ve geçit PROFIBUS ayağı jeton tutma süresi incelenmiştir.

Geçit çıkış tampon boyutu için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre çıkış tamponunun özellikle uzak mesaj oranının arttığı durumlarda yüksek tutulması gerektiği ve değer olarak 25 mesajlık bir tampon boyutunun yeterli olacağı görülmüştür.

Geçit giriş tampon boyutu için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre giriş tamponunun özellikle uzak mesaj oranının arttığı durumlarda yüksek tutulması gerektiği ve değer olarak 5 mesajlık bir tampon boyutunun yeterli olacağı görülmüştür.

Geçit PROFIBUS ayağı jeton tutma süresi için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre benzetim yapılmıştır. Üç trafik

durumunda da 7 msn jeton tutma süresinin üzerine çıktığında iletilen ve gelen mesajların sayılarında azalma görülmüştür. Ayrıca giriş tamponunda herhangi bir taşma görülmezken, çıkış tamponunda %70 uzak %30 yerel mesaj durumunda taşmalar gözlenmiştir. Bu sebeple uzak mesaj oranının yüksek olduğu durumlarda geçit jeton tutma süresinde yüksek tutulmaması gerektiği izlenmiştir. Sonuç olarak; verilen değerler için geçit jeton tutma süresinin 7 msn değerinin üzerine çıkmaması gerektiği çıkarılabilir.

Master istasyon jeton tutma sürüsü için %30 uzak %70 yerel, %50 uzak %50 yerel ve %70 uzak %30 yerel mesaj oranlarına göre benzetim yapılmıştır. Üç trafik durumunda da master istasyon jeton tutma süresinin artması ile iletilen mesajların arttığı gözlemlenmiştir. Fakat bu artış değerleri 7 msn'den sonra küçük değerlerde olmuştur. Aynı süreçte gelen mesajlarda da artış gözlemlenirken 10 msn'den sonraki değerlerde gelen mesaj sayılarında, özellikle uzak mesaj trafiğinin arttığı durumlarda, bir azalma söz konusudur. Buna sebep olarak master istasyonun jeton tutma süresinin yükselmesi ile geçit PROFIBUS jeton tutma süresi arasındaki farkın arttığı durumlarda geçit iletimi için yeterli jeton tutma süresi olmaması gösterilebilir. Ayrıca giriş tamponunda herhangi bir taşma görülmezken, çıkış tamponunda %70 uzak %30 yerel mesaj durumunda bir taşma gözlenmiştir. Sonuç olarak, master istasyon jeton tutma süresinin 5-10 msn aralığında bir değerde seçebileceğimiz çıkarılabilir.

Ayrıca uzak-yerel mesaj oranının yüksek jeton tutma süresi, düşük tampon boyutu gibi durumlarda yüksek olmaması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple mesaj trafik hızının yüksek olduğu durumlarda uzak mesaj oranının %70'den küçük olması gerektiği çıkarılabilir.

6.2.Çalışmanın Getirdiği Katkılar

- Bilime/endüstriye yenilik getirme;
Yüksek hızlı, kablosuz genişbant, çoklu-hizmet ve çoklu-ortam ağ protokolü olarak IEEE 802.16 WiMAX protokolü, endüstriyel kontrol sistemlerinde bir omurga ağ olarak kullanılması önerilmiştir.

PROFIBUS sahayolu ile IEEE 802.16 iletişimini sağlamak üzere PROFIBUS/IEEE 802.16 saydam-kapsüllemeli yerel köprü tasarımı yapılmıştır.

- Bilinen bir yöntemi yeni bir alana uygulama;

Bu tez çalışmasında, daha önce çalışılmış olan PROFIBUS/ATM, CAN/IEEE 802.11 köprülerinin tasarım yöntemleri kullanılmış olup farklı bir benzetim ortamı kullanılarak geçit geliştirilmiştir.

- Diğer katkılar;

OSI'nin birinci ve ikinci katmanlarını destekleyen herhangi bir sahayolu sistemi ile IEEE 802.16-WiMAX iletişiminde yerel geçit tasarımı için bir method sunulmuştur.

Fiziksel gerçekleştirilecek olan kişiler için performans analizi yapılmış bir model sunulmuştur.

Geçit için giriş-çıkış tampon boyutları, uzak-yerel mesaj oranları için farklı değerler atanarak önerilen sistemin başarımı farklı çalışma şartları altında ölçülmüştür.

6.3. Tartışma ve Öneriler

Bu çalışmadaki master sayılarına baktığımızda; A segmenti için bir master istasyon ve arabağlaşım biriminin master PROFIBUS ayağı mevcutken, B segmenti için de yine bir master istasyon ve arabağlaşım biriminin master PROFIBUS ayağı vardır. Sonraki çalışmalar için, ihtiyaca göre hem segment sayısı hem de segmentteki master istasyon sayıları artırılarak daha karmaşık sistemler için de ilgili parametreler irdelenebilir.

Çalışmamızda arabağlaşımı yapılan segmentler otonom olarak düşünülmüş olup, her segmentin içerisinde kendi jetonu olup jeton aktarımı yapılmaktadır. Diğer bir method olan sanal halkada tüm segmentler arasında tek bir jeton aktarımı olup,

arabağlaşımı yapılan segmentleri tek bir segment gibi düşünülmesidir. Bu methota göre de modelleme yapılarak karşılaştırma yapılabilir.

Çalışmamızda WiMAX IEEE 802.16 protokolü için UGS servis sınıfına göre modelleme yapılarak performans analizi yapılmıştır. UGS servis sınıfının dışındaki servis sınıfları da (BE, rtPS, ertPS, nrtPS) modellenerek PROFIBUS protokolünün ihtiyaçlarını karşılayıp karşılamadığı incelenebilir.

Diğer taraftan sistemin Petri ağ modeli ile matematiksel ve grafiksel modeli çıkartılmış olduğundan farklı parametre değerleri ile sistem yeniden benzetim yapılarak istenilen testler yapılabilir. Bu modellerden donanımsal tanımlama dilleri ve FPGA (Alan Programlanabilir Kapı Dizisi-Field Programmable Gate Array) gibi gömülü sistemlerle fiziksel olarak gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

ALVES, F., Real-Time Communications over Hybrid Wired/Wireless PROFIBUS-Based Networks, Doktora Tezi, Porto University, Portekiz, 2003.

ANDREWS, J.,G, GHOSH, A., MUHAMED, R., Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall , ISBN 0-13-2225522, 2007.

Automating with Step7 in LAD and FBD in the SIMATIC S7-300/400 Programmable Controllers, Siemens, MCD Corporate Publishing, 2001.

BAYILMIŞ, C., IEEE 802.11b KLAN Kullanarak CAN Segmentleri Genişleten Arabağlaşım Birimi Tasarımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006

BEHKI, N., TAVARES, S.E., An Integrated Approach To Protocol Design, IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 1989.

BTK, Test ve Deneme İzinleri Listesi, 2008

http://www.tk.gov.tr/Yetkilendirme/Test_Deneme_Izini.htm, Çevrimiçi: Aralık 2008

ÇALIŞKAN, V., Petri Ağlarının Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2003.

CAN Application Fields, CiA, <http://www.inrialpes.fr/iramr/Docs/CANappl.pdf>

CAVALIERI, S., PANO, D., A novel solution to interconnect FieldBus systems

using IEEE wireless LAN technology, Computer Standards & Interfaces, 9–23, 1998

ÇAYIR, S., Petri Ağlarında Değişmez Analizi , Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul, 2004.

CHEN, K., DEMARCA, J. B., Mobile Wimax, John Wiley & Sons Ltd., ISBN 978-0-470-51941-7, 2008.

Communication Networks, Technical Information L155EN, SAMSON AG. 99/12, 1999, (<http://www.samson.de>).

CONTROLS GROUP, Recommendation Standard use of Fieldbuses at CERN, <http://itcowww.cern.ch/fieldbus/welcome.html>.

DANTHINE, A., Protocol Representation with Finite-State Models, IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-28, No. 4, April 1980

DURSUN, H., A Formal Specification Method: VDM, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, 1993.

EKİZ, H., Design, Implementation, and Performance Analysis of CAN/CAN and CAN/Ethernet Bridges, Doktora Tezi, University of Sussex, Brighton, England, 1997a.

EKİZ, H., KUTLU, A., POWNER, E., Design and Implementation of a CAN/Ethernet Bridge, Proc. Of 3.International CAN Conference, Paris, France, 11–20, 1996d.

EKİZ, H., KUTLU, A., POWNER, ET., Design and Implementation of a CAN/CAN Bridge, Proceedings of IEEE ISPAN'96, Beijing, China, 1996b

EKİZ, H., KUTLU, A., POWNER, ET., ODEH, A., Performance Analysis of CAN in Bridged Systems, Proceedings of II Electrical Engineers Conference, Karak,

Jordan, 1996a

EKİZ, H., KUTLU, A., POWNER, ET., Performance Analysis Interconnected CAN systems in Industrial Environments, Proceeding of II Communication Symposium, pp. 89-92, Manchester, UK, 1995

EKİZ, H., KUTLU, A., POWNER, ET., Performance Analysis of a CAN/CAN Bridge, Proceedings of IEEE ICNP'96 Conference, pp. 181-188, Ohio, USA, 1996c

EKİZ, H., POWNER, E., KUTLU, A., Performance Analysis of a Ethernet/CAN Bridge, Proc. Of IEEE SICON'97 Conference, Singapore, 71–85, 14–17 April, 1997b.

EKLUND, C., ROGER, B. M., KENNETH, L., IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access, IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 6, pp.98-107, 2002.

ERTÜRK, İ., A New Method for Transferring CAN Messages Using Wireless ATM, Journal of Network & Computer Applications, 28 (1), 45–56, 2005.

ERTÜRK, İ., Transporting CAN Messages over WATM, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 2639, 724–729, 2003.

Fieldbus Market Worldwide, <http://www.anybus.com/resources/vbfstudy.shtml>

Fieldbus Tutorial, <http://dali.ece.curtin.edu.au/~clive/Fieldbus/fieldbus.htm>.

GAW, D., MARSH, A., Architectural Issues Related to Ethernet TCP/IP Connectivity to LonWorks, Fieldcomms International, 1997.

GUOQING, L., New Protocol Modeling Methods Based On ESTELLE Formal Description, Communications, Circuits and Systems, Proceedings on International Conference, Volume: 2, Page: 1277-1282, 2005.

HAWE, B., KIRBY, A., Transparent Interconnection of Local Area Network with Bridges, Telecommunication Network, Vol. 3, No 2, pp. 116-130, 1984

HEINDL, A., GERMAN, R., Performance modeling of IEEE 802.11 wireless LANs with stochastic Petri nets, Performance Evaluation 44, 139-164, Elsevier, 2001

HELD, G., Internetworking LANs and WANs, Wiley Communication Technology, England, 1993.

HERB, S., Networks and Fieldbuses: Some Trends, Grömitz Seminar, 2000

HOLZMANN, G. J., Design and Validation of Computer Protocols, Lucent Technologies, Bell Laboratories, Incorporated PRENTICE-HALL, 1991

HONG, S., H., KİM, K., A., Implementation and Performance Evaluation of Profibus in the Distributed Computer Control Systems, Proc. 14th IFAC Workshop on DCCS'97, pp 99-104, 1997

HPSim, HPSim Help File, <http://www.winpesim.de/3.html>,

Çevrimiçi: Eylül 2009

IEC 61158 series: Digital data communication for measurement and control – Fieldbus for use in industrial control systems, August 2001.

IEEE 802.16 Çalışma Grubu, <http://www.ieee802.org/16>, Çevrimiçi: Aralık 2008

IEEE 802.16-2001, IEEE Standard for Local and metropolitan area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, 2001

IEEE 802.16-2004, IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks —Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems,, 2004

IEEE 802.16e-2005, IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks— Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum1, 2006

İSKEFİYELİ, M., ÖZÇELİK, İ., Interconnection of Autonomous PROFIBUS Segments through IEEE 802.16 WMAN , International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering, Berlin, 2007

ITU Statistics, Internet indicators; subscribers, users and broadband subscribers report, <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>, 2007a

ITU Statistics, Mobile cellular, subscribers per 100 people report, <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>, 2007b

JENSEN, K., Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods, and Practical Use, Springer, 1992

JONES, A. Et. Al., Issues in the Design and Implementation of a System Architecture for Computer Integrated Manufacturing, International Journal on Computer Integrating Manufacturing (March-April 1989), vol. 2, no 2, pp. 65-76, 1989

KIM, Y.S., Pre-Run-Time Scheduling Methods of Data Link Layer in the Fieldbus Environment, Proceedings of 14th IFAC Workshop on Distributed Computer Control Systems, pp. 105-110, Korea, 1997

KOKKINAKI, A.I., MORSE, M. J., Industrial Communications Architectures and their Application in a Garment Computer Integrated Manufacturing Cell, Computer Communications, vol. 20, no. 10, pp: 912-922, 1997

KÜÇÜKÜNSAL, J., Metropol Alanlar İçin Kablosuz Erişim Uygulamaları ve Düzenleme Önerileri, Telekomünikasyon Kurumu Uzmanlık Tezi, Ankara, 2006

KUNERT, O., ZITTERBART, M., Interconnecting field buses through ATM, Proceedings of the 22nd Conference on Local Computer Networks, LCN, Minneapolis, 1997

KURAN, M. S., TUĞÇU, T., A survey on emerging broadband wireless technologies, Computer Networks, Volume 51, Issue 11, Pages 3013-3046, 2007

KUTLU, A., EKİZ, H., POWNER, E., T., Performance analysis of MAC protocols for wireless control area network, Proc. Int. Symp. Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, 494–499, 1996a

KUTLU, A., EKİZ, H., POWNER, E., T., Wireless control area network, Networking Aspects of Radio Communication System, 1–4, 1996b

KWON, J., U., Modeling of PROFIBUS for Evaluating Performance by Simulation, Proceedings of the 10th CISL Winter Workshop, Cheju Island, February 1997.

LAWRENZ, W., CAN System Engineering From Theory to Practical Applications, Springer Verlag, 1997

LEBLANC, C., The Future of Industrial Networking and Connectivity, Dedicated Systems Magazine, Q1, pp. 9-11, 2000

LEE, K.C., LEE, S., Integrated Network of PROFIBUS-DP and IEEE 802.11 Wireless LAN with Hard Real-time Requirement, Proceeding of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Korea, 2001.

LIN, C., LI, B., WU, J., Modelling ATM Traffic Using Stochastic Petri Net, Sixth International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN '97) Page(s): 538-541, 1997

MARSAN, M.A., NERI, F., Cioffari, C.S., VASCO, A., GSPN models of bridged

LAN configurations, Journal of Systems Architecture 46, 105-130, Elsevier, 2000

MURATA, T., Petri Nets Properties Analysis and Applications, Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 4, April 1989

NEUMANN, P., Integration of Fieldbus Systems and Telecommunication Systems in the field of industrial automation, V. Brasilianisches Symposium über Intelligente Automatisierungssysteme VSBAI, 07-09.11.2001, Canela (Brasilien). Plenarvortrag., 2001

ÖZÇELİK, İ., CAN/ATM ve PROFIBUS/ATM Yerel Köprülerinin Tasarımı, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002

ÖZÇELİK, İ., EKİZ, H., Building an interconnection between PROFIBUS and ATM Standard, Journal of Network and Computer Application, 2006

ÖZÇELİK, İ., EKİZ, H., Design, Implementation and Performance Analysis of The PROFIBUS/ATM Local Bridge, Computer Standart & Interface, 26, 329–342, 2004

ÖZÇELİK, İ., SELÇUK, F., 1999, Endüstriyel İletişim Ağlarında Tek Standarda Doğru, Otomasyon Dergisi, Nisan, Mayıs, Haziran 1999.

PAREEK, D., The Business of WiMAX, John Wiley & Sons Ltd., ISBN 978-0-470-02691-5, 2006

PARK, T., R., LEE, J., M., at all, Implementation of PICNET+ As The Control Network of The Distributed Control Systems For The Nuclear Power Plant, International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human- Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT2000) , 2000

PARK, W., Performance Evaluation of PROFIBUS Data Link Layer by Petri Nets, Proceedings of the 9th CISL Winter Workshop, pp. 55-77, 1996

Petri Nets Tools Database

<http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tools/db.html>

Çevrimiçi: Eylül 2009

PETRİ, C. A., Kommunikation mit Automaten Schriften des Rheinisch Westfälischen Inst. Fur Instrumentelle Mathematik and der Universitat Bonn, Translation by C. F. Green, Applied Data Research Inc., Suppl 1 to Tech report RADC-TR-65-337, NY, 1962

PINTO, J., Finding Fieldbus Standards, Design Engineering, Oct99, p47, 3p., 1999

PROFIBUS Specification, International Standard, IEC 61158, 2000

PROFIBUS Technical Description, PROFIBUS Brochure, September 1999.

PROFIBUS Workshop, SIEMENS (Chapter 1, 2, 3, 4), 1999

RAMACHANDRAN, S., Link Adaptation Algorithm and Metric for IEEE Standard 802.16, Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004

REYNOLDS, T., The Implications of WiMAX for Competition and Regulation, Technical Report, OECD-Organisation for Economic Co-operation and Development, 2005

ROHDE&SCHWARZ, WiMAX: General information about the standard 802.16, Application Note, 2006

http://www2.rohde-schwarz.com/file_1782/1MA96_0.pdf, (Çevrimiçi: Aralık 2008)

SHRIVASTAV, N., A NS Model of the DOCSIS Protocol and a Solution to the Bandwidth-Hog Problem in the Cable Networks, MSc Thesis, North Carolina State University, 2003

SJODIN, M., Predictable High-Speed Communications For Distributed Real-Time

Systems, Dphil Thesis, Upsala University, France, May 2000.

STALLINGS, W, 2001, Standardizing Fixed Broadband Wireless, www.commsdesign.com, September 2001

SUPERONLINE, Superonline ve WiMAX, 2008
<http://wimax.superonline.com/solvewimax.php>, Çevrimiçi: Aralık 2008

The Synergetic Fieldbus Comparison Chart,
<http://www.synergetic.com/compare.htm>, Çevrimiçi: Aralık 2008

TOVAR, E., VASQUES, F., Real-Time Fieldbus Communications using Profibus Networks, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 6, 1999b.

TOVAR, E., VASQUES, F., Analysis of the Worst-Case Real Token Rotation Time in PROFIBUS Networks, Proceedings of Fieldbus Technology (FET99), Magdeburg, Germany, pp. 359-366, 1999a.

TRANORIS, C., THRAMBOULIDIS, K., Towards a Real-Time Interconnection of Industrial Fieldbuses, Greece, Crete, 2001

UZAM, M., Petri-Net-Based Supervisory Control of Discrete Event Systems and Their Ladder Logic Diagram Implementations, PhD Thesis, University of Salford, Salford, UK, 1998

VASQUES, F., JUANOLE, G., Pre-Run-Time Schedulability Analysis in Fieldbus Networks, IECON94 Proceedings, Bologna, Italy, 1994

WANG, J., Timed Petri Nets Theory and Application, Kluwer Academic Publishers, 1998

WILLIG, A., An Architecture for Wireless Extension of PROFIBUS, 29th Annual Conference of IEEE, IECON'03, Volume 3, 2003

WiMAX Forum, Can WiMAX Address Your Applications?, 2005a
http://www.wimaxforum.org/documents/downloads/Can_WiMAX_Address_Your_Applications_final.pdf Çevrimiçi: Aralık 2008

WiMAX Forum, Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX Networks, 2005b
http://www.wimaxforum.org/documents/downloads/Applications_for_802.16-2004_and_802.16e_WiMAX_networks_final.pdf, Çevrimiçi: Aralık 2008

WiMAX Forum, WiMAX Forum Position Paper for WiMAX, Technical Documents and Specifications, 2008a
http://www.wimaxforum.org/documents/downloads/wf_700mhz_messaging_white_paper_final.pdf Çevrimiçi: Aralık 2008

WiMAX Forum, WiMAX Forum Overview, 2008b
www.wimaxforum.org/about, Çevrimiçi: Aralık 2008

WiMAX Forum, WiMAX Forum Member Countries, 2008c
<http://www.wimaxforum.org/about/roster/countries>, Çevrimiçi: Aralık 2008

WiMAX Forum, WiMAX Forum Member Companies, 2008d
http://www.wimaxforum.org/about/Current_Members Çevrimiçi: Aralık 2008

WiMAX Forum, WiMAX Networks Worldwide, Technical Documents and Specifications, 2008e
http://www.wimaxforum.org/documents/documents/wimax_networks_worldwide_11x17.pdf, Çevrimiçi: Aralık 2008

WOLFGANG, E., Computer Design's: Electronic Systems Technology&Design, May99, Vol.38 Issue 5, p48, 4p., 1999

ZHOU, JQ., Petri Net Modeling and Performance Analysis of CAN Fieldbus, MSc

Thesis, New Jersey Institute of Technology, 1998

ZHOU, Y., WANG, T., YU, H., DSPN Modeling and Performance Analysis of PROFIBUS, Proceedings of the 6th WCICA, China, 2006

ÖZGEÇMİŞ

Murat İSKEFİYELİ; 1976 yılında Sakarya'nın Hendek ilçesinde doğdu. İlköğretimini Düzce Cumhuriyet İlkokulu'nda, lise eğitimini Düzce Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1994 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1998 yılında bu bölümden mezun oldu ve özel sektörde mesleki hayata başladı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimiyle beraber Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1999-2001 yılları arasında yedek subay olarak askerlik görevini tamamladı. Halen Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.

MODELLING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF WiMAX (IEEE 802.16)-PROFIBUS INTERNETWORKING DEVICE BY PETRI NETS

Murat İSKEFİYELİ

SUMMARY

Keywords: PROFIBUS, WiMAX, IEEE 802.16, Petri Nets, Internetworking

In the application of industrial controlling, fieldbuses are used in the communication of distributed controller devices at field layer. PROFIBUS (PROcess FIeld BUS) which is defined with the international standards (IEC61158, EN50170) is the most popular fieldbus. PROFIBUS which is used frequently in manufacturing (factory), process and building automations, provides datarates from 9.6 kbps to 12 Mbps at distance from 100 to 1200 meters. This situation requires using of internetworking units which has backbone technology, for using PROFIBUS at more coverage area and high datarates.

The requirements of a backbone protocol used for internetworking, are changed by the development in technology. Nowadays, because of advantages of easiness in installation and mobility, in addition to the wired backbone solutions, wireless backbone solutions began to be used and rapidly became common. As a wireless broadband backbone technology, IEEE 802.16-WiMAX is a protocol that can serve a 50 km coverage area, a 120 Mbps datarate and a QoS at different service classes (UGS, rtPS, nrtPS, BE, ErtPS) in line-of-sight.

In this study, an internetworking unit is proposed that interconnects PROFIBUS segments placed at different locations through a wireless backbone technology of IEEE 802.16-WiMAX by using UGS service class. By the features of synchronization, concurrent, deadlock avoidance, exponential distribution and constant time delay, Generalized Stochastic Petri Nets model of the unit is done. Also in the model, it is proposed that PROFIBUS packets are encapsulated into IEEE 802.16 packets.

The designed PROFIBUS/IEEE 802.16-WiMAX internetworking unit is analyzed according to gateway output buffer size, gateway input buffer size, master station token holding time and gateway PROFIBUS side token holding time parameters. The outputs of simulations show that internetworking unit can support a sufficient service under different loads and present a designed model with a measurable performance for the people who want to implement it physically.

WiMAX(IEEE 802.16)-PROFIBUS ARABAĞLAŞIM ELEMANNININ PETRİ AĞLARLA MODELLENMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Murat İSKEFİYELİ

ÖZET

Anahtar kelimeler: PROFIBUS, WiMAX, IEEE 802.16, Petri Ağlar, Arabağlaşım

Endüstriyel kontrol uygulamalarında saha seviyesindeki dağıtık kontrolör cihazların haberleşmesinde sahayolu ağları kullanılmaktadır. PROFIBUS (PROcess FIEld BUS) uluslararası standartlarla (IEC61158, EN50170) tanımlanmış en popüler sahayoludur. Üretim (fabrika), süreç ve bina otomasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılan PROFIBUS, 100 m ile 1200 m mesafede 9.6 kbps ile 12 Mbps arasındaki iletişim hızlarını desteklemektedir. Bu durum, PROFIBUS'ın daha geniş kapsama alanları ve yüksek hızlarda kullanılabilmesi için omurga teknolojisine sahip arabağlaşım elemanlarının kullanımını gerektirir.

Arabağlaşım için kullanılan omurga protokolü gereksinimleri gelişen teknolojilerle birlikte değişmektedir. Günümüzde, kurulum kolaylığı ve hareketlilik avantajlarından dolayı kablolu omurga çözümlerine karşılık, kablosuz omurga çözümleri de kullanılmaya başlanmış ve hızla yaygınlaşmaktadır. Kablosuz genişbant omurga teknolojisi olan IEEE 802.16-WiMAX, görüş hattında 50 km'lik bir kapsama alanı, 120 Mbps veri transfer hızı ve farklı servis sınıflarında (UGS, rtPS, nrtPS, BE, ErtPS) hizmet kalitesi sunan bir protokoldür.

Bu çalışmada, farklı lokasyonlardaki PROFIBUS segmentlerini IEEE 802.16-WiMAX kablosuz omurga teknolojisi üzerinden UGS servis sınıfı kullanarak birbirine bağlayan bir arabağlaşım birimi önerilmektedir. Bu birimin, senkronizasyon, koşut zamanlılık, kilitlenmeyi önleyebilme, üstel dağılım ve sabit zaman gecikme özellikleri olan Genelleştirilmiş Stokastik Petri Ağlar modeli sunulmaktadır. Ayrıca, model içerisinde PROFIBUS paketlerinin IEEE 802.16 paketleri içerisinde kapsullendiği önerilmektedir.

Tasarlanan PROFIBUS/IEEE 802.16-WiMAX arabağlaşım birimi, geçit çıkış tampon boyutu, geçit giriş tampon boyutu, master istasyon jeton tutma süresi ve geçit PROFIBUS ayağı jeton tutma süresi parametrelerine bakılarak değerlendirilmiştir. Benzetimlerden alınan sonuçlar, arabağlaşım biriminin, farklı yükler altında yeterli bir hizmet sağladığını ve fiziksel gerçekleştirmesini yapacak olan kişiler için de başarımı ölçülebilir bir tasarım modeli sunduğunu göstermektedir.