

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İLETİŞİM TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİNİN SONLU DURUM
OTOMATLARI İLE MODELLENMESİ VE MERKEZİ OLMAYAN HİYERARŞİK
KONTROLÜ**

CEM ATILGAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ÖZGÜR TURAY KAYMAKÇI**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İLETİŞİM TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİNİN SONLU DURUM
OTOMATLARI İLE MODELLENMESİ VE MERKEZİ OLMAYAN HİYERARŞİK
KONTROLÜ**

Cem ATILGAN tarafından hazırlanan tez çalışması 20.03.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Galip CANSEVER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Salman KURTULAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yoğun bir çalışmanın ardından nihayet yüksek lisans tezimi bitirmeyi başardım. Bu yola çıkarken attığım her adımda, karamsarlığa düştüğüm her anda tüm desteğiyle, anlayışıyla, hoşgörüsüyle, bilgisiyle ve yol göstericiliğiyle her zaman yanımda olan sevgili ve saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI'ya sonsuz minnetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte bana bir arkadaş gibi her anlamda destek olan ve yapabileceklerim konusunda her zaman cesaret veren, gösterdiği anlayış ve hoşgörüsü için bölüm başkanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Evren ÇAĞLARER hocama, her zaman derdimi, sıkıntımı dinleyen gittiğim bu yolda tecrübeleriyle ışık tutan sayın Dr. Öğr. Üyesi Gülcan İNER hocama ve bana manevi desteğini hiç esirgemeyen, yaptıkları değerli katkılar için değerli arkadaşlarım Kazım ZENGİN, Merve ZENGİN, Aykut HAVSUT, Muammer UĞUR, Adem AKPINAR ve ismini buraya sığdıramadığım tüm herkese buradan en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak en değerlilerim, beni yetiştiren, bugünlere getiren, herşeyden önce iyi bir insan olmam gerektiğini öğreten, ömürleri boyunca bugünlere gelmem için emek veren ve her koşul altında yılmadan sıkılmadan yanımda olan, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim canım babam Hasan ATILGAN, canım annem Emine ATILGAN ve canım kardeşim Ceren ATILGAN'a bana gösterdikleri sabır, verdikleri destek için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mart, 2019

Cem ATILGAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
AYRIK OLAYLI SİSTEMLER.....	4
2.1 Ayrık Olaylı Sistemlerin Temel Kavramları.....	4
2.2 Dil Tanımı ve Temel Kavramları.....	4
2.3 Dil Üzerine Tanımlı İşlemler.....	5
2.3.1 Dilin Önek Kapanışı	5
2.3.2 Dilin Kleene Kapanışı	6
2.3.3 Dilllerin Birbirine Eklenmesi	6
2.3.4 Doğal Projeksiyon İşlemi.....	6
2.3.5 Ters Projeksiyon İşlemi	6

2.4	Otomat Tanımı ve Temel Kavramları.....	7
2.4.1	Otomatlar Tarafından Üretilen Dil.....	9
2.4.2	Otomatlar Tarafından İşaretlenen Dil	10
2.5	Kilitlenme Olayı.....	10
2.6	Otomat Üzerine Tanımlı İşlemler.....	11
2.6.1	Erişilebilir Kısım.....	11
2.6.2	Çarpma İşlemi	12
2.6.3	Paralel Birleşim İşlemi.....	13
BÖLÜM 3		
DENETİMSSEL GÖZETLEYİCİ TEOREMİ.....		15
3.1	Denetimsel Gözetleyici Teorisi Temel Kavramları.....	15
3.2	Kontrollü Sistemde Kilitlenme Olayı.....	17
3.3	Kontrol Edilebilirlik Teorisi.....	18
3.3.1	En Büyük Kontrol Edilebilir Alt Dil	18
3.3.2	En Küçük Kontrol Edilebilir Önek Kapalı Üst Dil.....	18
3.4	Kilitlenmesiz Kontrol Edilebilirlik Teorisi.....	19
BÖLÜM 4		
MERKEZİ OLMAYAN VE HİYERARŞİK KONTROL.....		20
4.1	Merkezi Olmayan Kontrol (Dağıtılmış Kontrol).....	20
4.2	Hiyerarşik Kontrol.....	21
4.2.1	Hiyerarşik Daraltma	22
4.3	Merkezi Olmayan ve Hiyerarşik Kontrol.....	23
BÖLÜM 5		
İLETİŞİM TABANLI TREN KONTROLÜ (CBTC).....		26
5.1	Raylı Sistemlerde Sinyalizasyon.....	27
5.2	Sabit Blok Nedir?.....	27
5.3	Hareketli Blok Nedir?	28
5.4	İletişim Tabanlı Tren Kontrol Sistemlerinin Temel Kavramları.....	29
5.5	Otomatik Tren Kontrolü (ATC).....	31
5.5.1	Otomatik Tren Denetimi (ATS)	32
5.5.2	Otomatik Tren Koruması (ATP).....	33

5.5.2.1 Araç Üstü ATP (VATP)	33
5.5.2.2 Bölgesel ATP (RATP)	33
5.5.3 Otomatik Tren İşletimi (ATO).....	34
5.5.3.1 Araç Üstü ATO (VATO).....	34
5.5.3.2 Bölgesel ATO (RATO)	35
BÖLÜM 6	
TEORİNİN İLETİŞİM TABANLI TREN KONTROLÜNE UYGULANMASI	36
6.1 İletişim Tabanlı Tren Kontrolü Alt Sistemlerinin Otomat Modelleri	37
6.1.1 Araç Üstü Otomatik Tren Koruması (VATP).....	37
6.1.2 Bölgesel Otomatik Tren Koruması (RATP)	42
6.1.3 Araç Üstü Otomatik Tren İşletmesi (VATO)	46
6.1.4 Bölgesel Otomatik Tren İşletmesi (RATO)	48
6.1.5 Otomatik Tren Koruması (ATP) ve Otomatik Tren İşletimi (ATO)	49
6.2 Otomatik Tren Denetimi (ATS).....	50
6.3 ATS-ATO-ATP Genel Sistemi.....	51
6.4 Sanal Bölgeler.....	53
6.5 Makaslar.....	54
6.6 Sanal Bölge-1 ATS ATP ve ATO.....	55
6.7 Sanal Bölge-2 Makas-1 Makas-4 ATS ATP ve ATO.....	57
6.8 Sanal Bölgelerin Genel Hali.....	60
6.9 CBTC'nin Merkezi Olmayan ve Hiyerarşik Kontrol Yapısı.....	62
BÖLÜM 7	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR	65
EK-A	
SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	69
EK-B	
OLAYLAR TABLOSU.....	99

SİMGE LİSTESİ

Σ	Olaylar küme
L	Olay kümesinden meydana gelen dil
Σ^*	Olay kümesinin Klenee kapanışı
$\bar{L}^*$	L dilinin Klenee kapanışı
$\bar{L}$	L dilinin önek kapanışı
e	Olay
ε	Boş olay
s	Kelime
Σ_{uc}	Kontrol edilemeyen olaylar
Σ_c	Kontrol edilen olaylar
θ	Projeksiyon işlemi
P	Projeksiyon işlemi
θ^{-1}	Ters Projeksiyon işlemi
P^{-1}	Ters Projeksiyon işlemi
$Ac(G)$	G otomatının ulaşılabilir kısmı
G	Otomat
X	Durum kümesi
f	Geçiş fonksiyonu
x_0	Bir otomatın başlangıç durumu
X_m	Bir otomatın işaretli durumu
$L(G)$	Otomatın ürettiği dil
$L_m(G)$	Otomatın işaretlediği dil
$G_1 \times G_2$	İki otomatın çarpımı
$G_1 \parallel G_2$	İki otomatın paralel birleşimi
L_r	Kabul edilebilir ve izin verilen minimum gerekli davranış
L_a	Kabul edilebilir ve izin verilen maksimum gerekli davranış
L^c	Kontrol edilebilir dil
L_m^c	Kontrol edilebilir ve işaretlenen dil

S	Denetimsel gözetleyici
$L(S / G)$	G otomatının S tarafından denetlenmekte iken ürettiği dil
$L_m(S / G)$	G otomatının S tarafından denetlenmekte iken işaretlediği dil
K	Kabul edilebilir ve beklenen davranışı içeren dil
$K^{\uparrow C}$	K dilinin en büyük kontrol edilebilir alt dili
$K^{\downarrow C}$	K dilinin en küçük kontrol edilebilir örnek kapalı üst dili
Σ^{hi}	Üst seviye olay kümesi
L^{hi}	Üst seviye dil
L_m^{hi}	Üst seviye işaretlenen dil
G^{hi}	Üst seviye otomat
S^{hi}	Üst seviye denetimsel gözetleyici
s^{hi}	Üst seviye kelime
Γ	Aktif olaylar kümesi
S^{lo}	Alt seviye denetimsel gözetleyici
Com_{hilo}	Üst seviyeden alt seviyeye komut
Inf_{lohi}	Alt seviyeden üst seviyeye bilgi
Con_{hi}	Üst seviye denetimsel gözetleyiciden kontrol komutları
Inf_{hi}	Üst seviye denetimsel gözetleyiciye bilgi
Con_{lo}	Alt seviye denetimsel gözetleyiciden kontrol komutları
Inf_{lo}	Alt seviye denetimsel gözetleyiciye bilgi

KISALTMA LİSTESİ

ATO	Otomatik Tren İşletimi
ATP	Otomatik Tren Koruması
ATS	Otomatik Tren Denetimi
CBTC	İletişim Tabanlı Tren Kontrolü
DES	Ayrık Olaylı Sistemler
DFSA	Deterministik Sonlu Durumlu Otomat
FSA	Sonlu Durumlu Otomat
NDFSA	Deterministik Olmayan Sonlu Durumlu Otomat
RATO	Bölgesel Otomatik Tren İşletimi
RATP	Bölgesel Otomatik Tren Koruması
VATO	Araç Üstü Otomatik Tren İşletimi
VATP	Araç Üstü Otomatik Tren Koruması

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Ayrık olaylı sistemin davranışı	4
Şekil 2. 2 Deterministik sonlu otomat (DFSA)	8
Şekil 2. 3 Deterministik olmayan sonlu otomat (NDFSA)	9
Şekil 2. 4 Ölü kilit olayı	11
Şekil 2. 5 Canlı kilit olayı	11
Şekil 2. 6 G_1 ve G_2 otomatları	13
Şekil 2. 7 $G_1 \times G_2$ otomatı	14
Şekil 2. 8 $G_1 \parallel G_2$ otomatı	14
Şekil 3. 1 Denetimsel gözetleyici mimarisi	16
Şekil 4. 1 Merkezi olmayan kontrol mimarisi	21
Şekil 4. 2 Hiyerarşik kontrol mimarisi	22
Şekil 4. 3 Merkezi olmayan hiyerarşik kontrol mimarisi	25
Şekil 5. 1 Sabit blok	28
Şekil 5. 2 Hareketli blok	29
Şekil 5. 3 Hareketli blok ve sabit bloğun karşılaştırılması	29
Şekil 5. 4 CBTC mimarisi	30
Şekil 5. 5 CBTC genel sistem yapısı	31
Şekil 5. 6 ATC mimarisi	32
Şekil 5. 7 Otomatik tren kontrolü genel yapısı ve alt sistemleri	35
Şekil 6. 1 Üsküdar-Kısıklı metro hattı	36
Şekil 6. 2 Trenin izleyeceği rota	37
Şekil 6. 3 VATP düşük seviye otomat modeli (G_{VATP}^0)	38
Şekil 6. 4 VATP için belirlenen tanımlamalar ($D_{VATP-1}^0, D_{VATP-2}^0$)	40
Şekil 6. 5 VATP'nin kontrollü davranışı (R_{VATP}^0)	41
Şekil 6. 6 VATP'nin üst seviye otomat modeli (G_{VATP}^1)	42
Şekil 6. 7 VATP'nin alt seviye ve üst seviye mimarisi	42
Şekil 6. 8 RATP düşük seviye otomat modeli (G_{RATP}^0)	43
Şekil 6. 9 RATP için belirlenen tanımlamalar ($D_{RATP-1}^0, D_{RATP-2}^0$)	44
Şekil 6. 10 RATP'nin kontrollü davranışı (R_{RATP}^0)	45

Şekil 6. 11 RATP'nin üst seviye otomat modeli (G_{RATP}^1)	46
Şekil 6. 12 RATP'nin alt seviye ve üst seviye mimarisi	46
Şekil 6. 13 VATO'nun kontrollü davranışı (R_{VATO}^0)	47
Şekil 6. 14 VATO'nin üst seviye otomat modeli (G_{VATO}^1).....	48
Şekil 6. 15 RATO'nun kontrollü davranışı (R_{RATO}^0)	48
Şekil 6. 16 RATO'nin üst seviye otomat modeli (G_{RATO}^1).....	49
Şekil 6. 17 $G_{ATP-ATO}^1$ sistemi için yapılan tanımlamalar	50
Şekil 6. 18 ATP-ATO'nun üst seviye otomat modeli ($G_{ATP-ATO}^2$)	50
Şekil 6. 19 ATS'nin kontrollü davranışı (R_{ATS}^0)	51
Şekil 6. 20 ATS-ATO-ATP'nin kontrollü davranışı ($R_{ATS-ATO-ATP}^2$)	52
Şekil 6. 21 ATS-ATO-ATP'nin üst seviye otomat modeli ($G_{ATS-ATO-ATP}^3$).....	53
Şekil 6. 22 Sanal bölgelerin (b) kontrollü davranışı (R_b^0)	53
Şekil 6. 23 Sanal bölge üst seviye otomat modeli ($G_b^1 = G_b^2 = G_b^3$)	54
Şekil 6. 24 Makasların (m) kontrollü davranışı (R_m^0)	54
Şekil 6. 25 Makasın üst seviye otomat modeli($G_m^1 = G_m^2 = G_m^3$).....	55
Şekil 6. 26 Sanal bölge-1 (b_1), ATS, ATP ve ATO kontrollü davranışı ($R_{b_1-ATS-ATP-ATO}^3$) ...	56
Şekil 6. 27 Sanal bölge-1 (b_1), ATS, ATP ve ATO üst seviye modeli ($G_{b_1-ATS-ATP-ATO}^4$)	56
Şekil 6. 28 b_1 , ATS, ATP ve ATO merkezi olamayan hiyerarşik kontrol mimarisi	57
Şekil 6. 29 b_2 , m_1 , m_4 , ATS, ATP ve ATO kontrollü davranışı ($R_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3$)	58
Şekil 6. 30 b_2 , m_1 , m_4 , ATS, ATP ve ATO üst seviye modeli ($G_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^4$)	59
Şekil 6. 31 b_2 , m_1 , m_4 , ATS, ATP ve ATO merkezi olamayan ve hiyerarşik mimarisi	59
Şekil 6. 32 Bölge-1 ve bölge-2 kontrollü davranışı ($R_{bölge1-bölge2}^4$)	60
Şekil 6. 33 Bölge-1 ve bölge-2 üst modeli($G_{bölge1-bölge2}^5$)	61
Şekil 6. 34 CBTC'nin merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol yapısı.....	62
Şekil A. 1 VATP kontrolsüz davranış modeli ilk durum	69
Şekil A. 2 VATP kontrollü davranış modeli ilk durum	70
Şekil A. 3 VATP üst seviye modeli ilk durum	70
Şekil A. 4 checkregion olayında denetimsel gözetleyici davranışı.....	71
Şekil A. 5 checkregion olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar	72
Şekil A. 6 VATP kontrolsüz davranış modeli obtainalltrainslaocation olayı.....	73
Şekil A. 7 VATP kontrollü davranış modeli obtainalltrainslaocation olayı.....	74
Şekil A. 8 VATP üst seviye modeli obtainalltrainslaocation olayı	74
Şekil A. 9 obtainalltrainslocation olayında denetimsel gözetleyici davranışı	75
Şekil A. 10 obtainalltrainslocation olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar	76
Şekil A. 11 VATP kontrolsüz davranış modeli getinfoRATP olayı	77
Şekil A. 12 VATP kontrollü davranış modeli getinfoRATP olayı	78
Şekil A. 13 VATP üst seviye modeli getinfoRATP olayı.....	78

Şekil A. 14 getinfoRATP olayında denetimsel gözetleyici davranışı	79
Şekil A. 15 getinfoRATP olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar	80
Şekil A. 16 VATP kontrolsüz davranış modeli checkdoor olayı	81
Şekil A. 17 VATP kontrollü davranış modeli checkdoor olayı	82
Şekil A. 18 VATP üst seviye modeli checkdoor olayı	82
Şekil A. 19 checkdoor olayında denetimsel gözetleyici davranışı.....	83
Şekil A. 20 checkdoor olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar.....	84
Şekil A. 21 VATP kontrolsüz davranış modeli closedoor-opendoor olayı.....	85
Şekil A. 22 VATP kontrollü davranış modeli closedoor-opendoor olayı	86
Şekil A. 23 VATP üst seviye modeli closedoor-opendoor olayı.....	86
Şekil A. 24 VATP kontrolsüz davranış modeli trainwait olayı	87
Şekil A. 25 VATP kontrollü davranış modeli trainwait olayı.....	88
Şekil A. 26 VATP üst seviye modeli trainwait olayı	88
Şekil A. 27 VATP kontrolsüz davranış modeli checkdoor olayı	89
Şekil A. 28 VATP kontrollü davranış modeli checkdoor olayı	90
Şekil A. 29 VATP üst seviye modeli checkdoor olayı.....	90
Şekil A. 30 VATP kontrolsüz davranış modeli lockdoor olayı.....	91
Şekil A. 31 VATP kontrollü davranış modeli lockdoor olayı	92
Şekil A. 32 VATP üst seviye modeli lockdoor olayı	92
Şekil A. 33 VATP kontrolsüz davranış modeli controlPSDdoor olayı	93
Şekil A. 34 VATP kontrollü davranış modeli controlPSDdoor olayı.....	94
Şekil A. 35 VATP üst seviye modeli controlPSDdoor olayı	94
Şekil A. 36 VATP kontrolsüz davranış modeli sendinfoATS olayı.....	95
Şekil A. 37 VATP kontrollü davranış modeli sendinfoATS olayı	96
Şekil A. 38 VATP üst seviye modeli sendinfoATS olayı.....	96
Şekil A. 39 VATP sistemi denetimsel gözetletiyici davranışları.....	98

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge B.1 Olaylar Tablosu	99

**İLETİŞİM TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİNİN SONLU DURUM
OTOMATLARI İLE MODELLENMESİ VE MERKEZİ OLMAYAN HİYERARŞİK
KONTROLÜ**

Cem ATILGAN

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI

Bu çalışmadaki amacımız, İletişim Tabanlı Tren Kontrol sistemleri (CBTC) ve ayrık olaylı sistemlerin (DES) ayrıntılı olarak incelenmesi, sistemin sonlu durum otomatları (FSA) ile modeli çıkartılmasıdır. Ayrıca sistemin denetimi ve kontrolü için hiyerarşik kontrol modeli ve merkezi olmayan kontrol modeli birleştirilerek merkezi olmayan hiyerarşik kontrol mimarisinin kurulmasıdır. Diğer yandan teoremin uygulanacağı alan olarak seçilen tren kontrol sistemlerinden hareketli blok sisteminin detaylı incelenmesidir. Daha sonra sistemin modelleri bilgisayar ortamında başarılı bir şekilde yapılmış ve sistemin davranışını düzenlemek için gerekli gözetimsel denetleyici tasarımları istenildiği gibi elde edilmiştir. Elde edilen modeller ve gözetimsel denetleyicilerin simulasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sayede sistemin davranışı gözlemlenmiştir. Oluşturulan modeller ve gözetimsel denetleyicilerle yukarıda bahsettiğimiz merkezi olmayan hiyerarşik kontrol yapısı başarılı bir şekilde kurulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İletişim tabanlı tren kontrolü, ayrık olaylı sistemler, merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol, sonlu durum otomatlar, gözetimsel denetleyici

DECENTRALIZED AND HIERARCHICAL CONTROL OF COMMUNICATION BASED TRAIN CONTROL AND MODELLING SYSTEM WITH FINITE STATE AUTOMATA

Cem ATILGAN

Department of Control and Automation Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI

The aim of this study is to investigate communication-based train control systems and discrete event systems in detail and to model the system with finite state automats. It is also the establishment of a decentralized hierarchical control architecture by combining a hierarchical control model and a decentralized control model for supervisory control of the system. On the other hand, it is a detailed examination of the moving block system from the train control systems selected as the area where the theory will be applied. Then, the models of the system were successfully made in computer environment and the control designs required to regulate the behavior of the system were obtained as desired. Simulation results of obtained models and supervisory controllers were obtained. In this way, the behavior of the system was observed. In this way, the behavior of the system was observed. The decentralized hierarchical control structure mentioned above has been successfully established with the models and controllers.

Keywords: Communication based train control, discrete event systems, decentralized and hierarchical control, finite state automaton, supervisory control



YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüz dünyasında teknoloji hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Teknoloji sayesinde gündelik işlerimizi daha kolay bir şekilde ve daha kısa sürelerde yapabilmekteyiz. Teknolojinin hayatımıza kazandırdığı yeniliklerden biride hiç şüphesiz akıllı sistemlerdir. Bu sistemler insan ihtiyaçlarına en kısa sürede cevap verebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Akıllı sistemler birçok alanda yer edinmeye başlamıştır. Bu alanlardan biride ulaşımdır.

Artan dünya nüfusu ve giderek kalabalıklaşan şehirlerimiz için akıllı sistemler çok önemli bir yere gelmiştir. Özellikle büyük şehirlerde insan sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Kalabalık şehirlerdeki en büyük problemlerden biri ulaşımdır. Ulaşım alanındaki en önemli şey insanları gitmek istediği yere doğru ve zamanında ulaştırmaktır. Buradan hareketle ulaşım sistemlerinde zamanlama çok önemli bir noktadır. Örneğin, bir metro için, trenlerin maksimum verimi, demiryolunun durumuna, trenlerin durumuna ve zamanlamasına bağlıdır. Zamanlama ve verim için trenlerin rayları maksimum dolulukla kullanması gerekir. Sabit bloklu sistemler gibi geleneksel sistemler metro hatlarının tam verimli kullanılması için yetersiz kalmakta ve zaman kaybına sebep olmaktadır. Diğer yandan hareketli blok sistemler ile tren hatları maksimum verimle çalışabilmektedir. Aynı zamanda hareketli blok sistemi ile zaman tasarrufu sağlanmaktadır. Hareketli blok sistem sayesinde trenler sürekli olarak tren kontrol merkezi ve kendi aralarında haberleşir. Bu sayede ray hatları maksimum verimle kullanılır. Günümüz dünyasında hareketli blok sistemleri hakkında yoğun bir çalışma vardır. Bu çalışmalardan biri (CBTC) iletişim tabanlı tren kontrolüdür.

1.1 Literatür Özeti

Ayrık olaylı sistemlerin kontrolü için denetimsel gözetleyici yaklaşımı ilk olarak Ramadge and Wonham[1][2] tarafından ileri sürülmüştür. Fakat birçok alt sistemden meydana gelen büyük sistemler için yekpare bir denetimsel gözetleyici tasarımı çok zor bir hal almıştır. Bir sistemde çok fazla alt sistem varsa alt sistemlerin tüm dinamiklerinin kontrol edilmesi gerekir, yekpare yaklaşımda sistemin tüm alt sistemlerini kapsayacak şekilde hareket edildiğinden burada bir durum uzayı patlaması meydana gelmektedir. Bu da sistemin modellerinin karmaşıklığına ve denetimsel gözetleyici hesabının hesaplama süresinin çok zaman almasına neden olmaktadır. Meydana gelen durum uzayı patlaması, karmaşıklık ve hesaplama süresinin azaltılması için çeşitli çalışmalar yapılmıştır: Zhong ve Wonham 1990[3]; Rudie ve Wonham 1992[4]; Wong ve Wonham 1996[5]; Yoo ve Lafortune 2002[6]; Jiang, Kumar, Takai ve Qiu 2010[7]; Hubbard ve Caines 2002[8]; Cunha, Cury ve Krogh 2002[9]; Lee ve Wong 2002[10]. Merkezi olmayan kontrol mimarisi Lee ve Wong 2002[10] tarafından önerilmiştir. Bu mimaride paylaşılan olaylarla birleştirilen birçok alt sistemden meydana gelen sistemin modelleri ele alınır. Her bir alt sistem için sistem davranışını barındıran tanımlamalar yapılır. Bu tanımlamalarla denetimsel gözetleyici hesabı yapılır. Diğer yandan hiyerarşik kontrol yapısı mimarisi Zhong ve Wonham 1990[3]; Hubbard ve Caines 2002[8]; Cunha, Cury ve Krogh 2002[9] tarafından önerilmiştir. Bu mimaride ise hiyerarşik seviyeler oluşturulur ve her bir seviye için denetimsel gözetleyici hesabı yapılır. Her iki yapının birleştirilerek elde edilen merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol Schmidt, Reger ve Moor 2004[11]; Schmidt, Moor ve Perk 2005[12] Schmidt, Moor ve Perk 2008[13] tarafından çalışılmıştır.

Diğer yandan iletişim tabanlı tren kontrolünün sistem yapısını anlatan çeşitli çalışmalarda mevcuttur. Bu çalışmalardan Siahvashi ve Moaveni 2010[14]; Tang, Liu, Wang 2013[15]; Yin, Tang, Yang, Xu, Hurang ve Gao, 2017[16]; Farooq ve Soler 2017[17]; Âlvarez ve Crocker 2018[18]; iletişim tabanlı tren kontrol sistemini detaylı bir şekilde anlatmaktadır. Bu çalışmalarda iletişim tabanlı tren kontrol sisteminin tüm alt sistemleri açıklanarak sistemin altyapısını oluşturan bileşenlerden ve teknolojiden ayrıntılı bir şekile anlatılmaktadır. Bunun yanında iletişim tabanlı tren kontrolünün matematiksel teorisi ayrıca bu çalışmalar da işlenmektedir.

1.2 Tezin Amacı

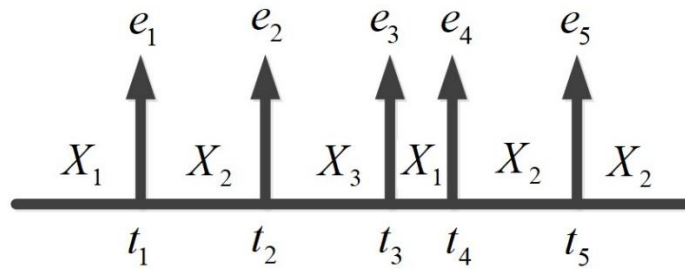
Bu tezin amacı birçok alt sistemden meydana gelen iletişim tabanlı tren kontrol sistemini alt sistemlere ayırarak her bir sistem için ayrı ayrı denetimsel gözetleyici hesabının yapılması ve iletişim tabanlı tren kontrol sisteminin alt sistemlerinin yapısal olarak merkezi olmayan hiyerarşik kontrol mimarisinin elde edilmesidir. Böylelikle ayırık olaylı bir sistem olan iletişim tabanlı tren kontrolünün durum uzayı patlaması minimize edilerek karmaşıklığın azaltılması ve denetimsel gözetleyici hesaplama süresinin azaltılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yapılan bu çalışmada iletişim tabanlı tren sistemi, alt sistemlere ayrılarak her bir alt sistem için sistem davranışını ifade eden modeller geliştirilmiştir. Bu modellerde istenilmeyen davranışları önlemek ve sistemin istenilen davranışa yakınsamak için sistemi gözlemleyen ve denetim yapan denetimsel gözetleyici tasarımı yapılmıştır. Elde edilen modeller ve denetimsel gözetleyiciler ile merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol mimarisi elde edilmiştir. Son olarak elde edilen modellerin teoriyle karşılaştırılması yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar simüle edilmiştir ve simülasyon sonuçları hem merkezi olmayan hiyerarşik kontrol mimarisi hem de monolitik yaklaşım için elde edilmiştir.

AYRIK OLAYLI SİSTEMLER**2.1 Ayrik Olaylı Sistemlerin Temel Kavramları**

Ayrik olaylı sistemler (DES), zamana bağlı olarak değişen sistemlerden farklı olarak diferansiyel denklemlerle ifade edilemezler. Ayrik olaylı sistemlerde iki önemli kavram bulunmaktadır. Bunları durumlar ve olaylar olarak sıralayabiliriz. Ayrik olaylı sistemlerde herhangi bir anda meydana gelen bir olay sistem durumunu değiştirir. Kısaca bir olay meydana geldiğinde ayrik olaylı sistem durum değiştirir. Diğer yandan aşağıdaki şekilden görüldüğü üzere meydana gelen her olay durum değişikliği meydana getirmeyebilir.[1]



Şekil 2. 1 Ayrik olaylı sistemin davranışı

2.2 Dil Tanımı ve Temel Kavramları

Ayrik olaylı sistemlerde meydana gelecek mantıksal davranışları sınıflandırmak ve bu davranışları incelemek için kullanabileceğimiz alternatiflerden birisi dildir. Ayrik olaylı sistemlerin dinamiğini etkileyen parametre olaydır. Ayrik olaylı sistemi etkileyen olaylar

kümesini Σ sembolü ile ifade ederiz. Olaylar bir araya gelerek kelimeleri oluşturur. Kelimelerden meydana gelecek kümeye ise dil adını veririz. Dil sonlu uzunluklu kelimelerden oluşur. Dili L harfi ile ifade ederiz. Örneğin, $\Sigma = \{e_1, e_2, e_3\}$ olay kümesini gösterir. $L = \{\varepsilon, e_1, e_2, e_1e_2, e_1e_2e_3, e_1e_2e_3e_1\}$ kümesi olaylardan meydana gelen dili ifade eder. Burada ε hiçbir olaydan oluşmayan boş kelimeyi ifade ederken $e_1e_2e_3$ ise bir kelimeyi ifade eder. [19]

2.3 Dil Üzerine Tanımlı İşlemler

Σ sembolü olay kümesini ifade ederken bu kümenin olaylarıyla oluşturulabilecek bütün sonlu kelimelere olay kümesinin Kleene kapanışı adı verilir. Σ^* sembolü ile gösterilir. $\Sigma^* = \{\varepsilon, e_1, e_2, e_3, e_1e_1, e_1e_2, e_1e_3, e_2e_1, e_2e_2, e_2e_3, e_3e_1, e_3e_2, e_3e_3, e_1e_1e_1, e_1e_1e_2, \dots\}$ ile ifade edilebilir. Buradan şu sonuca varabiliriz. Σ olay kümesi ile oluşturulabilecek her dil kümesi aslında Σ^* kümesinin bir alt kümesidir. $L \subseteq \Sigma^*$ olarak ifade edilebilir. s harfi Σ^* kümesinde tanımlı bir kelimeyi ifade eder ve $s \in \Sigma^*$ olsun. $s = e_1e_2e_3$ kelimesinde e_1 olayı s kelimesinin öneki e_2 olayı s kelimesinin altkelimesi ve e_3 olayı s kelimesinin son eki olarak adlandırılır. Diğer bir deyişle s kelimesinin öneki olan e_1 en başta meydana gelen olay, e_2 olayı e_1 olayından sonra meydana gelen olay ve e_3 olayı en sonda meydana gelen olayı ifade etmektedir.[19]

2.3.1 Dilin Önek Kapanışı

Σ olay kümesi olmak üzere bu olay kümesinden üretilecek bir L dilinin önek kapalı olmasının şartı L dilinin içerdiği kelimelerin öneklerini de bulundurmasıdır. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir. $L \subseteq \Sigma^*$ olsun. $\bar{L} = \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*)[st \in L]\}$ olarak ifade edilir. Burada L dilin önek kapalı olduğu $\bar{L}$ sembolü ile gösterilir. Genelde L dili $\bar{L}$ dilinin alt kümesidir. ($L \subseteq \bar{L}$) [19]

2.3.2 Dilin Kleene Kapanışı

Σ olay kümesi olmak üzere, bir L dilinin Kleene kapanışı $L^* = \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \dots$ eşitliği ile ifade edilir. Diğer yandan $L^* \subseteq \Sigma^*$ ifadesi daima sağlanır. [19]

2.3.3 Dillerin Birbirine Eklenmesi

L_1 ve L_2 birbirinden farklı iki dil ve $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$ olmak üzere $L_1 L_2 = \{s \in \Sigma^* : (s = s_1 s_2), (s_1 \in L_1), (s_2 \in L_2)\}$ L_1 ve L_2 dillerinin birbirine eklenmesi ya da bağlanması olarak ifade edilir. Örneğin $L_1 = \{e_1, e_2, e_3, e_2 e_2, e_3 e_1\}$ ve $L_2 = \{\varepsilon, e_1\}$ birbirinden farklı iki dil olmak üzere bu iki dilin birbirine bağlanması sonucu elde edilen dil $L_1 L_2 = \{e_1 \varepsilon, e_2 \varepsilon, e_3 \varepsilon, e_2 e_2 \varepsilon, e_3 e_1 \varepsilon, e_1 e_1, e_2 e_1, e_3 e_1, e_2 e_2 e_1, e_3 e_1 e_1\}$ olur. [19]

2.3.4 Doğal Projeksiyon İşlemi

Doğal projeksiyon ya da kısaca projeksiyon işleminde biri büyük Σ_l ve diğeri küçük Σ_s olan iki olay kümesi bulunmaktadır. $\Sigma_s \subseteq \Sigma_l$, küçük olan olay kümesi daha büyük olay kümesinin alt kümesidir. Projeksiyon işlemi büyük olan dil kümesinden bir kelime alır ve aldığı bu kelimede küçük olay kümesine ait olmayan olayları siler. Projeksiyon işlemi P harfi ifade edilir. [19]

$$P : \Sigma_l^* \rightarrow \Sigma_s^* \quad (2.1)$$

$$P(\varepsilon) = \varepsilon \quad (2.2)$$

$$P(e) = \begin{cases} e & \text{eğer } e \in \Sigma_s \\ \varepsilon & \text{eğer } e \in \Sigma_l \setminus \Sigma_s \end{cases} \quad (2.3)$$

$$P(se) = P(s)P(e) \text{ için } s \in \Sigma_l^*, e \in \Sigma_l \quad (2.4)$$

2.3.5 Ters Projeksiyon İşlemi

Daha küçük olay kümesinde (Σ_s) bir kelime göz önüne alındığında, ters projeksiyon işlemi, verilen kelimeye projeksiyon işlemi yapılarak büyük olay kümesinden (Σ_l) tüm kelimelerin kümesini döndürür. Ters projeksiyon işlemi P^{-1} ile ifade edilir.

$$P^{-1} : \Sigma_s^* \rightarrow 2^{\Sigma_l^*} \quad (2.5)$$

$$P^{-1}(t) = \{s \in \Sigma_l^* : P(s) = t\} \quad (2.6)$$

$$L \subseteq \Sigma_l^* \text{ için}$$

$$P(L) = \{t \in \Sigma_s^* : (\exists s \in L) [P(s) = t]\} \quad (2.7)$$

$$P^{-1}(L_s) = \{s \in \Sigma_s^* : (\exists t \in L_s) [P(s) = t]\} \quad (2.8)$$

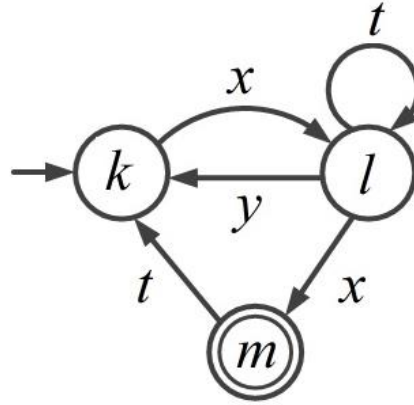
2.4 Otomat Tanımı ve Temel Kavramları

Ayrık olaylı sistemlerin davranışlarını diller yardımıyla ifade edebiliriz. Fakat davranış diller ile ifade etmenin getirdiği bazı kısıtlar vardır. Örnek olarak birçok sistemde, sistem davranışına ait olan dil, çok büyük veya sonsuz bir kümeye dönüşebilmektedir. Diğer yandan bu dil modelinin analiz ve denetleyici tasarımı aşamasında karşılaşılan zorluklar bir diğer kısıtlardır. Bu kısıtları otomatlar sayesinde ortadan kaldırabiliriz. Otomat modeliyle ayrık olay sistemlerin davranışını ifade eden dil kümesi elde edilebilir ve sonlu olarak ifade edilebilir. Bu sayede ayrık olaylı sistemlerin dinamikleri daha kolay modellenebilir ve sistem davranışına ait bütün dil kümeleri elde edilebilir. Otomatlar ayrık olaylı sistem davranışının biçimsel olarak gösterimidir. Bu biçimsel formatta bulunan daireler durumları ifade ederken, daireler arasında geçiş sağlayan oklar ise olayları ifade eder. Şekil 2.2 'de bir otomat modeli örneği verilmiştir. Otomat modeline ait olan bazı kavramlar vardır. Başlangıç durumu, işaretli durum, geçiş fonksiyonu, durum kümesi ve olay kümesi bir otomat modelinin genel kavramları olarak sıralanabilir. Durum sayısı sonlu ise otomatları iki şekilde sıralayabiliriz.

- Deterministik sonlu otomat (Belirli)(DFSA)
- Deterministik olmayan sonlu otomat (Belirsiz)(NDFSA)

Deterministik ve deterministik olmayan otomatları açıklamadan önce genel bir otomat tanımına ilişkin açıklamalara bakarak otomatı yakından inceleyelim. Bir otomat literatürde G harfi ile ifade edilir. $G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ ise 5 sembol içermektedir. Bu sembollerini sırası ile açıklarsak:

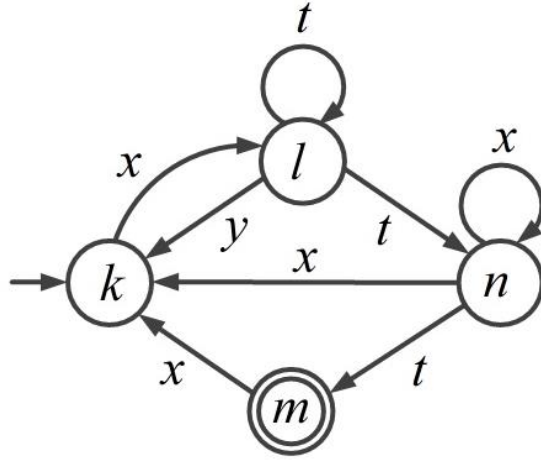
- $X \rightarrow$ Durum kümesini,
- $\Sigma \rightarrow$ Olay kümesini,
- $f \rightarrow$ Durum geçiş fonksiyonunu, ($f : X \times \Sigma \rightarrow X$)
- $x_0 \rightarrow$ Başlangıç durumunu,
- $X_m \rightarrow$ İşaretli durumlar kümesini ifade etmektedir. ($X_m \subseteq X$) [19]



Şekil 2. 2 Deterministik sonlu otomat (DFSA)

Deterministik sonlu otomatların bazı şartları sağlaması gerekmektedir. Bunlardan ilki otomattaki her durumlar arası geçiş sırasında meydana gelecek bir olayla sadece bir duruma gidilmesidir. Diğer bir deyişle belirsizlik olayının meydana gelmemesi için geçiş yapan olayın aynı anda iki farklı duruma gitmemesi gerekmektedir. Sağlaması gereken şartlardan bir diğeri durumlar arası geçiş işleminde boş kelime (ε) bulunmamalıdır. Son şart ise otomatın bir girdi için tek bir bitiş durumu kabul etmesidir.

Şekil 2.2’de $G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ beşlisini tanımlayalım. Burada durum kümesi $X = \{k, l, m\}$, olay kümesi $\Sigma = \{x, y, t\}$, başlangıç durumu $x_0 = \{k\}$ ve işaretli durum kümesi $X_m = \{m\}$ ’dir. Durum geçiş fonksiyonları ise $f(k, x) = l$, $f(l, t) = l$, $f(l, y) = k$, $f(l, t) = m$ ve $f(m, t) = k$ olarak ifade edilir. Burada Σ olay kümesindeki olaylarla oluşturulabilecek bir L dili içindeki $s = xttx$ kelimesinin durum geçiş fonksiyonunun sonucu ise $f(k, xttx) = f(f(f(f(k, x), t), t), x) = m$ durumu olur.



Şekil 2. 3 Deterministik olmayan sonlu otomat (NDFSA)

Deterministik olmayan sonlu otomatlar $G_{nd} = \{X, \Sigma \cup \{\varepsilon\}, f_{nd}, x_0, X_m\}$ ile ifade edilir.

Burada $f_{nd} = X \in \Sigma \cup \{\varepsilon\} \rightarrow 2^X$ olarak tanımlıdır.

Deterministik olmayan sonlu otomatlar durumlar arasında meydana gelen geçiş olaylarının birden fazla duruma götürebileceği yani meydana gelecek olayın sonucunun belli olmadığı otomatlardır. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere l durumunda t olayı meydana geldiğinde sonucu $f(l, t) = l$ ve $f(l, t) = n$ olan iki farklı duruma götürmektedir. Aynı şekilde n durumunda x olayı meydana geldiğinde $f(n, x) = n$ ve $f(n, x) = k$ yine iki farklı duruma meydana gelmektedir. Sonuç olarak böyle durumlar belirsizliğe neden olmaktadır.

2.4.1 Otomatlar Tarafından Üretilen Dil

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu bir otomat olmak üzere bu otomatın ürettiği dil şu şekilde tanımlıdır.

$$L(G) = \{s \in \Sigma^* : f(x_0, s) \text{ tanımlı} \} \text{ olarak ifade edilir. [19]}$$

Üretilen dil $L(G)$, otomat üzerinde ulaşılabilir bütün kelimeler kümesini ifade etmektedir. Diğer bir deyişle sistemin oluşabilecek bütün davranışlarını içerir.

Şekil 2.2 'de bulunan otomatı örnek olarak alırsak bu otomatın üreteceği dil

$$L(G) = \{\varepsilon, x, xy, xt, xtt, xty, xtx, xttx, xttt...tttx, \dots\}' \text{dir.}$$

2.4.2 Otomatlar Tarafından İşaretlenen Dil

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu bir otomat olmak üzere bu otomat tarafından işaretlenen dil şu şekilde tanımlıdır.

$$L_m(G) = \{s \in \Sigma^* : f(x_0, s) \in X_m\} \text{ olarak ifade edilir. [19]}$$

İşaretlenen dil $L_m(G)$, başlangıç durumundan başlayıp, olayların durum geçişi sonucu işaretli durumda biten kelimeler kümesini ifade etmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere işaretlenen dil kelime kümesinde sistemin bütün davranışlarını içermez.

Şekil 2.2 'de bulunan otomatı örnek olarak alırsak bu otomatın üreteceği işaretlenen dil

$$L_m(G) = \{xtx, xyxtx, xttxx, xttt...tttx,\}'dir.$$

2.5 Kilitlenme Olayı

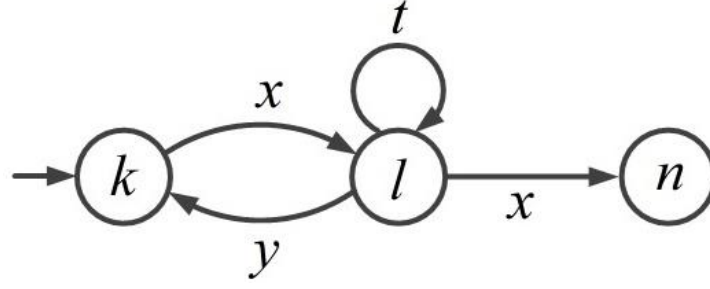
Yukarıdaki yapılan tanımlardan aşağıdaki ifade elde edilir.

$$L_m(G) \subseteq \overline{L_m(G)} \subseteq L(G) \text{ [19]}$$

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu bir otomat olmak üzere bu otomatın durum kümesindeki herhangi bir duruma durum geçiş fonksiyonu ile geçilmesi sonucu ulaştığı bu durumun işaretli durum olmaması ve bu durumdan başka bir duruma geçiş olmamasına ölü kilitlenme denir.

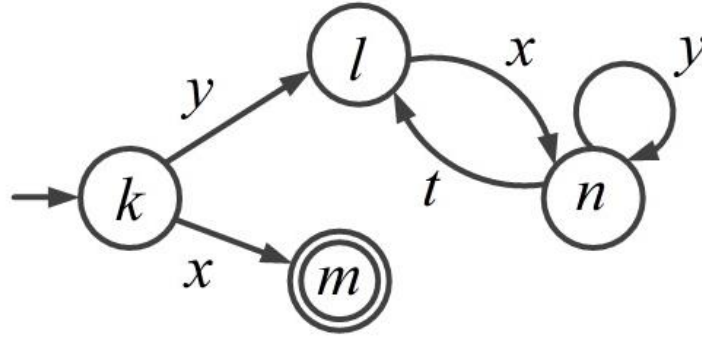
Diğer yandan bir otomatta bazı durumlarda birbiri arasında geçiş yapılabilirken, diğer durumlara geçiş yapılamayabilir. Bu aslında iki durum arasında sonsuz bir döngü anlamına gelir ve bu durumlardan herhangi biri işaretli durum kümesine ait değilse yine bir kilitlenme ortaya çıkmıştır. Bu kilitlenme türüne ise canlı kilitlenme adı verilir. Kilitlenmenin formal tanımı ise $\overline{L_m(G)} \subset L(G)$ 'dir. Buradan hareketle eğer $\overline{L_m(G)} = L(G)$ ise otomat kilitlenmesizdir. [19]

Kilitlenme olayını örneklerle açıklayacak olursak Şekil 2.4'te l durumunda sonra x olayı meydana geldiğinde sistem n durumuna geçmektedir ve n durumu işaretli durum kümesine ait olmayıp ayrıca n durumundan herhangi bir duruma geçiş söz konusu değildir. Böylece otomatta n durumunda ölü kilitlenme vardır.



Şekil 2. 4 Ölü kilit olayı

Şekil 2.5'te ise l olayından sonra x olayının meydana gelmesi sonucu sistem n durumuna geçmiştir bundan sonra meydana gelecek olan y olayı sistemi yine n durumuna, t olayı ise sistemi l durumuna götürecektir. Sistem tekrar l durumuna gelecektir fakat buradan başka bir duruma geçemeyecektir. Sistem burada x, y, t olayları ve l, n durumları ile bir kısır döngü halini almıştır ve bu durumlardan hiç biri işaretli durum kümesine ait değildir. Böylece l ve n durumunda canlı kilitlenme vardır.



Şekil 2. 5 Canlı kilit olayı

2.6 Otomat Üzerine Tanımlı İşlemler

Ayrık olaylı sistemlerin dinamiklerini ve davranışlarını otomatlar ile ifade ederken bu sistemlerin analizini yapabilmek, otomatlar arasında ilişki kurabilmek, otomatların ürettiği dili incelemek ve bu dil üzerinde değişiklik ve düzenleme yapabilmek için otomatlar üzerine bazı işlemler tanımlanmıştır.

2.6.1 Erişilebilir Kısım

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu bir otomat olmak üzere, erişilebilir kısım başlangıç durumundan başlayarak otomatın ulaşılabilinen tüm kollarını içeren otomata

denir. Diğer bir deyişle başlangıç durumundan başlayarak ulaşılamayan tüm durumlar ve bu durumlarla ilişkili olan tüm geçişler silinir. $Ac(G)$ ile sembolize edilir.[19][20][21][22]

Matematiksel ifadesi ise:

$$Ac(G) = (X_{ac}, \Sigma, f_{ac}, x_0, X_{ac,m}) \text{ iken} \quad (2.9)$$

$$X_{ac} = \{x \in X : \exists s \in \Sigma^* (f(x_0, s))\} \quad (2.10)$$

$$X_{ac,m} = X_m \cap X_{ac} \quad (2.11)$$

$$f_{ac} = X_{ac} \times \Sigma \rightarrow X_{ac} \quad (2.12)$$

2.6.2 Çarpma İşlemi

G_1 ve G_2 birbirinden farklı iki deterministik otomat olsun. İki otomatın çarpım işlemi $(\times)$ ile gösterilir ve G_1 ve G_2 otomatlarının çarpımının tanımı şöyle ifade edilir.

$G_1 = (X_1, \Sigma_1, f_1, x_{1,0}, X_{m,1})$ ve $G_2 = (X_2, \Sigma_2, f_2, x_{2,0}, X_{m,2})$ olmak üzere

$$G_1 \times G_2 = Ac(X_1 \times X_2, \Sigma_1 \cap \Sigma_2, f, (x_{1,0}, x_{2,0}), X_{1,m} \times X_{2,m}) \quad (2.13)$$

$$f((x_1, x_2), e) = \begin{cases} f_1(x_1, e), f_2(x_2, e) & \text{eğer } e \in f_1(x_1) \cap f_2(x_2) \\ \text{tanımsız} & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.14)$$

Çarpım olayında $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$ ifadesinden anlaşılacağı üzere her iki otomatında olay kümesinde ortak olaylar bulunmalıdır. Bu ortak olay her iki otomat içinde aynı anda meydana gelmelidir. Böylece bu ortak olay meydana geldiğinde her iki otomattada geçiş meydana gelir. Her iki otomatta ortak olmayan olaylar çarpım işleminde bir geçiş meydana getirmez. Buradan hareketle şu sonuçlara ulaşılır. [19]

Otomatın ürettiği dil

$$L(G_1 \times G_2) = L(G_1) \cap L(G_2) \quad (2.15)$$

Otomatın işaretlediği dil

$$L_m(G_1 \times G_2) = L_m(G_1) \cap L_m(G_2) \text{ olarak ifade edilir.} \quad (2.16)$$

2.6.3 Paralel Birleşim İşlemi

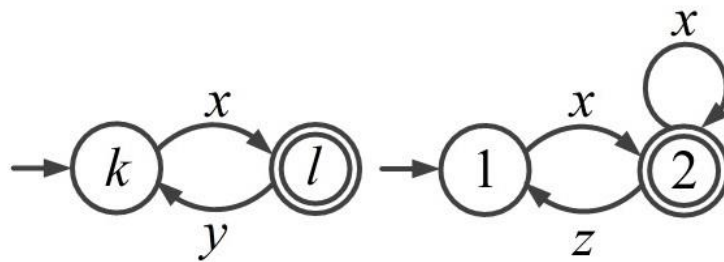
G_1 ve G_2 birbirinden farklı iki deterministik otomat olsun. İki otomatın paralel birleşim işlemi ($\parallel$) ile gösterilir ve G_1 ve G_2 otomatlarının paralel birleşiminin tanımı şöyle ifade edilir. [19]

$G_1 = (X_1, \Sigma_1, f_1, x_{1,0}, X_{m,1})$ ve $G_2 = (X_2, \Sigma_2, f_2, x_{2,0}, X_{m,2})$ olmak üzere

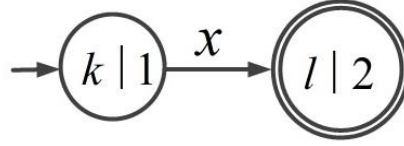
$$G_1 \parallel G_2 = Ac(X_1 \times X_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, f, (x_{1,0}, x_{2,0}), X_{1,m} \times X_{2,m}) \quad (2.17)$$

$$f((x_1, x_2), e) = \begin{cases} (f_1(x_1, e), f_2(x_2, e)) & \text{eğer } e \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2 \\ (f_1(x_1, e), x_2) & \text{eğer } e \in \Sigma_1 \setminus \Sigma_2 \\ (x_2, f_2(x_2, e)) & \text{eğer } e \in \Sigma_2 \setminus \Sigma_1 \\ \text{tanımsız} & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.18)$$

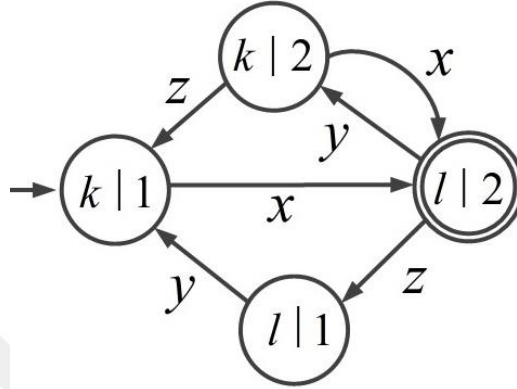
Tanımdan anlaşılacağı üzere paralel birleşim işleminde de çarpım işleminde olduğu gibi her iki otomatın da olay kümesinde ortak olay olmalı ve bu olaylar her iki otomat içinde aynı zamanda oluşmalıdır. Paralel birleşim işleminde çarpım işleminden farklı olarak her iki otomatın kendine ait olan yani ortak olmayan olaylar için aynı anda oluşma şartı yoktur ve bu olaylarda geçiş sonucu durum değişikliği meydana getirir.



Şekil 2. 6 G_1 ve G_2 otomatları



Şekil 2. 7 $G_1 \times G_2$ otomatu



Şekil 2. 8 $G_1 \parallel G_2$ otomatu

DENETİMSSEL GÖZETLEYİCİ TEOREMİ

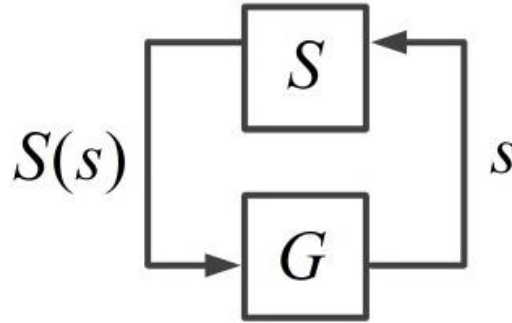
3.1 Denetimsel Gözetleyici Teorisi Temel Kavramları

Bir önceki bölümde ayrık olaylı sistemlerin davranışlarının dil ve otomatlar yardımıyla ifade edilebileceğinden bahsettik. Ayrık olaylı sistemlerin tüm davranışları sistemin doğru ve istenilen şekilde çalışmasını sağlayan durumları içermez. Bu davranışlardan bazıları sistemi kilitlemeye sokabileceği gibi bazı davranışlar ise sistemi fiziksel olarak kabul edilemeyecek durumlara sokabilir. Bu durumlara, bir üretim hattında konveyör bantların ani şekilde hareket yönünü değiştirmesi, konveyör bant üzerinde karşılıklı çalışan robot kolların çarpışması örnek olarak verilebilir. Bu tür durumlar sistem açısından istenilen ve kabul edilebilir davranış türü değildir. Buradan hareketle sistemin sahip olduğu davranış bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu kontrol mekanizmasıyla sistem davranışı denetlenebilir ve sistemin istenilmeyen davranışları kısıtlanabilir. Bu kontrol mekanizması denetimsel gözetleyici olarak adlandırılır ve S harfi ile ifade edilir. Teknik olarak S denetimsel gözetleyicinin yaptığı iş, sistemin ürettiği dili sistemin istenilen davranışına yakınsaması için üretilen dilin bir alt kümesine sınırlandırmasıdır. Bu sınırlama işlemi S denetimsel gözetleyicisi ile, geribesleme yoluyla yapılır. Diğer bir deyişle S denetimsel gözetleyici sistemde oluşan olayları gözlemler, bu gözlem sonucunda sistemi istenilen davranışa getirmek için bazı olayların gerçekleşmesine izin verirken bazı olayların gerçekleşmesini engeller. Denetimsel gözetlemenin sonucu olarak sistem tarafında üretilen dil, kontrolsüz sistem tarafından üretilen dilin bir alt kümesi olur. Birçok durumda bu alt dil tek bir dile karşılık gelmez bir

alt dil grubuna karşılık gelir. Denetimsel gözetleyici uygulanarak elde edilecek alt dilleri şöyle sıralayabiliriz.

- $L_r \rightarrow$ kabul edilebilir ve izin verilen minimum gerekli davranış
- $L_a \rightarrow$ kabul edilebilir ve izin verilen maksimum sistem davranış

Sonuç olarak denetimsel gözetleyici ile elde edilecek dil L olduğunda ve denetimsel gözetleyici olmadan oluşan dil $L(G)$ olmak üzere $L_r \subseteq L \subseteq L_a \subseteq L(G)$ elde edilir. Denetimsel gözetleyici S , sistemde meydana gelen bütün olaylar üzerinde etki göstermeyebilir. Çünkü olay kümesi sadece kontrol edilebilen olaylardan oluşmaz, olaylar kümesi ayrıca kontrol edilemeyen olayları da içermektedir. Buradan hareketle aslında olay kümesi $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc}$ olarak ifade edilebilir. Burada Σ_c kontrol edilebilen olayları ifade ederken, Σ_{uc} kontrol edilemeyen olayları ifade etmektedir. Kontrol edilebilen olaylara bir motorun kontrolü örnek olarak verilebilirken kontrol edilemeyen olaylara sistemin arıza ortaya çıkarması veya sensör bilgisi örnek verilebilir. Denetimsel gözetleyici S kontrol edilebilen olaylar üzerinde etki gösterirken, kontrol edilemeyen olaylar üzerinde bir etki gösteremez. Buradan anlaşılacağı gibi kontrol edilemeyen olaylara denetimsel gözetleyici S tarafından daima izin verilir.



Şekil 3. 1 Denetimsel gözetleyici mimarisi

Şekil 3.1’de verilen kontrol yapısı G otomatının S tarafından denetlenmekte olduğunun göstergesidir. Bu ifadenin teknik olarak gösterimi ise S/G ’dir. Buradan hareketle G otomatının S tarafından denetlenmekte iken ürettiği dil $L(S/G)$ ve işaretlediği dil $L_m(S/G)$ ile ifade edilir.[1][19][23][26]

S/G tarafından üretilen dil aşağıdaki gibi tanımlıdır:

$$\varepsilon \in L(S / G)$$

$$[(s \in L(S / G)) \text{ ve } (s\sigma \in L(G)) \text{ ve } (\sigma \in S(s))] \Leftrightarrow [s\sigma \in L(S / G)] \quad (3.1)$$

S / G tarafından işaretlenen dil aşağıdaki gibi tanımlıdır.

$$L_m(S / G) = L(S / G) \cap L_m(G) \quad (3.2)$$

Yukarıdaki tanımlardan açıkça görülmektedir ki $L(S / G) \subseteq L(G)$ dili önek kapalıdır.

Diğer bir deyişle $L(S / G) = \overline{L_m(S / G)}$ eşitliği sağlanır.

$$\text{En genel halde ise } \phi \subseteq L_m(S / G) \subseteq \overline{L_m(S / G)} \subseteq L(S / G) \subseteq L(G) \text{ 'dir.} \quad (3.3)$$

Buradan anlaşılacağı üzere denetimsel gözetleyici S , G otomatının davranışını alt kümelerle indirgemektedir. [19][20][24][26]

3.2 Kontrollü Sistemde Kilitlenme Olayı

Ayrık olaylı bir sistem için ve S denetimsel gözetleyici tarafından denetlenen sistem için sistemin kilitlenme şartı

$$L(S / G) \neq \overline{L_m(S / G)} \quad (3.4)$$

sistemin kilitlenmeme ya da kilitlenmesiz olma şartı

$$L(S / G) = \overline{L_m(S / G)} \quad (3.5)$$

ifadeleri ile gösterilir.

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ sonlu durumlu bir otomat olsun ve olay kümesi ise $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc}$ kontrol edilen ve kontrol edilemeyen olaylardan oluşsun. Kontrol edilemeyen olaylar denetimsel gözetleyici tarafından kontrol edilemediğinden dolayı sistemin beklenen davranışını sağlayacak olan denetleme davranışını sağlayan bir denetimsel gözetleyici her zaman elde edilemeyebilir. Buradan hareketle üretilen dil kontrol edilemeyen bu olaylarla genişletilebilir, diğer bir deyişle üretilen dilde istenmeyen davranışa sebep olan kelimeler bulunabilir. Bu sebeple, istenilmeyen kelimeleride içeren ve istenilen kontrol davranışını sağlayabilecek bir denetimsel gözetleyici ihtiyacı doğmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayacak şartı kontroledilebilirlik teorisi ile tanımlayabiliriz. [19]

3.3 Kontrol Edilebilirlik Teorisi

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu durumlu bir otomat ve kontrol edilemeyen olaylar kümesi $\Sigma_{uc} \subseteq \Sigma$ olsun, bir K dili tanımlı olsun, bu K dili uygulanan denetim altında sistemin kabul edilebilir ve beklenen hareketlerini içeren dil kümesi olsun. Buradan anlaşılaçağı üzere K dil kümesi üretilen dilin alt kümesidir ve S denetimsel gözetleyici denetimi altında meydana gelir. Buradan şu sonuçlara varabiliriz.

$$K \subseteq L(G) \quad (K \neq \emptyset) \quad (3.6)$$

$L(S / G) = \overline{K}$ eşitliğini sağlayabilme şartı ancak şu koşul altında gerçekleşir.

$$\overline{K} \Sigma_{uc} \cap L(G) \subseteq \overline{K} \quad (3.7)$$

K dili üzerindeki bu şart kontroledilebilirlik şartı olarak ifade edilir. Tanımlanan bu şartın sonucu olarak sistemin beklenen davranışı aşağıdaki ifade ile elde edilir. [1][19]

$$S(s) = [\Sigma_{uc} \cap f(x_0, s)] \cup \{\sigma \in \Sigma_c : s\sigma \in \overline{K}\} \quad (3.8)$$

3.3.1 En Büyük Kontrol Edilebilir Alt Dil

K dili uygulanan S denetimi altında sistemin istenilen davranışını sergilemesini beklediğimiz dil kümesi olarak tanımladık. Fakat bu sistemin beklenen davranışlarını içeren K dili kontrol edilebilir olmayabilir. Eğer K kontrol edilebilir değilse sistem istenen davranışı gösteremez. Burada beklenen davranışı kazandıracak S denetimsel gözetleyici tasarımı için K dilinin kontrol edilebilir alt dilleri kullanılabilir. Bu diller içinde en geniş kontrol edilebilen K diline en büyük kontrol edilebilir alt dil adı verilir. $K^{\uparrow c}$ ifadesi ile gösterilir. [19][20][24][25]

3.3.2 En Küçük Kontrol Edilebilir Önek Kapalı Üst Dil

K dilinin kontrol edilebilir en büyük alt kümesi her zaman beklentiye karşılamayabilir. Bu durumda K dilini de içeren kontrol edilebilir en küçük önek kapalı dil ile istenen çözüm üretilebilir. Sonuç olarak üst dil içinde K dilinin karakteristiğide bulunur. Diğer yandan sistemden beklenen davranışlar bu şekilde elde edilirken istenmeyen davranışlarda

sistem tarafından sergilenecektir. Bu elde edilen dile K dilinin en küçük kontrol edilebilir örnek kapalı dili denir. $K^{\downarrow C}$ ile gösterilir. [19][20][24]

3.4 Kilitlenmesiz Kontrol Edilebilirlik Teorisi

Denetimsel gözetleyici S ile sistemin istenilen davranışını yansıtacak dil kümesini yukarıdaki tanımlarla elde edebiliriz. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta elde edilen S / G sisteminin kilitlenmesiz olmasıdır. Kilitlenmesiz bir S denetimsel gözetleyici şu tanımlar ile elde edilir.

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu durumlu bir otomat ve kontrol edilemeyen olaylar kümesi $\Sigma_{uc} \subseteq \Sigma$ olsun. $K \subseteq L(G)$ ($K \neq \emptyset$) dili uygulanan denetim altında sistemin kabul edilebilir ve beklenen hareketlerini içeren dil kümesi olsun. Buradan hareketle $L_m(S / G) = K$ ve $L(S / G) = \bar{K}$ eşitliklerini aşağıdaki koşullar sağlandığı sürece sağlarız.

$$\text{Kontrol edilebilirlik: } \bar{K}\Sigma_{uc} \cap L(G) \subseteq \bar{K} \quad (3.9)$$

$$L_m(G) - \text{kapalı: } \bar{K} \cap L_m(G) = K \quad (3.10)$$

Üstteki şartlar sağlanırsa kilitlenmesiz bir S denetimsel gözetleyicisi vardır.[19][24][25]

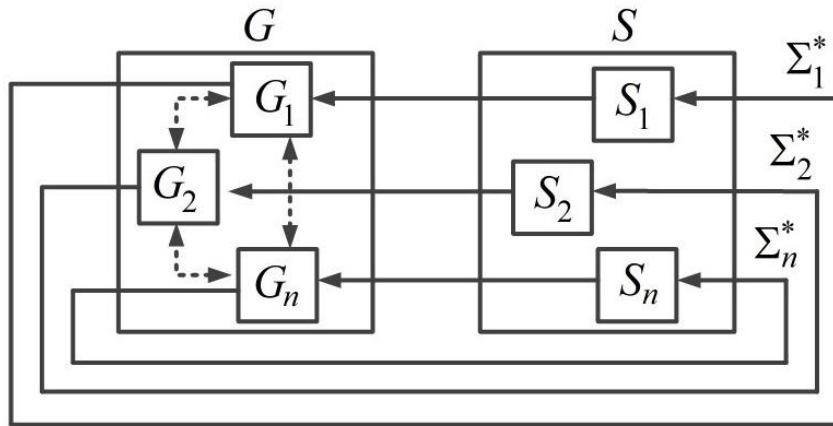
MERKEZİ OLMAYAN VE HİYERARŞİK KONTROL

Ayrık olaylı sistemlerde herhangi bir anda meydana gelen bir olay sonucunda sistemin durumunu değiştireceğinden söz etmiştik. Günümüzde birçok büyük sistem ayrık olaylı sistemlere örnek olarak verilebilir. Bilgisayar ağları, endüstriyel üretim sistemleri, uçak ve tren kontrol sistemleri ve iletişim ağları ayrık olaylı sistemlere örnek olarak verilebilir. Ayrık olaylı sistemlerde, sistem yapısal olarak büyüdükçe buna bağlı olarak durum uzayıda büyümektedir. Durum uzayının artması sonucu büyük sistemlerin beklenen davranışını gözlemleyip denetleyecek olan S denetimsel gözetleyicisinin hesaplanması çok karmaşık bir hal almaktadır. Çok büyük sistemlerde ise durum uzayı patlaması meydana gelmekte buna bağlı olarak S denetimsel gözetleyici hesabı çok zor olmaktadır. Bu tür büyük ayrık olaylı sistemlerin karmaşıklığı ve hesaplama zamanını azaltmak için farklı kontrol mimarileri ortaya çıkmıştır. Bunlardan ikisi merkezi olmayan ya da dağıtılmış kontrol ve bir diğer yaklaşım ise hiyerarşik kontroldür.

4.1 Merkezi Olmayan Kontrol (Dağıtılmış Kontrol)

Ayrık olaylı sistemlerde hesaplama problemleri genelde karmaşıktır. S denetimsel gözetleyicisinin sentezlenmesi için ortaya çıkan karmaşıklık sistem davranışını ve tanımlamaları gösteren üreticilerin durum büyüklükleri bakımından polinomdur. Bunun yanında eğer sistem birkaç alt sistemden oluşursa, denetimsel gözetleyici hesaplaması, bileşenlerin sayısı ile üssel olarak artar. Bu karmaşıklığı azaltmak için yapılan yaklaşımlardan biri merkezi olmayan kontrol çalışmasıdır. Sistemi alt sistemlere ayırmadan tek parça olarak düşünerek, tek parça sistemi gözlemleyip denetim yapacak

olan denetimsel gözetleyicinin sentez hesabı çok karmaşık bir hal alır. Merkezi olmayan kontrol yaklaşımıyla bu karmaşıklık büyük oranda azaltılmış olur. Bu yaklaşımda birçok alt sistemden meydana gelen sistemler alt sistemlerine bölünür. Her bir alt sistem için sistemden beklenen davranışları gösteren yerel tanımlamalar belirlenir. Bu yerel tanımlamalar her bir alt sistem için özeldir ve sadece ait olduğu alt sistemle alakalı dinamikleri içermektedir. Her bir alt sistem için yapılan yerel tanımlamalarla her bir alt sistem için yerel denetimsel gözetleyici sentezi yapılır. Elde edilen bu yerel denetimsel gözetleyiciler ait olduğu alt sistemi gözlemler, denetimini ait olduğu alt sistem üzerinde gerçekleştirir. Bu yerel denetimsel gözetleyiciler eşzamanlı ve uyumlu olarak çalışır. Yerel denetimsel gözetleyicilerin denetlediği dil kümeleri aslında tüm sistemin davranışını içeren dil kümesinin alt kümesidir. Sistemin ayrılan alt sistemlerin birbirleriyle etkileşimi paylaşılan olaylar ile oluşur. Paylaşılan olaylar aslında iki olay kümesinin kesişim kümesinde bulunan olaylardır. [4][6][7][11][12][13][25][28]

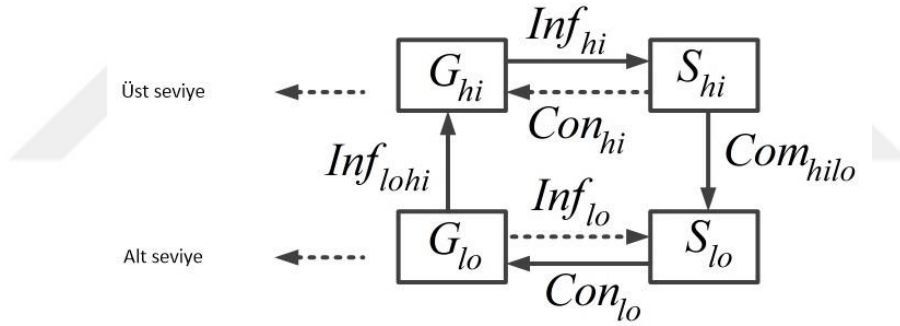


Şekil 4. 1 Merkezi olmayan kontrol mimarisi

4.2 Hiyerarşik Kontrol

Hiyerarşik kontrol mimarisinde kontrol edilecek sistem ve denetimsel gözetleyici hiyerarşik seviyelere bölünür. Bölünen bu seviyeler birbirleriyle arayüz üzerinden etkileşime girerler. Bu mimaride sağlanması gereken önemli iki özellik vardır. Bunlar seviyeye bağlı olarak kilitlenmeme ve seviyeye bağlı olarak kontroledilebilirliktir. Bu şartlarla ortaya konulan mimarinin aslında genel sistemin davranışına eşdeğer bir davranış ortaya koyduğu söylenebilir. Şekil 3.3' te hiyerarşik kontrol mimarisi verilmiştir. Bu mimarinin içerdiği bazı kavramlar vardır. Bu kavramları sırasıyla açıklarsak:

- $Com_{hilo} \rightarrow$ Üst seviye denetimsel gözetleyiciden alt seviye denetimsel gözetleyiciye komut göndermeyi,
- $Inf_{lohi} \rightarrow$ Alt seviye sistemden üst seviye sisteme bilgi göndermeyi,
- $Con_{hi} \rightarrow$ Üst seviyede, üst seviye denetimsel gözetleyici tarafından üst seviye sisteme komut göndermeyi,
- $Inf_{hi} \rightarrow$ Üst seviyede, üst seviye sistemden üst seviye denetimsel gözetleyiciye bilgi göndermeyi
- $Con_{lo} \rightarrow$ Alt seviyede, alt seviye denetimsel gözetleyici tarafından alt seviye sisteme komut göndermeyi,
- $Inf_{lo} \rightarrow$ Alt seviyede, alt seviye sistemden alt seviye denetimsel gözetleyiciye bilgi göndermeyi ifade eder. [3][11][12][13] [25][27][28]



Şekil 4. 2 Hiyerarşik kontrol mimarisi

Hiyerarşik kontrol mimarisine daha yakından bakarsak hiyerarşik kontrol için projeksiyon kavramı çok önemlidir. Projeksiyon işlemi ile hiyerarşik seviyeleri oluştururuz. Bölüm 2 de bahsettiğimiz üzere projeksiyon işlemi aslında geniş bir dil kümesinden alınan bir kelimenin dar olan olay kümesine ait olmayan olayların silinmesi esasına dayanır.

4.2.1 Hiyerarşik Daraltma

$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu durumlu bir otomat ve Σ^{hi} üst seviye olaylar kümesi olsun. Üst seviye olaylar tüm olaylar kümesinin alt kümesidir $\Sigma^{hi} \subseteq \Sigma$. Burada üst

seviyeyi oluşturmak için projeksiyon işlemi kullanılır. Teknik olarak ifade edersek $\theta: \Sigma^* \rightarrow (\Sigma^{hi})^*$ projeksiyon işlemini ifade etmektedir. Buradan

$$\theta(\varepsilon) = \varepsilon \quad (4.1)$$

$$\theta(s\sigma) = \theta(s) \text{ veya } \theta(s\sigma) = \theta(s)\sigma^{hi} \quad \sigma \in \Sigma, \sigma^{hi} \in \Sigma^{hi} \quad (4.2)$$

Yüksek seviye dilin tanımı ise

$$L^{hi} := \theta(L(G)) \quad (4.3)$$

Yüksek seviye işaretlenmiş dil kümesi L_m^{hi} ile ifade edilir ve üst seviye dil kümesinin bir alt kümesidir.

$$L_m^{hi} \subseteq L^{hi} \quad (4.4)$$

Bir otomat için

$$L(G^{hi}) = L^{hi} \quad (4.5)$$

$$L_m(G^{hi}) = L_m^{hi} \quad (4.6)$$

Yüksek seviye için kontrol edilebilen olaylar ve kontrol edilemeyen olaylar ise sırasıyla Σ_c^{hi} ve Σ_{uc}^{hi} olarak ifade edilir. Buradan

$$\Sigma^{hi} = \Sigma_c^{hi} \cup \Sigma_{uc}^{hi} \quad (4.7)$$

$$\Sigma_c^{hi} \cap \Sigma_{uc}^{hi} = \emptyset \quad (4.8)$$

[11][12][13][25][28]

4.3 Merkezi Olmayan ve Hiyerarşik Kontrol

Merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol daha önce detaylandırdığımız kontrol mimarilerinin birleştirilerek elde edilmesidir. Burada merkezi olmayan yaklaşımda tek parça sistemin alt sistemlerine ayrılarak her bir alt sistem için denetimsel gözetleyicilerin oluşturulması paylaşılan olaylarla alt sistemlerin etkileşimlerinin sağlanmasıdır. Buna ek olarak hiyerarşik mimariyle alt sistemlerin hiyerarşik seviyelerinin oluşturulmasının

sağlanarak sistemin kilitlenmesiz ve istenilen davranışı gösterecek şekilde çalışması amaçlanmaktadır. Teknik olarak açıklarsak:

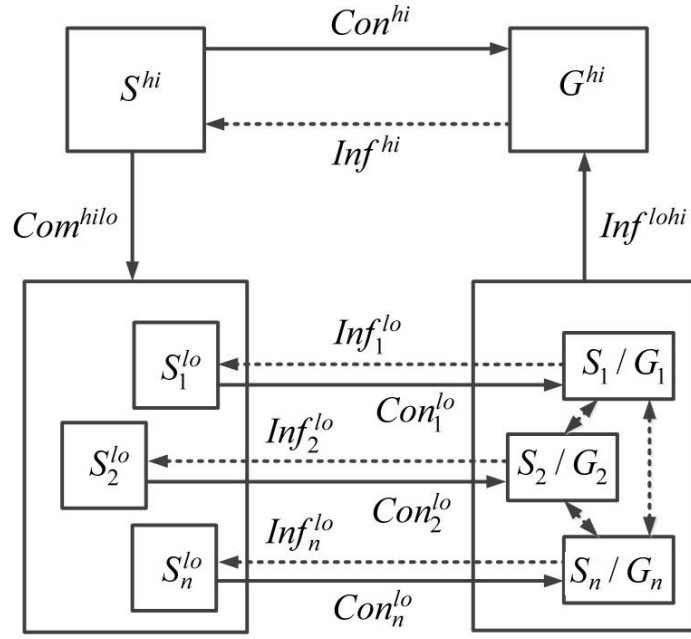
$G = \{X, \Sigma, f, x_0, X_m\}$ deterministik sonlu durumlu bir otomat olsun. G otomatı alt sistemlere sahip olsun böylece alt sistemlerin otomatları $G_i, i=1,2,3,\dots,n$ olarak ifade edilebilir. Ayrıca her bir alt sistem kendine ait bir olay kümesine sahiptir ve $\Sigma_i, i=1,2,3,\dots,n$ olarak ifade edilir. Sistemin bütün dinamiklerini içeren G otomatı alt sistemlerin paralel birleşimi işlemiyle $G = G_1 \parallel G_2 \parallel G_3 \parallel \dots \parallel G_n$ olarak veya daha kısa olarak $G = \parallel_{i=1}^n G_i$ ile elde edilir. Aynı şekilde olay kümesi için $\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2 \cup \Sigma_3 \cup \dots \cup \Sigma_n$ veya $\Sigma = \cup_{i=1}^n \Sigma_i$ olarak ifade edilir. Kontrol edilebilen, kontrol edilemeyen olaylar ise sırasıyla $\Sigma_{i,c} = \Sigma_i \cap \Sigma_c$ ve $\Sigma_{i,uc} = \Sigma_i \cap \Sigma_{uc}$ olarak ifade edilebilir. Burada $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc}$ ve $\Sigma_c \cap \Sigma_{uc} = \emptyset$. G_i, G_j gibi iki alt sistemden oluşan bir sistemi referans olarak alt sistemlerin etkileşimi ise paylaşılan olaylarla oluşur yani $\Sigma_i \cap \Sigma_j \neq \emptyset$ olmalıdır.

Alt sistemlerine ayrılan bir sistem için her bir alt sisteme ait yerel denetimsel gözetleyicilerin sentezlenmesi diğer önemli bir noktadır.

Yerel alt seviye denetimsel gözetleyici için $S_i = L_i \rightarrow \Gamma_i$ (Γ_i aktif olaylar veya kontrol kelimeleri) olmak üzere alt seviye yerel kapalı çevrim kontrol edilebilir dil $L_i^c = L(S_i / G_i)$ olarak ifade edilir, yerel kontrol edilebilir işaretlenen dil ise $L_{i,m}^c = L_i^c \cap L_{i,m}$ ile ifade edilir. Burada tüm sistem için ise kontrol edilebilir dil kümesi $L^c = \parallel_{i=1}^n L_i^c$ ve işaretlenen dil ise $L_m^c = \parallel_{i=1}^n L_{i,m}^c$ ile elde edilir. $L^c = L(G^c)$ ve $L_m^c = L_m(G^c)$ olarak ifade edilir.

Üst seviye denetimsel gözetleyici için $S^{hi} : L^{hi} \rightarrow \Gamma^{hi}$ olmak üzere üst seviye kapalı çevrim denetlenen dil $L(S^{hi} / G^{hi})$ ile elde edilir. Diğer yandan geçerli bir alt seviye denetimsel gözetleyici $S^{lo} : L^c \rightarrow \Gamma$ ifadesi $\theta(L(S^{lo} / G^c)) \subseteq L(S^{hi} / G^{hi})$ şartını sağlamalıdır.

Son olarak hiyerarşik daraltma için doğal projeksiyon kullanılır. Doğal projeksiyon $\theta : \Sigma^* \rightarrow (\Sigma^{hi})^*$ iken üst seviye olay kümesi $\Sigma^{hi} = \cup_{i,j,i \neq j} (\Sigma_i \cap \Sigma_j)$ ve üst seviye dil $L^{hi} = \theta(L^c)$ ve $L_m^{hi} = \{s^{hi} \in L^{hi} \text{ öyle ki } \theta^{-1}(s^{hi}) \cap L_m^c \neq \emptyset \text{ ve } G^{hi} \text{ öyle ki } L^{hi} = L(G^{hi})\}$ olmalıdır. [11][12][13][25][28]



Şekil 4. 3 Merkezi olmayan hiyerarşik kontrol mimarisi

İLETİŞİM TABANLI TREN KONTROLÜ (CBTC)

Dünya nüfusu günden güne artmaktadır. Nüfus artışının sonucu olarak şehirler günden güne daha kalabalık hale gelmektedir. Günümüz dünyasında büyük şehirlerde en büyük sorunlardan birisi ulaşım sorunu olarak göze çarpmaktadır. Büyük şehirlerde oluşan karmaşık ve yoğun araç trafiği insanlar için zaman kaybına ve maddi zarara sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak insanlar toplu taşımaya yönelmekte ve toplu taşımının ihtiyacı her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. İnsanların en çok tercih ettiği ulaşım türünden biri raylı sistemlerdir. Raylı sistemlerin zaman kaybını minimize ederek istenilen yere kısa sürelerde taşınması en büyük tercih sebebidir. Diğer yandan artan nüfusa paralel olarak raylı sistemlerin sefer sayısının artırılması ve insanların ulaşım ihtiyacına cevap vermesi gerekmektedir. Fakat burada klasik sinyalizasyon sistemleri artan tren trafiğini güvenli ve hızlı bir şekilde ayarlamakta yetersiz kalmaktadır. Klasik sinyalizasyon sistemlerinde sefer sayısının artmasıyla bazı güvenlik protokolleri iptal edilerek, sürekli olarak makinistlerle iletişim kurulması ve gerekli yönlendirmenin bilgilendirmenin telsiz aracılığıyla yapılmasını gerektirir. Bunun anlamı doğru bilgilendirme ve yönlendirme için zaman kaybı olması ve sefer sayısının azalmasıdır. Gelişen teknolojinin yardımıyla yeni sinyalizasyon tipleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu sayede tren trafiği daha hızlı, daha güvenli ve ray hattı daha verimli şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Sonuç olarak modern sinyalizasyon sistemleri ile toplu taşımının kalitesi artmış ve ulaşım sorunu minimize edilmiştir.

5.1 Raylı Sistemlerde Sinyalizasyon

Sinyalizasyon temel olarak trenlerin güvenli bir şekilde hızlanmasını, frenlemesini aynı zamanda güvenli olarak seferini tamamlamasını sağlayan ve ray trafiğini düzenlemek için belli donanımlar yardımıyla oluşturulan sistem olarak adlandırılabilir. Sinyalizasyon sistemleri ile demiryolu kazaları engellenir ve güvenli çalışma şartları sağlanmış olur. Sinyalizasyon sistemleri şu amaçlar için kullanılmaktadır:

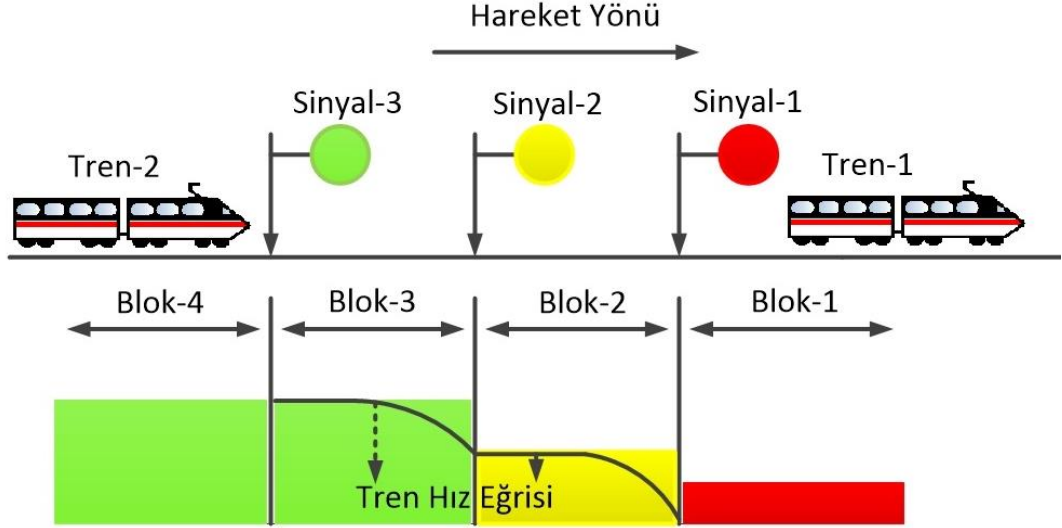
- Tren hızının ve tren hareketinin denetlenmesi
- Rayların meşguliyet durumunun denetimi
- Makinisti bilgilendirmek
- Tren rotasının ayarlanması
- Kontrol notaları ve sinyallerin ayarlanması

Sinyalizasyon sistemleri donanımsal olarak şu bileşenleri içermektedir:

- Sinyaller
- Makaslar
- Aks sayacı
- Anlaşman sistemi
- Hat devresi [30]

5.2 Sabit Blok Nedir?

Sabit blok sinyalizasyonu günümüzde en yaygın kullanılan sinyalizasyondur türüdür. Sabit bloklu sinyalizasyonda tren rayları bloklara ayrılır. Bu bloklar aynı uzunlukta olabildiğinin yanında farklı uzunlukta olabilir. Bu sinyalizasyon türünde bir bloğun sadece bir tren tarafından meşgul edilmesine izin verilir. Bloğun meşguliyeti bir sonraki trene sinyaller yardımıyla bildirilir. Blok doluysa sinyal kırmızı olur. Bir sonraki tren kırmızı sinyali gördüğünde bloğun dolu olduğunu bu sayede anlar. Blok boş ise sinyal yeşil yanar böylece bir sonraki tren bloğun kullanım için uygun olduğunu anlar.[30][31][32][33]

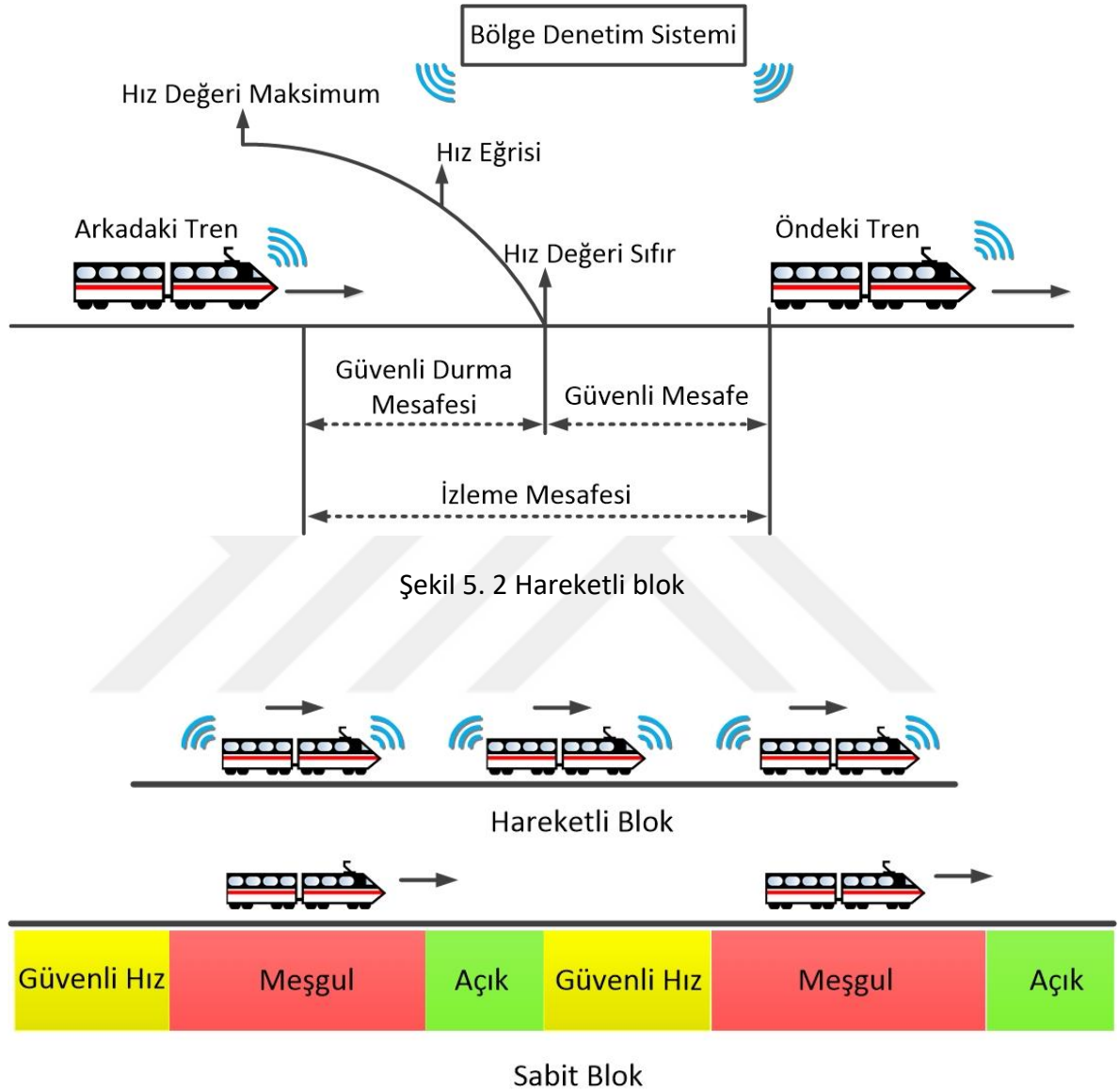


Şekil 5. 1 Sabit blok

5.3 Hareketli Blok Nedir?

Hareketli blok sistemi gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkmış, içinde son derece modern sistemleri barındıran tren güvenliği ve ray trafiğini çok hızlı bir şekilde ayarlayan sinyalizasyon sistemidir. Bu sistemde sabit blok sinyalizasyon sisteminin aksine ray hattı bloklar şeklinde ayrılmaz. Daha esnek olan sanal bölgelere ayrılır. Her sanal bölgenin kendine ait denetim yapan sistemler vardır. Ayrıca her trenin kendine özgü bir kimliği bulunmaktadır. Bu sayede tren kimliğini, hızını, konumunu ve yönünü bölge denetim sistemlerine göndermektedir. Güvenli tren mesafesi ve hızı için gerekli hesaplamaları yapan bölge denetim sistemi bu bilgileri bir sonraki trene iletmektedir. Tren ve bölge denetim sistemleri arasındaki iletişim sürekli olarak radyo bağlantısı ile sağlanır. Bunun sonucu olarak bir bölgedeki denetim sistemi kendi bölgesi içerisindeki trenlerle iletişim kurarak bölge içindeki tüm trenlerin bilgisini elde eder. Bölge denetim sistemleri sayesinde aslında trenler birbirleriyle haberleşirler. Diğer bir deyişle arkadaki trene öndeki trenin konumu bildirmekte ve böylece öndeki trenin durumuna göre trene hız ayarının yapılması sağlanmaktadır. Tren güvenli duruş mesafesi ya da güvenli sürüş mesafesini bölge denetim sistemleri sayesinde ayarlayabilmektedir. Ayrıca sabit bloklu sinyalizasyonun aksine hareketli blok sistemlerinde yol kenarı sinyal ışıkları bulunmamaktadır. Yani bölgenin durumu dinamik olarak sürekli trene iletilmektedir. Sonuç olarak hareketli blok sistemin en büyük avantajı ray hattının daha verimli

kullanılmasıdır. Diğer bir deyişle trenlerin arasındaki güvenli mesafelerin dinamik olarak ayarlanarak ray üzerinde daha fazla trenin bulunmasını sağlamaktır. Hareketli blok sistemleri genellikle İletişim Tabanlı Kontrol Sistemi (CBTC) olarak adlandırılır.[15][33][34][35][38][41]

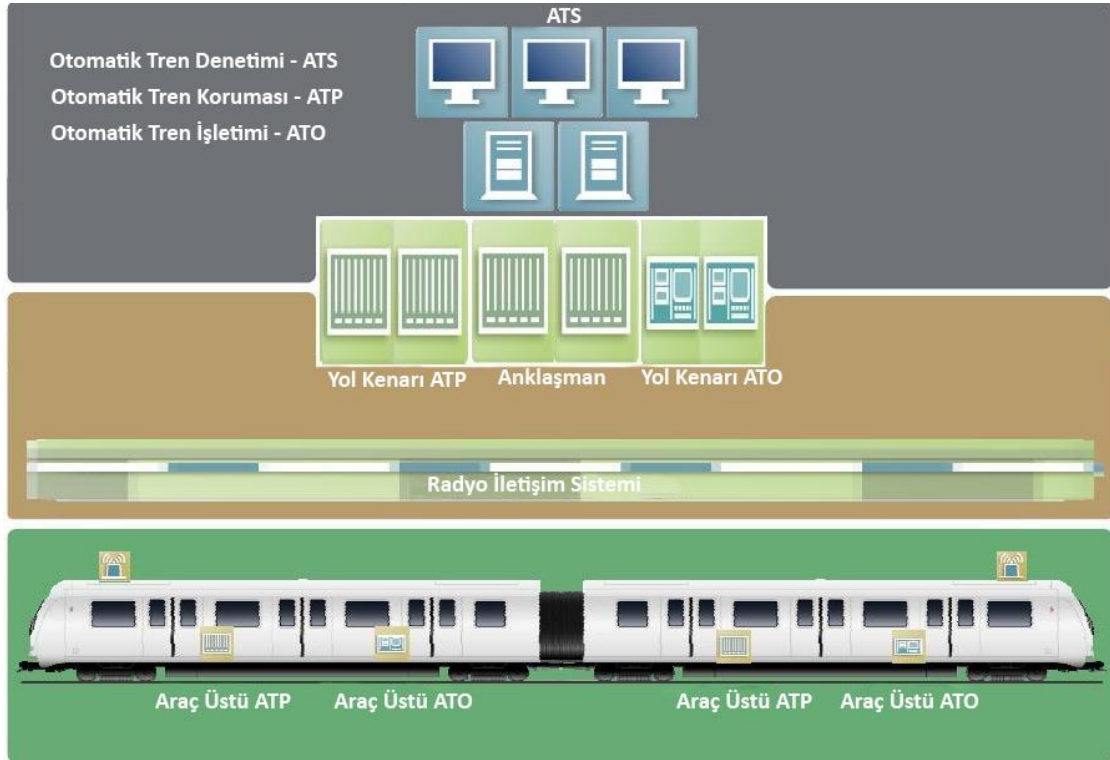


Şekil 5. 3 Hareketli blok ve sabit bloğun karşılaştırılması

5.4 İletişim Tabanlı Tren Kontrol Sistemlerinin Temel Kavramları

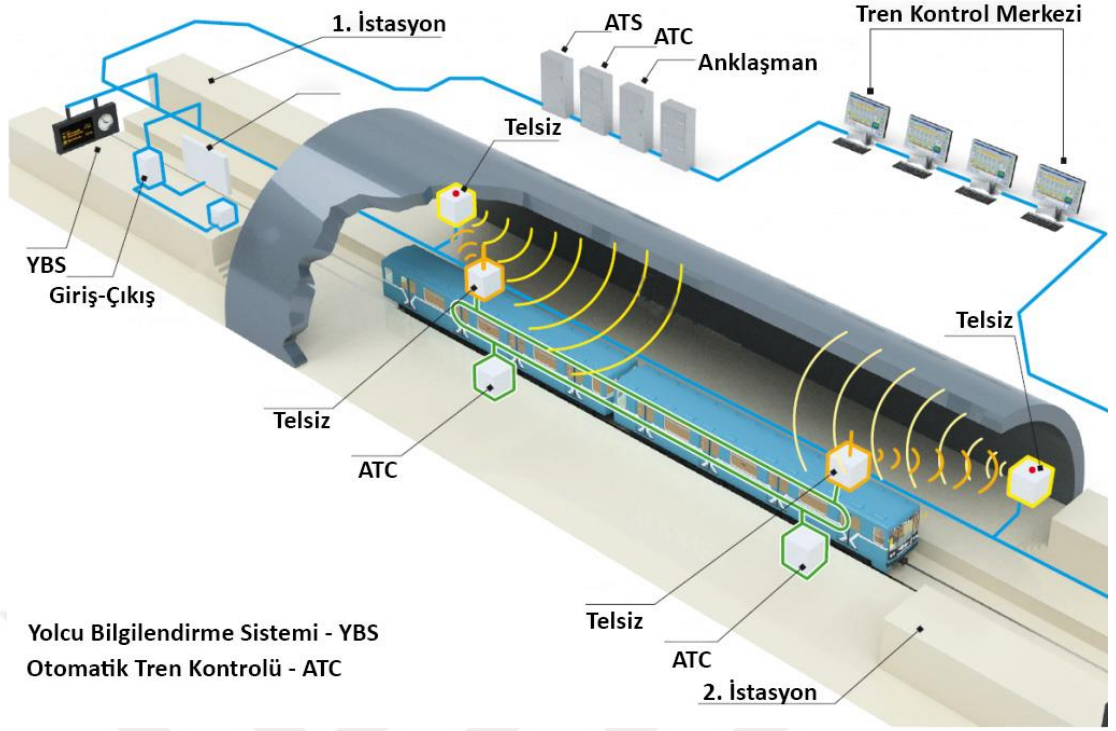
İletişim Tabanlı Tren Kontrol sinyalizasyon sistemi, tren merkezi ve ray hattı üzerindeki trenler arasında kablosuz veri transferi ile iletişim kurarak, kesintisiz ve anlık bilgi alış veriş yapar. Alış veriş yapılan bilgiler sayesinde ray hattı üzerindeki trenlerin hat üzerindeki tam konumunu, hızını ve trenin uzaktan kontrolünü, diğer sinyalizasyon

sistemlerine göre çok daha doğru ve çok daha hızlı olarak yapan sinyalizasyon sistemleri olarak açıklanabilir. CBTC sürekli, yüksek kapasiteli ve çift yönlü bilgi alışverişi sağlayan donanımlara sahiptir. Bu donanımlar IEEE 1474 standartlarına göre belirlenmiş ve oluşturulmuştur.



Şekil 5. 4 CBTC mimarisi

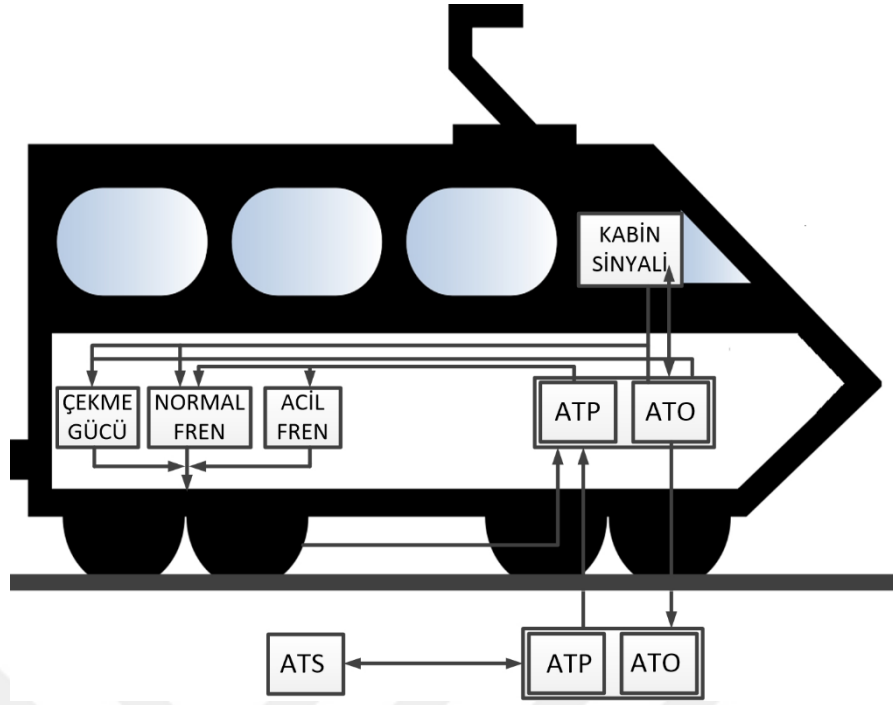
CBTC’de ray hattı sanal bloklara ayrılmıştır. Trenler bu sanal bloklarda hareket ederken sürekli olarak önünde ve arkasında sinyal meydana getirir. Bu sinyaller trenle birlikte hareket eder. Örnek ile açıklarsak, iki trenin ray üzerinde hareket ettiğini düşünelim. Bu iki trenden önden giden tren daha yavaş arkadan gelen tren daha hızlı hareket etmiş olsun. Önden giden trenin sinyalleri arkadan gelen trenin sinyalleri ile çakıştığında arkadan gelen tren önden giden trene göre kendi hızını ayarlar ve güvenli bir mesafede seyrine devam eder. Eğer öndeki tren durursa arkadan gelen trende güvenli mesafede hızını sıfırlayarak durma pozisyonuna geçer. [14][15][16][17][35][37][38][39][40]



Şekil 5. 5 CBTC genel sistem yapısı

5.5 Otomatik Tren Kontrolü (ATC)

CBTC genel sistem yapısı itibari ile temel olarak Otomatik Tren Kontrolü (ATC), anlaşıman sistemleri ve telsiz donanımlarından oluşmaktadır. Otomatik Tren Kontrolü İletişim Tabanlı Tren Kontrolünün en önemli bileşenlerinden biridir. İçerisinde bazı alt sistemleri barındırır. Bu alt sistemlerin CBTC içinde farklı görevleri vardır ve bu alt sistemler CBTC için çok önemli bir yere sahiptir. Bu alt sistemleri sırasıyla yazarsak Otomatik Tren Denetimi (ATS), Otomatik Tren Koruması (ATP) ve Otomatik Tren İşletimi (ATO) sistemleridir. Otomatik Tren Kontrolünün sistem içinde temel görevi ise hat üzerindeki trenleri sürekli olarak izlemek ve bu trenleri kontrol edilmesini sağlamaktır. Bunun yanında sistemde meydana gelebilecek bir arıza durumunda sistemin manuel moda alınması yine ATC ile sağlanır. Otomatik Tren Kontrolünün içerdiği alt sistemler aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır.[14][15][16][17][18][37]



Şekil 5. 6 ATC mimarisi

5.5.1 Otomatik Tren Denetimi (ATS)

Otomatik Tren Denetim sistemi trenlerin belirlenmiş sefer programı dâhilinde trafik düzenine uygun hareket etmesi için tren aktivitelerini izlemekten sorumludur. Bununla birlikte ATS'nin sistemde farklı görevleri de mevcuttur.

- Rota tanzim taleplerinin değerlendirilmesi
- Rotanın durumuna göre rota tanzimin onayı veya iptali
- ATP ve ATO 'nun durumlarını izlemek
- Tren çalışma durumu ve konum durumunun denetimi
- İstatistik ve rapor oluşturma
- Sistemin durumunu izlemek
- Makas tahsisi
- Rotanın durumuna göre rota yasaklama[14][15][16][17][18]

5.5.2 Otomatik Tren Koruması (ATP)

Otomatik Tren Koruması sistemi trenlerin güvenli bir şekilde hareketini sağlamaktan sorumlu olan çok önemli ve hayati bir sistemdir. ATP trenler arasında güvenli hareket mesafesini oluşturmayı sağlar. Bunu yaparken trenin güvenli hareket sınırları içinde çalışması için hız sınırları uygular. Eğer bir tren hız limitlerini aşarsa ATP devreye girer ve treni durdurmak veya güvenli hız sınırları içine taşımak için otomatik olarak frenleme gerçekleştirir. Bunun yanında acil durumlar veya tehlikeli durumlar için acil frenleme de yapabilir. CBTC içinde iki farklı ATP bulunmaktadır bunlar araçüstü ATP ve bölgesel ATP olmak üzere ikiye ayrılır. [14][15][16][17][18]

5.5.2.1 Araç Üstü ATP (VATP)

Araçüstü ATP ihtiyaç duyduğu rota, çakışma noktası ve hız kısıtları bilgilerini Bölgesel ATP'den alır. Araçüstü ATP trenin üzerinde bulunur ve şu işlevleri yerine getirir:

- Hat üzerindeki her bir trenin konumlarının algılanması
- Hareket halindeki trenler arasındaki güvenli mesafenin korunmasının sağlanması
- Hareket halindeki trene duruma göre hız kısıtlamalarının uygulanması
- Algılanan tren hızının, belirlenen tren hızını aşması durumunda trende frenlemenin yapılması
- Tren kapılarının kapanması ve kilitlenmesinin izlenmesi
- Tren kapılarının durumuna göre tren kalkışına izin verilmesi
- Trenin istasyonu geçmesi halinde tren kapılarının açılmasının engellenmesi
- Peron ayırıcı kapılar açıkken trenin istasyona girişinin engellenmesi

[14][15][16][17][18]

5.5.2.2 Bölgesel ATP (RATP)

Bölgesel ATP tren yer, hız ve yön bilgilerini Araçüstü ATP'den alır. Bölgesel ATP hat boyunca yol üzerinde belirlenen bölgeler içinde bulunur ve şu işlevleri yerine getirir:

- Hat üzerindeki her bir trenin konumlarının algılanması

- Hareket yetkisi sınırının (MAL) belirlenmesi
- Normal seyir yönünün kontrol edilmesi
- Tren kapılarının kapanması ve kilitlenmesinin izlenmesi
- Peron ayırıcı kapı açıkken trenlerin perona girişinin engellenmesi
- Tren kapılarının durumuna göre tren kalkışına izin verilmesi[14][15][16][17][18]

5.5.3 Otomatik Tren İşletimi (ATO)

Otomatik Tren İşletimi sistemi makinistin işlevlerini yerine getirmekten sorumludur. ATO tren kalkış sırasında yumuşak bir kalkış yapmasını, frenleme yaparken yumuşak fren yaparak yolcuları sarsmayacak şekilde trenin durdurulmasını sağlar. Normal şartlarda trenin cer gücünden ve frenleme komutlarının oluşturulmasından sorumludur. Aynı zamanda trenin istasyonda doğru bir şekilde durmasından ve kapıların açılıp kapatılmasından sorumludur. Tren seyir halindeyken ATO'ya hız verileri göndermekte ve bu hız verilerine göre hızlanma ve frenleme fonksiyonlarının ayarlanmasını sağlamaktadır. CBTC içinde iki farklı ATO bulunmaktadır bunlar araç üstü ATO ve bölgesel ATO olmak üzere ikiye ayrılır. [14][15][16][17][18]

5.5.3.1 Araç Üstü ATO (VATO)

Araç üstü ATO trenin üzerinde bulunur ve VATO sistemi VATP sisteminin denetimi altında şu işlevleri yerine getirir:

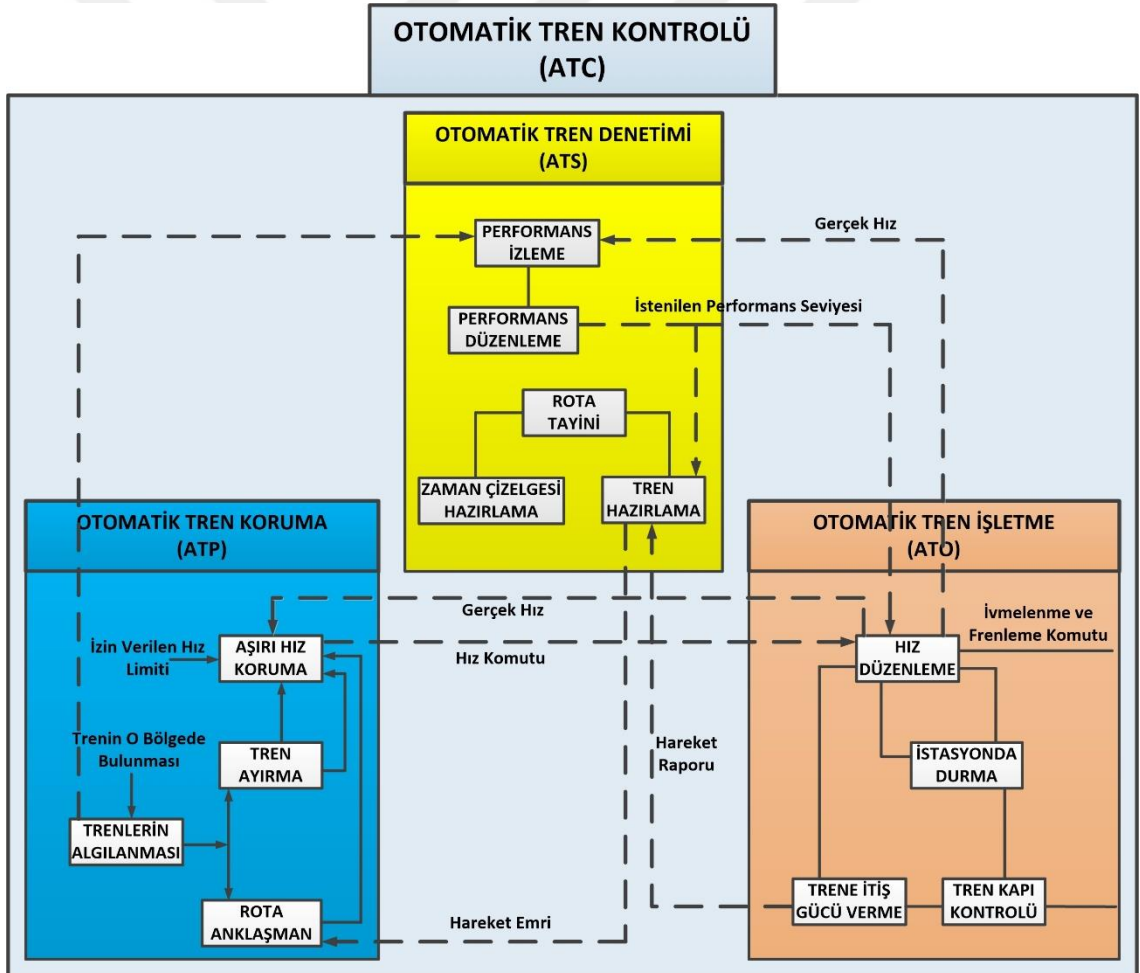
- Tren frenleme sistemine komut çıkışı
- Tren yolcu kapısı kapatılması ve durumunun algılanması
- Peron ayırıcı kapı sistemlerinin açılması ve kapatılmasının kontrolü
- Sefer sonu istasyonlarda geri dönüşün sağlanması
- Park edilen trenlerin aktif edilmesi ve devreye alınması
- Seferi biten trenlerin park sahalarına park edilmesi
- Trenin otomatik olarak aktif edilmesi için itiş gücü sistemine komut çıkışının sağlanması[14][15][16][17][18]

- Sürüş stratejilerine göre ivme, hız ve boşta gitme düzeylerinin ayarı için itiş gücü ve frenleme sistemine komut çıkışının sağlanması
- Bölgesel ATO ile haberleşmenin yapılması[14][15][16][17][18]

5.5.3.2 Bölgesel ATO (RATO)

Bölgesel ATO hat boyunca yol üzerinde bölgeler içinde bulunur ve şu işlevleri yerine getirir:

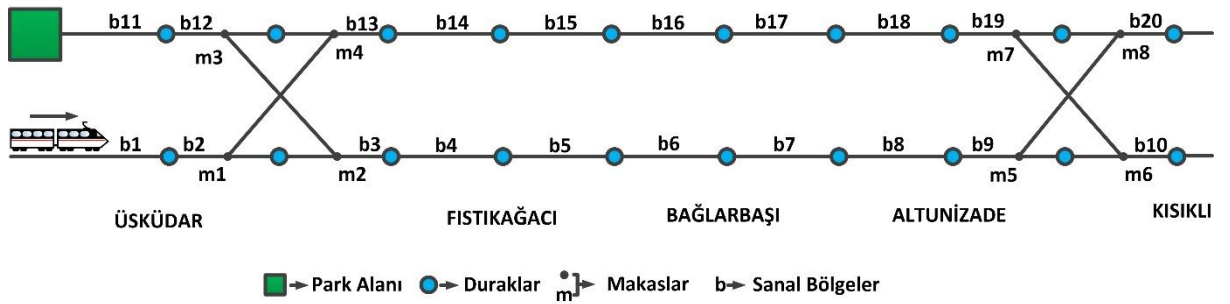
- Tren bilgilerini bölgesel ATP'ye iletmek
- Her trenin hedef ve ayarlama hedeflerini kontrol etmek[14][15][16][17][18]



Şekil 5. 7 Otomatik tren kontrolü genel yapısı ve alt sistemleri

TEORİNİN İLETİŞİM TABANLI TREN KONTROLÜNE UYGULANMASI

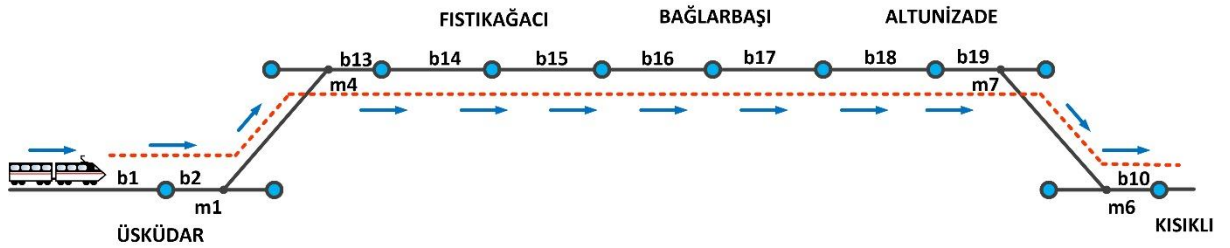
Bu çalışmada İstanbul Üsküdar-Çekmeköy metro hattının Üsküdar ve Kısıklı istasyonları arasındaki bölge (Şekil 6.1) dikkate alınmıştır. Bu bölge arasında belirlenen rota Şekil 6.2 de olduğu gibi belirlenmiştir. Bu bölümde trenin belirlenen rotada hatasız olarak ilerlemesini sağlayan İletişim Tabanlı Tren Kontrol sisteminin sahip olduğu Otomatik Tren Denetimi, Otomatik Tren Koruması ve Otomatik Tren İşletimi alt sistemlerinin modelleri deterministik sonlu durumlu otomatlarla ifade edilmiştir. Modellenen her bir alt sistemin davranışını denetleyen ve istenilen davranışı elde etmeyi sağlayan denetimsel gözetleyicileri elde edilmiştir. Ayrıca trenin belirlenen rotada gitmesi için makasların, sanal bölgelerin modelleri ve denetimsel gözetleyicileri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu modeller ile merkezi olmayan hiyerarşik kontrol mimarisi kurulmuştur. Son olarak simülasyon sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 6. 1 Üsküdar-Kısıklı metro hattı

Tren park alanından çıkarak belirlenen rotada ilerleyecektir. İstasyonları içeren tüm hat b ile ifade edilen sanal bölgelere bölünmüştür. Rota tanziminin onayından sonra m ile ifade edilen makaslar bu rotaya uygun olarak yönlendirilmiştir. Sefer süresince tren diğer

trenlerle ve sanal bölgedeki donanımlarla haberleşmektedir. Bunun yanı sıra trenin kendi üzerinde bulundurduğu donanımlar ile trenin güvenli ve otomatik olarak işletilmesini sağlamaktadır. Teorinin uygulandığı sistemde belirlediğimiz rota ile tren Üsküdar'dan başlayıp sırasıyla Fıstıkağacı, Bağlarbaşı ve Altunizade' den geçerek son olarak Kısıklı istasyonuna varacaktır. Sefer süresince trenin hızı, hatta başka trenin olup olmamasına göre, istasyonların durumlarına göre ve trenin kendi dinamiklerine göre ayarlanacaktır. Bu sayede trenin güvenli bir şekilde ve güvenli hız aralıklarında hareket etmesi sağlanacaktır.



Şekil 6. 2 Trenin izleyeceği rota

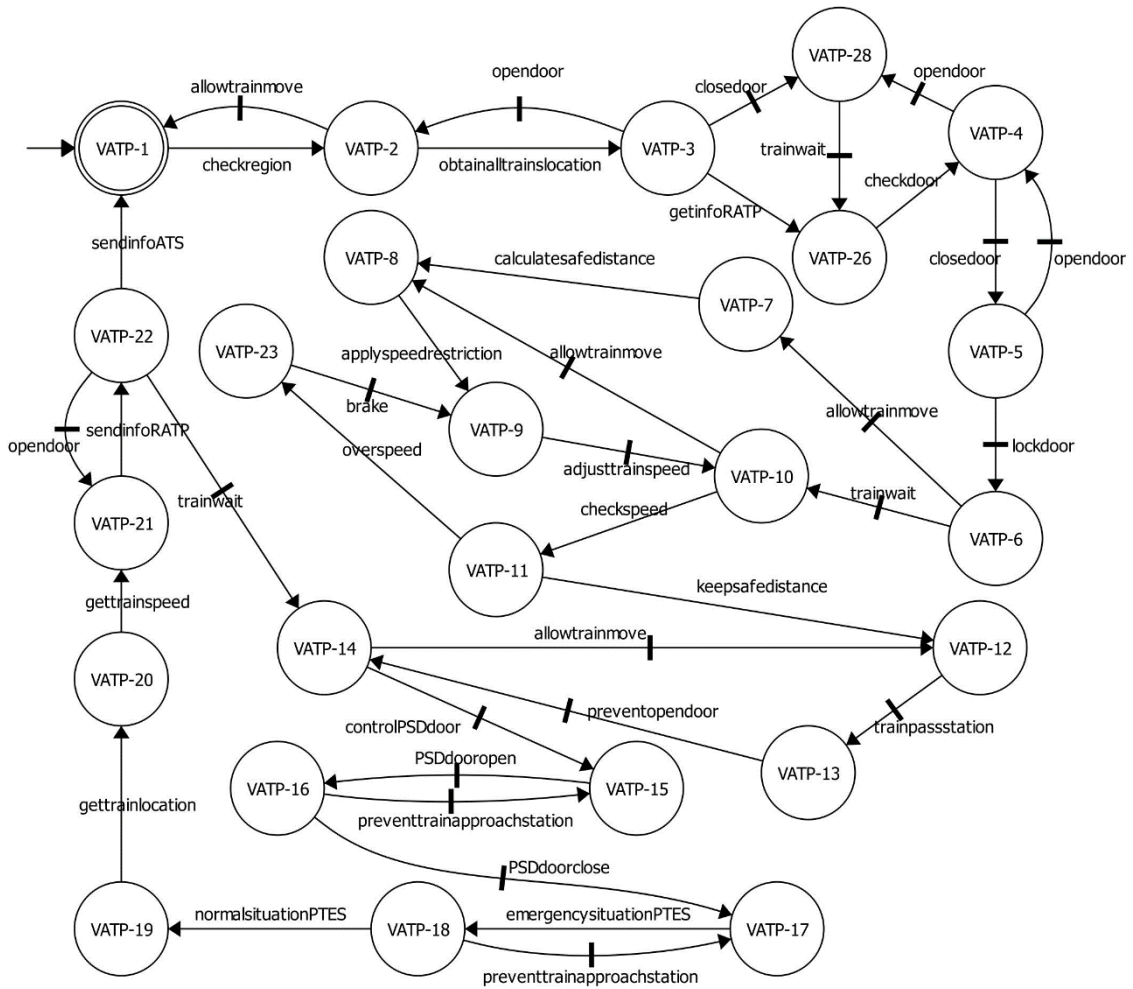
6.1 İletişim Tabanlı Tren Kontrolü Alt Sistemlerinin Otomat Modelleri

Bu bölümde İletişim Tabanlı Tren Kontrolünün yapısal olarak içinde barındırdığı tüm alt sistemlerinin (Otomatik Tren Koruması (ATP), Otomatik Tren İşletimi (ATO) ve Otomatik Tren Denetimi (ATS)) yanı sıra tanzim edilen rotaya göre makasların durumunun davranışını gösteren deterministik sonlu durumlu otomat modelleri verilecektir.

6.1.1 Araç Üstü Otomatik Tren Koruması (VATP)

Şekil 6.3 te araç üstü Otomatik Tren Korumasının (VATP) düşük seviye modeli olarak adlandırılan kontrolsüz davranışını gösteren sonlu durumlu otomat modeli görülmektedir. Matematiksel olarak ifadesi ise G_{VATP}^0 'dir. Kontrolsüz davranış aslında sistemin denetim uygulanmamış hali olarak düşünülebilir. Şekil 6.3 incelendiğinde sistemde istenilmeyen bazı olayların meydana geldiği görülebilir. Örnek olarak VATP-22 durumundan trainwait olayının gerçekleşmesi ile VATP-14 durumuna geçilmesi verilebilir. Burada trainwait olayının gerçekleşmesi için belli olan bazı olayların gerçekleşmesi gerekmektedir. Fakat kontrolsüz modelde bu olayın gerçekleşmesine neden olacak hiçbir olay meydana gelmemişken trainwait olayı oluşmuştur. Buradan

hareketle kontrolsüz davranışlarda bazı durumlar sistemi ölü kilit olayına veya canlı kilit olayına sokabilir. Bu durumlar fiziksel olarak kabul edilemeyecek davranışlara da sebep olabilir. Örnek olarak tren kapısının sürekli olarak açılıp kapanması veya trenin ileri geri hareket etmesi verilebilir. Bu istenilmeyen durumların oluşmasını önlemek için bir denetime ihtiyaç vardır. Bu denetim sayesinde sistemin davranışını değiştirebiliriz ve sistemden beklenen davranış elde edebiliriz. Yapılan işlemi teknik olarak açıklarsak; aslında burada sisteme uygulanan denetim ile sistemin alt dilleri elde edilir. Burada sistemin denetleyicisini elde etmek için diğer bir anahtar kelime tanımlamalardır. Şekil 6.3 ' te üzeri işaretli olan olaylar kontrol edilebilir olaylar iken işaretli olmayan olaylar ise kontrol edilemeyen olaylardır.



Şekil 6.3 VATP düşük seviye otomat modeli (G_{VATP}^0)

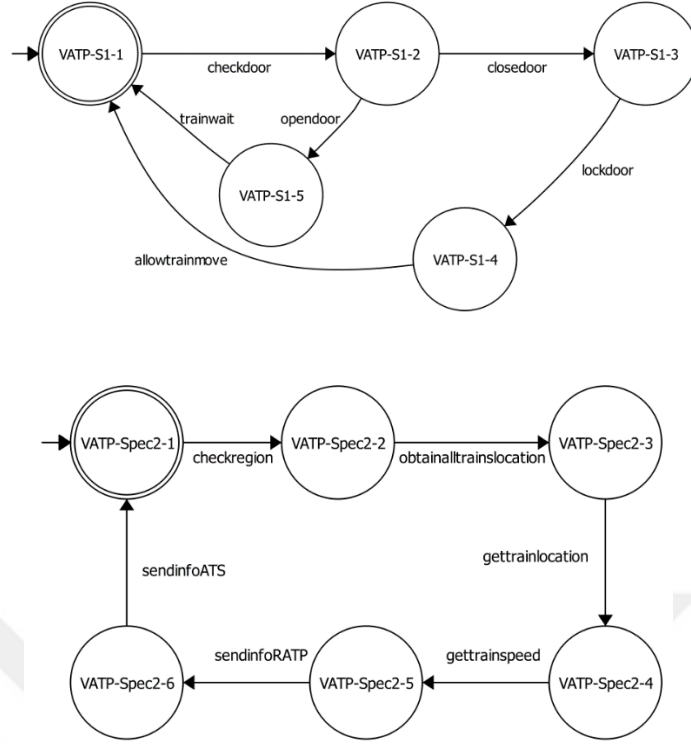
Tanımlamalar aslında bir dili temsil eder. Bu dil tüm olayları içeren dilin alt kümesidir. Tanımlamalar sistemin beklenen davranışının modelidir. Tanımlamalar D veya E harfi ile gösterilebilir. Bir sistemin ürettiği dil $L(G)$ olsun. Tanımlanan dil ile üretilen dil arasındaki ilişki $L(D) \subseteq L(G)$ olarak yazılabilir. Şekil 6.4'te araç üstü otomatik tren koruması (VATP) için belirlenmiş iki tane tanımlama görülmektedir.

- D_{VATP-1}^0 : Tren kapısını kontrol et eğer tren kapısı açıksa treni beklet eğer tren kapısı kapalıysa tren kapısını kilitle ve ardından trenin hareket etmesine izin ver.

Yukarıdaki VATP için yapılmış olan ilk tanımlamayı şu şekilde açıklayabiliriz. Bu tanımlama tren kapısının durumları ile ilgili tanımlanmıştır. Burada tren kapısının durumu checkdoor olayı ile kontrol edilir eğer kapı açıksa opendoor olayı meydana gelir ve ardından trainwait olayı ile tren kapı açık olduğu sürece beklemeye devam eder. Kapı kapandığında closedoor olayı meydana gelir ve ardından tren kapısı kilitlendiğinde lockdoor olayı meydana gelir. Tren kapısının kilitlenmesinin ardından allowtrainmove olayı ile tren hareketine izin verilir.

- D_{VATP-2}^0 : Sanal bölgeyi kontrol et ve ardından bölgedeki tüm trenlerin yerlerini öğren bölgesel otomatik tren korumasına (RATP) kendi hız, konum ve yön bilgilerini gönder son olarak otomatik tren denetimine ilgili bilgileri gönder.

Yapılan bu ikinci tanımlamayla checkregion olayı ile sanal bölge kontrol edilir. obtainalltrainslocation olayı ile bölgedeki tüm trenlerin konumları öğrenilir ve ardından meydana gelen gettrainlocation olayı ve gettrainspeed ile tren kendi yer ve hız bilgilerini elde eder. Bu bilgileri sendinfoRATP olayı meydana geldiğinde bölgesel otomatik tren korumasına (RATP) iletir. Son olarak seninfoATS olayı meydana geldiğinde otomatik tren denetim sistemine trenin bilgileri gönderilir ve bu sayede trenin rota boyunca aktiviteleri izlenir.

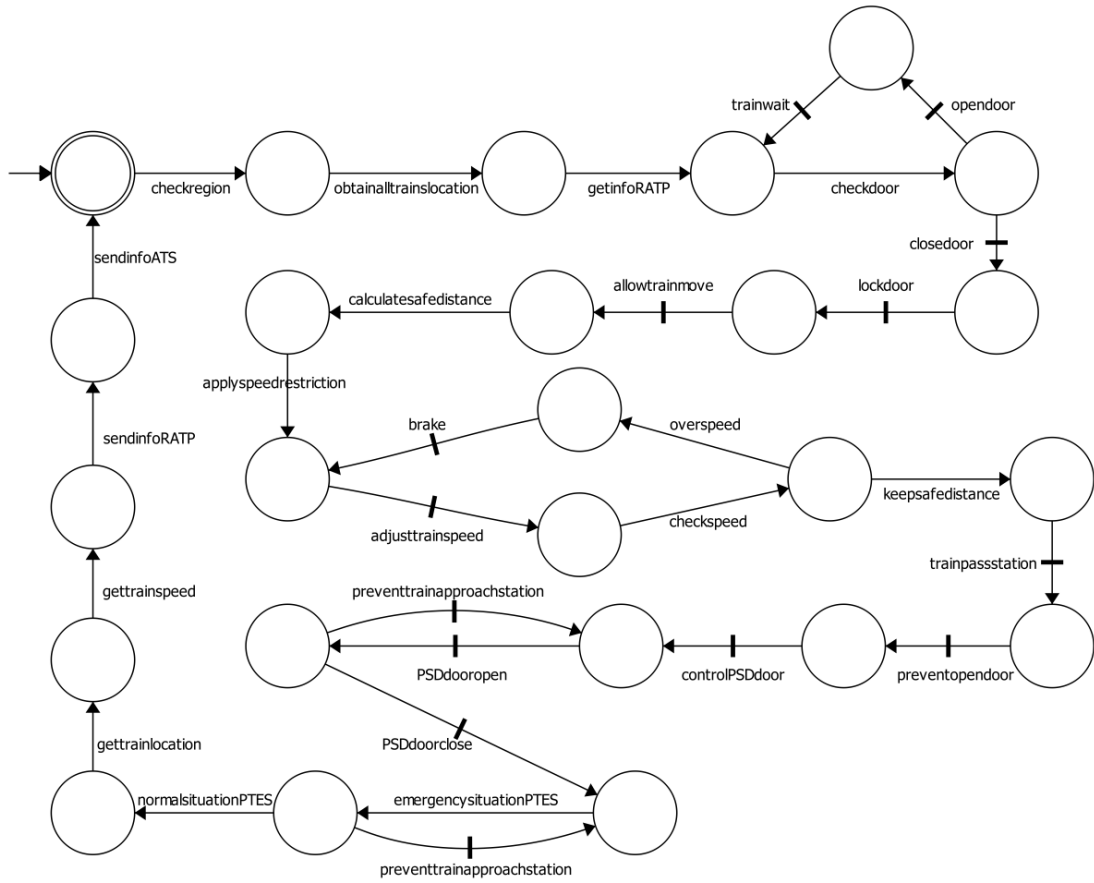


Şekil 6. 4 VATP için belirlenen tanımlamalar ($D_{VATP-1}^0, D_{VATP-2}^0$)

Tanımlamanın en genel hali ise, aşağıdaki tanımlamaların senkronize bileşimi $D_{VATP}^0 = D_{VATP-1}^0 \parallel D_{VATP-2}^0$ ile elde edilir. Elde edilen D_{VATP}^0 'nin 30 durumu vardır. Tanımlamalar yardımıyla denetimsel gözetleyici S hesaplanır. Bu tanımlamalarla hesaplanan denetimsel gözetleyiciler S tarafından sistemin kontrollü davranış elde edilir. Kontrollü davranış matematiksel olarak $\kappa_{L_m(D)}(L_m(G))$ ifade edilir ve R ile sembolize edilir.

VATP için kontrollü davranış aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$R_{VATP}^0 = \kappa_{L_m(D_{VATP}^0)}(L_m(G_{VATP}^0)) \quad (6.1)$$



Şekil 6. 5 VATP'nin kontrollü davranışı (R_{VATP}^0)

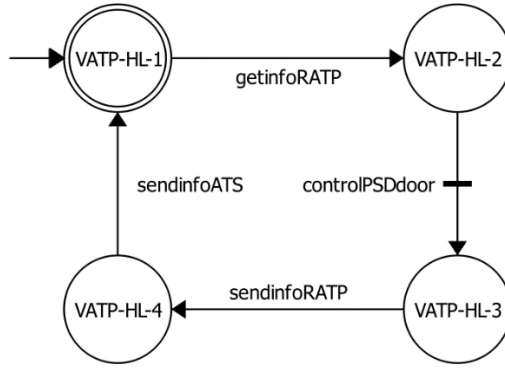
Şekil 6.5'te alt seviye VATP sisteminin kontrollü davranışının $R_{VATP}^{0,c}$ otomat modeli görülmektedir. Burada modele baktığımızda VATP'nin istenilen davranışı sergileyecek şekilde çalıştığını anlayabiliriz. Şekil 6.3'te verilen otomat modeli ile karşılaştırıldığında sistem davranışını etkileyecek bazı olayların olmadığını görmekteyiz. Elde edilen bu otomat aslında denetimsel gözetleyici S 'in kendisidir. Böylelikle iletişim tabanlı tren kontrolünün alt sistemi olan VATP için en alt seviye denetimsel gözetleyici S elde edilmiştir.

VATP sistemi diğer alt sistemlere *getinfoRATP*, *sendinfoRATP*, *sendinfoATS* ve *controlPSDdoor* olayları ile bağlanır. Bu olaylar paylaşılan olaylar olarak adlandırılır ve hiyerarşik daraltma için kullanılacak olaylar kümesinin elemanlarıdır. Bu olaylar kümesi ile VATP'nin bir üst seviyedeki modeli elde edilir.

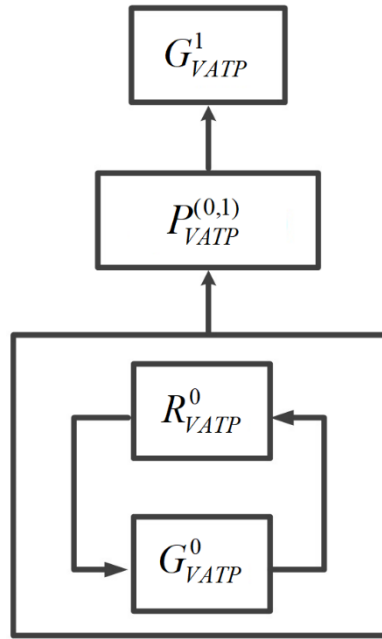
$$\Sigma_{VATP}^1 = \{getinfoRATP, sendinfoRATP, sendinfoATS, controlPSDdoor\} \text{ olarak ifade edilir}$$

$$\text{ve } \Sigma_{VATP}^1 \subseteq \Sigma_{VATP}^0 \text{ 'dir.} \quad (6.2)$$

Bu noktadan hareketle hiyerarşik daraltma yapmak için projeksiyon işlemi uygulanır. Üst seviye model G_{VATP}^1 ile ifade edilirken üst seviye VATP'nin eldesi ise $(R_{VATP}^0, P_{VATP}^{(0,1)}, G_{VATP}^1)$ ile gösterilir. Elde edilen üst seviye VATP sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.



Şekil 6. 6 VATP'nin üst seviye otomat modeli (G_{VATP}^1)

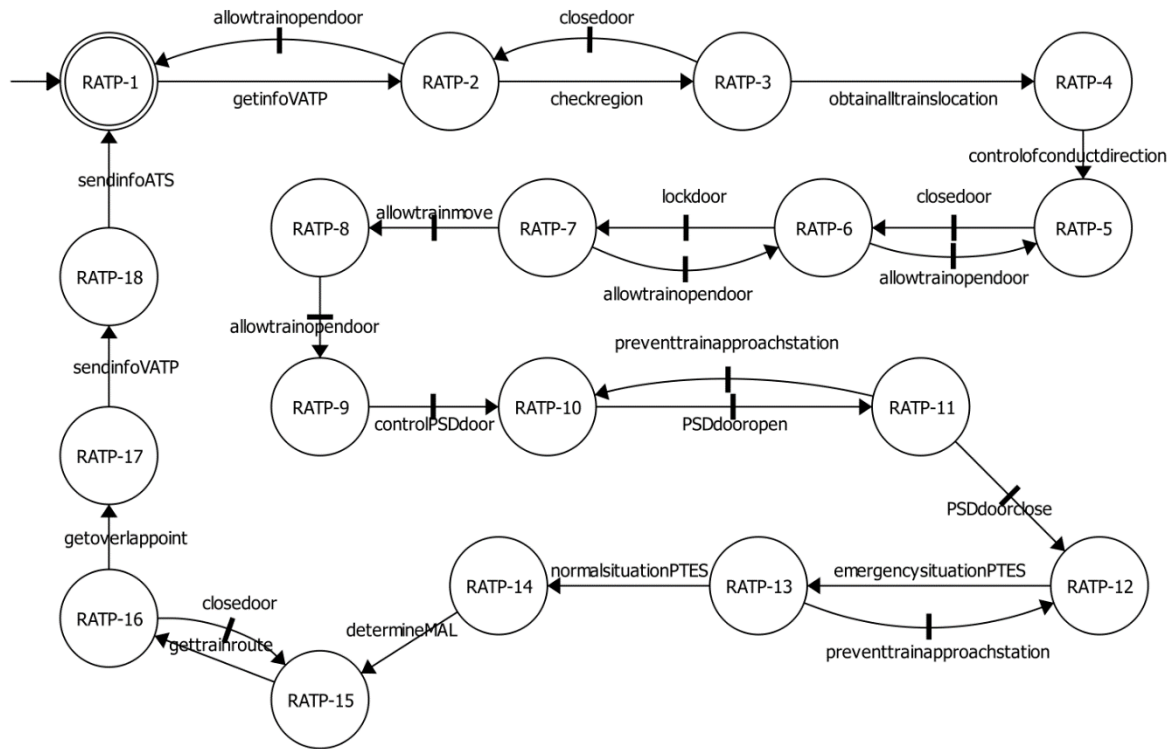


Şekil 6. 7 VATP'nin alt seviye ve üst seviye mimarisi

6.1.2 Bölgesel Otomatik Tren Koruması (RATP)

Şekil 6.8 'de bölgesel otomatik tren korumasının (RATP) düşük seviye otomat modeli görülmektedir. RATP trenin yer, hız ve yön bilgilerini VATP'den alır. RATP'nin en önemli görevlerinden biri hareket yetkisi sınırının (MAL) belirlenmesidir. Hareket yetkisi sınırının

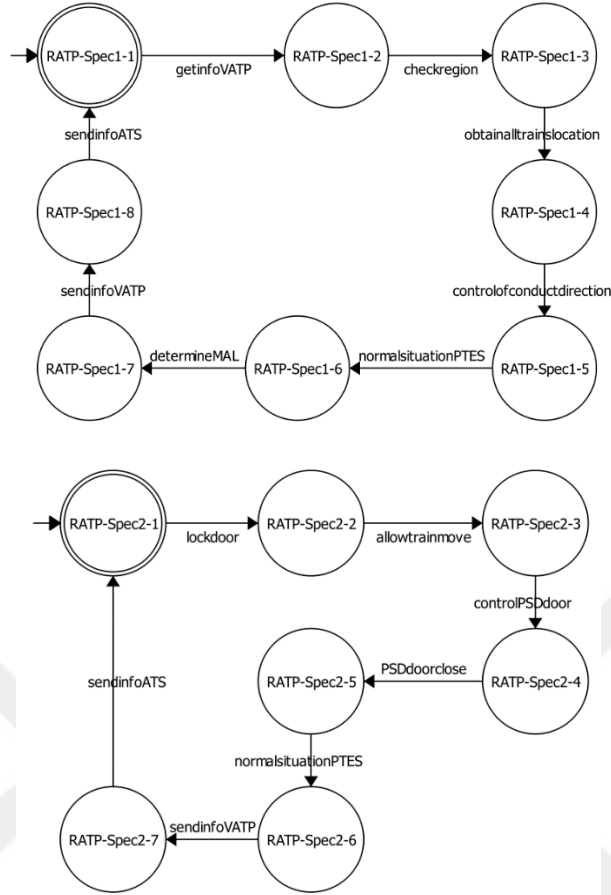
trenin hızına, frenleme kabiliyetine ve engele yaklaştığında durması gereken gidebileceği mesafeye dayanır.



Şekil 6. 8 RATP düşük seviye otomat modeli (G_{RATP}^0)

Şekil 6.9'te bölgesel otomatik tren koruması (RATP) için belirlenmiş iki tane tanımlama görülmektedir.

- D_{RATP-1}^0 : VATP'den bölgedeki trenlerin yer, hız ve yön bilgileri alınır. Daha sonra RATP ait olduğu sanal bölgeyi kontrol eder. Bölgedeki tüm trenlerin yerlerini öğrenir. Trenlerin bölgedeki hareket yönlerini kontrol eder. Eğer tren içinde acil durum butonu (PTES) normal durumda ise tren için hareket yetki sınırı belirlenir ve bu bilgi VATP ve ATS'ye iletilir.
- D_{RATP-2}^0 : Tren kapıları kilitlendikten sonra trenin hareket etmesine izin verilir. Peron ayırıcı kapıların (PSD) durumu kontrol edilir. Peron ayırıcı kapılar kapalı ve acil durum butonu normal ise bu bilgiler VATP'ye ve ATS'ye iletilir.



Şekil 6. 9 RATP için belirlenen tanımlamalar ($D_{RATP-1}^0, D_{RATP-2}^0$)

Tanımlamanın en genel hali ise, aşağıdaki tanımlamaların senkronize bileşimi

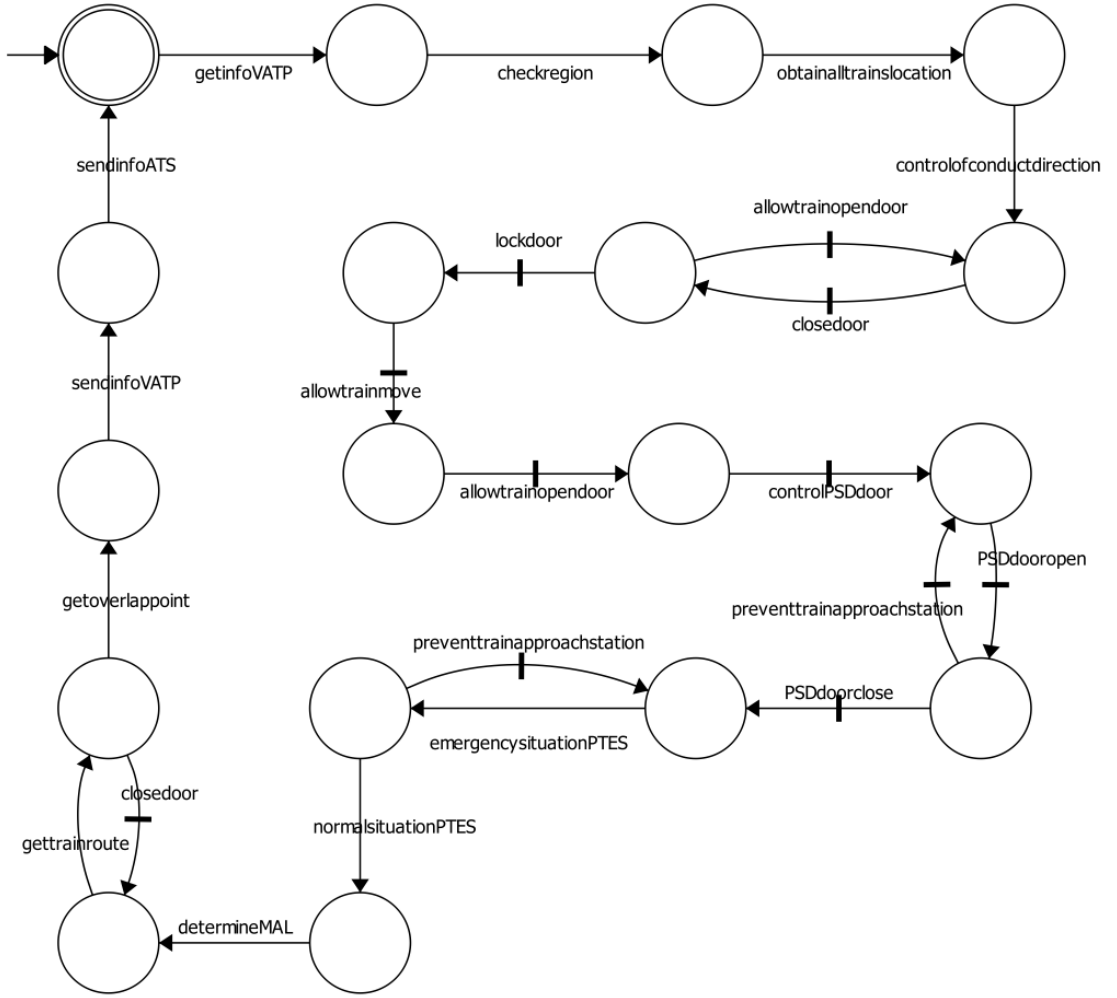
$D_{RATP}^0 = D_{RATP-1}^0 \parallel D_{RATP-2}^0$ ile elde edilir. Elde edilen D_{RATP}^0 'nin 28 durumu vardır.

RATP için kontrollü davranış aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$R_{RATP}^0 = \kappa_{L_m(D_{RATP}^0)}(L_m(G_{RATP}^0)) \quad (6.3)$$

Şekil 6.10'da alt seviye RATP sisteminin kontrollü davranışının R_{RATP}^0 otomat modeli görülmektedir. Burada istenilen davranışa yakın bir davranış modeli elde edilmiştir.

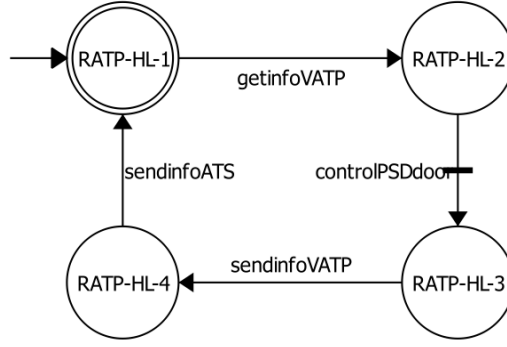
$\kappa_{L_m(D_{RATP}^0)}(L_m(G_{RATP}^0))$ işlemi ile istediğimiz davranışa en yakın davranışı yansıtan model elde edilmiştir. Elde edilen model Bölüm 3' te bahsettiğimiz en büyük kontrol edilebilir dil tanımının karşılığıdır.



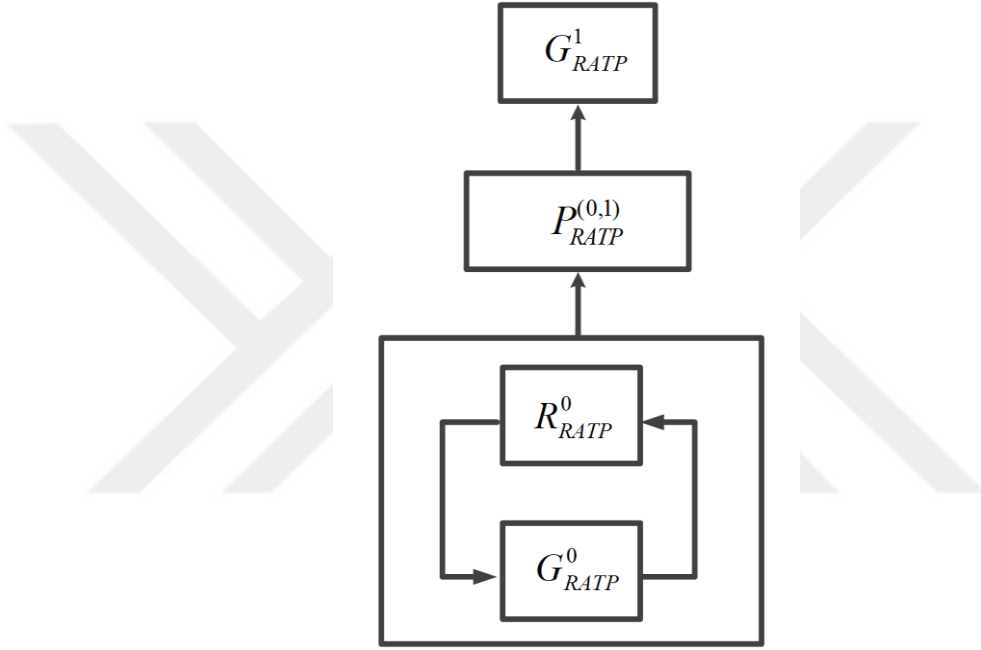
Şekil 6. 10 RATP'nin kontrollü davranışı (R_{RATP}^0)

RATP sistemi diğer alt sistemlere getinfoVATP, sendinfoVATP, sendinfoATS ve controlPSDdoor olayları ile bağlanır. Bu olaylar paylaşılan olaylar olarak adlandırılır ve hiyerarşik daraltma için kullanılacak olaylar kümesinin elemanlarıdır. Bu olaylar kümesi ile VATP'nin bir üst seviyedeki modeli elde edilir.

$\Sigma_{RATP}^1 = \{getinfoVATP, sendinfoVATP, sendinfoATS, controlPSDdoor\}$ olarak ifade edilir ve $\Sigma_{RATP}^1 \subseteq \Sigma_{RATP}^0$ 'dir. Elde edilen üst seviye RATP sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.



Şekil 6. 11 RATP'nin üst seviye otomat modeli (G^1_{RATP})

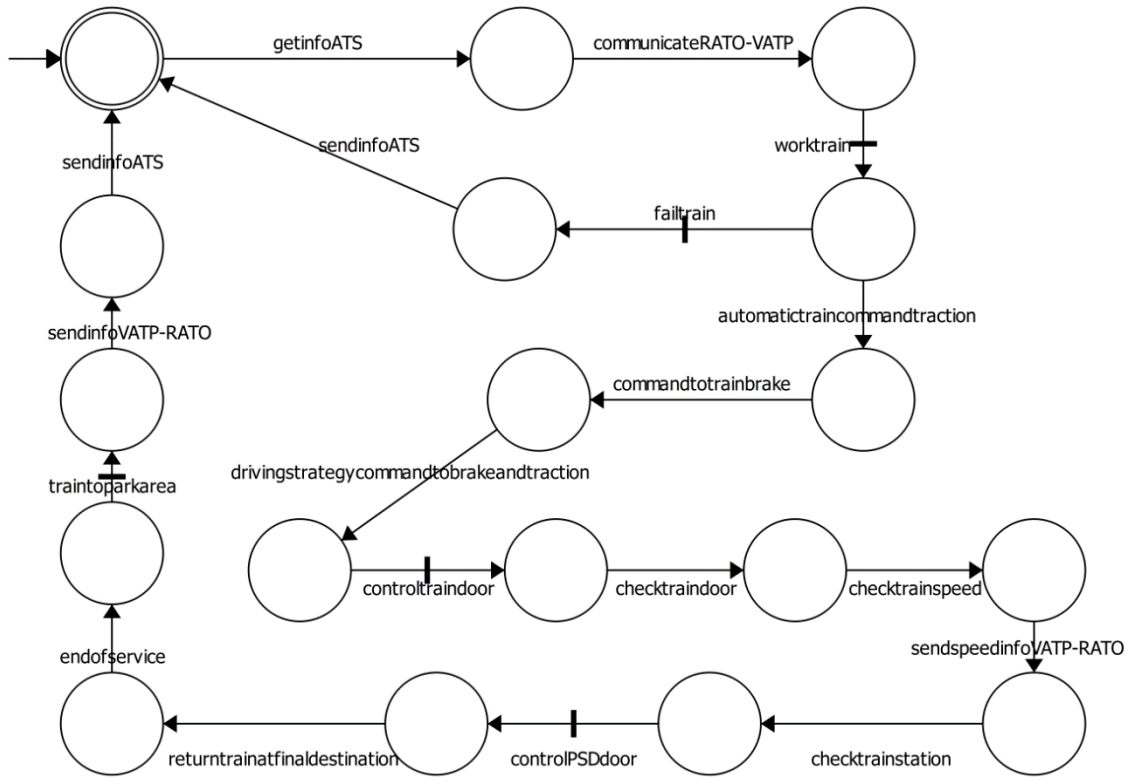


Şekil 6. 12 RATP'nin alt seviye ve üst seviye mimarisi

VATP ve RATP'ye uyguladığımız işlemlerin aynılarını araç üstü otomatik tren işletmesi (VATO) ve bölgesel otomatik tren işletmesi (RATO) için uygulayarak VATO ve RATO'nun kontrollü davranış otomat modeli ve yüksek seviye otomat modelleri elde edilir.

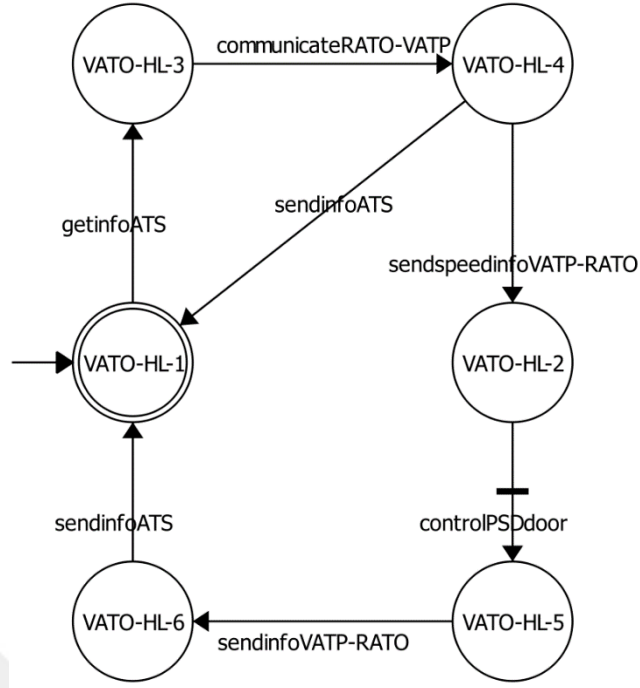
6.1.3 Araç Üstü Otomatik Tren İşletmesi (VATO)

VATO için iki adet tanımlama belirlenmiştir. Tanımlamanın en genel hali ise, aşağıdaki tanımlamaların senkronize bileşimi $D^0_{VATO} = D^0_{VATO-1} \parallel D^0_{VATO-2}$ ile elde edilir. Elde edilen D^0_{VATO} 42 durumludur. Kontrollü davranışı $\kappa_{L_m(D^0_{VATO})}(L_m(G^0_{VATO}))$ ifadesi ile elde ederiz.



Şekil 6. 13 VATO'nun kontrollü davranışı (R_{VATO}^0)

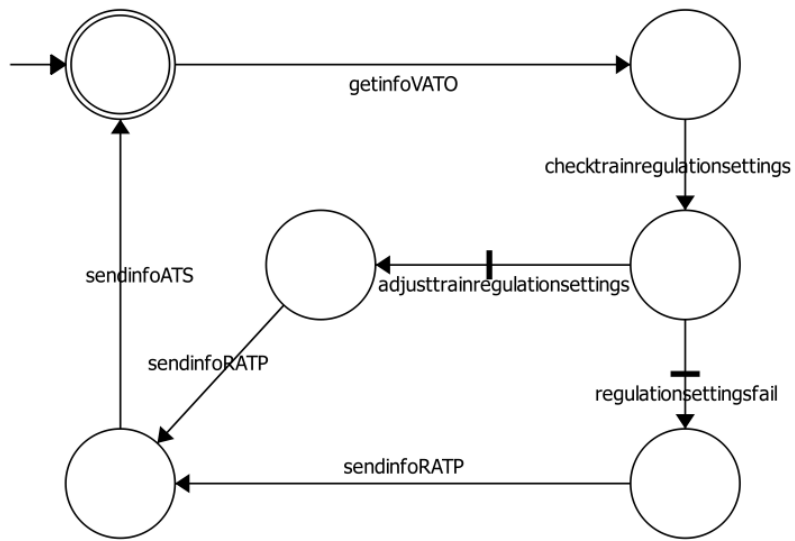
Paylaşılan olaylar $\Sigma_{VATO}^1 = \{communicateRATO - VATP, sendinfoVATP - RATO, getinfoATS, controlPSDdoor, sendinfoATS, sendspeedinfoVATP - RATO\}$ 'dir ve $\Sigma_{RATP}^1 \subseteq \Sigma_{RATP}^0$ 'dir. Buradan projeksiyon işlemi ile Şekil 6.14'te görülen VATO'nun üst seviye modeli elde edilir. Elde edilen üst seviye VATO sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.



Şekil 6. 14 VATO'nun üst seviye otomat modeli (G_{VATO}^1)

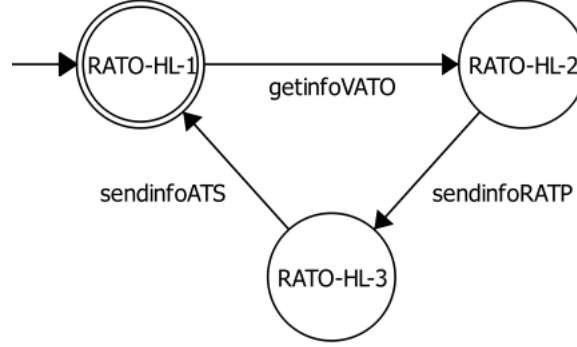
6.1.4 Bölgesel Otomatik Tren İşletmesi (RATO)

RATO için iki adet tanımlama yapılmıştır. Tanımlamanın en genel hali $D_{RATO}^0 = D_{RATO-1}^0 \parallel D_{RATO-2}^0$ ile elde edilir. RATO için kontrollü davranışı $\kappa_{L_m(D_{RATO}^0)}(L_m(G_{RATO}^0))$ ifadesi ile elde ederiz. Şekil 6.15'te bölgesel otomatik tren işletmesinin (RATO) kontrollü davranışı görülmektedir.



Şekil 6. 15 RATO'nun kontrollü davranışı (R_{RATO}^0)

Şekil 6.16'da bölgesel otomatik tren işletimi üst seviye otomat modeli görülmektedir. Elde edilen üst seviye RATO sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.



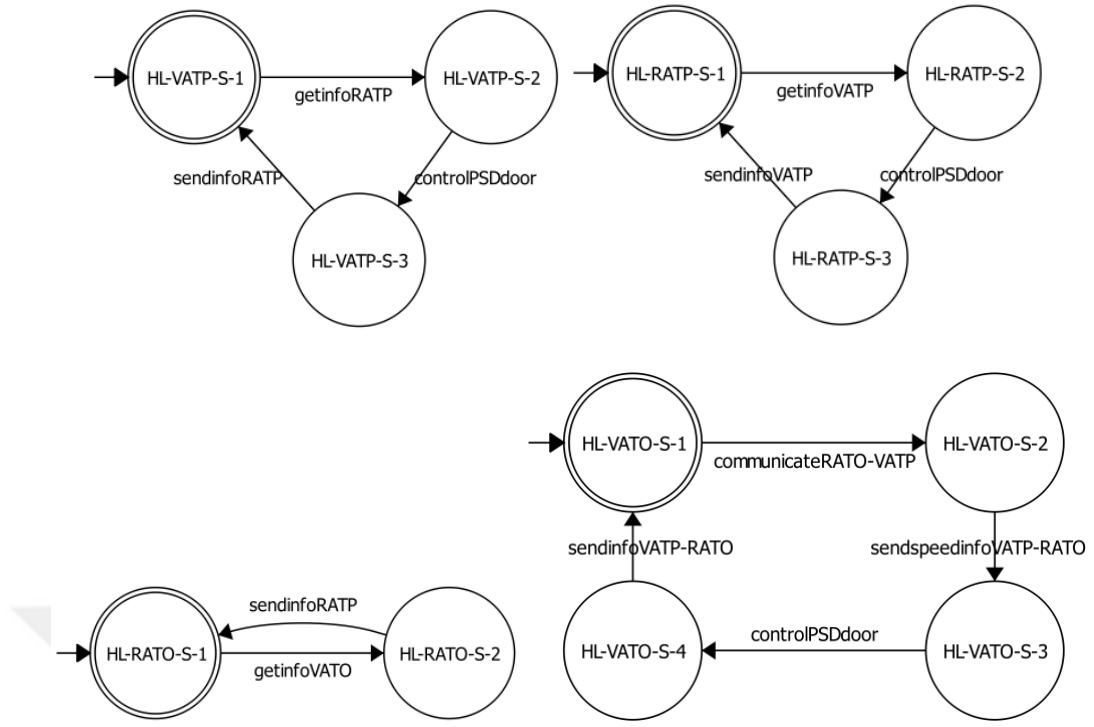
Şekil 6. 16 RATO'nin üst seviye otomat modeli (G_{RATO}^1)

6.1.5 Otomatik Tren Koruması (ATP) ve Otomatik Tren İşletimi (ATO)

Yukarıda elde edilen araç üstü otomatik tren koruması (VATP) ve bölgesel otomatik tren koruması (RATP) birleştirilerek otomatik tren koruması (ATP) elde edilir. Diğer yandan aynı şekilde araç üstü otomatik tren işletimi (VATO) ve bölgesel otomatik tren işletimi (RATO) birleştirilerek otomatik tren işletimi (ATO) elde edilir. ATP ve ATO'nun birleştirilmiş hali $G_{ATP-ATO}^1$ ise şu şekilde elde edilir.

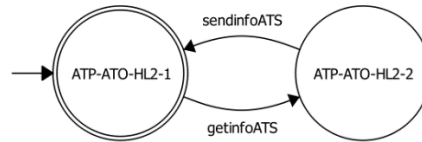
$G_{ATP-ATO}^1 = G_{VATP}^1 \parallel G_{RATP}^1 \parallel G_{VATO}^1 \parallel G_{RATO}^1$ elde edilen $G_{ATP-ATO}^1$ 'ün 44 durumu vardır.

Buradan paralel birleşim ile elde edilen $G_{ATP-ATO}^1$ VATP, RATP, VATO ve RATO'nun tüm dinamiklerini içermektedir. Buradan $G_{ATP-ATO}^1$ için tekrar tanımlamalar yapılır ve bu tanımlamalar ile denetimsel gözetleyici hesaplanır. ATP-ATO sistemi için 4 tane tanımlama yapılmıştır. Bu tanımlamaların en genel hali ise $D_{ATP-ATO}^1 = D_{VATP}^1 \parallel D_{RATP}^1 \parallel D_{VATO}^1 \parallel D_{RATO}^1$ ile elde edilir. Elde edilen $D_{ATP-ATO}^1$ 144 duruma sahiptir.



Şekil 6. 17 $G^1_{ATP-ATO}$ sistemi için yapılan tanımlamalar

Yapılan bu tanımlamalar kullanılarak $D^1_{ATP-ATO}$ elde edilir ve $\kappa_{L_m(D^1_{ATP-ATO})}(L_m(G^1_{ATP-ATO}))$ ile kontrollü davranış $R^1_{ATP-ATO}$ elde edilir. Elde edilen $R^1_{ATP-ATO}$ 44 duruma sahiptir. Üst seviye model $G^2_{ATP-ATO}$ için paylaşılan olaylar $\Sigma^2_{ATP-ATO} = \{getinfoATS, sendinfoATS\}$ olarak belirlenmiştir.



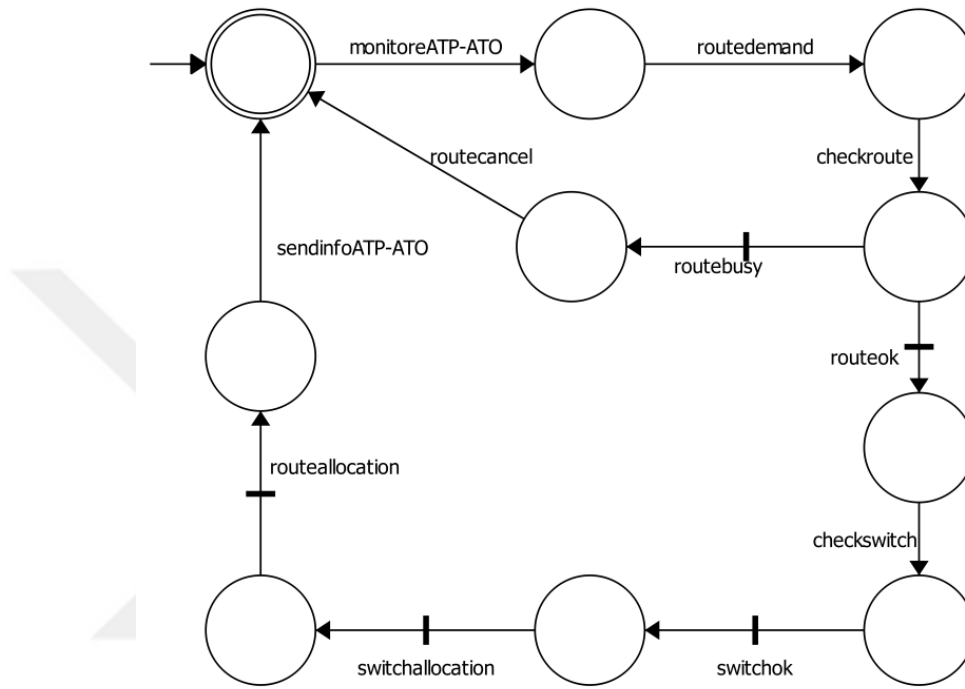
Şekil 6. 18 ATP-ATO'nun üst seviye otomat modeli ($G^2_{ATP-ATO}$)

6.2 Otomatik Tren Denetimi (ATS)

Otomatik Tren Denetimi (ATS), İletişim Tabanlı Tren Kontrolü için çok önemli bir yere sahiptir. Rota talepleri, değerlendirmeleri ve rota hattının durumu Otomatik Tren Denetimi ile sağlanır. Otomatik Tren Denetimi sürekli olarak otomatik tren koruması ve Otomatik Tren İşletimi ile iletişim halindedir bu sayede trenlerin rota üzerinde tüm aktivitelerini izler. ATS için 2 tane tanımlama yapılmıştır ve bu tanımlamalar sırasıyla 7

ve 4 duruma sahiptir. $D_{ATS}^0 = D_{ATS-1}^0 \parallel D_{ATS-2}^0$ ile en genel tanımlama elde edilir. D_{ATS}^0 , 28 duruma sahiptir. D_{ATS}^0 yardımıyla alt seviye kontrollü davranış elde edilir. $\kappa_{L_m(D_{ATS}^0)}(L_m(G_{ATS}^0))$ ile R_{ATS}^0 elde edilir.

ATS 'nin kontrollü davranışı Şekil 6.19'da görülmektedir.



Şekil 6. 19 ATS'nin kontrollü davranışı (R_{ATS}^0)

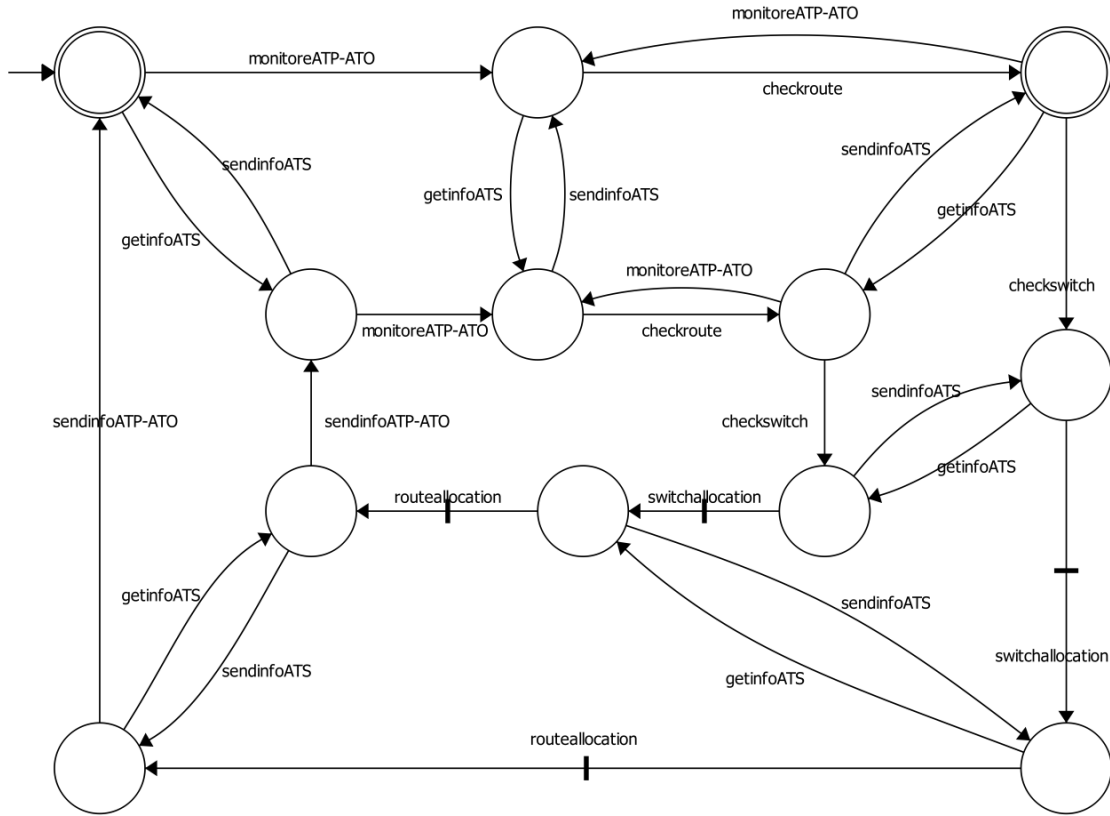
Paylaşılan olaylar ise $\Sigma_{ATS}^1 = \{checkroute, checkswitch, monitoreATP - ATO, routeallocation, sendinfoATP - ATO, switchallocation\}$ olarak belirlenmiştir. Buradan üst seviye ATS modeli ($G_{ATS}^1 = G_{ATS}^2$) elde edilir. G_{ATS}^1 6 duruma sahiptir. Elde edilen üst seviye ATS sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.

6.3 ATS-ATO-ATP Genel Sistemi

ATS, ATO ve ATP'nin elde edilen üst seviye otomat modellerinin eldesinin ardından bu sistemelerin birlikte çalışmalarını paralel birleşimi sonucu elde ederiz. Buradan ATS, ATO

ve ATP'nin birlikte çalıştığını gösteren en genel otomat tanımı

$G_{ATS-ATO-ATP}^2 = G_{ATS}^2 \parallel G_{ATP-ATO}^2$ ifadesi ile elde edilir. Bu otomat modelinin kontrollü davranışı Şekil 6.20'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 20 ATS-ATO-ATP'nin kontrollü davranışı ($R_{ATS-ATO-ATP}^2$)

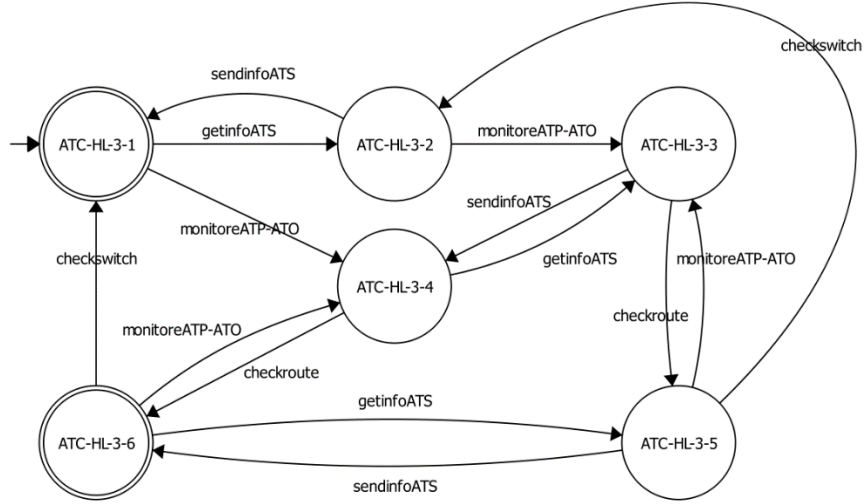
Elde edilen sistem için 3 adet tanımlama yapılmıştır. Bu tanımlamaların en genel hali ise

$D_{ATS-ATO-ATP}^2 = D_{ATS-ATO-ATP-1}^2 \parallel D_{ATS-ATO-ATP-2}^2 \parallel D_{ATS-ATO-ATP-3}^2$ ifadesi ile elde edilir.

$D_{ATS-ATO-ATP}^2$ 8 duruma sahiptir. Paylaşılan olaylar ise

$\Sigma_{ATS-ATO-ATP}^2 = \{getinfoATS, sendinfoATS, checkroute, checkswitch, monitoreATP - ATO\}$

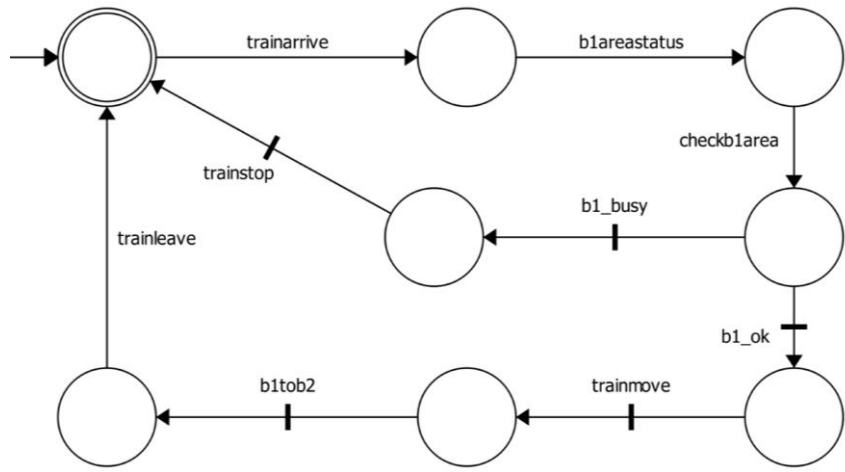
olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. 21 ATS-ATO-ATP'nin üst seviye otomat modeli ($G^3_{ATS-ATO-ATP}$)

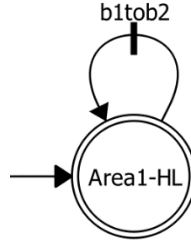
6.4 Sanal Bölgeler

Tüm rota hattı sanal bölgelere bölünmüştür. Tren rota tanzimi için talepte bulunduğu tüm sanal hatlar kontrol edilerek durumu ATS tarafından izlenir. Uygun koşullar altında bölgelerin durumuna göre rota tanzimi yapılır. Sanal bölge için bir adet tanımlama D_b^0 yapılmıştır. D_b^0 6 duruma sahiptir.



Şekil 6. 22 Sanal bölgelerin (b) kontrollü davranışı (R_b^0)

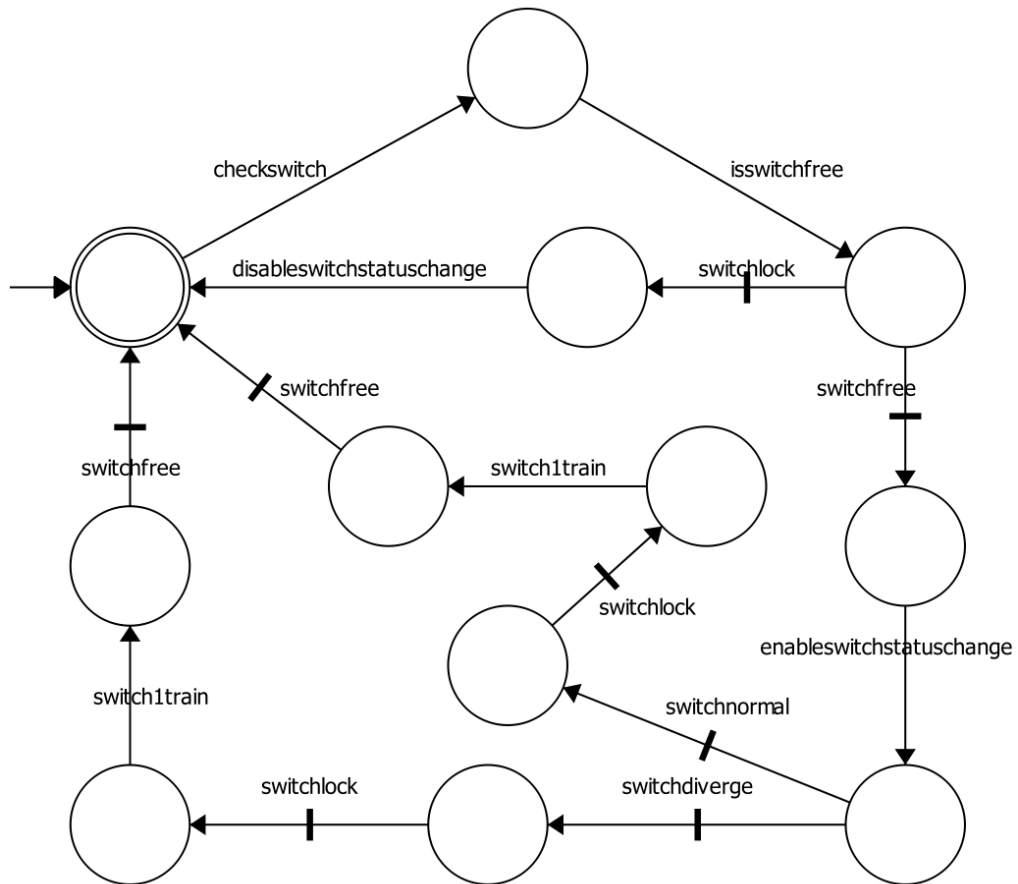
Sanal bölge için projeksiyon işlemi yapıldığında üst seviye sanal bölge modeli elde edilir. Sanal bölge için paylaşılan olay $\Sigma_m^1 = \{b1tob2\}$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen üst seviye sanal bölge (b) sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.



Şekil 6. 23 Sanal bölge üst seviye otomat modeli ($G_b^1 = G_b^2 = G_b^3$)

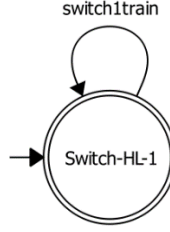
6.5 Makaslar

Makaslar ray hattında yön değiştirmeyi sağlayan elemanlardır. Trenin rota talebine göre makaslar normal ve sapan olmak üzere ayarlanabilir. Ayarlanan duruma göre tren yön değiştirir veya değiştirmeden yoluna devam edebilir. Makaslar için tek bir tanımlama (D_m^0) yapılmıştır. Bu tanımlama 10 adet duruma sahiptir. Yapılan bu tanımlama D_m^0 yardımıyla alt seviye kontrollü davranış R_m^0 elde edilir.



Şekil 6. 24 Makasların (m) kontrollü davranışı (R_m^0)

Makas için belirlenen paylaşılan olaylar ile üst seviye model elde edilir. Paylaşılan olay $\Sigma_m^1 = \{switch1train\}$ olarak belirlemiştir. Elde edilen üst seviye makas (m) sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.

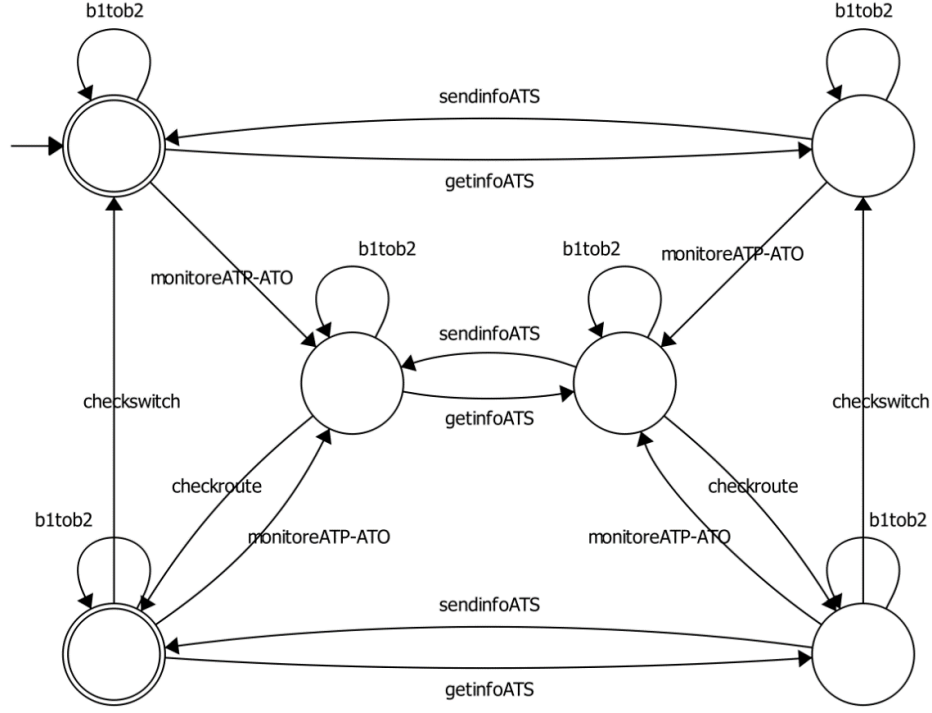


Şekil 6. 25 Makasın üst seviye otomat modeli($G_m^1 = G_m^2 = G_m^3$)

6.6 Sanal Bölge-1 ATS ATP ve ATO

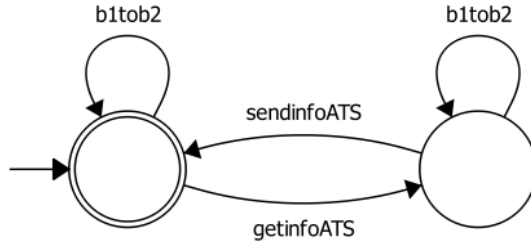
Şekil 6.2’de izlenecek rota incelendiğinde sanal bölge-1 (b_1) içinde ATS, ATP ve ATO bulundurmaktadır. Genel sistem olarak bir bölge içindeki tüm elemanların eşzamanlı çalışmasını sağlamak için elde ettiğimiz tüm üst seviye otomat modellerine paralel birleşim $G_{b_1-ATS-ATP-ATO}^3 = G_{b_1}^3 \parallel G_{ATS-ATP-ATO}^3$ işlemi uygulanır ve sistemin en genel davranışını içeren $G_{b_1-ATS-ATO-ATP}^3$ otomatı elde edilir. $G_{b_1-ATS-ATO-ATP}^3$ 6 duruma sahiptir. Sonuç olarak yapılan paralel birleşim işlemi ile sanal bölge içinde tüm sistemlerin birbirleriyle uyumlu olarak çalışmasını sağlanır. Diğer yandan rotanın sanal bölge-1 (b_1) içinde ATS, ATP ve ATO kısmı için iki adet tanımlama yapılmıştır. Genel tanımlama $D_{b_1-ATS-ATP-ATO}^3 = D_{b_1-ATS-ATP-ATO-1}^3 \parallel D_{b_1-ATS-ATP-ATO-2}^3$ ile elde edilir. $D_{b_1-ATS-ATP-ATO}^3$ 2 adet duruma sahiptir. Burada yapılan tanımlamalar sanal bölge otomatik tren denetimi, otomatik tren koruması ve otomatik tren işletiminin tümünün dinamiklerini içermektedir. Yapılan bu tanımlamalar ile kontrollü davranış elde edilir.

$\kappa_{L_m(D_{b_1-ATS-ATP-ATO}^3)}(L_m(G_{b_1-ATS-ATP-ATO}^3))$ ile $R_{b_1-ATS-ATP-ATO}^3$ elde edilir.

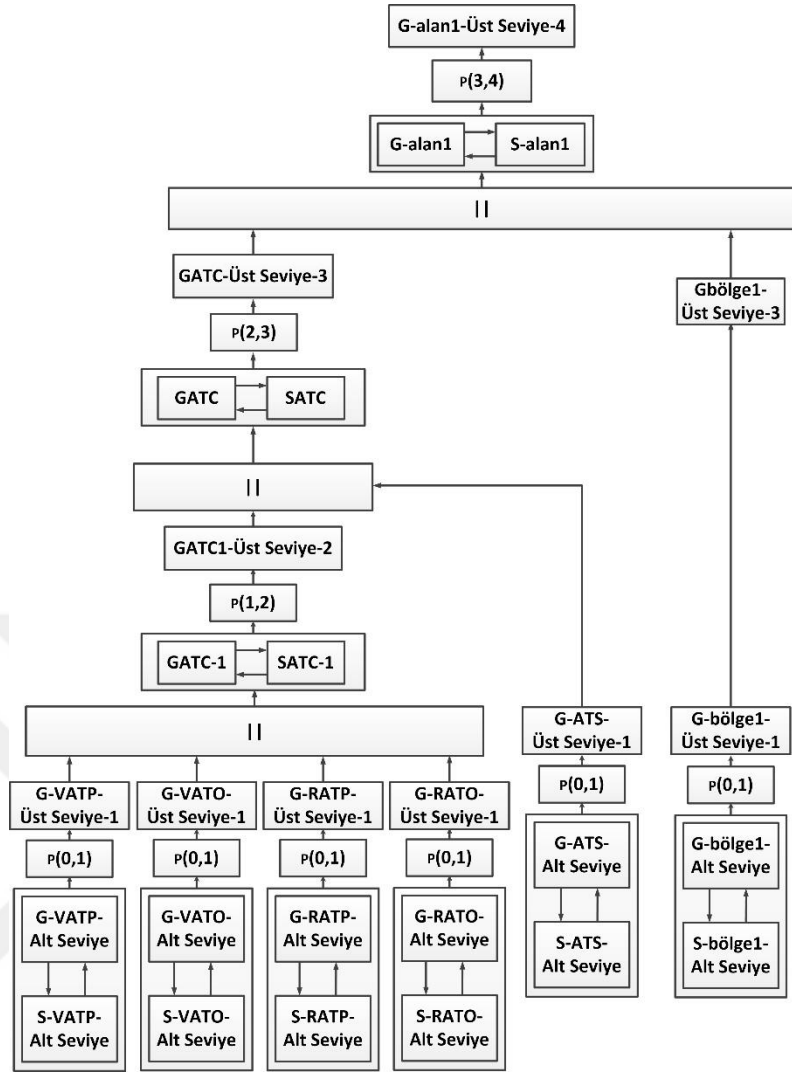


Şekil 6. 26 Sanal bölge-1 (b_1), ATS, ATP ve ATO kontrollü davranışı ($R^3_{b_1-ATS-ATP-ATO}$)

Sanal bölge-1, ATS, ATP ve ATO sisteminin bir üst seviye modelini elde etmek için paylaşılan olaylar kümesi $\Sigma^4_{b_1-ATS-ATP-ATO} = \{b1tob2, getinfoATS, sendinfoATS\}$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen üst seviye sanal bölge-1 (b_1), ATS, ATP ve ATO sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.



Şekil 6. 27 Sanal bölge-1 (b_1), ATS, ATP ve ATO üst seviye modeli ($G^4_{b_1-ATS-ATP-ATO}$)



Şekil 6. 28 b_1 , ATS, ATP ve ATO merkezi olamayan hiyerarşik kontrol mimarisi

6.7 Sanal Bölge-2 Makas-1 Makas-4 ATS ATP ve ATO

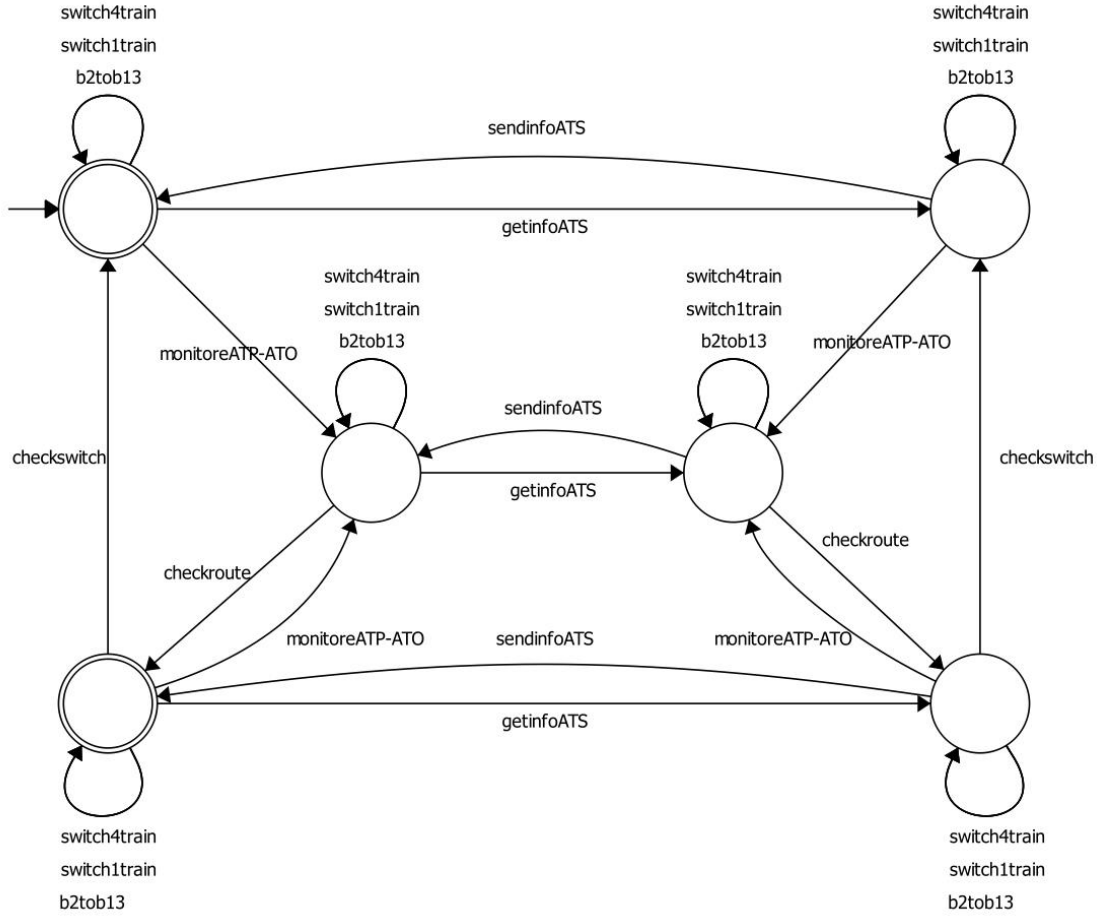
Şekil 6.2'de izlenecek rota incelendiğinde rotanın bu kısmı içinde sanal bölge-2 (b_2), sanal bölge-13 (b_{13}), makas-1 (m_1), makas-4 (m_4) ATS, ATP ve ATO bulundurmaktadır. Bunun yanı sıra tren makas-1'den (m_1) geçiş yaptığında sanal bölge-13'e (b_{13}) yönlenecek ve sanal bölge-13 (b_{13}) giriş yapmak için makas-4'ü (m_4) kullanacaktır. Bölge içindeki sistemin en gelen modeli paralel birleşim ile elde edilir.

$G_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3 = G_{b_2}^3 \parallel G_{m_1}^3 \parallel G_{m_4}^3 \parallel G_{ATS-ATP-ATO}^3$ genel sistem otomati elde edilir.

$G_{b_2-m_1-b_{13}-m_4-ATS-ATP-ATO}^3$ otomati 6 durumludur. Diğer yandan rotanın sanal bölge-2 (b_2),

sanal bölge-13 (b_{13}), makas-1 (m_1), makas-4 (m_4) ATS, ATP ve ATO kısmı için 3 adet tanımlama yapılmıştır. Tanımlamaların en genel hali $D_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3$ paralel birleşim ile bulunur. $D_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3$ otomatı 4 duruma sahiptir. Yapılan bu tanımlamalar ile kontrollü davranış elde edilir. Kontrollü davranış şu ifade

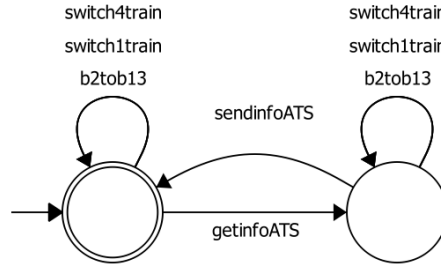
$\kappa_{L_m(D_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3)}(L_m(G_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3))$ ile $R_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3$ ile elde edilir.



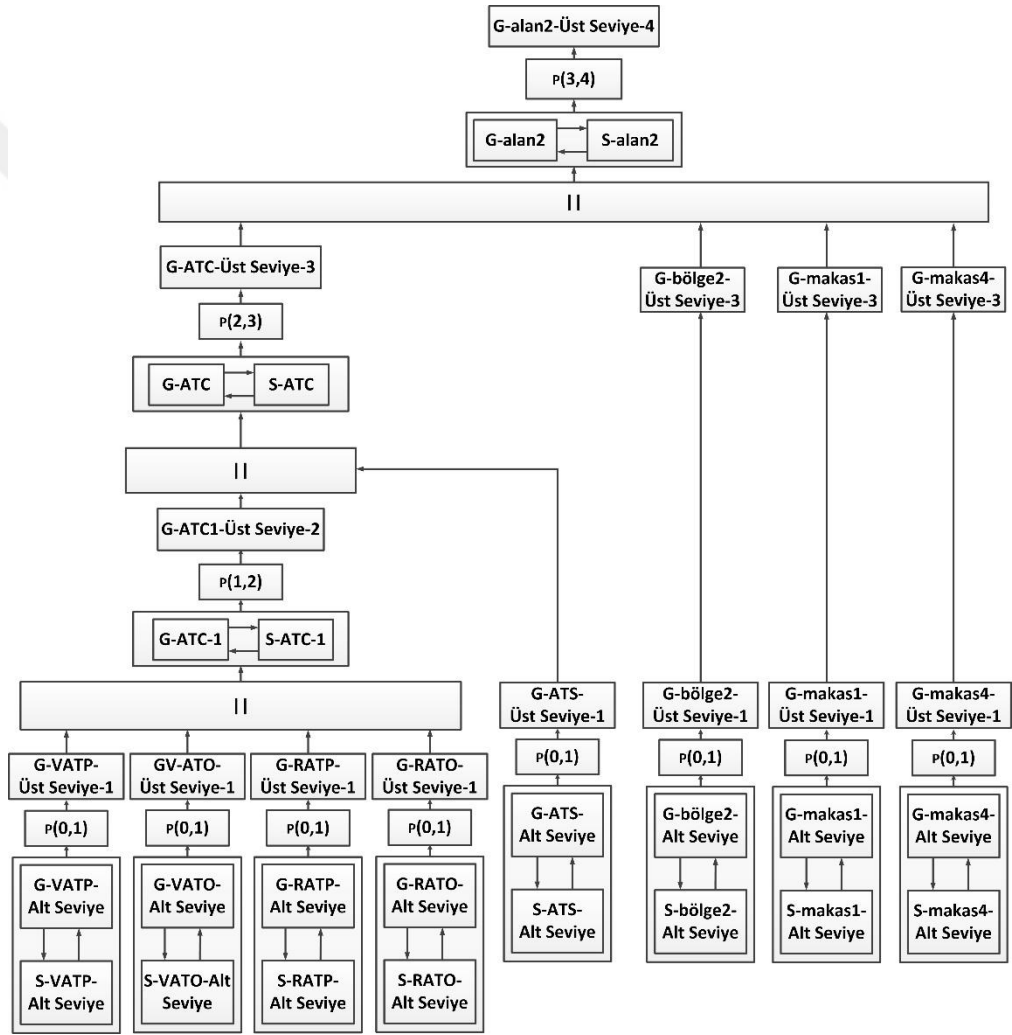
Şekil 6. 29 b_2 , m_1 , m_4 , ATS, ATP ve ATO kontrollü davranışı ($R_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^3$)

Sanal bölge-2, makas-1, makas-4 ATS, ATP ve ATO sisteminin bir üst seviye modelini elde etmek için paylaşılan olaylar kümesi aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Elde edilen üst seviye sanal bölge-2 (b_2), makas-1(m_1), makas-4(m_4), ATS, ATP ve ATO sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.

$$\Sigma_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^4 = \{b2tob13, switch1train, switch4train, getinfoATS, sendinfoATS\}$$



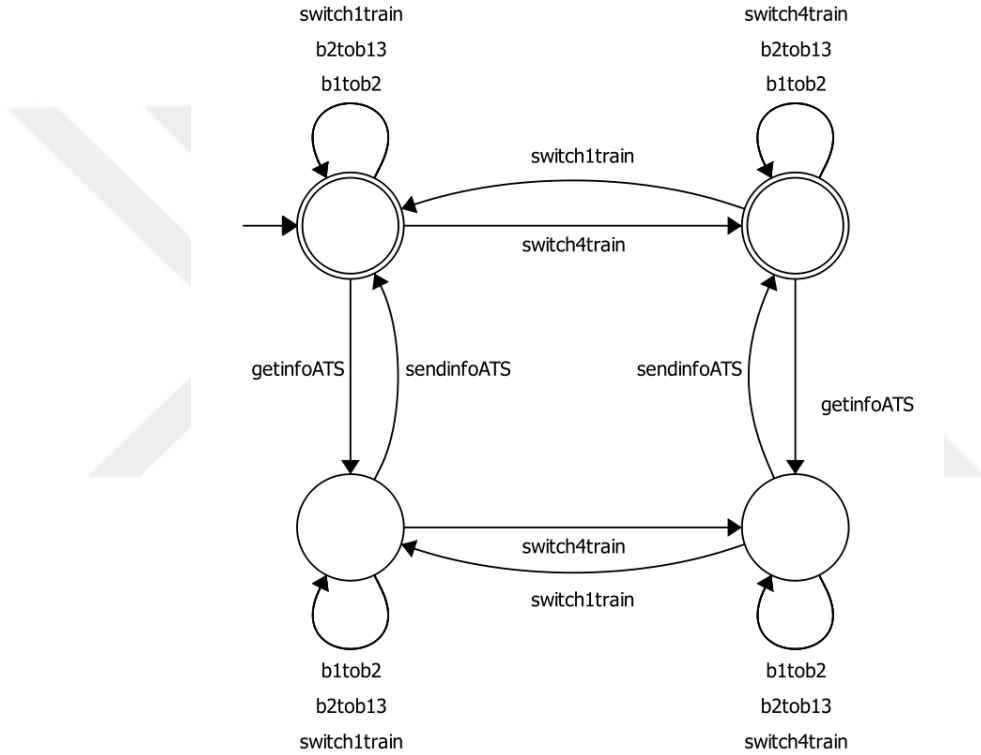
Şekil 6. 30 b_2, m_1, m_4, ATS, ATP ve ATO üst seviye modeli ($G_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^4$)



Şekil 6. 31 b_2, m_1, m_4, ATS, ATP ve ATO merkezi olamayan ve hiyerarşik mimarisi

6.8 Sanal Bölgelerin Genel Hali

$G_{b_1-ATS-ATP-ATO}^4$ bölge-1 ve $G_{b_2-m_1-m_4-ATS-ATP-ATO}^4$ bölge-2 olarak isimlendirilirse tüm sanal bölgelerin genel hali ise $G_{bölge1-bölge2}^4$ bölge-1 ve bölge-2'nin paralel birleşimi $G_{bölge1-bölge2}^4 = G_{bölge1}^4 \parallel G_{bölge2}^4$ ile elde edilir. $G_{bölge1-bölge2}^4$ 2 duruma sahiptir. Diğer yandan sanal bölgelerin hali için 3 adet tanımlama yapılmıştır. Tanımlamaların en genel hali $D_{bölge1-bölge2}^4 = D_{bölge1-bölge2-1}^4 \parallel D_{bölge1-bölge2-2}^4 \parallel D_{bölge1-bölge2-3}^4$ ile elde edilir. $D_{bölge1-bölge2}^4$ 4 adet duruma sahiptir. Yapılan tanımlamalarla ile kontrollü davranış elde edilir.

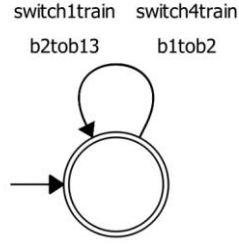


Şekil 6.32 Bölge-1 ve bölge-2 kontrollü davranışı ($R_{bölge1-bölge2}^4$)

Son olarak bölge-1 ve bölge-2'nin bir üst seviye modeli için paylaşılan olaylar

$$\Sigma_{bölge1-bölge2}^5 = \{b1tob2, b2tob13, switch1train, switch4train\} \text{ olarak belirlenmiştir.}$$

Elde edilen üst seviye bölge-1 ve bölge-2 sistemi modeli kilitlenmesiz olma kontroledilebilirlik ve tutarlılık koşullarını sağlamaktadır.



Şekil 6. 33 Bölge-1 ve bölge-2 üst modeli($G_{bölge1-bölge2}^5$)

[illegible]

62

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikle Ramadge ve Wonham (RW) denetimsel gözetleyici teorisi temel argümanları ile ayrıntılı bir şekilde anlatılmış ve bu teoriye ait matematiksel kavramlar açıklanmıştır. Dil ve otomat kavramları detaylandırılarak anlatılmış olup bir sistemin davranışının otomatlarla ve dillerle nasıl ifade edileceği gösterilmiştir. Merkezi olmayan kontrol mimarisi ve hiyerarşik kontrol mimarisi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Daha sonra İletişim Tabanlı Tren Kontrol sisteminin tüm altyapısı, içerdiği teknoloji ve matematiksel-fiziksel arka planı anlatılmıştır. Son olarak RW teorisi merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol mimarisi ile İletişim Tabanlı Tren Kontrolüne uygulanmıştır.

Bu çalışmada ayrık olaylı sistem olan İletişim Tabanlı Tren Kontrolü sistemi alt sistemlere ayrılmıştır. Her bir alt sistemin davranışını formal olarak sergileyen otomat modelleri oluşturulmuştur. Her bir alt sistem için tanımlamalar yapılmıştır ve her bir alt sistem için denetimsel gözetleyici hesabı yapılmıştır. Merkezi olmayan mimari ve hiyerarşik kontrol mimarisi birleştirilerek, elde edilen sistem modelleri ve denetimsel gözetleyicilerle merkezi olmayan hiyerarşik kontrol yapısı kurulmuştur.

Sistemi tek parça olarak düşünerek monolitik yaklaşımla denetimsel gözetleyici sentez hesabı yapıldığında elde edilen hesap çok karmaşık bir hal alır. Bunun sebebi sistemin yapısı itibarıyla çok fazla sayıda bileşene sahip olmasıdır. Bileşen sayısı arttıkça durum uzayı katlanarak artar ve durum uzayı patlaması sonucuyla karşı karşıya kalırız.

Merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol mimarisi ile durum uzayı patlaması, model karmaşıklığı minimize edildi ve denetimsel gözetleyici hesaplama süresi kısaltılmış oldu.

Şöyle ki monolitik yaklaşımla sadece VATP, RATP, VATO, RATO'yu içeren düşük seviye modelde yaklaşık 5000 durum mevcuttur. Bu model için bir denetimsel gözetleyici hesabı çok zordur. Diğer yandan sistemi alt sistemlere ayırarak elde edilen modellerden VATP 28 duruma, RATP 18 duruma, VATO 18 duruma ve RATO 6 duruma sahiptir. Bu modeller için elde edilen denetimsel gözetleyici modelleri VATP için 25 duruma, RATP 22 duruma, VATO 22 duruma ve RATO 6 duruma sahiptir. Burada herbir alt sistem için bireysel tanımlamalar yapılmıştır ve bu tanımlamalarla her bir alt sistem için bireysel denetimsel gözetleyiciler elde edilmiştir. Paylaşılan olaylarla bu sistemler birbirine bağlanmıştır. Bağlama işlemi paralel birleşim işlemi ile yapılmıştır. Paylaşılan bu olaylar bir üst seviye oluşturulurken projeksiyon işleminde kullanılmıştır. Her bir alt sistemin bireysel üst seviye modelleri elde edilmiştir ve bu dört alt sistemin üst seviye modelleri ile ortak üst seviye model elde edilmiştir. Elde edilen bu model 44 duruma sahiptir ve bu üst seviye ortak model için tasarlanan denetimsel gözetleyici 44 duruma sahiptir.

Sonuçlardan anlaşılacağı üzere monolitik yaklaşımla meydana gelen durum uzayı patlaması, karmaşıklık ve denetimsel gözetleyici hesaplama süresinin uzunluğu, merkezi olmayan ve hiyerarşik kontrol mimarisi ile azaltılmıştır.

KAYNAKLAR

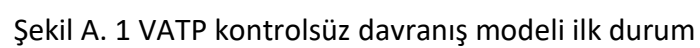
- [1] Ramadge, P.J. ve Wonham, W. M., (1987). "Supervisory Control of a Class of Discrete Event Systems". *SIAM Journal on Control and Optimization*, 25: 206–230.
- [2] Wonham, W.M. ve Ramadge, P., (1987). "On the supremal controllable sublanguage of a given language." *SIAM Journal on Control and Optimization*, 25: 637–659.
- [3] Zhong, H. ve Wonham, W.M., (1990). " On the Consistency of Hierarchical Supervision in Discrete-Event Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35: 1125-1134.
- [4] Rudie, K. ve Wonham, W.M., (1992). "Think Globally, Act Locally: Decentralized Supervisory Control", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37: 1692-1708.
- [5] Wong, K.C. ve Wonham, W.M., (1996). "Hierarchical Control of Discrete-Event Systems", *Discrete Event Dynamic Systems*,6(3): 241-273.
- [6] Yoo, T.S. ve Lafortune, S., (2002). "A General Architecture for Decentralized Supervisory Control of Discrete-Event Systems", *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 12: 335-377.
- [7] Jiang, S., Kumar, R., Takai, S. ve Qiu, W., (2010). "Decentralized Control of Discrete-Event Systems with Multiple Local Specializations", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 7(3): 512-522.
- [8] Hubbard, P. ve Caines, P.E., (2002). "Dynamical Consistency in Hierarchical Supervisory Control", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(1):37-52.
- [9] Cunha, A.E.C. da, Cury, J.E.R., ve Krogh, B.H., (2002). "An Assume Guarantee Reasoning for Hierarchical Coordination of Discrete-Event Systems" *Proceedings of the Sixth International Workshop on Discrete Event Systems (WODES '02)*, 78-80.
- [10] Lee, S.H. ve Wong, K.C., (2002). "Structural Decentralised Control of Concurrent Discrete-Event Systems", *European Journal of Control*, 8(5): 477-491.
- [11] Schmidt, K., Reger, J. ve Moor, T., (2004). "Hierarchical Control for Structural Decentralized DES" *Science Direct IFAC Proceedings*,37(18): 279-284.

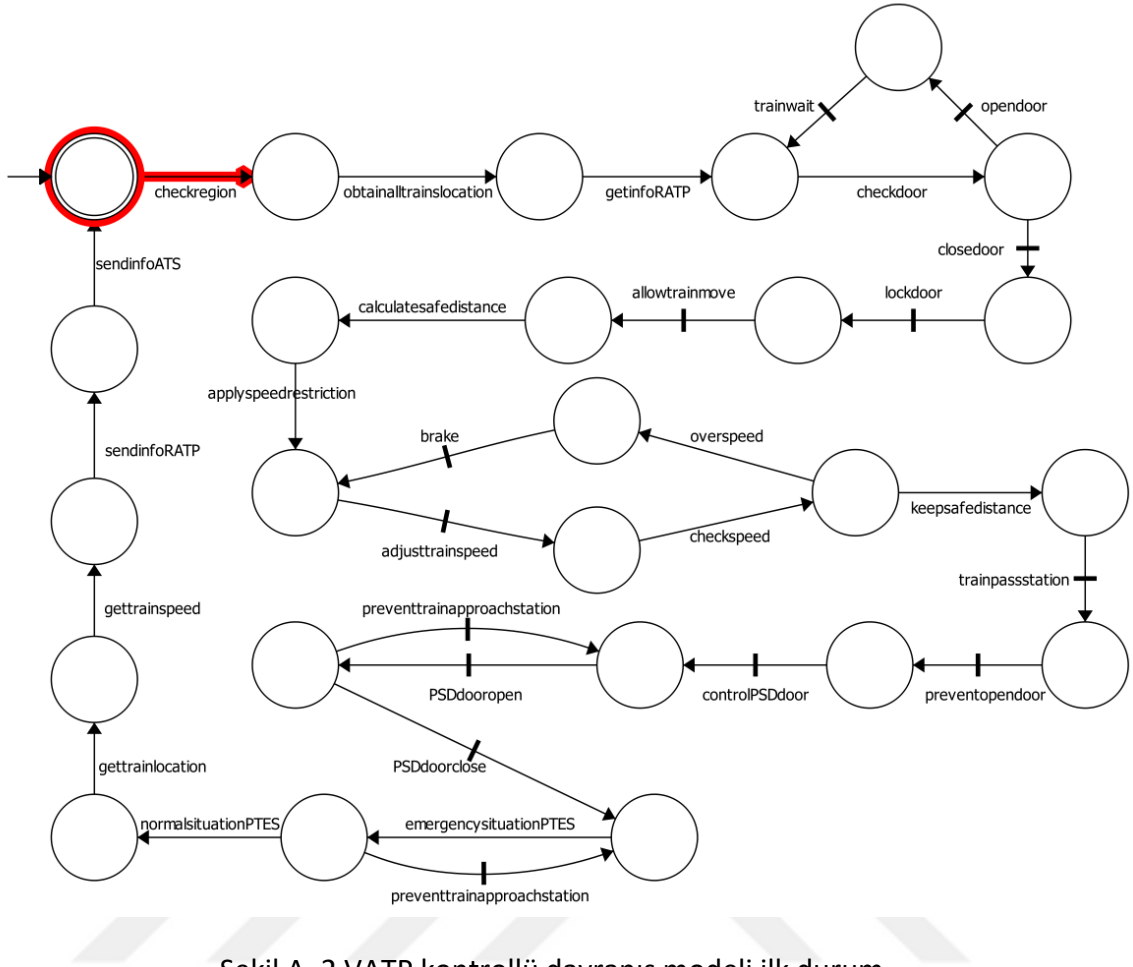
- [12] Schmidt, K., Moor, T. ve Perk, S., (2005). "A Hierarchical Architecture for Nonblocking Control of Discrete Event Systems", Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 902-907.
- [13] Schmidt, K., Moor, T. ve Perk, S., (2008). "Nonblocking Hierarchical Control of Decentralized Discrete Event Systems" IEEE Transactions on Automatic Control, 53(10): 2252-2265.
- [14] Siahvashi, A. ve Moaveni, B., (2010). "Automatic Train Control Based on the Multi-Agent Control of Cooperative Systems" The Journal of Mathematics and Computer Science, 1(4): 247-257.
- [15] Tang, T., Liu, S. ve Wang, X., (2013). "Study on Modeling and Verification of CBTC Interlocking System". 5th IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 350-354.
- [16] Yin, J., Tang, T., Yang, L., Xun, J., Huang, Y. ve Gao, Z., (2017). "Research and Development of Automatic Train Operation for Railway Transportation Systems: A Survey". Transportation Research Part C 85: 548–572.
- [17] Farooq, J. ve Soler, J., (2017). "Radio Communication for Communication-Based Train Control (CBTC): A Tutorial and Survey." IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(3): 1377-1402.
- [18] Álvarez, R. ve Crocker M. (2018), Converging Parallels: How Automated Vehicles and Driverless Trains Influence Each Other, Rail Systems Australia, Australia.
- [19] Cassandras, C.G. ve Lafortune, S., (2008). Introduction to Discrete Event Systems Second Edition, Springer Science+Business Media, LLC.
- [20] Kaymakçı, T.Ö., (2007). Ayrık Olay Sistemleri için Optimal Denetimsel Gözetleyici Tasarımı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] Martin, J.C., (1991). Introduction to Languages and the Theory of Computation, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- [22] Kumar, R. ve Garg, V., (1995). "Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems", Kluwer Academic Publishers.
- [23] Thistle, J.G., (1996). "Supervisory Control of Discrete Event Systems", Mathematical and Computer Modeling, 25: 25-53.
- [24] Wonham, W.M. ve Ramadge, P.J., (1987). "On the Supremal Controllable Sublanguage of a Given Language", SIAM Journal of Control and Optimization, 25: 637-659.
- [25] Schmidt, K., (2005). Hierarchical Control Of Decentralized Discrete Event Systems Theory and Application, Doktora Tezi, Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Almanya.
- [26] Lin, F. ve Wonham, W. M., (1991). "Verification of Nonblocking Indecentralized Supervision." Control-Theory and Advanced Technology, 7(11): 223–232.

- [27] Leduj, R.J., (2002). Hierarchical Interface-Based Supervisory Control. Doktora Tezi , University of Toronto, Toronto, Canada.
- [28] Wonham, W.M., (2015). Supervisory Control of Discrete Event Systems, ECE 1636F/1637S 2014-15, University of Toronto, Toronto, Canada.
- [29] Raylı Sistemlerde Sinyalizasyon Ekipmanları. <https://www.endustri40.com/rayli-sistemlerde-sinyalizasyon-ekipmanlari/>, 28 Aralık 2018.
- [30] Wang,Y., Schutter, De B., Boom, van den T.J.J ve Ning, B., (2014). "Optimal Trajectory Planning for Trains Under Fixed and Moving Signaling Systems Using Mixed Integer Linear Programming",Science Direct, Control Engineering Practice, 22: 44-56.
- [31] Oz, M.A. ve Kaymakci, O. T., (2017). "An Automatic Formal Model Generation and Verification Method for Railway Interlocking Systems",Gazi University Journal of Science, 30(2): 133-147.
- [32] Sener, I., Kaymakci, O. T., U. Ustoglu, I. ve Cansever, G., (2014). "Specification And Formal Verification of Safety Properties in a Point Automation System", Science Direct, IFAC Proceedings Volumes 47 (3): 12140-12145.
- [33] Sabit Blok ve Hareketli Blok Sinyalizasyon Dilleri. <https://www.elektrikport.com/makale-detay/sabit-blok-ve-hareketli-blok-sinyalizasyon-dilleri-elektrikport-akademi/16859#ad-image-0>, 29 Aralık 2018
- [34] Wikipedia. Communications-Based Train Control, https://en.wikipedia.org/wiki/Communications-based_train_control, 30 Aralık 2018.
- [35] CBTC Sinyalizasyon Sistemi Nedir?,<http://www.demiryolcuyuz.biz/forum/cbtc-sinyalizasyon-sistemi-nedir-t4479.0.html>, 30 Aralık 2018.
- [36] Communications-Based Train Control (CBTC), <http://www.railsystem.net/communications-based-train-control-cbtc/>, 31 Aralık 2018.
- [37] Railway, <http://www.ison-tech.com/Application/Railway?lang=1>, 31 Aralık 2018.
- [38] Frost ve Sullivan., (2013). Strategic Analysis of Communication Based Train Control Systems in the Western European Urban Rail Market, <http://www.frost.com/sublib/displayreport.do?id=M92D-01-00-00-00>, 1 Ocak 2019.
- [39] The Global Rail Market Now to 2016: UNIFE Study Key Findings & Future Outlook, http://www.rolandberger.at/media/pdf/rb_press/Roland_Bergr_Studie_UNIFE_20080924.pdf, 1 Ocak 2019.

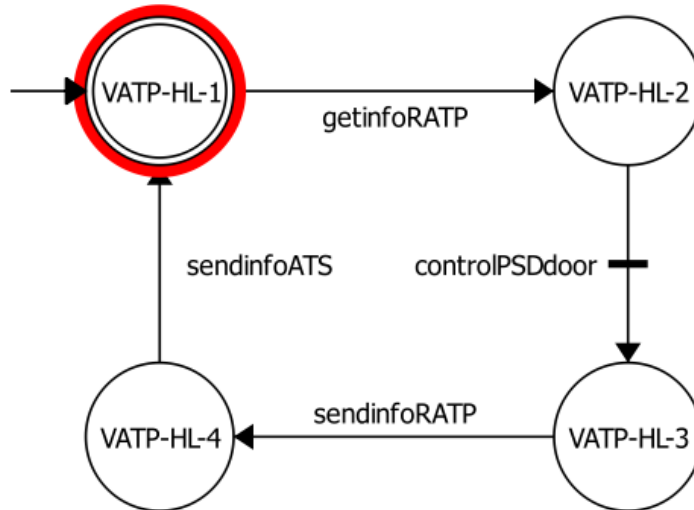
- [40] Morar, S., (2010). "Evolution of Communication Based Train Control Worldwide" in Proc. IET Professional Develop. Course Railway Signalling Control System. 281–289.
- [41] Alikoc, B., Mutlu, I. ve Ergenc, A.F. (2013). "Stability Analysis of Train Following Model with Multiple Communication Delays" , Science Direct IFAC Proceedings Volumes, 46(25),13-18.
- [42] Moor, T., DESTool-a Discrete Event Systems Tool, DESTool 0.83 using libFAUDES 2.28c with synthesis-observer-multitasking-diagnosis-iosystem-coordinationcontrol-timed-simulator-iodevice-luabinding-ins, 2008-2016.



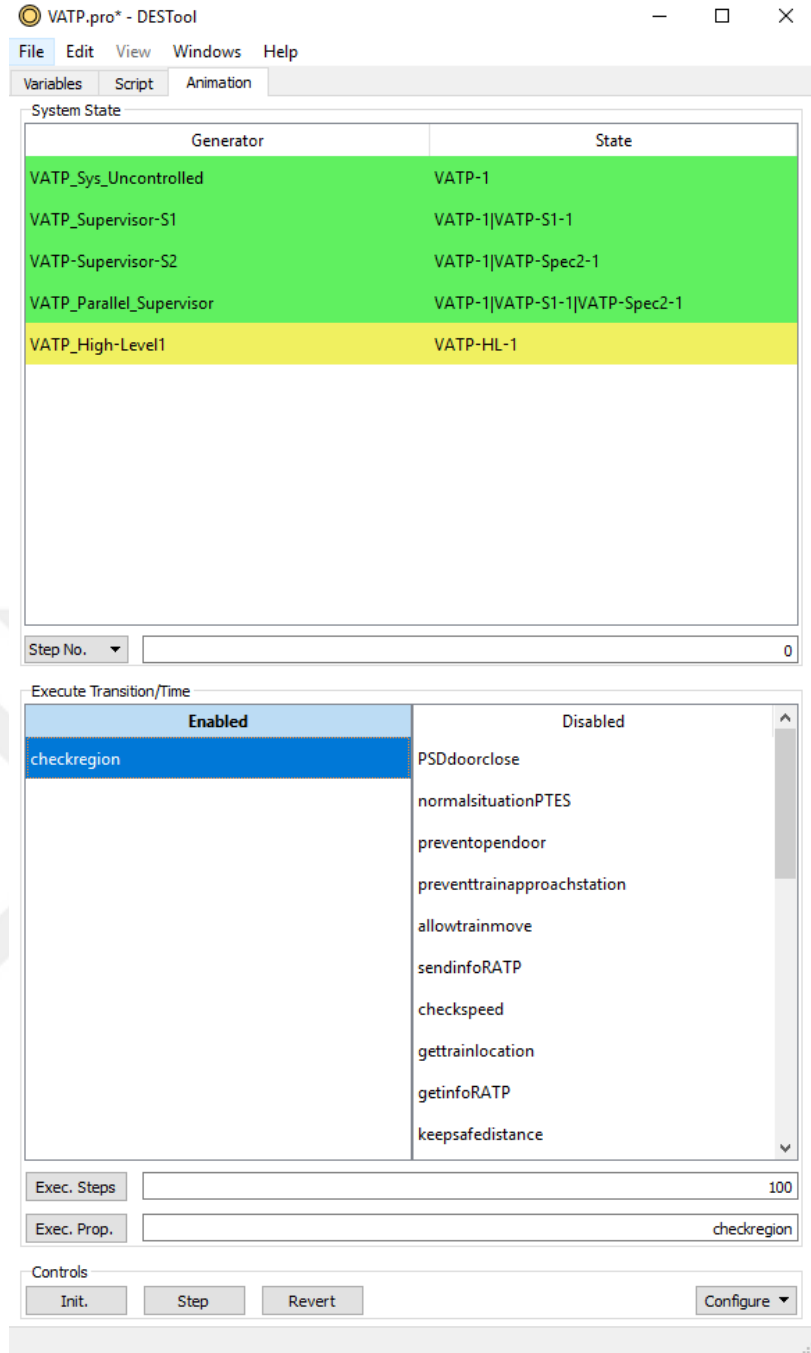




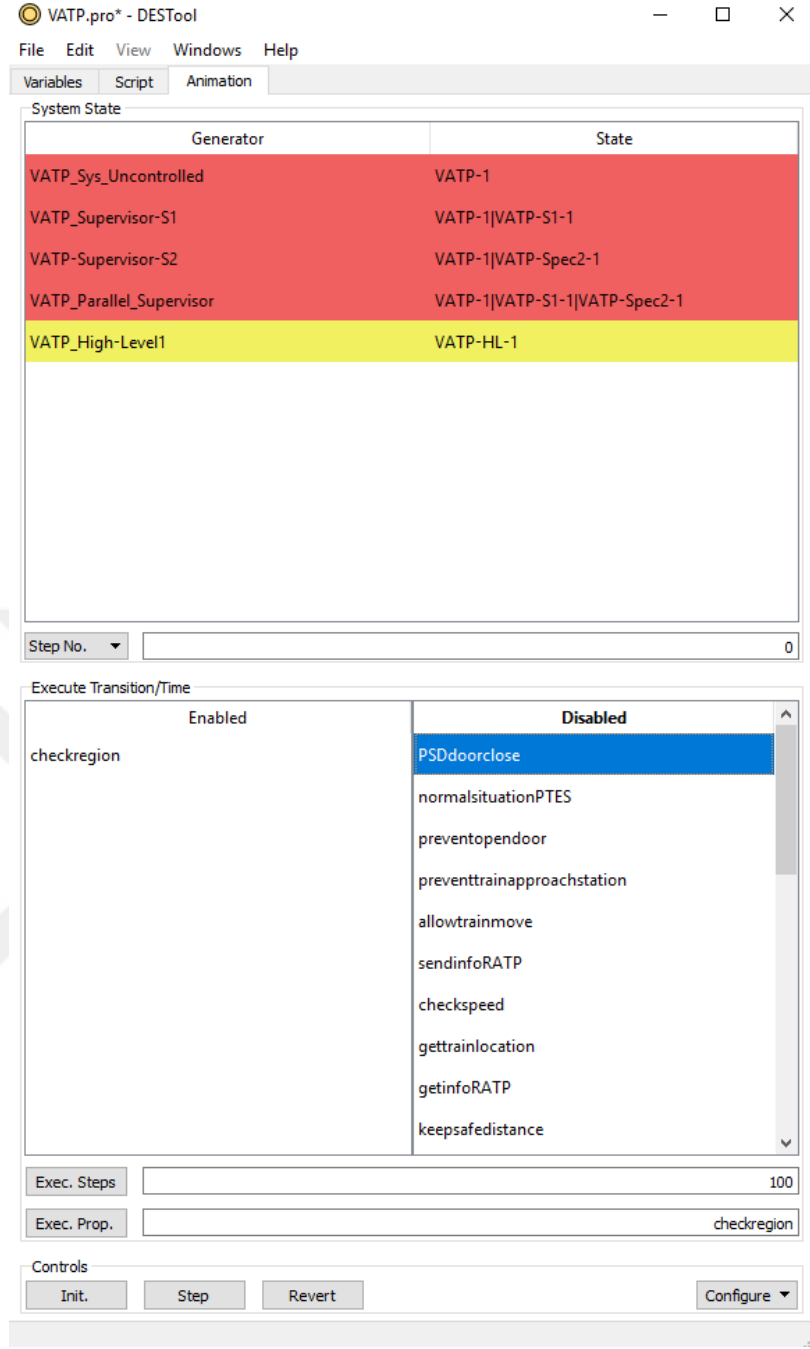
Şekil A. 2 VATP kontrollü davranış modeli ilk durum



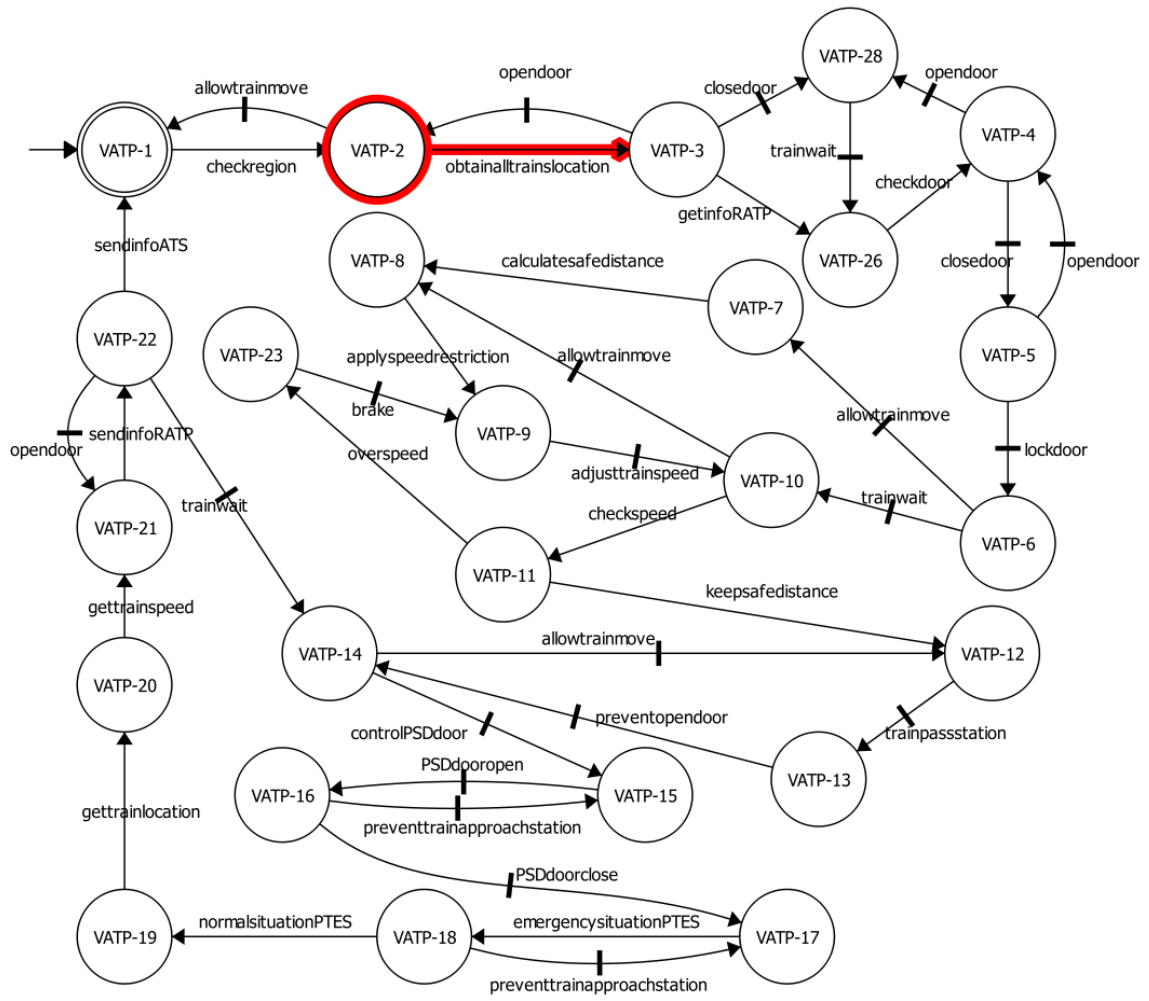
Şekil A. 3 VATP üst seviye modeli ilk durum



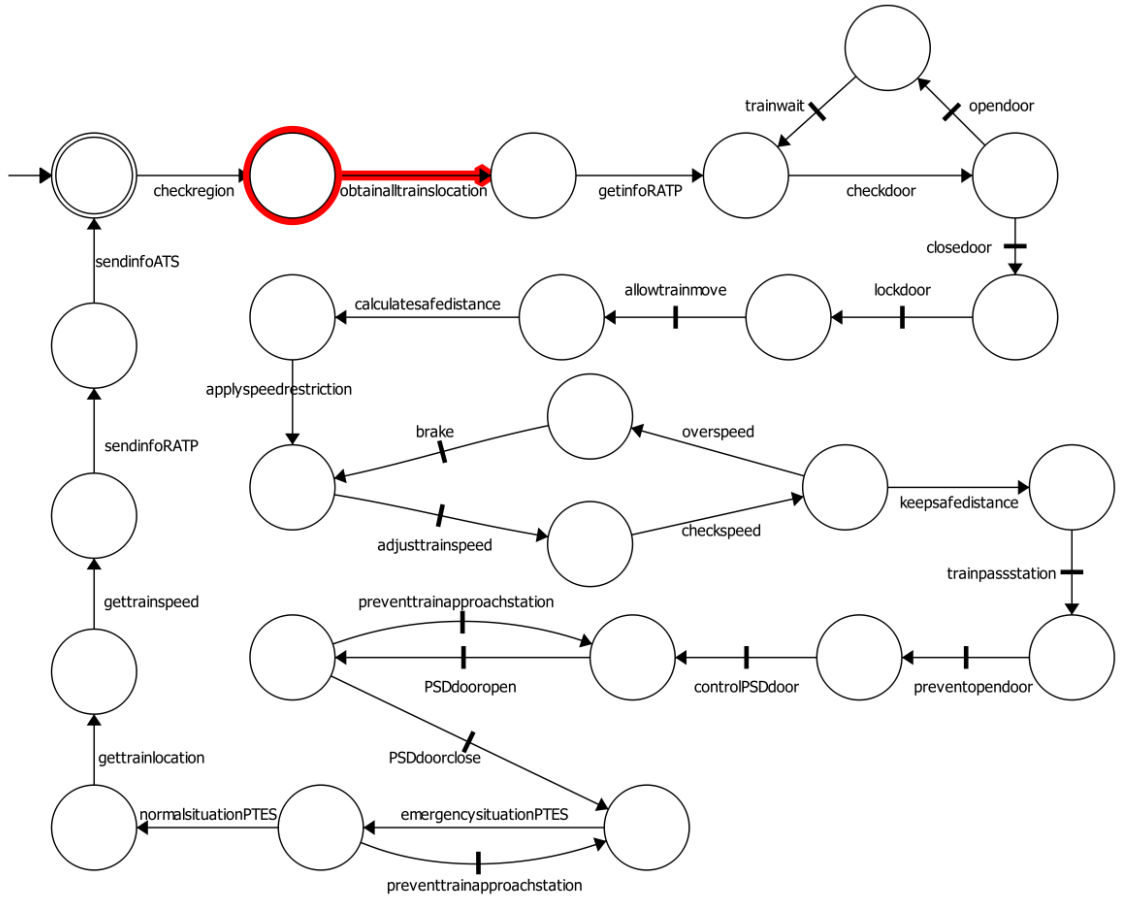
Şekil A. 4 checkregion olayında denetimsel gözetleyici davranışı



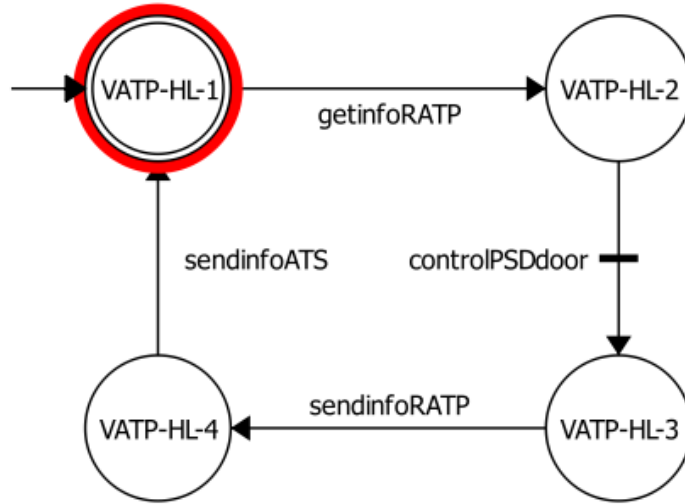
Şekil A. 5 checkregion olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar



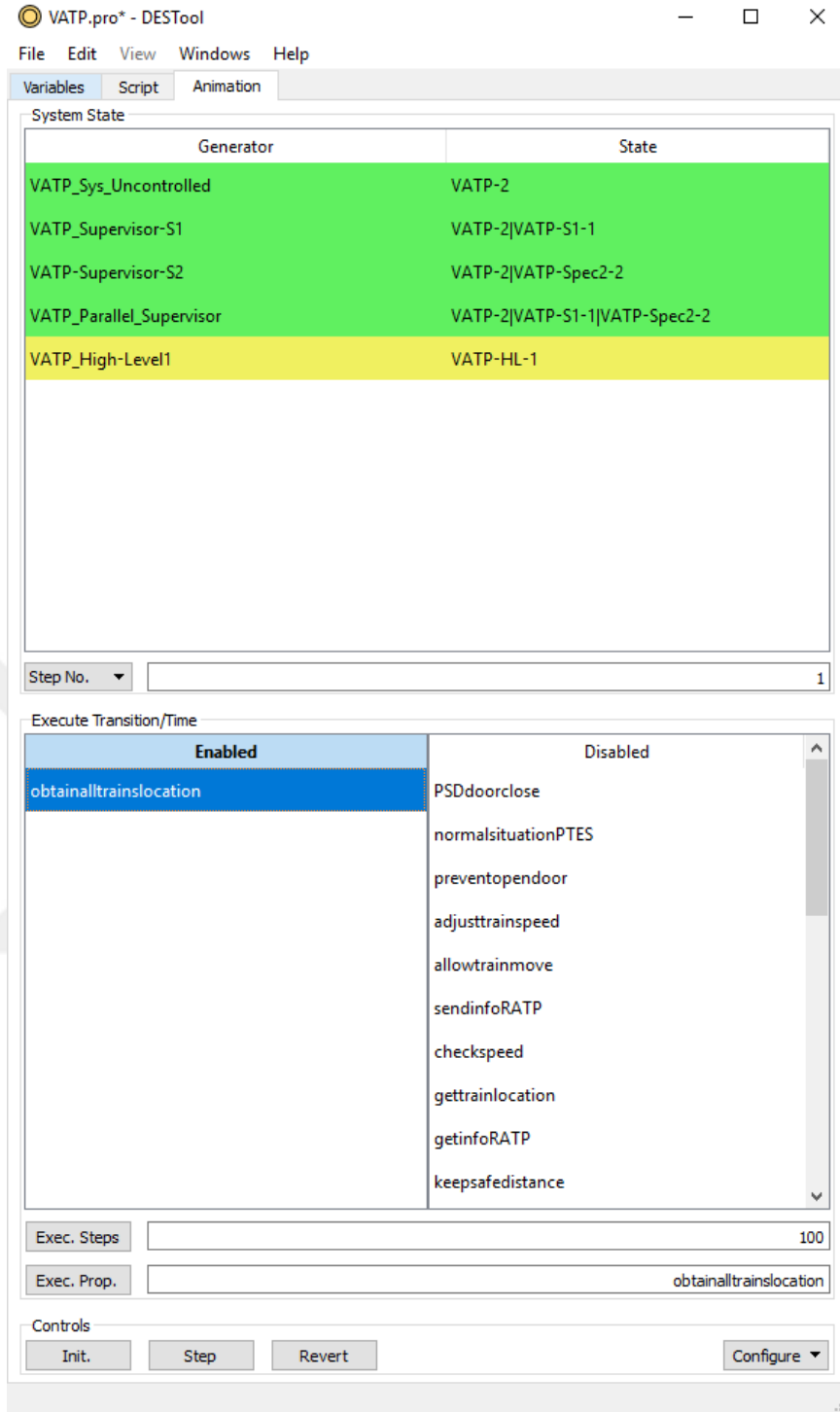
Şekil A. 6 VATP kontrolsüz davranış modeli obtainalltrainslaocation olayı



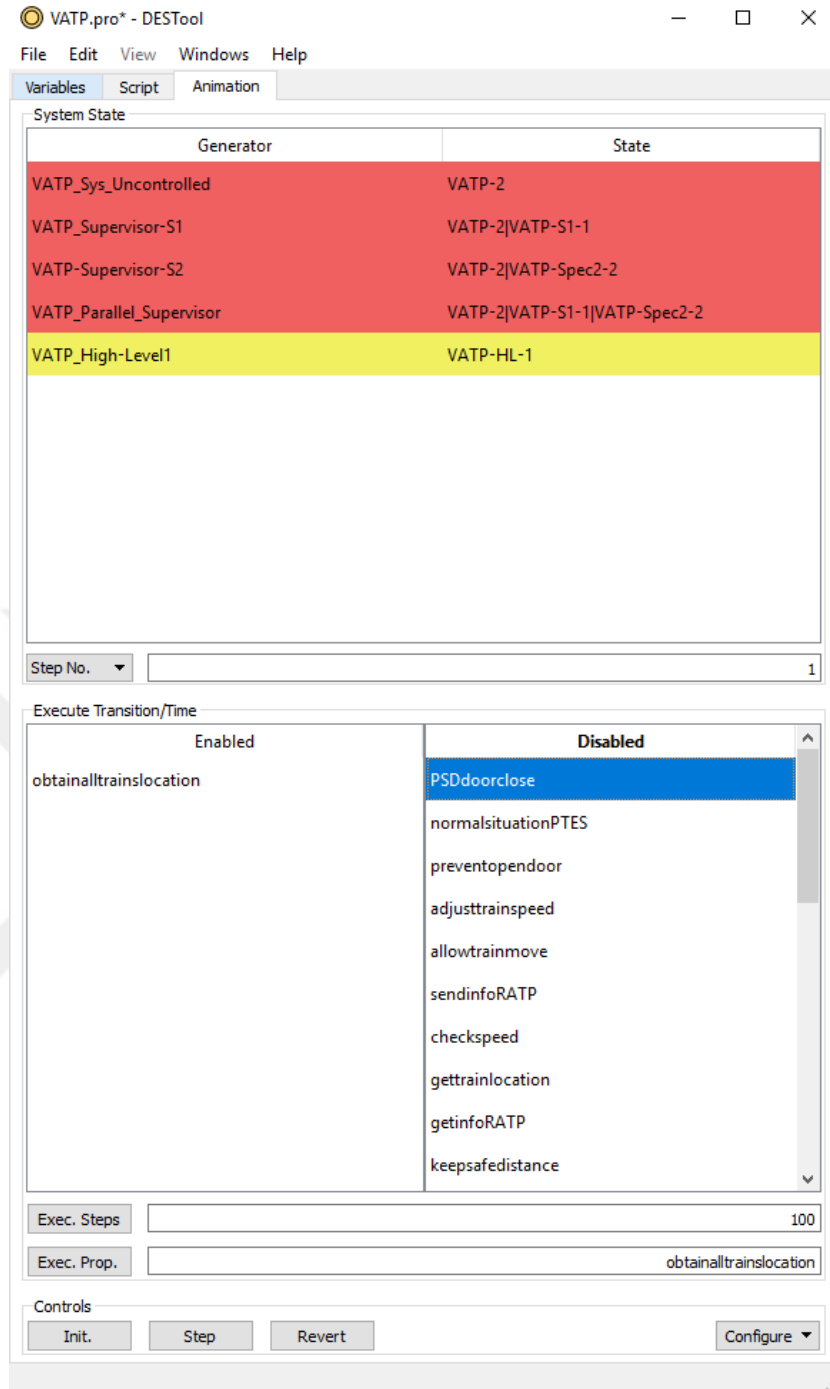
Şekil A. 7 VATP kontrollü davranış modeli obtainalltrainslaocation olayı



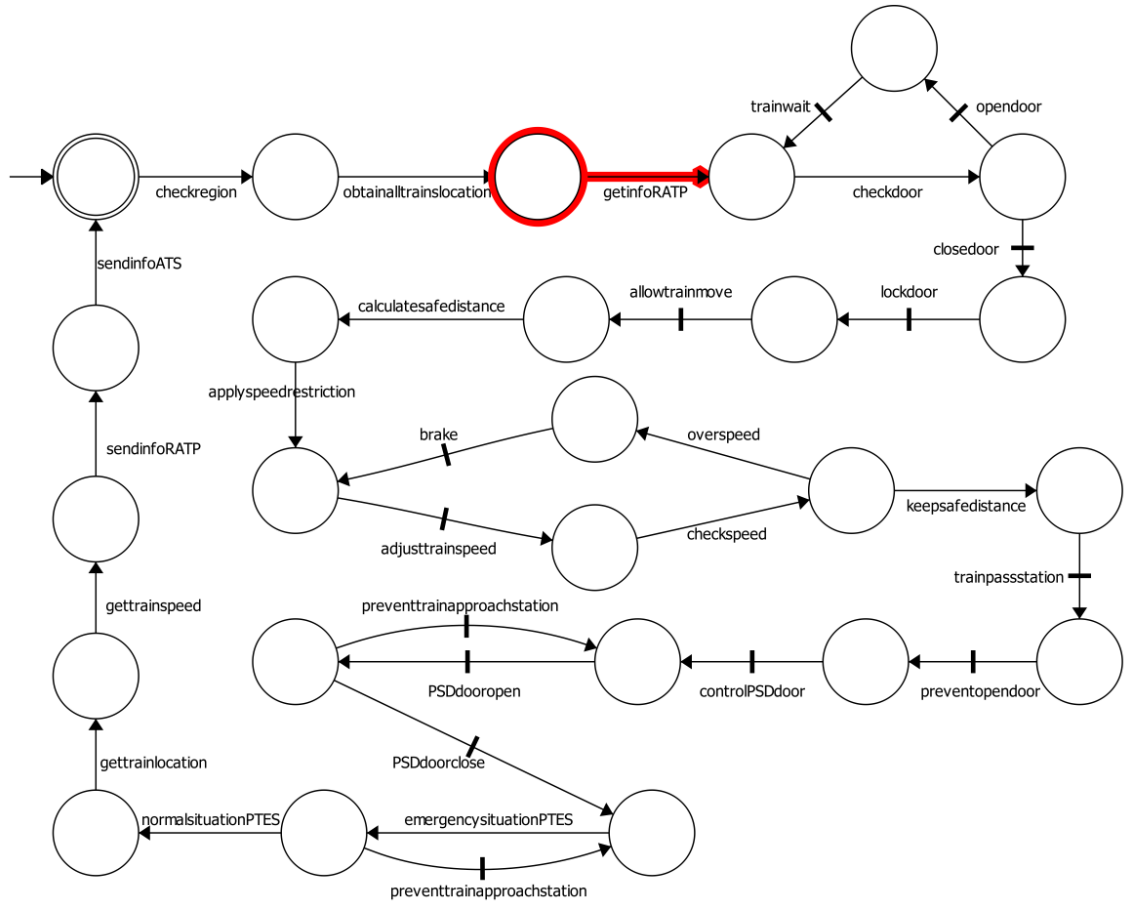
Şekil A. 8 VATP üst seviye modeli obtainalltrainslaocation olayı



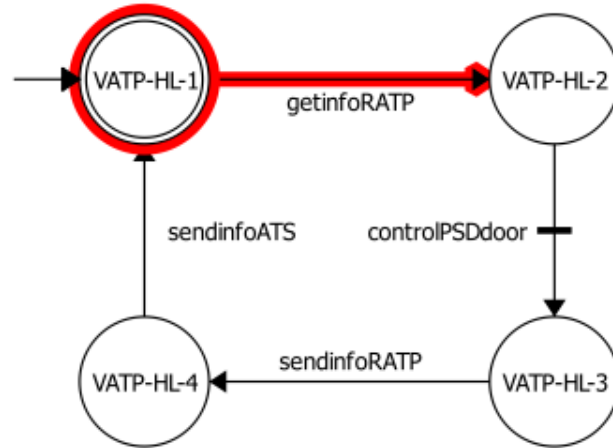
Şekil A. 9 obtainalltrainslocation olayında denetimsel gözetleyici davranışı



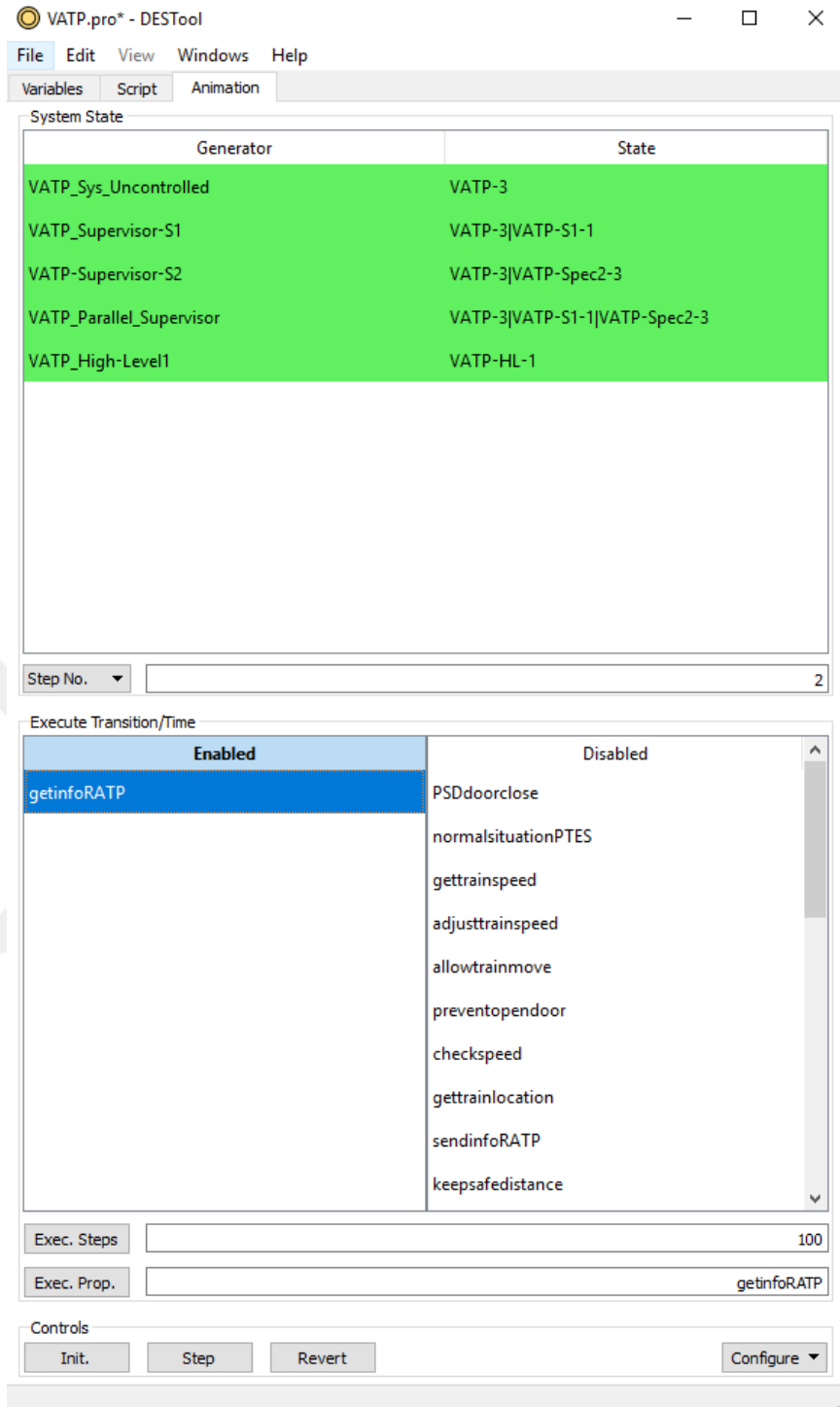
Şekil A. 10 obtainalltrainslocation olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar



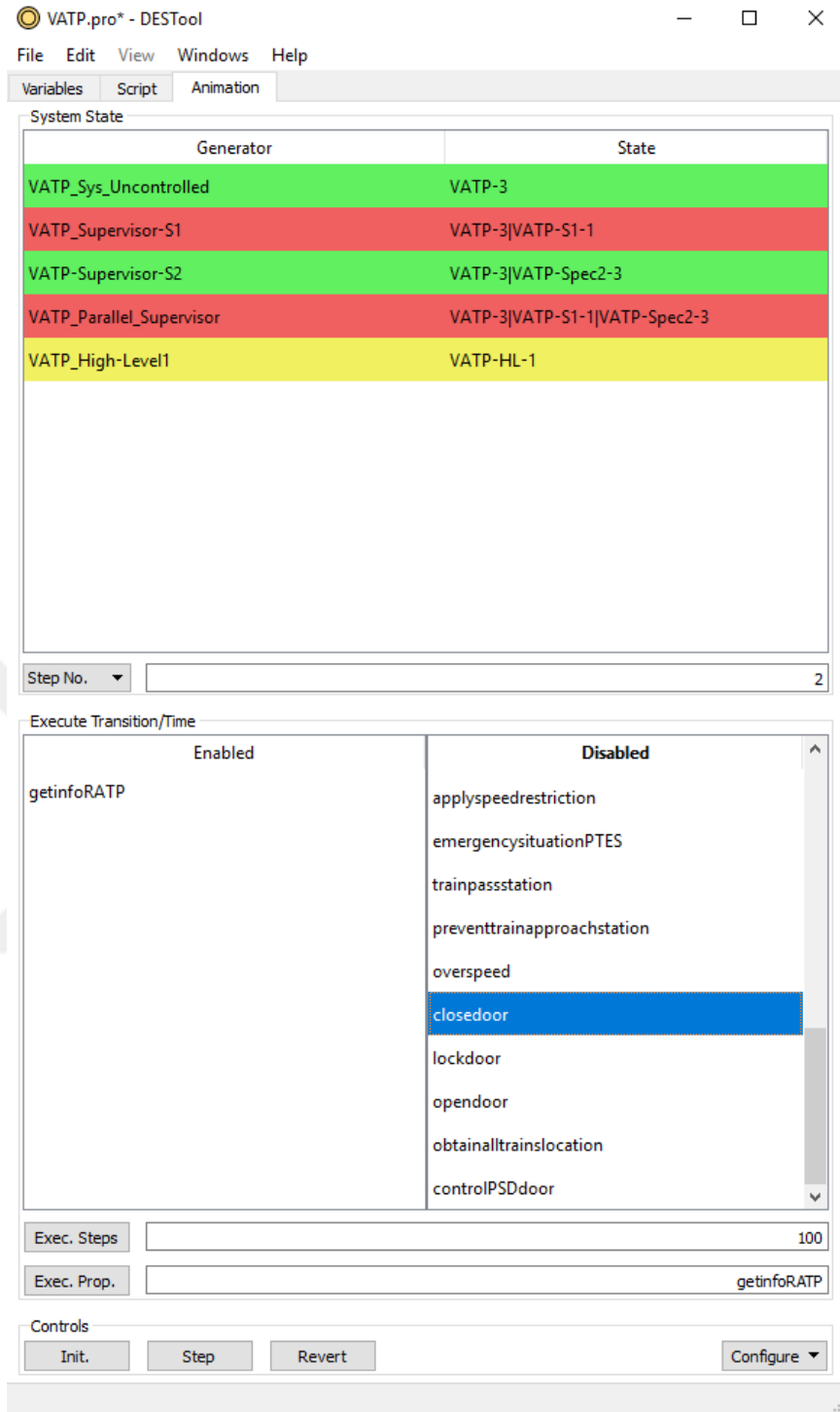
Şekil A. 12 VATP kontrollü davranış modeli getinfoRATP olayı



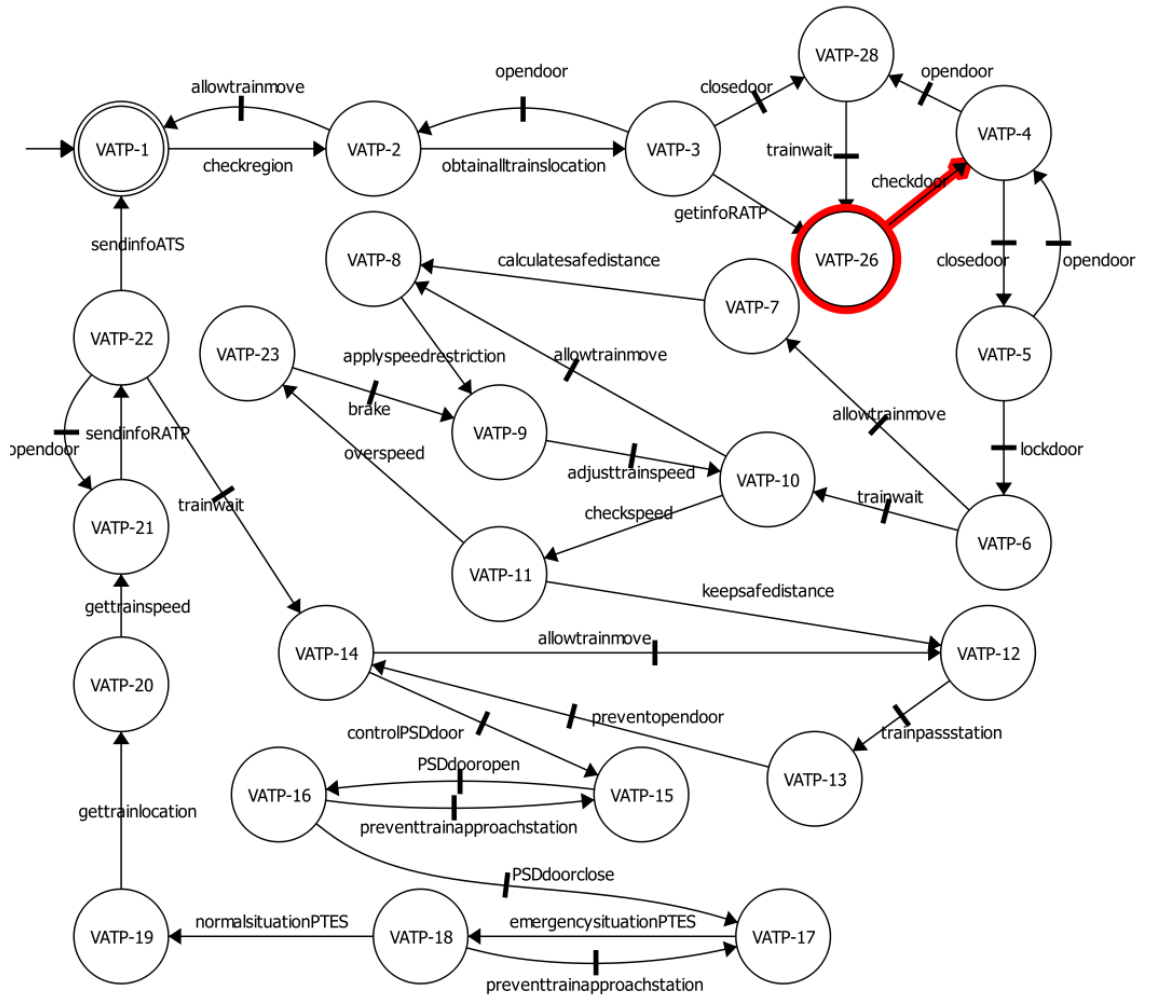
Şekil A. 13 VATP üst seviye modeli getinfoRATP olayı



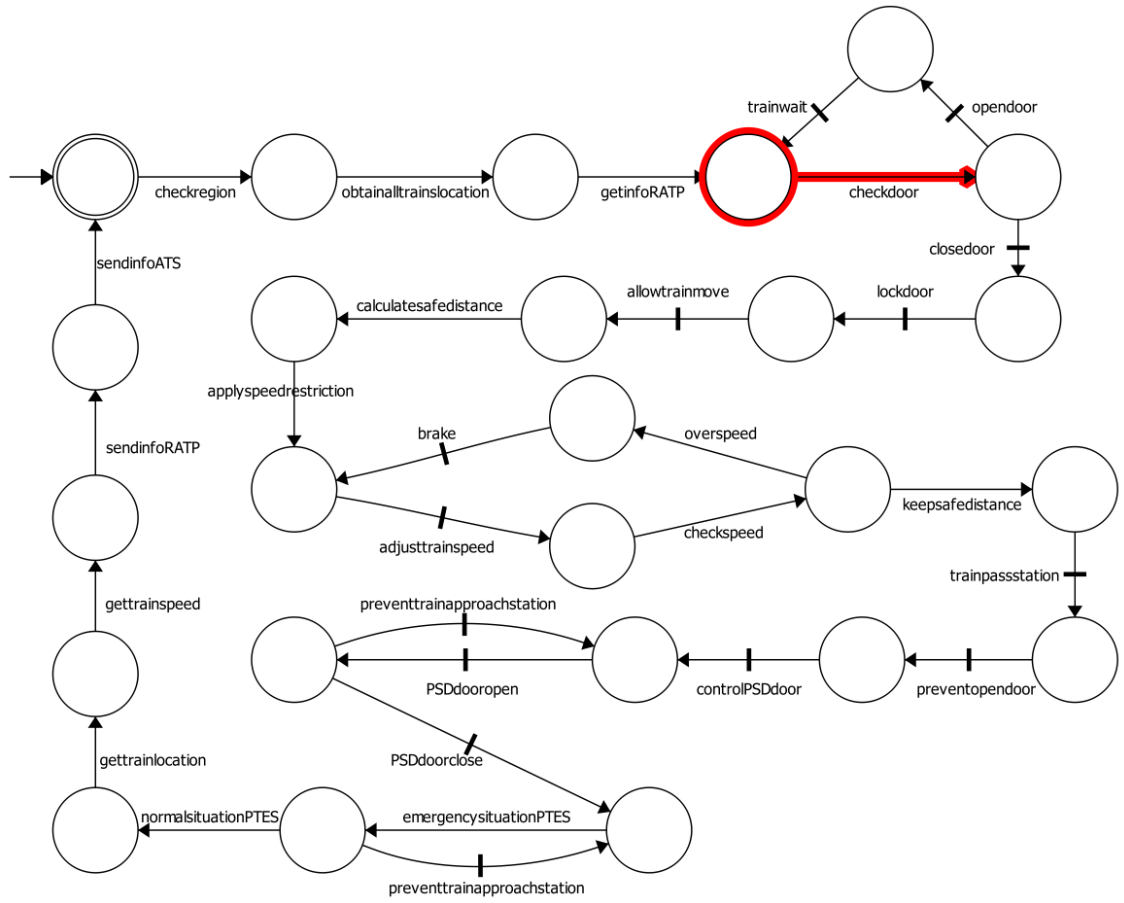
Şekil A. 14 getinfoRATP olayında denetimsel gözetleyici davranışı



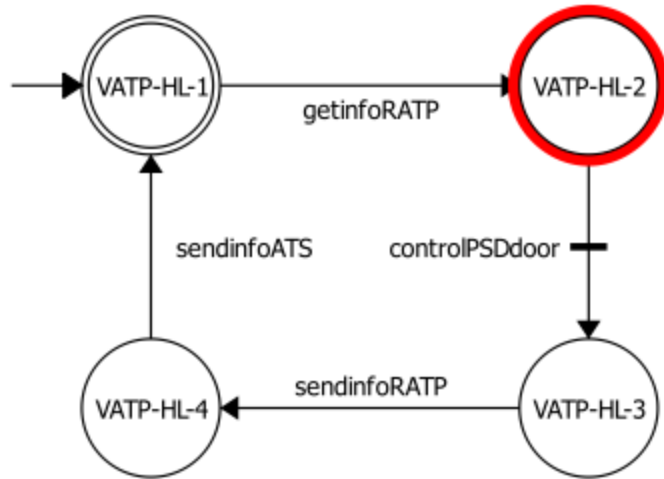
Şekil A. 15 getinfoRATP olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar



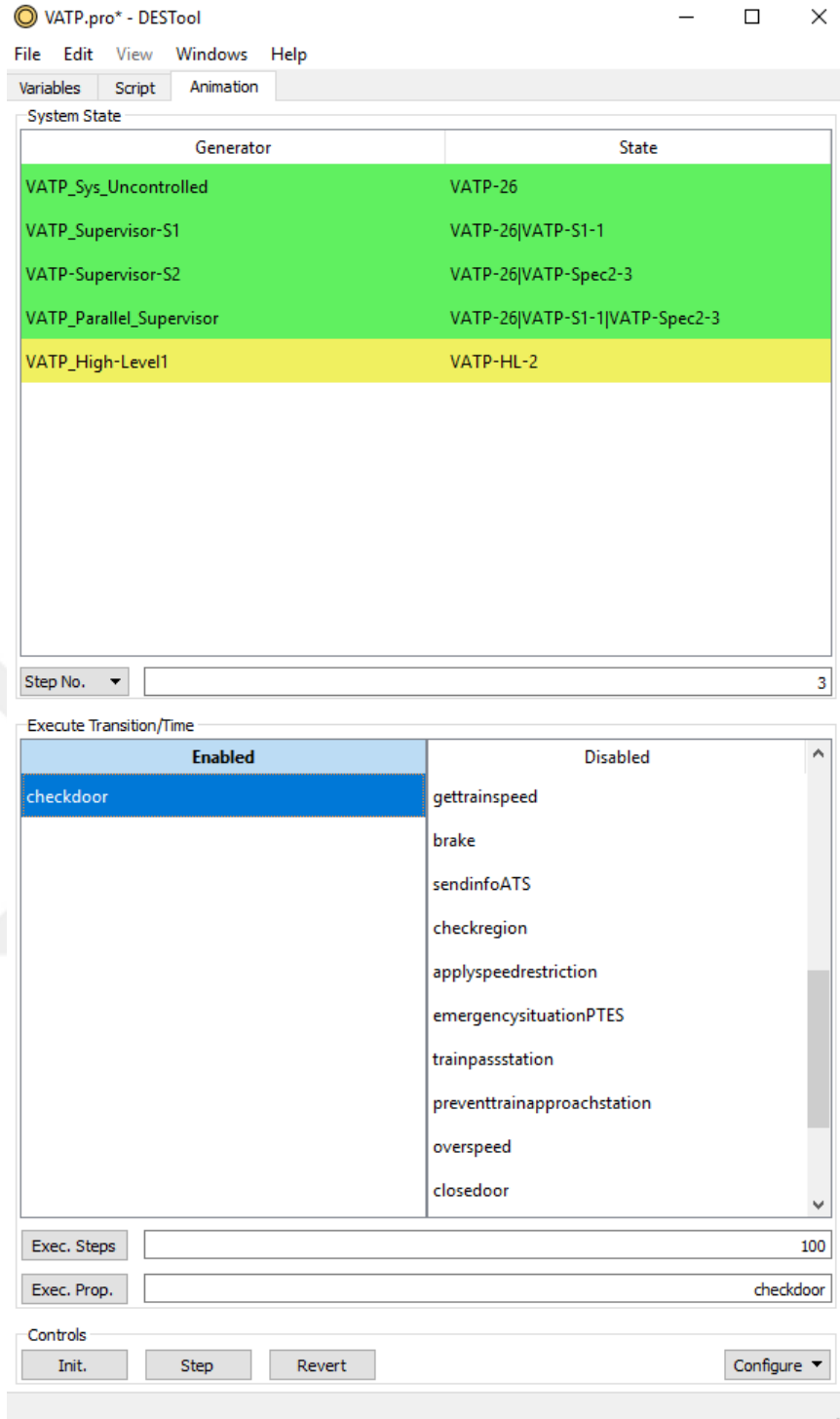
Şekil A. 16 VATP kontrolsüz davranış modeli checkdoor olayı



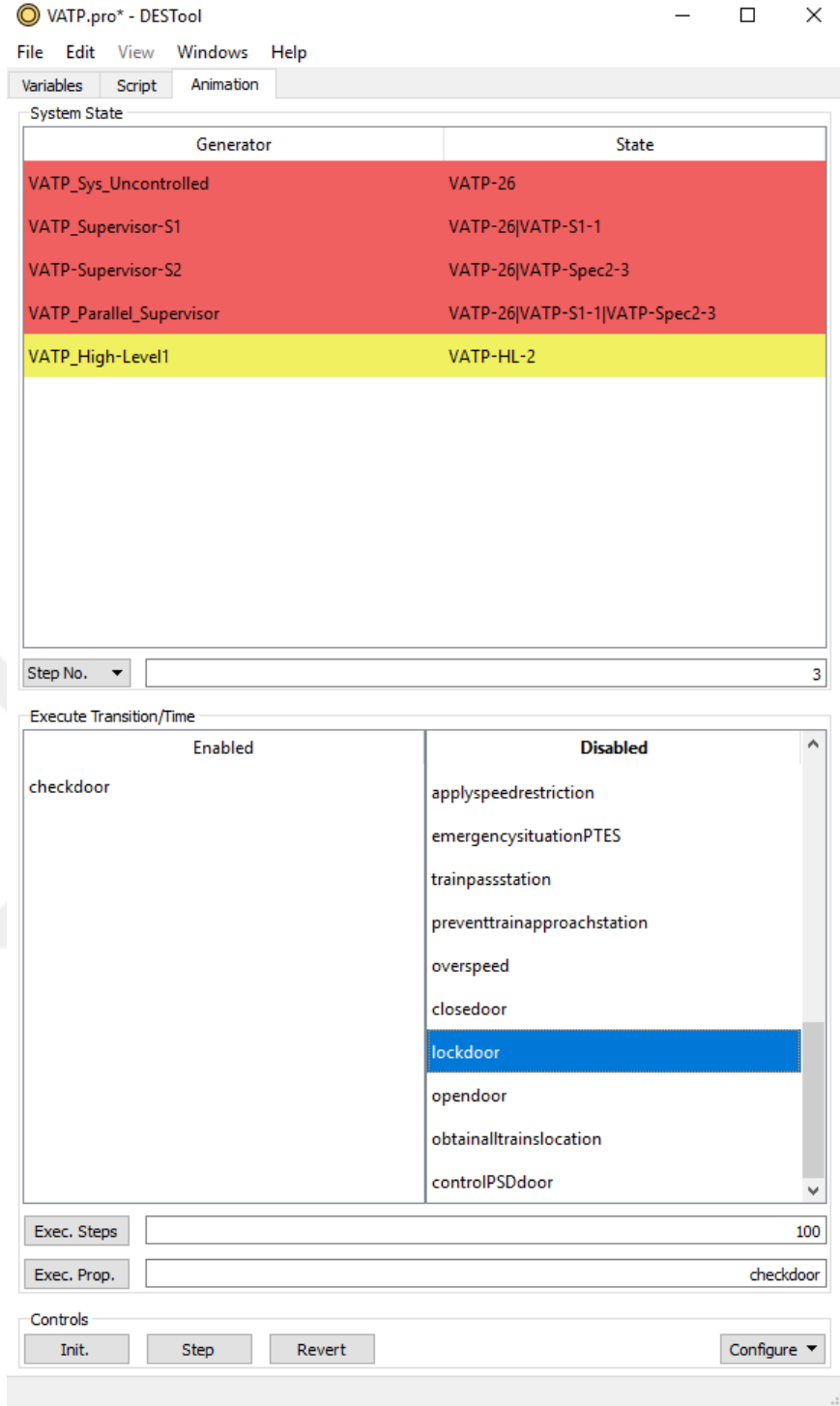
Şekil A. 17 VATP kontrollü davranış modeli checkdoor olayı



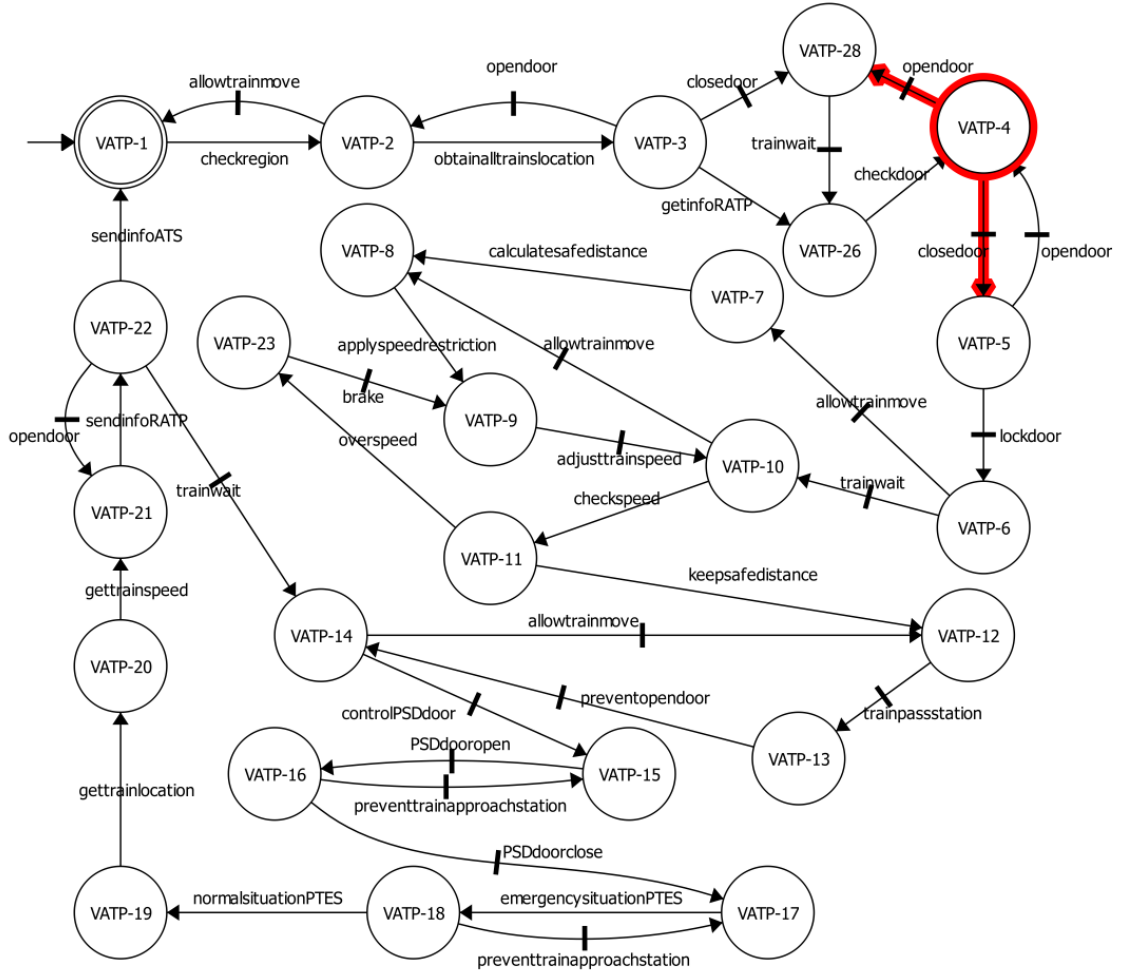
Şekil A. 18 VATP üst seviye modeli checkdoor olayı



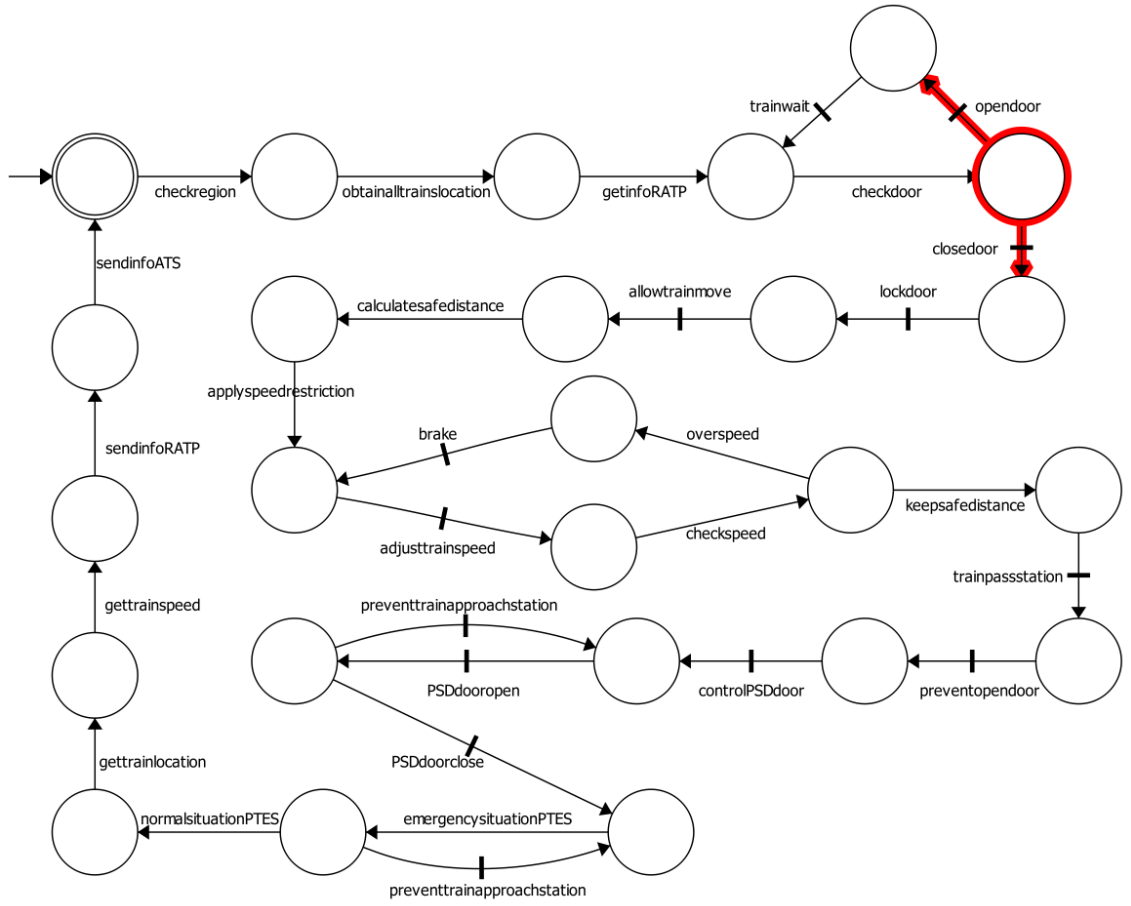
Şekil A. 19 checkdoor olayında denetimsel gözetleyici davranışı



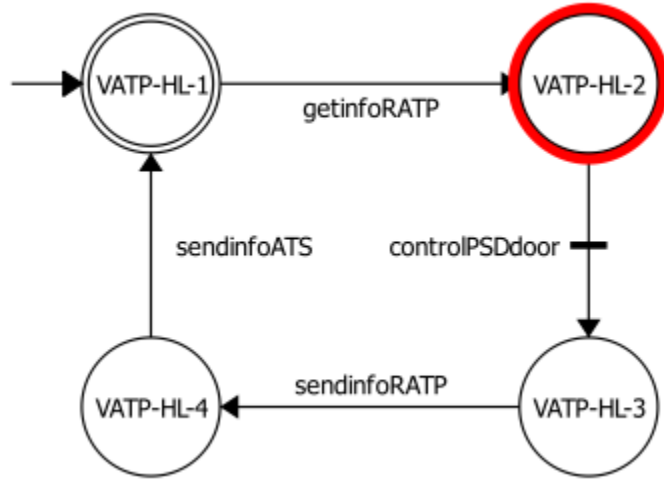
Şekil A. 20 checkdoor olayında denetimsel gözetleyicinin engellediği olaylar



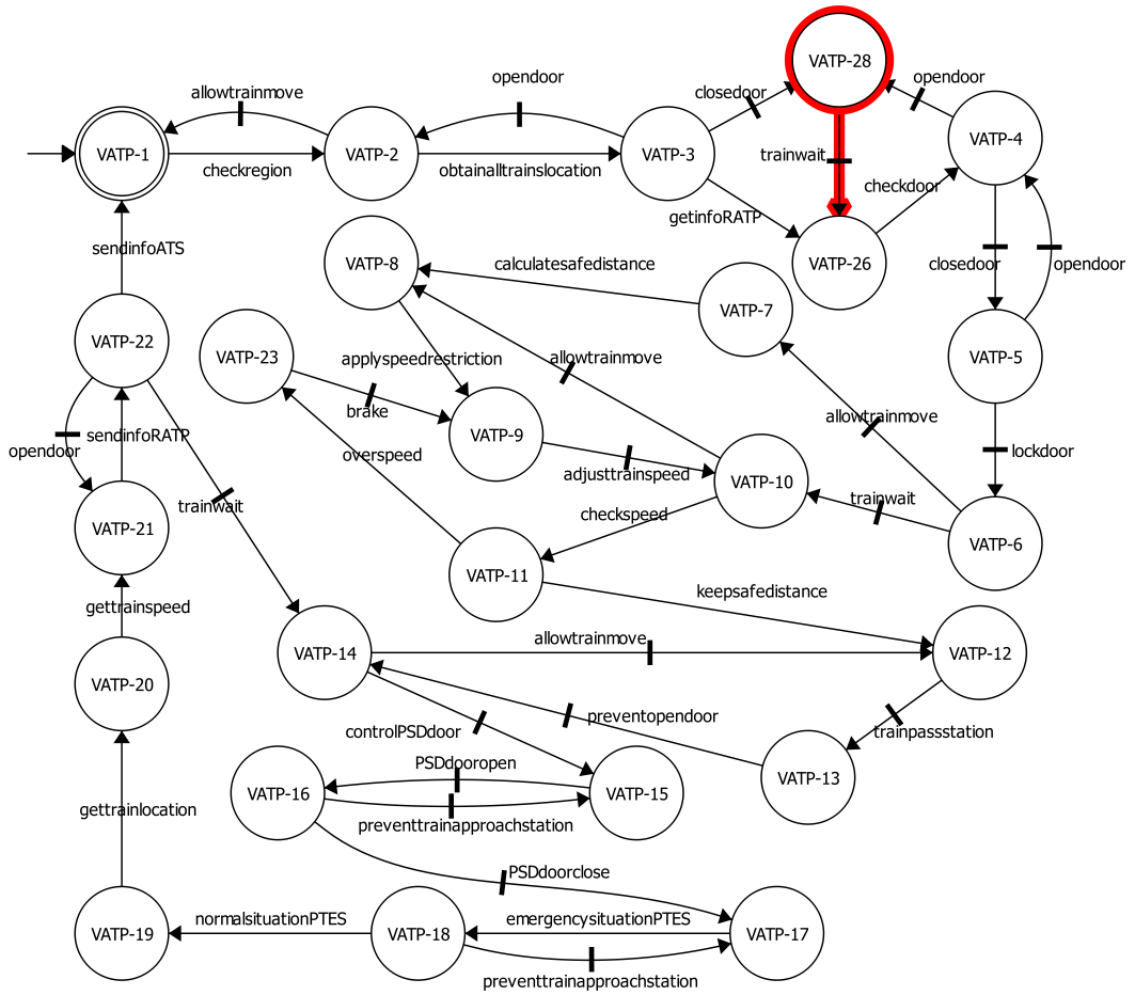
Şekil A. 21 VATP kontrolsüz davranış modeli closedoor-opendoor olayı



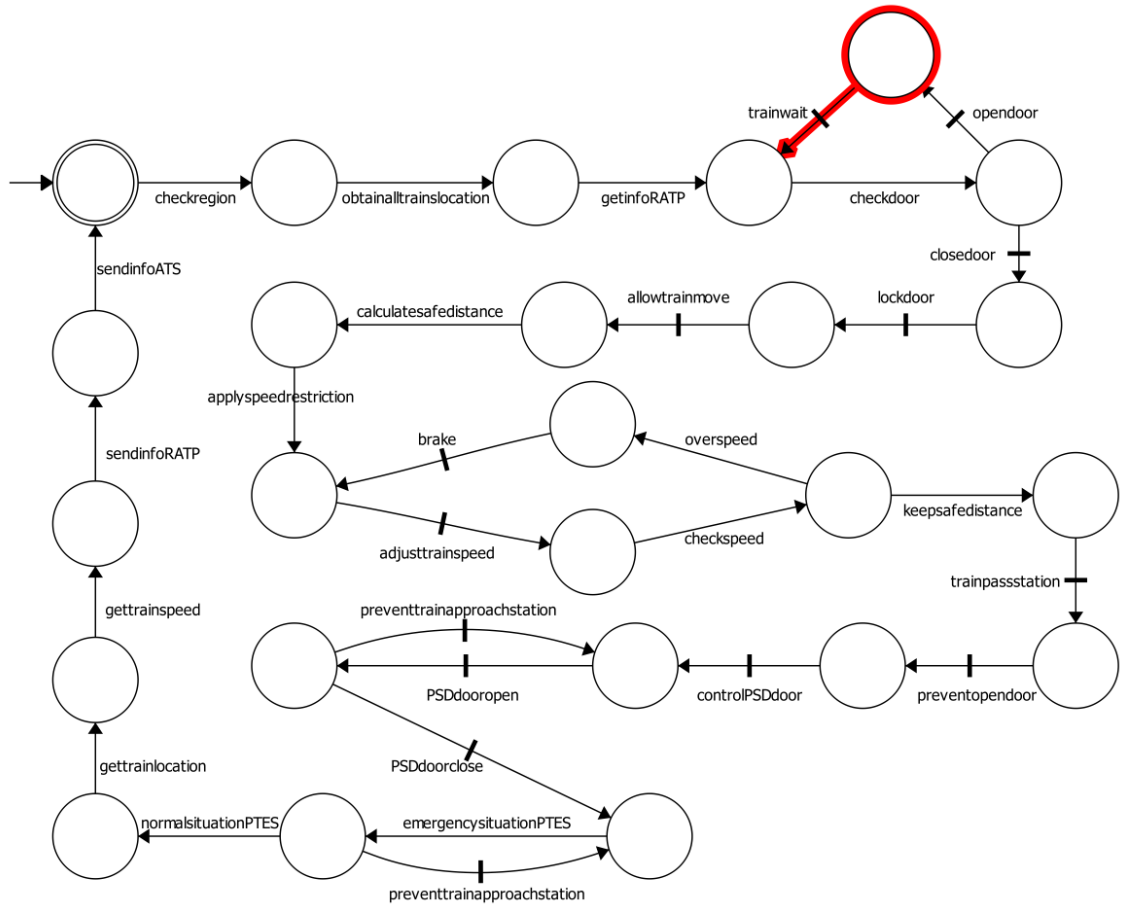
Şekil A. 22 VATP kontrollü davranış modeli closedoor-opendoor olayı



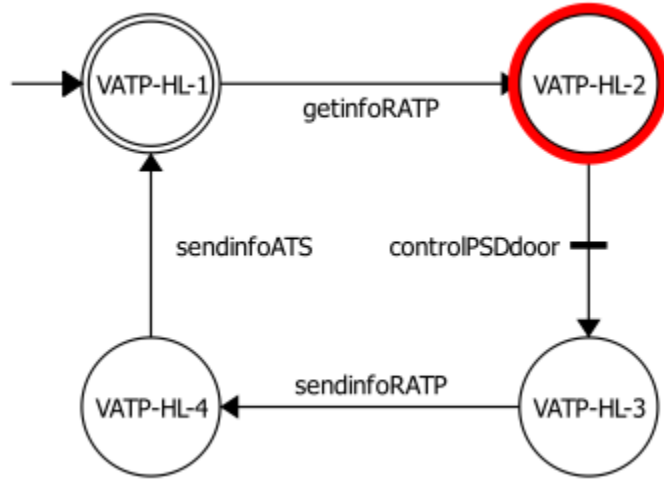
Şekil A. 23 VATP üst seviye modeli closedoor-opendoor olayı



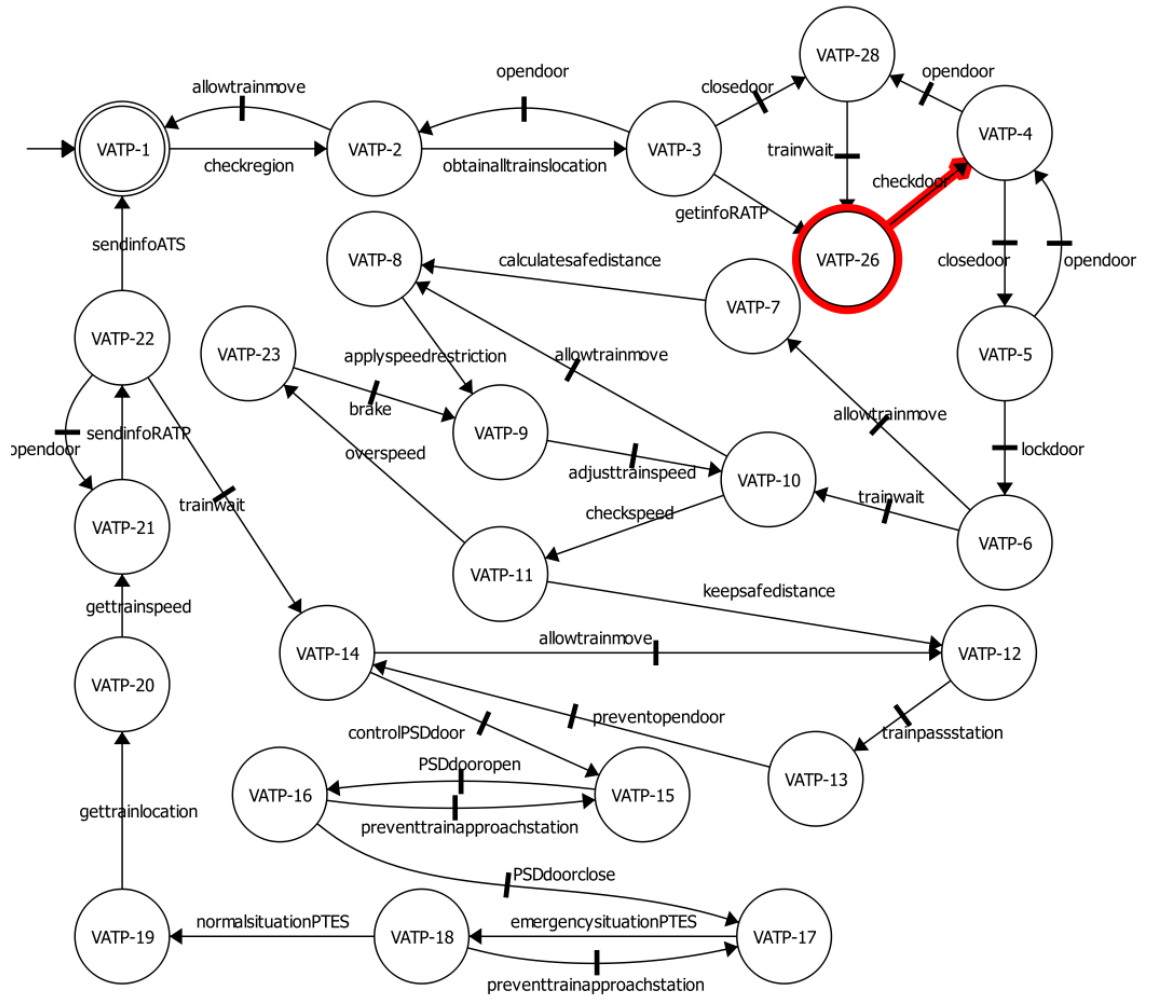
Şekil A. 24 VATP kontrolsüz davranış modeli trainwait olayı



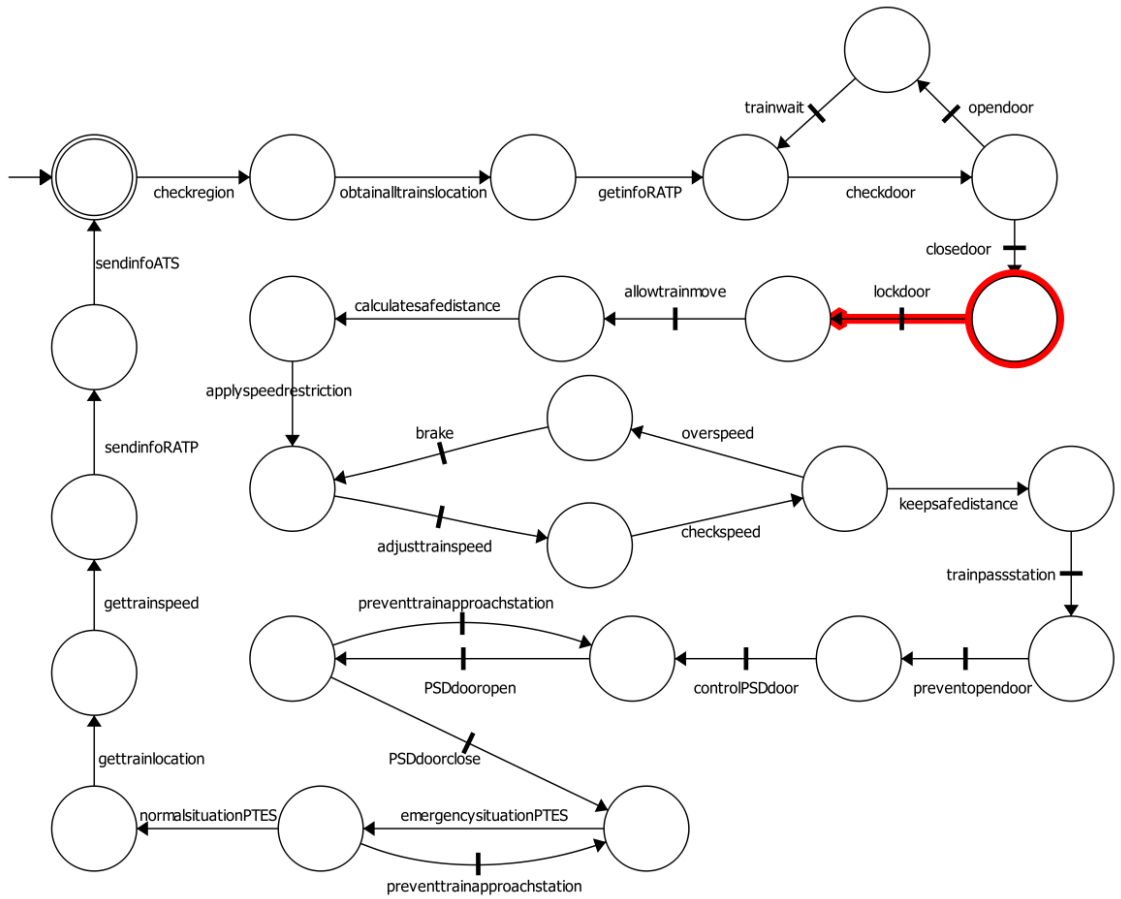
Şekil A. 25 VATP kontrollü davranış modeli trainwait olayı



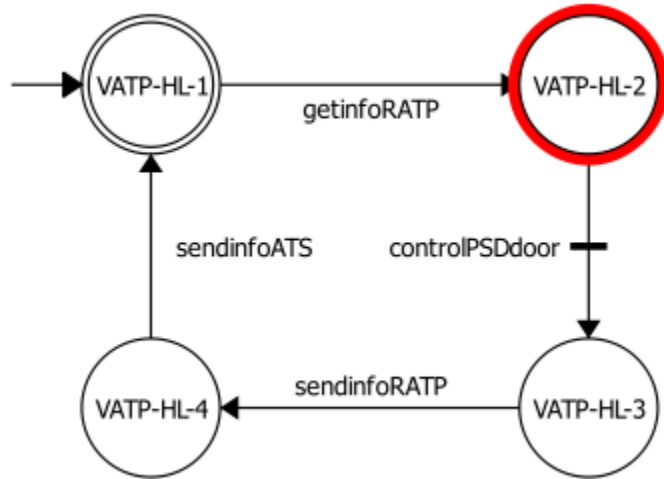
Şekil A. 26 VATP üst seviye modeli trainwait olayı



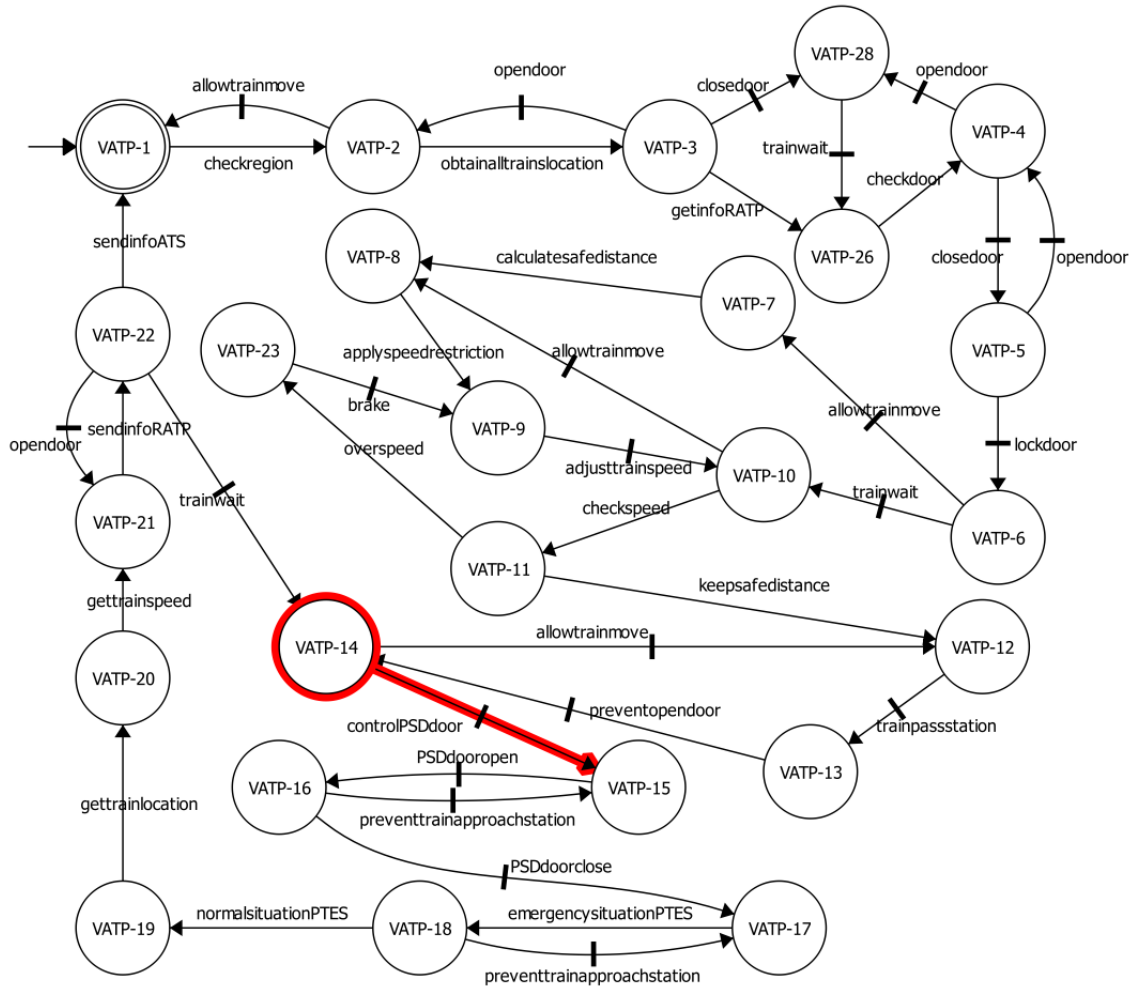
Şekil A. 27 VATP kontrolsüz davranış modeli checkdoor olayı



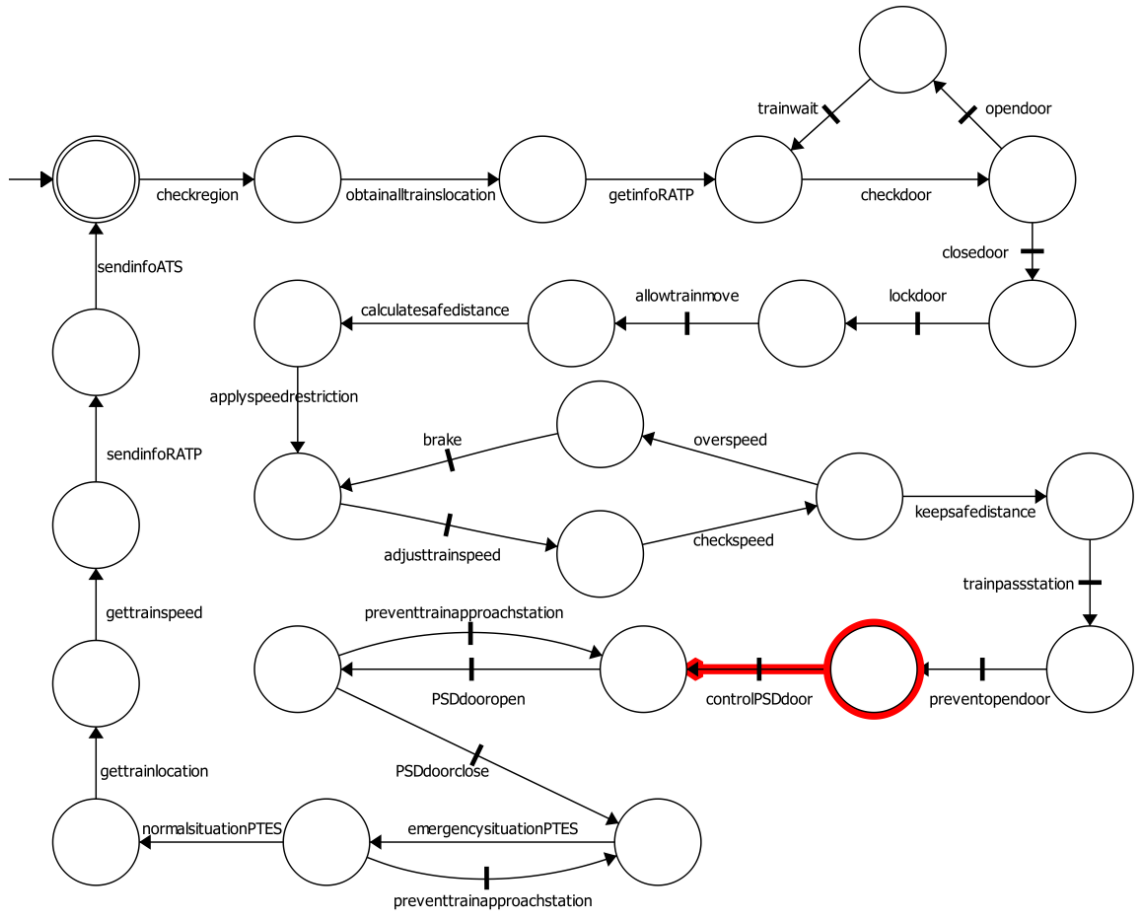
Şekil A. 31 VATP kontrollü davranış modeli lockdoor olayı



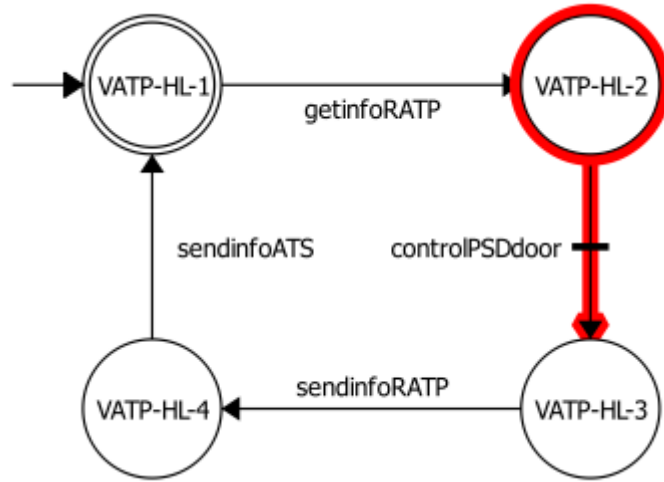
Şekil A. 32 VATP üst seviye modeli lockdoor olayı



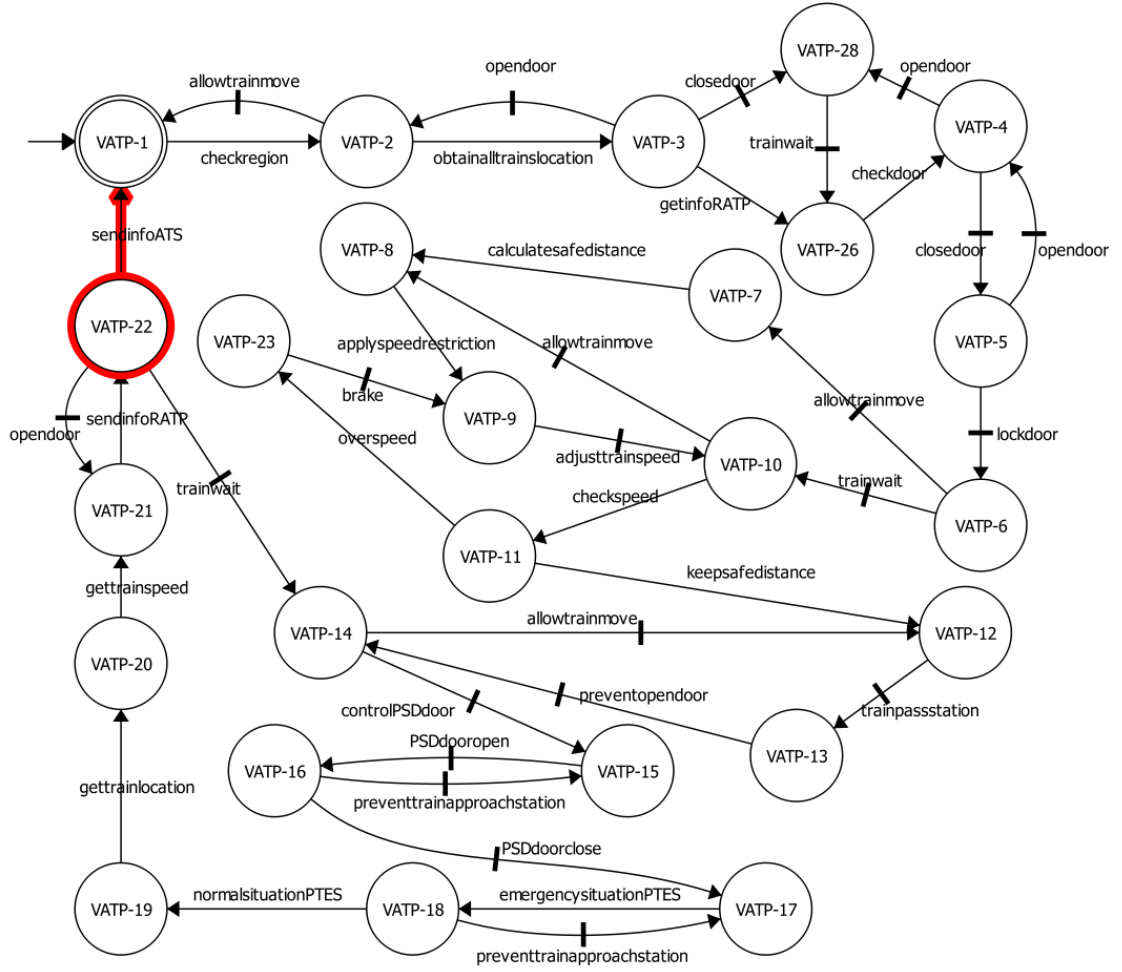
Şekil A. 33 VATP kontrolsüz davranış modeli controlPSDdoor olayı



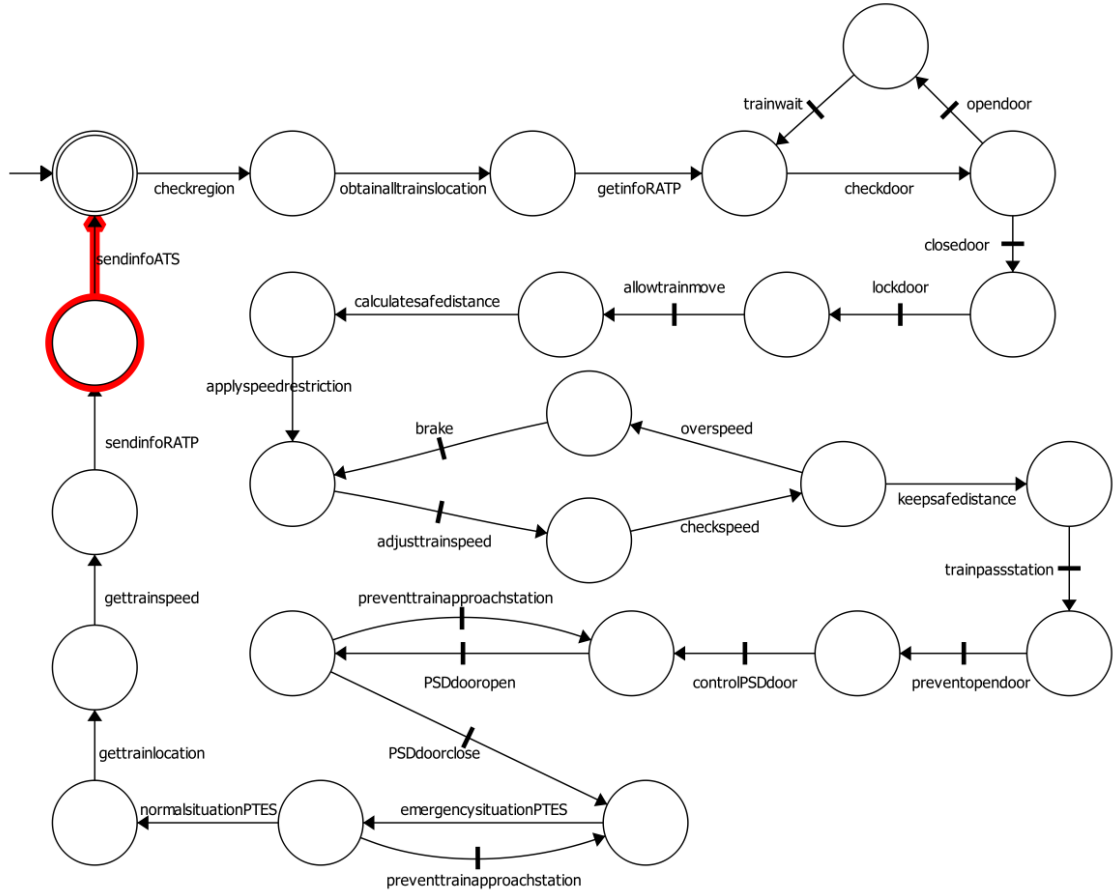
Şekil A. 34 VATP kontrollü davranış modeli controlPSDdoor olayı



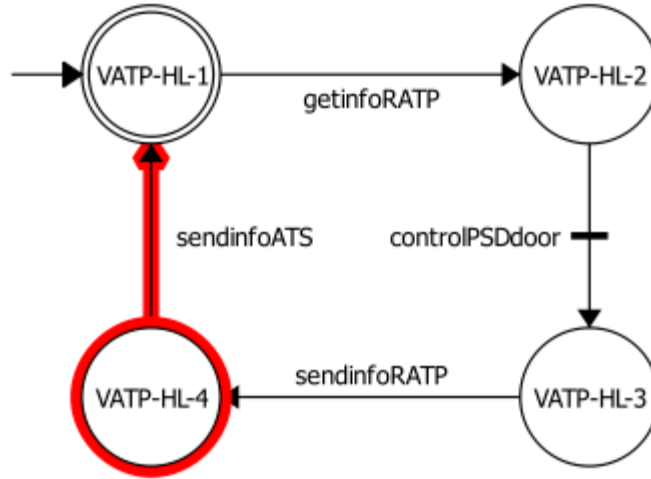
Şekil A. 35 VATP üst seviye modeli controlPSDdoor olayı



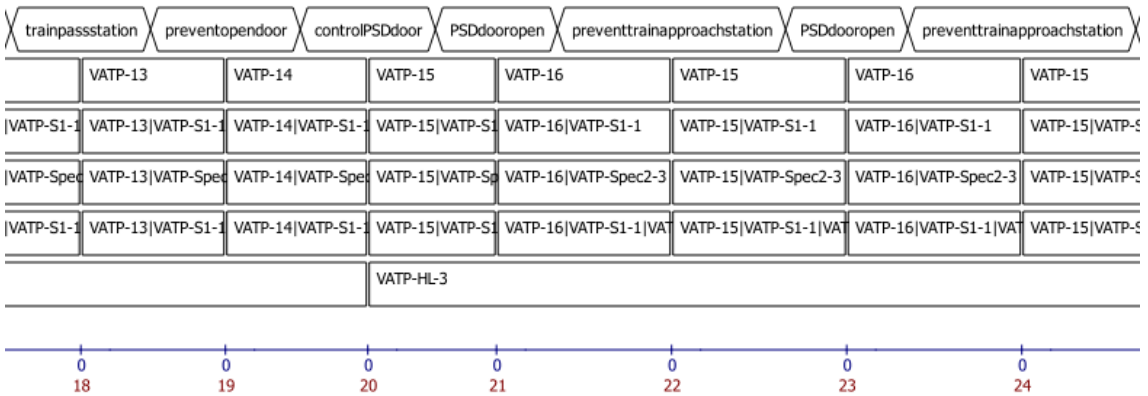
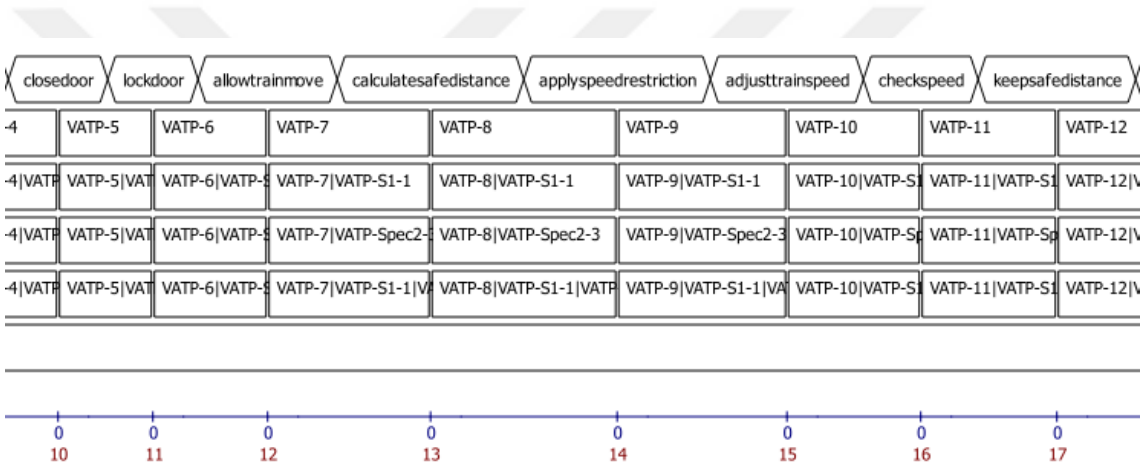
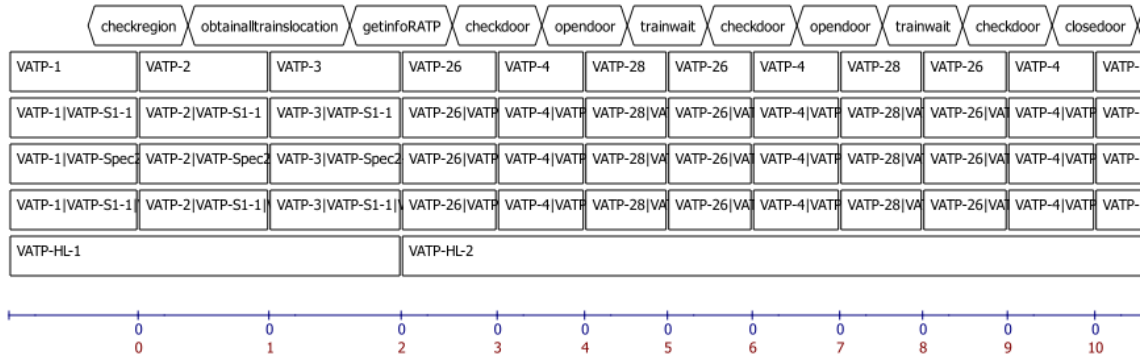
Şekil A. 36 VATP kontrolsüz davranış modeli sendinfoATS olayı

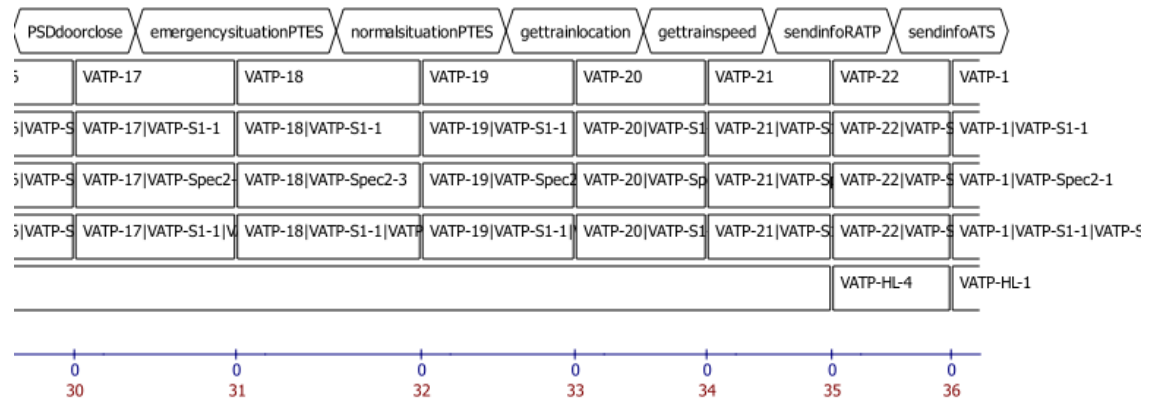
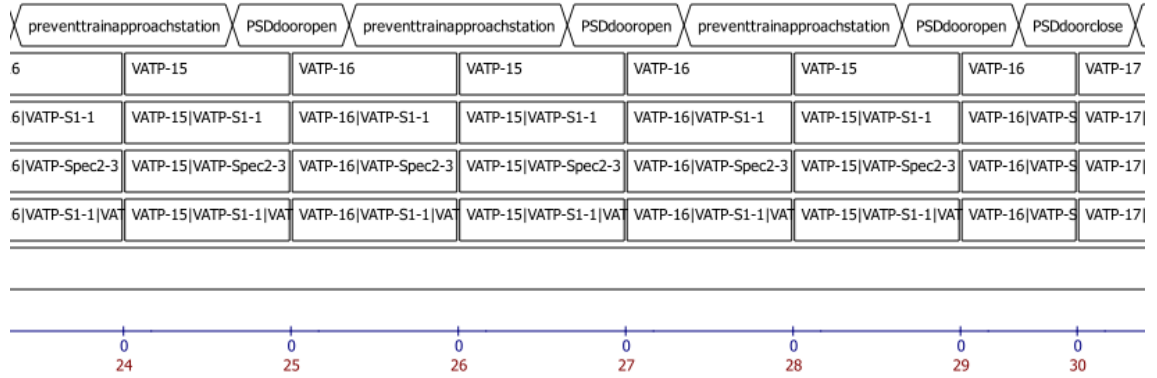
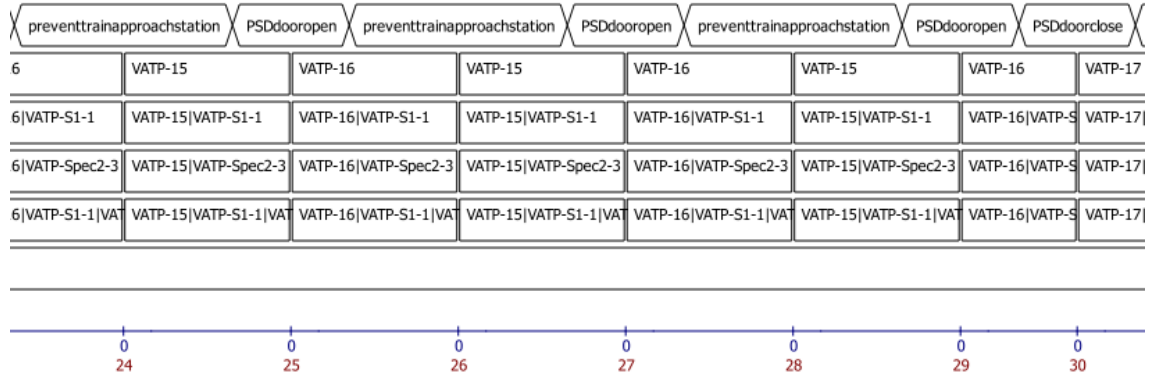


Şekil A. 37 VATP kontrollü davranış modeli sendinfoATS olayı



Şekil A. 38 VATP üst seviye modeli sendinfoATS olayı





Şekil A. 39 VATP sistemi denetimsel gözetletiyici davranışları

OLAYLAR TABLOSU

Çizelge B.1 Olaylar Tablosu

adjusttrainspeed	Tren hızını ayarla	allowtrainmove	Tren hareketine izin ver
applyspeedrestriction	Hız kısıtlarını uygula	brake	Fren yap
calculatesafedistance	Güvenli mesafeyi hesapla	checkdoor	Tren kapılarını kontrol et
checkregion	Sanal bölgeyi kontrol et	checkspeed	Tren hızını kontrol et
closedoor	Tren kapısını kapat	controlPSDdoor	Peron ayırıcı kapıları kontrol et
emergencysituationPTES	Acil durdurma butonu aktif	getinfoRATP	RATP'den bilgi al
gettrainlocation	Trenin konum bilgisini al	gettrainspeed	Trenin hız bilgisini al
keepsafedistance	Güvenli mesafeyi koru	lockdoor	Tren kapısını kilitle
normalsituationPTES	Acil durdurma butonu pasif	obtainalltrainslocation	Bütün trenlerin konum bilgilerini al

opendoor	Tren kapısını aç	overspeed	Hız sınırının üstü
preventopendoor	Tren kapılarının açılmasını engelle	preventtrain approachstation	Trenin istasyona yaklaşmasını engelle
sendinfoATS	ATS'ye bilgi gönder	sendinfoRATP	RATP'ye bilgi gönder
trainpassstation	İstasyonda beklemeden geç	trainwait	Treni beklet
PSDdoorclose	Peron ayırıcı kapıyı kapat	PSDdooropen	Peron ayırıcı kapıyı aç
automatictrain commandtraction	Trenin otomatik başlatılması için cer sistemine komut çıkışı	checktraindoor	Tren kapılarının kontrolü
checktrainspeed	Trenin hız bilgisini kontrol et	checktraininstation	Trenin istasyonda olup olmadığının bilgisini al
commandtotrainbrake	Tren	communicateRATO-VATP	RATO ve VATP ile iletişim kur
drivingstrategycommand-tobrakeandtraction	Sürüş stratejilerine göre ivme, hız ve boşta gitme düzeylerinin ayarı için cer ve fren sistemine komut çıkışı	endofservice	Tren servisinin sonu
failtrain	Tren bozuldu	getinfoATS	ATS'den bilgi al
returntrainatfinaldestination	Son duraktan treni döndür	sendinfoVATP-RATO	VATP ve RATO'ya bilgi gönder
sendspeedinfoVATP-RATO	Hız bilgisini VATP ve RATO'ya gönder	traintoparkarea	Treni park alanına park et

worktrain	Treni çalıştır	allowtrainopendoor	Tren kapılarının açılmasına izin ver
controlofconduct-direction	Tren hareket yönünü kontrol et	determineMAL	Hareket Otoritesi Limitini belirle
getinfoVATP	VATP'den bilgi al	getoverlappoint	Çakışma noktası bilgisini al
gettrainroute	Trenin rota bilgisini al	sendinfoVATP	VATP'ye bilgi gönder
adjusttrainregulation-settings	Tren düzenleme ayarlarını ayarla	checktrainregulation-settings	Tren düzenleme ayarlarını kontrol et
getinfoVATO	VATO'dan bilgi al	regulationsettingsfail	Düzenleme ayarları başarısız
sendinfoRATP	RATP'ye bilgi gönder	b1_busy	Bölge-1 meşgul
b1_ok	Bölge-1 müsait	b1tob2	Bölge1'den Bölge2'ye geçiş
b1areastatus	Bölge-1 durumu	checkb1area	Bölge-1 kontrol et
trainarrive	Tren geldi	trainleave	Tren ayrıldı
trainmove	Treni hareket ettir	trainstop	Treni durdur
checkswitch	Makasları kontrol et	disableswitchstatus-change	Makas durum değişikliği pasif
enableswitchstatus-change	Makas durum değişikliği aktif	isswitchfree	Makas müsaitmi
switch1train	Makas1'den tren geçti	switch4train	Makas4'den tren geçti
switchfree	Makas serbest	switchlock	Makas kilitli
switchnormal	Makas normalde	switchdiverge	Makas sapanda

b2_ok	Bölge-2 müsait	b2tob13	Bölge2'den Bölge13'e geçiş
b2areastatus	Bölge-2 durumu	checkb2area	Bölge-2 kontrol et
checkroute	Rotayı kontrol et	checkswitch	Makasları kontrol et
monitoreATP-ATO	ATP ve ATO'yu gözlemle	routeallocation	Rota tahsisi
routebusy	Rota meşgul	routeancel	Rota tahsisine ret
routeok	Rota müsait	sendinfoATP-ATO	ATP ve ATO'ya bilgi gönder
switchallocation	Makas tahsisi	switchbusy	Makas meşgul
switchok	Makas müsait		

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Cem ATILGAN
Doğum Tarihi ve Yeri :28.04.1989/ AMASYA
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :cematilgann@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Mekatronik Müh.	Erciyes Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	12Haziran Lisesi	2007

YAYINLARI

Makale

1. Atılğan C., Zengin K., Ugur M. Ve Çağlar E. (2018). Smart Parking Signaling. Majlesi Journal of Telecommunication Devices, 7(1):27-32. (Yayın No: 4281086)
2. Zengin K., Çağlar E. ve Atılğan C. (2018). Cost-Effective Colour Sensor Construction. Majlesi Journal of Electrical Engineering, 12(2):69-71. (Yayın No: 4343827)

Bildiri

1. Atılğan C. Ve Turay T. O. (2018). Modelling And Hierarchical Control Of CBTC. CEIT 2018 - 6th International Conference on Control Engineering Information Technology (Yayın No:4446870)

