



Haberleşme Tabanlı Tren Kontrolünün (CBTC) Otomatik Tren Korumasına (ATP) İlişkin Dağıtılmış-Hiyerarşik Kontrol Yaklaşımı

Cem ATILGAN*¹, Özgür Turay KAYMAKÇI¹, Tarık Veli MUMCU²

¹ Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye

² Çanakkale 18 Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

³ İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*cematilgan@klu.edu.tr

(Alınış/Received: 21.10.2022, Kabul/Accepted: 01.11.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Kentleşme ile birlikte metropollerde yaşayan insan sayısı artmaktadır, nüfus artışına paralel olarak şehir içi ulaşımda çok önemli bir yer tutan raylı ulaşım sistemlerine olan talep, kalabalık şehirlerde her geçen gün daha da artmaktadır. Artan talebe paralel olarak raylarda artacak trafik yoğunluğu, sinyalizasyon sistemlerini güvenlik, kapasite ve rayların verimine etkisi açısından oldukça önemli kılmaktadır. Günümüzde birçok raylı ulaşım sistemlerinde sinyalizasyon sistemi olarak Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) tercih edilmektedir. CBTC, Otomatik Tren Koruması (ATP), Otomatik Tren Denetimi (ATS) ve Otomatik Tren İşletmesi (ATO) gibi bazı alt sistemlerden meydana gelmektedir. Alt sistemlerin kendine özgü tanımlanan bazı görevleri bulunmaktadır. Bu görevleri yerine getirirken, alt sistemlerden artan gereksinimlerden etkilenmeden, istenen emniyet fonksiyonlarını en üst düzeyde güvenle uygulaması beklenmektedir. Ancak, bu sistemlerin genel tasarımının, ihtiyaç duyulan yeni gereksinimlere göre değiştirilmesi gerekebilir. Bu bağlamda çeşitli standartların sağlarken, alt sistemlerin kontrol edilmesi ve modellenmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, CBTC'nin alt sistemi ATP, ayrık olay sistemi yaklaşımıyla sonlu durum otomatları ile modellenmiştir ve alt sistemlere ait denetimsel gözetleyicilerin tasarımı yapılarak, kontrol edilebilirlik ve kilitlenmesiz kontrol koşullarını karşıladığı gösterilerek, elde edilen sonuçlar yekpare yaklaşım modeli ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ayrık olaylı sistemler, Sonlu durum otomatları, Denetimsel gözetletiyici, Dağıtılmış-hiyerarşik kontrol, Haberleşme tabanlı tren kontrolü

Decentralized-Hierarchical Control Approach to Automatic Train Protection (ATP) of Communication-Based Train Control (CBTC)

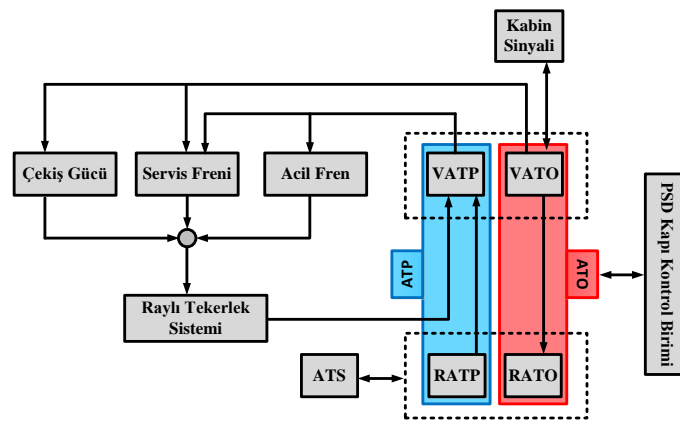
Abstract: With urbanization, the number of people living in metropolises is increasing, parallel to population growth, the demand for rail transportation systems, which has a very important place in urban transportation, is increasing day by day in populous cities. The traffic density, which will increase in parallel with the increasing demand on rail, makes the signal systems very important in terms of their impact on rail safety, capacity and efficiency. Today, communication-based train control (CBTC) is the preferred signaling system in many rail transportation systems. CBTC consists of some subsystems such as Automatic Train Protection (ATP), Automatic Train Control (ATS) and Automatic Train Operation (ATO). The subsystems have some specific, defined tasks. In performing these tasks, it is expected that the desired safety functions will be implemented with the highest level of confidence without being compromised by the increasing requirements from the subsystems. Nevertheless, the overall design of these systems may require to be modified to meet the new necessities. In this case, it is of great importance to control and model the subsystems while considering different standards. In this study, the subsystem of CBTC, ATP, is modeled with finite state automata with the discrete event system approach, and the supervisory watchers of the subsystems are designed, shown to satisfy the controllability and nonlocking conditions, and the obtained results are matched with the model of the monolithic approach.

Keywords: Discrete event systems, Finite state automata, Supervisory Control, Decentralized-hierarchical control, Communication based train control

Atıf için/Cite as: C. Atılğan, Ö.T. Kaymakçı, T.V. Mumcu, "Haberleşme tabanlı tren kontrolünün (CBTC) otomatik tren korumasına (ATP) ilişkin dağıtılmış-hiyerarşik kontrol yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 66-81, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1191856

1. Giriş

Günümüzde tren ve metro sistemlerinin en önemli alt yapısı sinyalizasyon sistemleridir. Sinyalizasyon sistemleri, tren trafiğini düzenlerken, trenlerin demiryolu hattı üzerinde güvenli bir şekilde hareket etmesini sağlar. Raylı sistemlerde seferlerin sorunsuz bir şekilde sürdürülebilmesi için seyrüsefer güvenliğine yönelik çalışma ve projeler üretilip, uygulanmaktadır [1]. Teknolojinin gelişimine paralel olarak sinyalizasyon sistemlerinin alt yapısı da her geçen gün gelişmektedir. Günümüzde en çok üzerinde çalışılan sinyalizasyon tipi hareketli blok sinyalizasyonudur. Hareketli blok, tren hattının sanal bloklara ayrıldığı ve blokların bilgisayarlar tarafından her trenin etrafında güvenli bölgeler olarak gerçek zamanlı olarak tanımlandığı bir sinyalizasyon sistemidir. Bu, hem herhangi bir zamanda tüm trenlerin tam konumu ve hızı hakkında bilgi sahibi olmayı hem de merkezi sinyalizasyon sistemi ile trenin kabin sinyalizasyon sistemi arasında sürekli iletişimi sağlamaktadır. Hareketli bloğa dayalı Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) sistemleri, bu temelde çalışan bir sistemdir. CBTC yüksek çözünürlüklü tren konum belirleme, ray devrelerinden bağımsız olarak, sürekli, yüksek kapasiteli ve çift yönlü veri iletişimiyle çalışan bir tren kontrol sistemidir. CBTC, iki ardışık tren arasındaki güvenlik mesafesinin azaltılmasına izin verir ki bu ray hatlarının kapasitesini artırmak anlamına gelmektedir. Trenler arasındaki mesafe, güvenlik gerekliliklerini koruyarak, trenin konumu ve hızının sürekli güncellenmesine göre değişmektedir. Bu durum, gerekli güvenlik şartlarını sağlarken, trenlerin birbirine daha yakın çalışmasına izin verir. Belirtmek gerekir ki, CBTC sisteminde güvenlik gereklilikleri hayati bir rol oynamaktadır ve CBTC demiryolundaki güvenli trafik akışı açısından kritik öneme sahip sistemlerden biridir [2]. CBTC bünyesinde Otomatik Tren Denetimi (ATS), Otomatik Tren Operasyonu (ATO), Otomatik Tren Koruma (ATP) vb. alt sistemler içermektedir. Burada ATP ve ATO alt sistemleride alt sistemlerden meydana gelmektedir. ATP alt sistemi, Araçüstü Otomatik Tren Koruma (VATP) ve Bölgesel Otomatik Tren Koruma (RATP) alt sistemlerinden meydana gelmektedir. ATO alt sistemi ise Araçüstü Otomatik Tren Operasyonu (VATO) ve Bölgesel Otomatik Tren Operasyonu (RATO) alt sistemlerinden meydana gelmektedir. Araçüstü alt sistemler: VATP ve RATP tren üzerinde yer almaktayken, bölgesel alt sistemler: VATO ve RATO ray hattı boyunca belirlenen bölgeler içerisinde konumlandırılır. Bu alt sistemlerin kendine ait tanımlanmış çeşitli görevleri bulunmaktadır ve alt sistemler birbirleriyle çift yönlü iletişim halindedir. Trenlerin ve diğer sistemlerin güvenli bir şekilde çalışması ve birlikte çalışabilirliği bu alt sistemler sayesinde sağlanmaktadır [3]. Şekil 1’de CBTC’nin genel yapısı görülmektedir.

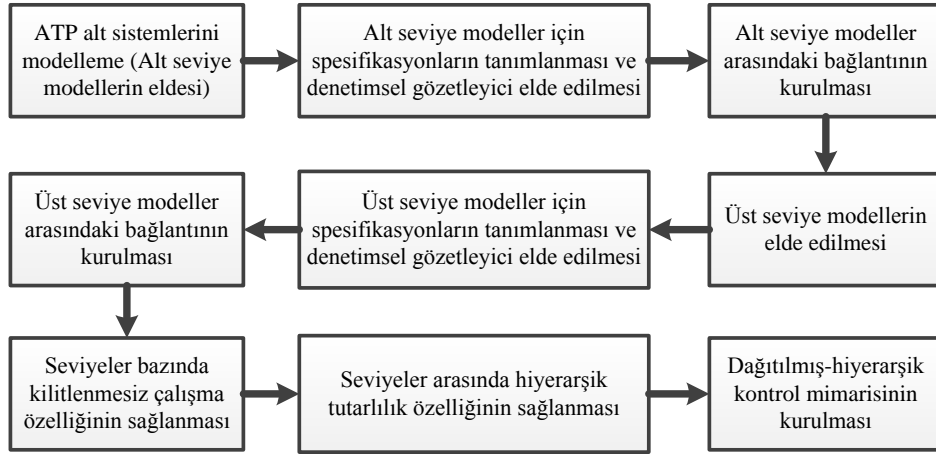


Şekil 1. CBTC yapısı

Bu nedenle alt sistemlerin görevlerini sorunsuz bir şekilde yerine getirebilmesi ve kontrol edilmeleri oldukça önemlidir. Şunu vurgulamak gerekir ki, CBTC’nin alt sistemleri karmaşık bir yapıya sahiptir. Yapıların karmaşıklığını en aza indirmek, sistem yapısını anlaşılır hale getirmek için modellenmesi gerekmektedir. Modelleme, sisteme şu avantajları getirir; sistemin izlenebilirliğini kolaylaştırır, kontrolörlerin tasarımını basitleştirir ve bir hata olması durumunda

sisteme daha kısa sürede müdahale edilmesine olanak sağlar. CBTC gibi ayrık zamanlı olaylardan ve durumlardan meydana gelen bir sistemi otomatlar ile modellenenabilir. Otomat modelde, sistemin belli durumları vardır ve olaylar meydana geldiğinde sistem durum değişikliğine gider. Diğer yandan otomatlarla modelleme yapılırken tercih edilen bazı yaklaşımlar CBTC gibi karmaşık sistemlerin modellenmesinde probleme neden olur. CBTC, sonlu durum otomatları ile yekpare olarak modellenmek istendiğinde içerdiği alt sistemlerin fazlalığı önemli bir sorun olan durum uzayı patlamasına neden olur ve modeller oldukça karmaşık hale gelir. Böyle bir durumda, sistem modellerini kontrol eden denetimsel gözetleyici sentezi çok zorlaşır ve hesaplama süresi önemli ölçüde uzar. Otomatlar ile modelleme yaparken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta modelin kilitlenmeme özelliğini sağlamasıdır. Bu noktadan hareketle denetimsel gözetleyici tasarlamak, kilitlenmesiz çalışmayı sağlamak, model karmaşıklığını azaltmak ve durum uzayı patlamasını önlemek için farklı sistemlere uygulanmış birçok önemli çalışma bulunmaktadır. Jiang Shebbibg ve Kumar Rathnesh, kısmi gözlem altında eşzamanlı ayrık olaylı sistemlerin dağıtılmış denetimsel gözetleyici sorunu üzerinde çalışmışlardır ve çalışmalarında sistemlerin kontrollü davranışının belirli aralıklar arasında verilmesini sağlayan dağıtılmış denetimsel gözetleyici mevcudiyeti için gerekli koşulu oluşturmuşlardır. Bu çalışma sayesinde, eş zamanlı çalışan sistemlerin dağıtılmış kontrolü ve dağıtılmış yerel kontrolünü mümkün kılmışlardır [4]. Cunha, Cury ve Krogh, ayrık olay sistemlerinin hiyerarşik kontrolünde önemli rol oynayan hiyerarşik seviyeler arasında tutarlılığı sağlayan bir izdüşüm yapısı sunmuşlardır. Hiyerarşik yaklaşımla model karmaşıklığını azaltmışlardır [5]. Wong ve Wonham, birbirine bilgi kanalları ile bağlanan düşük seviyeli ve yüksek seviyeli modellerden oluşan iki seviyeli bir hiyerarşik mimarisi kurmuşlardır. Bu mimariyi hiyerarşik tutarlılığı ve kilitlenmesiz olma durumunu geliştirmek için kullanmışlardır ve modellerin karmaşıklığını azaltmışlardır [6]. Schmidt, Reger ve Moor dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol mimarisi üzerinde çalışmışlardır, yazarlar dağıtılmış ayrık olaylı sistemi dikkate alarak, mevcut kontrol yapısını iki seviyeli bir hiyerarşik mimarisi ile birleştirmişlerdir. Yaklaşımlarını uyguladıkları sistemde, kapalı döngü davranışının hiyerarşik olarak tutarlılığını ve kilitlenmeme koşullarını sağladığını göstermişlerdir [7]. Ayrıca, Schmidt, Perk ve Moor, paylaşılan olaylarla senkronize edilen dağıtılmış ayrık olay sistemlerinin hiyerarşik kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarında çok seviyeli hiyerarşik kontrol mimarisi ile hiyerarşik tutarlılığı sağlamışlardır ve denetimsel gözetleyici sentezi hesaplama karmaşıklığını azaltmışlardır [8]. Öte yandan, tren sinyalizasyon sistemlerinin modellenmesi ve anlaşman hakkında da birçok önemli çalışma bulunmaktadır. Tang, Liu ve Wang, Güvenlik-Kritik Uygulama Geliştirme Ortamı (SCADE) kullanarak CBTC anlaşman sistemi için model tabanlı bir tasarım yaklaşımı sunmuşlardır. CBTC'nin karmaşıklığını azaltmak için farklı bir modelleme yaklaşımı önermişlerdir [9]. Kaymakçı, Anık, Üstoğlu, çalışmalarında anlaşman sistemleri üzerinde durmuşlardır ve demiryolu bileşenlerinin ayrık olay sistem modellerini sunarken aynı zamanda yerel modüler denetimsel gözetleyicilerini tasarlamışlar ve kontrol edilebilirlik, koşulunun sağlanabilirliğini kontrol etmişlerdir [10]. Haxthausen ve Peleska demiryolu kontrol sistemleri, tren kontrol bilgisayarları ve makas kilitleme tertibatı içeren dağıtılmış demiryolu kontrol sistemleri hakkında çalışmışlardır. Çalışmalarında dağıtılmış ve işbirliği yapan kontrol algoritmalarının spesifikasyonları vererek durum-uzay patlaması sorununu ortadan kaldırmışlardır [11]. Vu, Haxthausen ve Peleska anlaşman sistemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Avrupa Tren Kontrol Sistemi (ETCS) seviye 2 ile uyumlu olan Danimarka demiryolu anlaşman sistemlerinin genel bir modelini oluşturmuşlardır. Bu çalışmada durum uzayı patlama sorununu ortadan kaldırmak için Satisfiability Modulu Theories (SMT) tabanlı Bounded Model Checking (BMC) yaklaşımını uygulamışlardır [12]. Son olarak Quian Jie, Liu Jing, çalışmalarında CBTC hakkında temel bilgiler vermişlerdir. Ayrıca SCADE kullanarak, CBTC sistemi için güvenlik açısından kritik sistemlerin tasarım, simülasyon süreçlerini yürütmüş ve gerekli tetkikleri yapmışlardır. Çalışmalarında, CBTC'nin modellenmesi ve doğrulanmasının durum uzayı patlaması sorunu nedeniyle zorlu bir sorun olduğunu vurgulamışlardır [13]. Bu çalışmada, dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol yaklaşımı, CBTC'nin alt sistemi olan ATP alt sistemine uygulanmıştır. Çalışmanın amacı durum uzayı patlamasının önüne geçerek modellerin karmaşıklığını azaltmaktır. Uygulanan adımlar Şekil 2'deki akış diyagramında özetlenmiştir.

Önerilen yaklaşımla elde edilen sonuçlar ile yekpare yaklaşımla elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, bulgular sunulmuştur.



Şekil 2. Önerilen yaklaşımın akış diyagramı

2. Materyal ve Metot

Dağıtılmış ve hiyerarşik yaklaşımla yekpare yaklaşımda karşılaşılan sorunlar ortadan kalkmaktadır. Bu sayede sistemin modellenmesi ve denetimsel gözetleyici tasarımı daha kolay yapılabilmektedir.

2.1. Otomatik tren koruma sistemi (ATP)

ATP alt sistemi trenlerin güvenli bir şekilde hareket etmesinden sorumlu olan oldukça önemli ve hayati bir alt sistemdir. ATP alt sistemi ile trenler arasındaki güvenli hareket mesafesi ayarlanırken, trenin güvenli hareket sınırları içerisinde çalışması için tren hızı sürekli olarak kontrol edilir. Hareket süresince, trenin hız sınırını aşması durumunda devreye girerek treni güvenli hız sınırları içerisine taşır, hareket sırasında meydana gelecek acil ve tehlikeli durumlarda acil frenleme ile treni tamamen durdurabilir. ATP alt sistemi VATP ve RATP alt sistemlerinden meydana gelmektedir ve bu alt sistemlerin kendilerine özgü tanımlanmış görevleri bulunmaktadır. VATP ve RATP alt sistemlerinin görevleri Tablo 1’de sıralanmıştır [14].

Tablo 1. VATP ve RATP görevleri

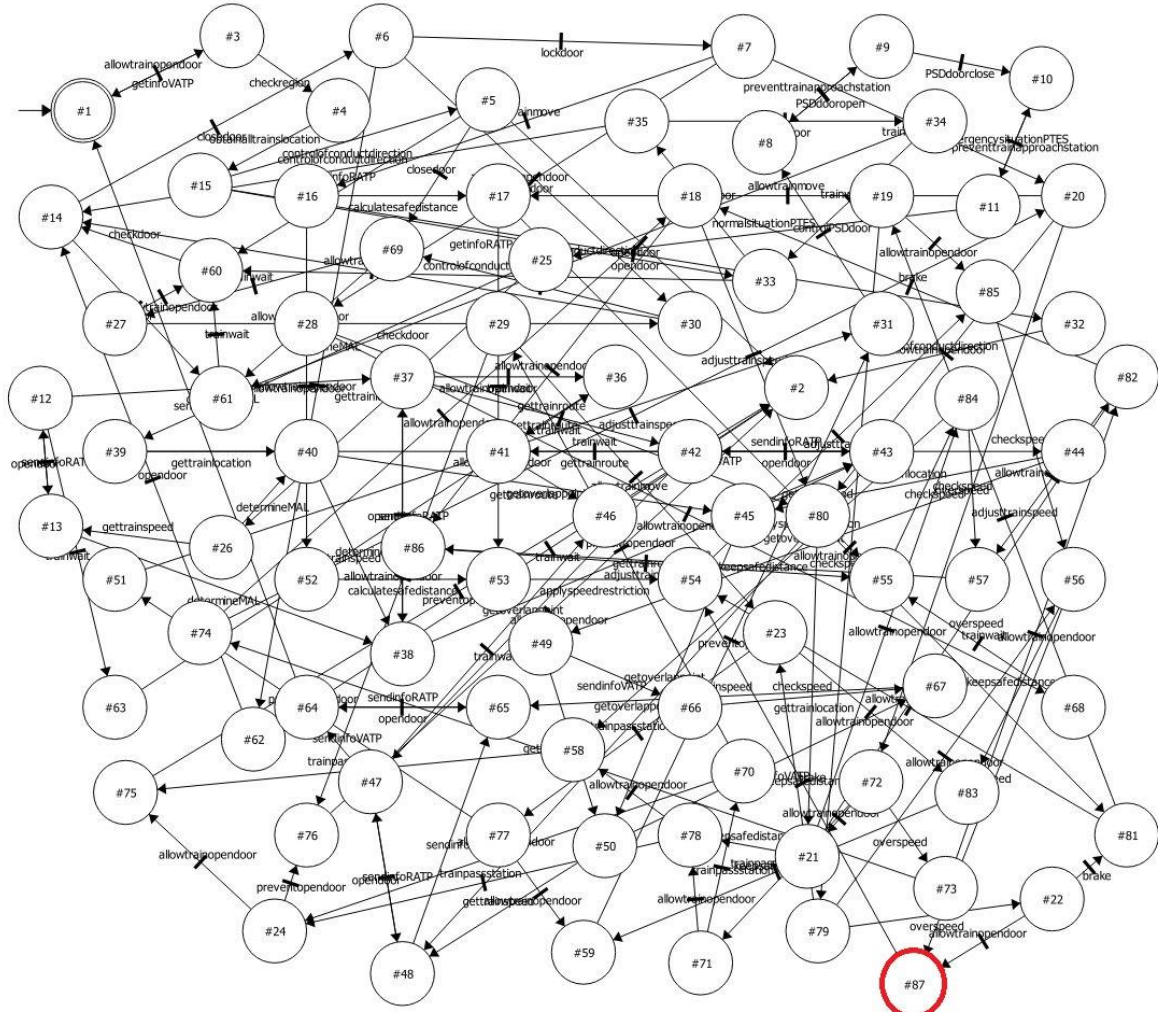
VATP Görevleri	RATP Görevleri
Trenlerin konumlarının algılanması	Trenlerin konumlarının algılanması
Trenler arasındaki güvenli mesafenin ayarlanması	Hareket Yetki Sınırının (MAL) belirlenmesi
Trenin durumuna göre hız kısıtlarının uygulanması	Seyir yönünün kontrolü
Hız ihlalinde fren uygulanması	Tren kapılarının kilitlenme ve kapalılık durumlarının izlenmesi
Tren kapılarının kilitlenme ve kapalılık durumlarının izlenmesi	Tren kapılarının durumuna göre tren hareketine izin verilmesi
Tren kapılarının durumuna göre tren hareketine izin verilmesi	Peron ayırıcı kapıların kapalılık durumuna göre trenin istasyona giriş kontrolü
Trenin istasyonda duruncaya kadar kapıları kapalı tutması	
Peron ayırıcı kapıların kapalılık durumuna göre trenin istasyona giriş kontrolü	

2.2. Matematiksel notasyon

Olay kümesi Σ ile, olay kümesindeki olaylar kullanılarak üretilecek diller L harfiyle, otomatlar G harfiyle, sisteme ilişkin denetimsel gözetleyici S harfiyle, sistem için tanımlanacak spesifikasyonlar ise D harfiyle temsil edilir. Tüm alt sistemlerin $\Sigma_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ile temsil edilen bir olay kümesi vardır. Tüm alt sistemler $\Sigma := \Sigma_1 \cup \Sigma_2 \cup \dots \cup \Sigma_n$ ya da $\Sigma := \bigcup_{i=1}^n \Sigma_i$ üzerinde $G := G_1 || G_2 || \dots || G_n$ şeklinde tanımlanabilir. Ayrıca kontrol edilebilen ve edilemeyen olayları $\Sigma_{i,c} := \Sigma_i \cap \Sigma_c$ ve $\Sigma_{i,uc} := \Sigma_i \cap \Sigma_{uc}$ iken $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc}$ ve $\Sigma_c \cap \Sigma_{uc} = \emptyset$ şeklinde yazılabilir. G_i, G_j gibi ayrılmış alt sistemler, yalnızca $\Sigma_i \cap \Sigma_j \neq \emptyset$ şartı sağlanıyorken senkronize edilebilir. Denetimsel gözetleyici, maksimum izin verilen kapalı döngü davranışı $\kappa_{L(G)}(D)$ üretir ve denetimsel gözetleyiciler sadece kontroledilebilir olayları devre dışı bırakabilir. Kontrol edilemeyen olaylar üzerinde bir etkisi yoktur. $E, L(G)$ 'ye göre kontrol edilebilir bir dil olduğunu varsayarsak S gözetimsel denetleyicisi altında $\bar{E} = L(S/G)$ eşitliği sağlanır. Tüm kontrol edilebilir dillerin kümesi $C(L(G))$ ile temsil edilir ve $(L(G)) = \{E \subseteq L(G) | \exists S \text{ öyle ki } \bar{E} = L(S/G)\}$ şartını sağlar. Bu nedenle, tüm spesifikasyonların dili için, $L(G)$ 'ye göre D 'nin üst kontrol edilebilir alt dili mevcuttur denilebilir. D 'nin üst kontrol edilebilir alt dili $\kappa_{L(G)}(D) := \bigcup \{K \in C(L(G)) | K \subseteq D\}$ olarak tanımlanır. K dili, sistemin denetimsel gözetleyicisi altında istenen davranışı sergilemesini beklenen dil kümesi olarak tanımlanır. Ancak bir sistemin beklenen davranışını içeren K dili kontrol edilemeyebilir. Eğer K kontrol edilemezse, sistem istenen davranışı gösteremez. Beklenen davranışı verecek denetimsel gözetleyicinin tasarımı için dilin kontrol edilebilir alt dilleri kullanılabilir. $K, K^{\uparrow c}$ ile gösterilen en büyük kontrol edilebilir dil olarak adlandırılır. Lokal düşük seviyeli denetimse gözetleyici $S_i: L_i \rightarrow F_i$ (F_i kontrol dizileri) ile gösterilir. Düşük seviyeli kapalı döngü dilleri $L_i^c := L(S_i/G_i)$ $L_{i,m}^c := L_i^c \cap L_{i,m}$, $L^c := \bigcap_{i=1}^n L_i^c$, $L_m^c := \bigcap_{i=1}^n L_{i,m}^c = L^c \cap L_m$ ile ifade edilir ve $L^c = L(G^c)$, $L_m^c = L_m(G^c)$ eşitlikleri sağlanır. Diğer yandan düşük seviyeli bir sistemin izdüşümü alınarak elde edilen yüksek seviyeli sistemin denetimsel gözetleyicisi $S^{hi}: L^{hi} \rightarrow F^{hi}$ ve yüksek seviyeli kapalı döngü dili $L(S^{hi}/G^{hi})$ ile gösterilir. Kullanılabilir bir düşük seviye denetimsel gözetleyici $S^{lo}: L^c \rightarrow F, \theta(L(S^{lo}/G^c)) \subseteq L(S^{hi}/G^{hi})$ şartını sağlamalıdır. Son olarak, doğal izdüşüm ile $\theta: \Sigma^* \rightarrow (\Sigma^{hi})^*$ and $\Sigma^{hi} := \bigcup_{i,j,i \neq j} (\Sigma_i \cap \Sigma_j)$ üst seviye modelin olay kümesi elde edilir. Üst seviye dil $L^{hi} := \theta(L^c)$ ve $L_m^{hi} := \{s^{hi} \in L^{hi} \text{ öyle ki } \theta^{-1}(s^{hi}) \cap L_m^c \neq \emptyset\}$ ile $L^{hi} = L(G^{hi})$ olacak şekilde elde edilir. Paralel birleşim, modeller arasındaki senkronizasyonu sağlayan notasyondur yani aynı anda çalışan aynı seviyedeki otomatların ortak davranışının modellenmesini sağlar. Paralel birleşim matematiksel olarak $L_1 || L_2 \subseteq \Sigma^*$ ifade edilir. Bir sistemin kilitlenmesiz olması için $\overline{L_m(G)} = L(G)$ şartını sağlaması gerekir [15].

2.3. Yekpare yaklaşım

Yekpare yaklaşım tercih edilerek bir denetimsel gözetleyici tasarımı, büyük sistemler için çok fazla hesaplama gerektirir. Bu yaklaşımda sistem, alt sistemlere ayrılmaz ve tek bir sistem olarak modellenir. Oluşturulacak model, sistemin alt sistemlerinde durumlarını kapsayacak şekilde tüm durumları dikkate alınarak oluşturulur ve bu modele göre bir denetimsel gözetleyici tasarımı yapılır. Sistem tek bir birim olarak düşünüldüğünde elde edilen denetimsel gözetleyicinin oluşturulması çok karmaşık bir hale gelmektedir. Bunun nedeni, çok sayıda bileşene sahip olan sistemin yapısıdır. Bileşen sayısı arttıkça durum uzayı üstel olarak artar ve sonuçta durum uzayı patlaması meydana gelir. ATP sisteminin yekpare modeli Şekil 3'te görülebilir. Yekpare modelde 87 durum bulunmaktadır. Şekil 3'ten de anlaşılacağı gibi yekpare yaklaşımla oluşturulacak sistem modeli oldukça karmaşıktır ve takip edilebilirliği çok zordur. Şunu ayrıca eklemek gerekir ki böyle bir model için denetimsel gözetleyici tasarlamakta çok zordur. Diğer yandan, CBTC'nin, ATO ve ATS gibi birçok alt sistemden oluştuğu göz önüne alındığında yekpare yaklaşımla CBTC sistemi modellenmek istendiğinde elde edilecek modelin ne kadar karmaşık olduğu açıktır.



Şekil 3. ATP altsisteminin yekpare yaklaşımı ile oluşturulmuş modeli

2.4. Dağıtılmış kontrol mimarisi

Dağıtılmış kontrol mimarisinde, bir sistem alt sistemlerine ayrılır. Tüm ayrılmış alt sistemler için ayrı ayrı spesifikasyonlar tanımlanır. Spesifikasyonlar sistemden istenen veya beklenen davranışın modelleridir ve sistemlere bağlı olarak tanımlanırlar. Sistemin tanımlanan spesifikasyonlar doğrultusunda beklenen davranışı kontrol etmek için denetimsel gözetleyiciler tasarlanır. Bu yaklaşımda her bir alt sistem için bireysel denetimsel gözetleyiciler sentezlenir. Diğer yandan alt sistemler birlikte tüm sistemi meydana getirdiği için alt sistemlerin birbirine bağlanması gerekir. Burada tüm alt sistemlerden, sistem modeline sahip olabilmek için paralel birleşim işlemi uygulanır. Bu işlem ile alt sistemler belirli şartlar altında birbirine bağlanır ve sistem sorunsuz bir şekilde çalışır [16].

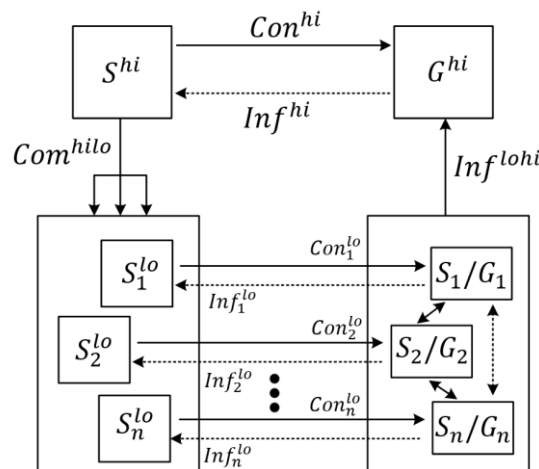
2.5. Hiyerarşik kontrol mimarisi

Hiyerarşik kontrol mimarisinde, denetimsel gözetleyici sentezi, sistem durumlarının azaltılmasına dayanır. Bu mimaride düşük seviyeli ve yüksek seviyeli olarak adlandırdığımız modeller bulunmaktadır. Düşük seviyeli bir model, yüksek seviyeli modelden daha karmaşıktır ve orijinal sistem modeli, düşük seviyeli bir model ile temsil edilir yani düşük seviyeli model sistemlerin tüm olası davranışlarını içeren ayrıntılı bir modeldir. Diğer yandan durumu azaltılmış sistem modeline yüksek seviyeli model denir. Teknik olarak, bir sistemdeki model sayının

azaltılması doğal izdüşümlerle sağlanır. Doğal izdüşüm, sistem durum sayısının azaltılmasını sağlayan önemli bir süreçtir. Diğer bir deyişle, doğal izdüşüm, belirlenen bir olay kümesi kullanılarak yüksek seviye modellerin elde edilmesini sağlar. Doğal izdüşüm teorik olarak şu şekilde açıklanabilir. Daha küçük olay kümesine (Σ_s) ait olmayan olayları daha büyük olay kümesinden (Σ_l) siler. Σ_l ve Σ_s sırasıyla daha büyük ve daha küçük olay setini temsil eder. Burada diğer önemli bir konu düşük seviye modeller ile yüksek seviye modellerin birbirine bağlanmasıdır. Düşük seviyeli model gerçek dünya modelini ifade ederken, yüksek seviyeli model belli durumları içeren sanal bir modeldir ve düşük seviyeli model üzerinde yönetici olarak yer alır. İki seviye, birbirlerine komut ve bilgi kanalları vasıtasıyla bağlıdır. Burada yüksek seviye model (yönetici) tarafından istenen üst düzey davranış alt seviye modele iletilir. Burada denetimsel gözetleyicilere ve genel sisteme bireysel hedefler atanır; yüksek seviyeli denetimsel gözetleyici, düşük seviyeli denetimsel gözetleyicileri kendi hedefine göre koordine ettiğinde genel hedefe ulaşırsa, sistemin karar problemlerinin tutarlı olduğu söylenir. Bu hiyerarşik tutarlılıktır. Bunun anlamı, hiyerarşinin herhangi bir seviyesinde bulunan kontrol modelinin, bir sonraki seviyenin gerektiği veya beklendiği gibi yanıt vereceği güvencesiyle kullanılabilmesi anlamına gelmektedir [17].

2.6. Dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi

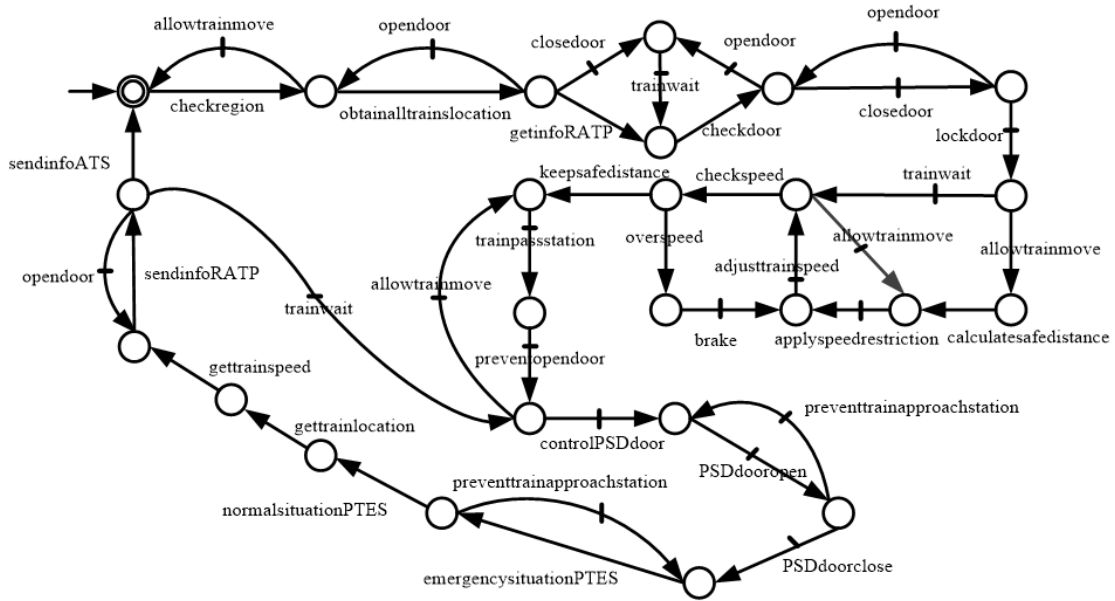
Dağıtılmış kontrol mimarisi ile hiyerarşik kontrol mimarisi birleştiğinde dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi ortaya çıkar. Şekil 4 dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisini yapısını göstermektedir. Gösterilen modelde S, denetimsel gözetleyiciyi, G ise sistemin sonlu durum otomatları tarafından ifade edilen davranışını belirtir. Diğer semboller ise; Com komut işlemini, Con kontrol işlemini, Inf bilgi işlemini, hi yüksek seviyeli sistem modellerini, lo düşük seviyeli sistem modellerini temsil etmek için kullanılmıştır. Bu kısaltmaların işlevleri şöyle ifade edilebilir. Com^{hilo} : Yüksek seviyeli denetimsel gözetleyiciden düşük seviyeli denetimsel gözetleyiciye komut göndermeyi, Inf^{lohi} : Düşük seviyeli sistem modelinden yüksek seviyeli sistem modeline bilgi göndermeyi, Con^{hi} : Yüksek seviye denetimsel gözetleyici tarafından yüksek seviye sistem modeline komut göndermeyi, Inf^{hi} : Yüksek seviye sistemden yüksek seviye denetimsel gözetleyiciye bilgi göndermeyi, Con^{lo} : Düşük seviyeli denetimsel gözetleyici tarafından düşük seviyeli sisteme modeline komut göndermeyi, Inf^{lo} : Düşük seviyeli sistem modelinden düşük seviyeli denetimsel gözetleyiciye bilgi göndermeyi ifade etmektedir. Bu parametreler sistemin birlikte çalışabilirliğini ve sistemler arası koordinasyonu sağlar. Bu sayede düşük seviye sistemler kendi aralarında haberleşir ve düşük seviye ve yüksek seviye sistemlerin birlikte çalışabilirliği sağlanır [7].



Şekil 4. Dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol mimarisi [7]

3. Bulgular

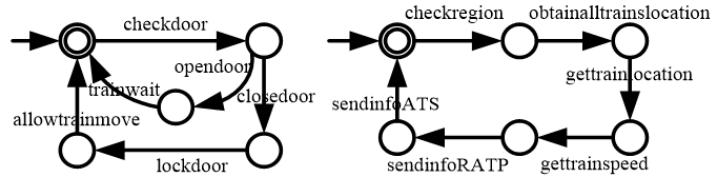
Bu bölümde CBTC'nin alt sistemi ATP sistemi göz önüne alınarak dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi kurulmuştur. Dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi elde edilirken şu yol izlenmiştir. ATP sistemi alt sistemlerine ayrılmıştır, ATP'nin VATP ve RATP olmak üzere iki alt sistemi vardır. VATP ve RATP alt sistemlerinin düşük seviyeli sistem modelleri oluşturulmuştur. VATP ve RATP alt sistemleri için spesifikasyonlar tanımlanmıştır. VATP ve RATP alt sistemlerinin düşük seviye modeli için tanımlanmış spesifikasyonlar kullanılarak, VATP ve RATP için bireysel denetimsel gözetleyiciler sentezlenmiştir. Denetimsel gözetleyici elde edildikten sonra, alt sistemler arasında paylaşılan olaylar tanımlanmıştır. Doğal izdüşüm işlemi ve paylaşılan olaylar kullanılarak yüksek seviyeli modeller elde edilmiştir. Son olarak, oluşturulan düşük seviyeli modeller, elde edilen yüksek seviyeli modeller, elde edilen düşük seviyeli denetimsel gözetleyici ve yüksek seviyeli denetimsel gözetleyiciler ile dağıtılmış hiyerarşik mimari inşa edilmiştir. Diğer yandan vurgulamak gerekir ki CBTC'nin diğer alt sistemleri de yukarıda bahsettiğimiz ATP sistemi için izlediğimiz yol kullanılarak modellenebilir. Bu çalışmada sadece VATP ve RATP modelleri detaylı olarak sunulmuştur. Şekil 5'te VATP alt sisteminin düşük seviye (G_{VATP}^0) görülmektedir. Burada bazı geçişlerin üzerinde çubuk işareti varken, bazı geçişlerin üzerinde çubuk işareti bulunmamaktadır. Herhangi bir geçişte çubuk işareti varsa, olayın kontrol edilebilir, çubuk işareti yoksa, olayın kontrol edilemez olduğu anlamına gelmektedir. Denetimsel gözetleyici yalnızca kontrol edilebilir olayları kontrol etme yeteneğine sahiptir. Modeldeki olaylar ile tüm modellerde bulunan olaylarının açıklaması Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 5, VATP sisteminin kontrolsüz davranışını (G_{VATP}^0) ifade etmektedir.



Şekil 5. Düşük seviyeli ve kontrol uygulanmamış VATP modeli

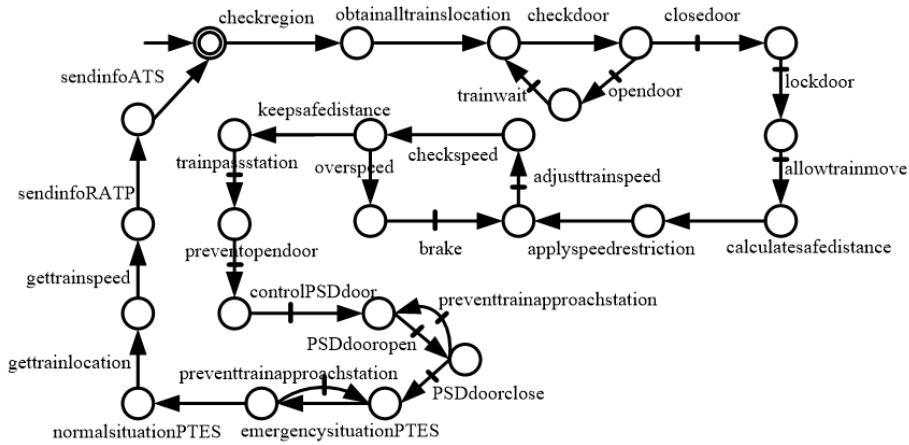
Kontrolsüz model demek içerisinde istenmeyen davranışları bulunduran model anlamına gelmektedir. Örneğin bu kontrolsüz modelde sanal bölgeler kontrol edilmeden trenin hareket etmesine izin verilmiştir. Bu istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, bu tür davranışları içeren modeller kontrolsüz modeller olarak adlandırılır. Kontrolsüz davranışların daha iyi anlaşılması için şu örnekler de verilebilir: trenin aşırı hızlanması, tren seyir halindeyken frenlerin tepki vermemesi vb. gibi. Bu tür istenmeyen durumlar meydana geldiğinde sistem düzgün çalışmaz ve bu durumlar sistemi kullanılamaz hale getirebilir. Peki kontrolsüz bir modelin istenen davranışı sergilemesini nasıl sağlanabilir ve bunun kontrolünü nasıl gerçekleştirilebilir? Bir modelin istenen davranışları spesifikasyonlar tanımlanarak ifade edilebilir. Tanımlanan spesifikasyonlarla

sistemin denetimsel gözetleyicileri elde edilir ve denetimsel gözetleyiciler olayları gözlemleyerek sistemin tanımlanan spesifikasyonlara uygun olarak çalışmasını sağlarlar yani sistemin istenmeyen davranışını ortadan kaldırarak kontrollü bir şekilde istenen davranışı sergilemesini sağlarlar. Şekil 6'da VATP sistemi için tanımlanmış spesifikasyonlar (D_{1VATP}^0, D_{2VATP}^0) görülmektedir.



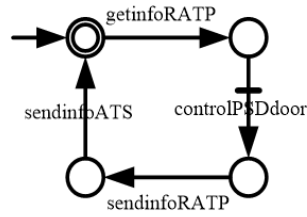
Şekil 6. VATP için tanımlanmış spesifikasyonlar

İlk spesifikasyon, kapı ve tren hareket ilişkisi ile ilgili tren kapıları durumu için, ikinci spesifikasyon ise ray hattında çarpışmayı önlemek için tanımlanmıştır. Bu spesifikasyonların amacı, sanal bölgelerin kontrolü sonrasında tren lokasyonlarını öğrenmek ve diğer trenlerin hızına göre trenin hızını ayarlamak ve bu bilgileri RATP ve ATS'ye göndermek ve trenin kapılarının açık-kapalı olma durumunu kontrol ederek trenin hareket etmesine izin vermektir. Bu özelliklerin senkronizasyonu paralel birleşim işlemi ile gerçekleştirilir. Bu işlem, aynı anda çalışan bir dizi otomatin ortak davranışını veren modeli $D_{VATP}^0 = D_{1VATP}^0 || D_{2VATP}^0$ elde etmemizi sağlar. VATP denetimsel gözetleyicisi ise $(G_{VATP}^{(0),c}) = L(S_{VATP}^0 / G_{VATP}^0) = \kappa_{L(G_{VATP}^0)}(D_{VATP}^0)$ ifadesi ile sentezlenmiştir. VATP'nin denetimsel gözetleyici modeli Şekil 7'de görülebilir.



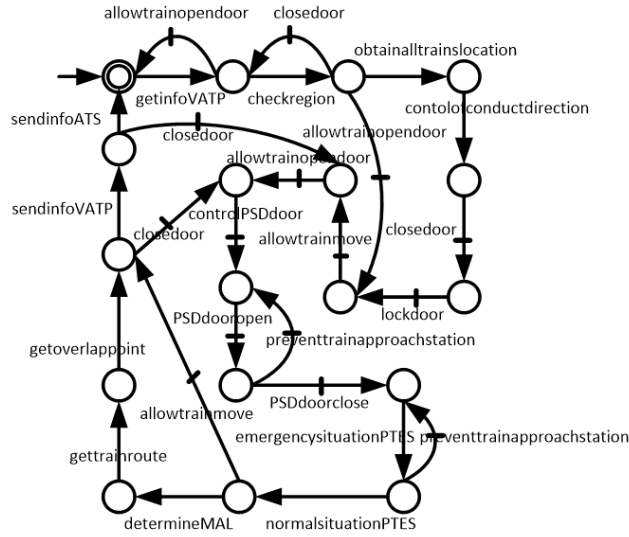
Şekil 7. VATP'nin denetimsel gözetleyici modeli

VATP için elde edilen denetimsel gözetleyici, VATP sistemini gözlemler ve spesifikasyonları sağlayabilmek amacıyla kontrol edilebilen bazı olayları devre dışı bırakır. Diğer yandan VATP alt sistemi, paylaşılan olaylar aracılığıyla RATP alt sistemine bağlanmıştır. Yüksek seviye bir VATP modeline sahip olmak için paylaşılan olaylar aşağıdaki tanımda belirtilmiştir. $\Sigma_{VATP}^1 = \{getinfoRATP, sendinfoRATP, sendinfoATS, controlPSDdoor\}$ ve $\Sigma_{VATP}^1 \subseteq \Sigma_{VATP}^0$. Burada belirlenen paylaşılan olaylar kümesi kullanılarak doğal izdüşüm işlemiyle VATP'nin yüksek seviye modeli elde edilmiştir. Yüksek seviyeli VATP modeli ($G_{VATP}^{(1),c}$) Şekil 8'de görülebilir.



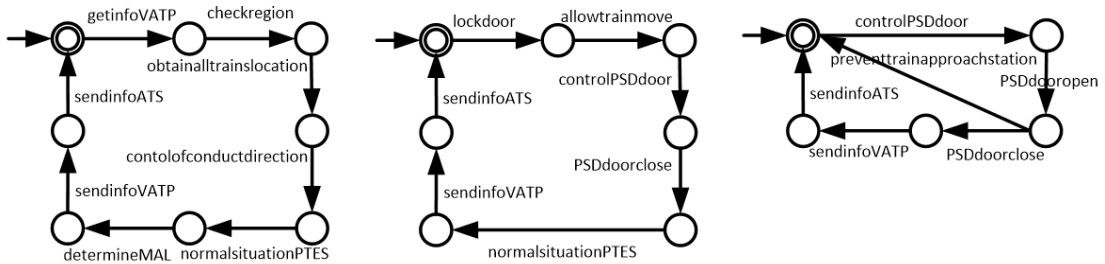
Şekil 8. Yüksek seviye VATP modeli

VATP alt sistemine uygulanan işlemler, RATP alt sistemine de uygulanmıştır. RATP alt sisteminin düşük seviyeli modeli (G_{RATP}^0) Şekil 9'daki gibi tanımlanmıştır.



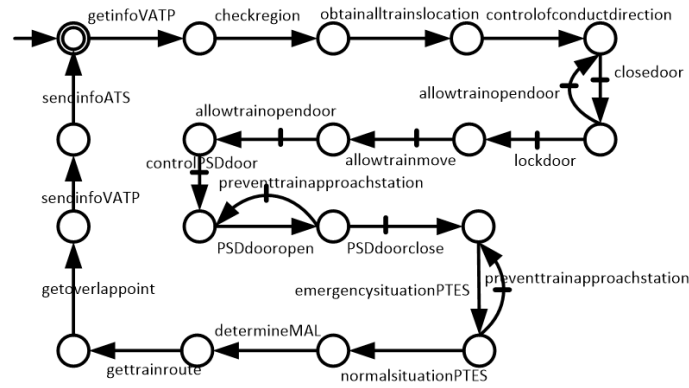
Şekil 91. RATP'nin kontrol edilmemiş düşük seviye modeli

Şekil 10, RATP için tanımlanan spesifikasyonları ($D_{1RATP}^0, D_{2RATP}^0, D_{3RATP}^0$) göstermektedir. Spesifikasyonların senkronizasyonu paralel birleşim işlemi $D_{RATP}^0 = D_{1RATP}^0 || D_{2RATP}^0 || D_{3RATP}^0$ ile yapılmıştır.



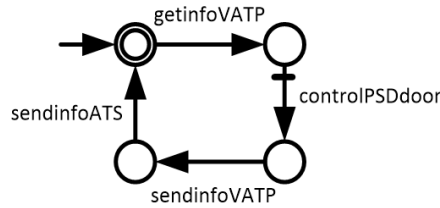
Şekil 10. RATP için tanımlanmış spesifikasyonlar

RATP alt sisteminin düşük seviyeli denetimsel gözetleyicisi ($G_{RATP}^{(0),c} = L(S_{RATP}^0 / G_{RATP}^0) = \kappa_{L(G_{RATP}^0)}(D_{RATP}^0)$) işlemi elde edilmiştir. Düşük seviyeli RATP alt sisteminin denetimsel gözetleyici modeli Şekil 11'de görülebilir.



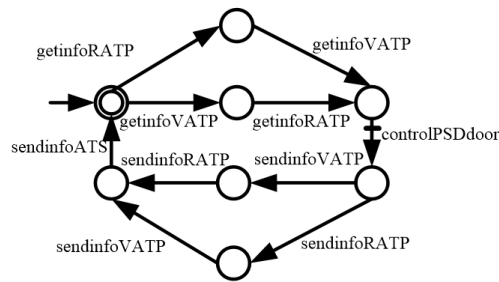
Şekil 11. RATP'nin denetimsel gözetleyici modeli

Paylaşılan olaylar, yüksek seviyeli bir RATP alt sistemine sahip olmak için $\Sigma_{RATP}^1 = \{\text{getinfoRATP}, \text{sendinfoRATP}, \text{sendinfoATS}, \text{controlPSDdoor}\}$ ve $\Sigma_{RATP}^1 \subseteq \Sigma_{RATP}^0$ olacak şekilde belirlenmiştir. Belirlenen paylaşılan olaylarla doğal izdüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir ve RATP alt sisteminin üst düzey modeli ($G_{RATP}^{(1),c}$) Şekil 12'deki gibi elde edilmiştir.



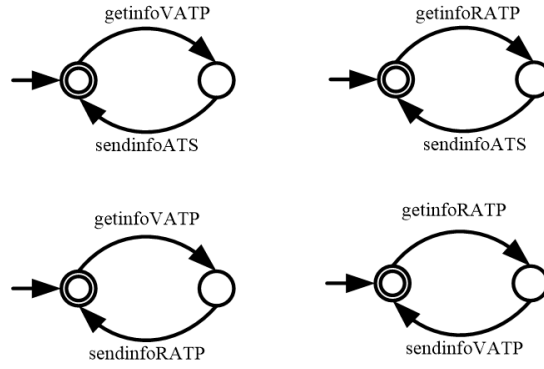
Şekil 12. Yüksek seviye RATP modeli

Alt sistemlerin senkronizasyonu için yüksek seviyeli VATP ve RATP modelleri kullanılmıştır. Bu modellere, paralel birleşim ($G_{ATP}^1 = G_{VATP}^1 || G_{RATP}^1$) işlemi uygulanarak VATP ve RATP'yi içeren ATP sisteminin yüksek seviye modeli elde edilmiştir. Şekil 13, yüksek seviyeli ATP sisteminin modelini (G_{ATP}^1) göstermektedir.



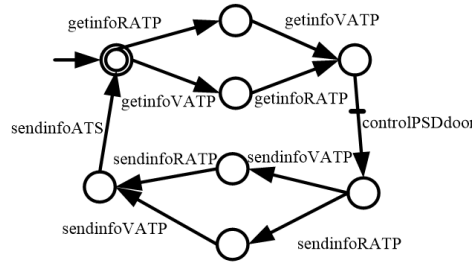
Şekil 13. RATP ve VATP'nin paralel bileşimi modeli ATP

Senkronize edilmiş yüksek seviyeli RATP ve VATP modeli yani ATP modeli için spesifikasyonlar sırasıyla $D_{1ATP}^1, D_{2ATP}^1, D_{3ATP}^1, D_{4ATP}^1$ olarak tanımlanmıştır. Şekil 14'te spesifikasyona ait modeller görülmektedir. Dört spesifikasyonun senkronizasyonu paralel birleşim $D_{ATP}^1 = D_{1ATP}^1 || D_{2ATP}^1 || D_{3ATP}^1 || D_{4ATP}^1$ işlemi ile elde edilmiştir.



Şekil 14. ATP için tanımlanmış spesifikasyonlar

Senkron üst düzey sistemin denetimsel gözetleyicisi ise $(G_{ATP}^{(1),c}) = L(S_{ATP}^1/G_{ATP}^1) = \kappa_{L(G_{ATP}^1)}(D_{ATP}^1)$ ile hesaplanmıştır. ATP modeline ait spesifikasyonları sağlayan denetimsel gözetleyici modeli Şekil 15'te görülmektedir. Diğer yandan Şekil 13 ve Şekil 15 incelendiğinde her iki modelinde aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni tanımlanmış olan spesifikasyonlardır.



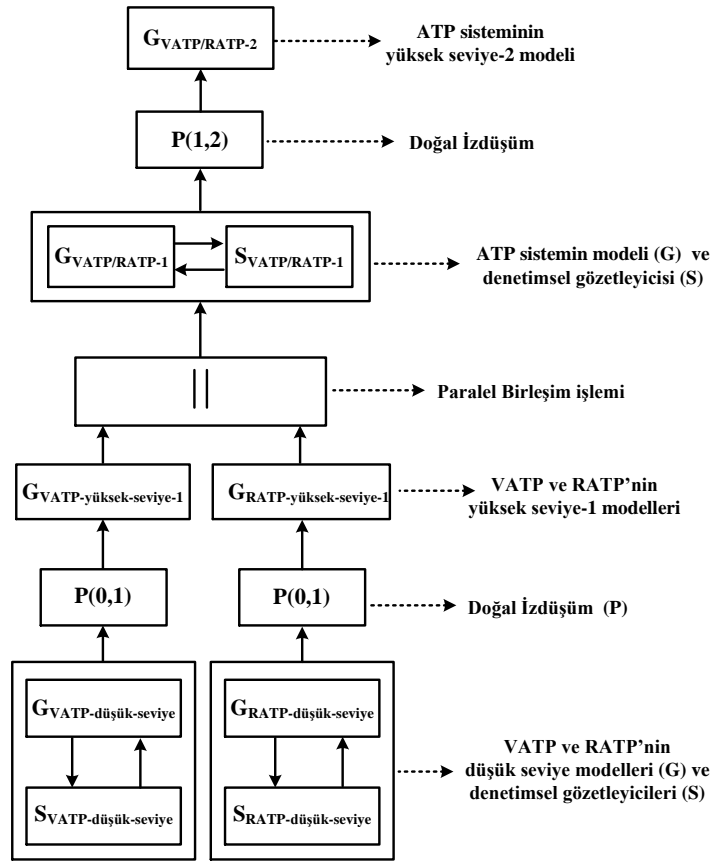
Şekil 15. ATP'nin denetimsel gözetleyici modeli

Tanımlanan paylaşılan olay $\Sigma_{ATP}^2 = \{\text{sendinfoATS}\}$ ve $\Sigma_{RATP}^2 \subseteq \Sigma_{RATP}^1$, doğal izdüşüm ile Şekil 16'daki model $(G_{ATP}^{(2),c})$ elde edilmiştir. Bu model hiyerarşinin en tepesindeki modeldir.



Şekil 16. ATP'nin yüksek seviyeli modeli

Sonuçta oluşturulan modeller ve sentezlenen denetimsel gözetleyiciler ile dağıtılmış ve hiyerarşik yapı inşa edilmiştir. ATP sisteminin dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi Şekil 17'de görülebilir.



Şekil 17. ATP sisteminin dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol mimarisi

Burada, denetimsel gözetleyicileri $S_{(VATP-düşük-seviye)}$ ve $S_{(RATP-düşük-seviye)}$ alt düzey $G_{(VATP-düşük-seviye)}$ ve $G_{(RATP-düşük-seviye)}$ modelleri ve spesifikasyonları kullanılarak sentezlenmiştir. P harfi doğal izdüşüm işlemini ifade etmektedir. Doğal izdüşüm işlemi ile $G_{(VATP-yüksek-seviye-1)}$ ve $G_{(RATP-yüksek-seviye-1)}$ modelleri elde edilmiştir. Ayrıca üst düzey modellerin birlikte çalışabilirliğini sağlamak için paralel birleştirme işlemi (||) gerçekleştirilmiş ve $G_{(VATP-RATP-1)}$ modeli elde edilmiştir. Aynı işlemler en yüksek seviyedeki $G_{(VATP-RATP-2)}$ modeli elde edilene kadar tekrarlanmıştır. Böylelikle, VATP ve RATP alt sistemlerinin denetimsel gözetleyicileri ve üst düzey denetimsel gözetleyiciler başarıyla elde edilmiştir. Denetimsel gözetleyici ile ATP sistemi güvenli bir şekilde çalışmakta ve güvenlik gereksinimlerini karşılamaktadır. Diğer yandan oluşturulan modeller ve sentezlenen denetimsel gözetleyiciler ile seviye bazında ve seviyeler arasındaki tutarlılık koşulu sağlanmaktadır ve modeller kilitlenmesiz olarak çalışma şartını sağlamaktadır.

Tablo 2. Otomat modellerindeki olayların açıklanması

Olaylar	Açıklaması	Olaylar	Açıklaması
adjusttrainspeed	Trenin hızının ayarlanması olayı	checkdoor	Trenin kapılarının açık olup olmadığının kontrol edilmesi olayı
allowtrainmove	Trene hareket etme izni verilmesi olayı	checkregion	Ayrılmış sanal blokların kontrol edilmesi olayı
allowtrainopendoor	Trene kapısını açma izninin verilmesi olayı	checkspeed	Trenin güvenli hızının kontrol edilmesi olayı
appliespeedrestriction	Tren hızının limit kısıtlarının uygulanması olayı	closedoor	Tren kapılarını kapatma olayı

brake	Trenin fren yapması olayı	controlPSDdoor	Platformla ayrılmış kapıların kontrol edilme olayı
calculatesafedistance	Trenin çarpışmasını önlemek için güvenli mesafeni ayarlanması olayı	determineMAL	Hareket yetki sınırının belirlenmesi olayı
emergencysituationPTES	Acil durum olması olayı	lockdoor	Tren kapılarının kilitlenmesi olayı
getinfoRATP	RATP'den tren ve bölge bilgilerinin alınması olayı	normalsituationPTES	Acil durum olmaması olayı
getinfoVATP	VATP'den tren bilgisinin alınması olayı	obtainalltrainslocation	Ray hattındaki trenlerin yerlerinin öğreilmesi olayı
keepsafedistance	Trenin güvenli mesafesini koruması olayı	opendoor	Tren kapılarının açılması olayı
overspeed	Trenin hız sınırını aşması olayı	sendinfoATS	ATS'ye tren ve ray bilgilerinin gönderilmesi olayı
PSDdoorclose	Platformla ayrılmış kapıların kapanması olayı	sendinfoRATP	Bölge ve tren bilgilerinin RATP'ye gönderilmesi olayı
PSDdooropen	Platformla ayrılmış kapıların açılması olayı	sendinfoVATP	Tren bilgilerinin VATP'ye gönderilmesi olayı
preventopendoor	Tren kapısının açılmasının önlenmesi olayı	trainpassstation	Trenin istasyonda durmaması olayı
preventtrainapproachstation	Trenin tren istasyonuna girmesinin önlenmesi olayı	trainwait	Trenin çalışır halde bekletilmesi olayı

4. Sonuç

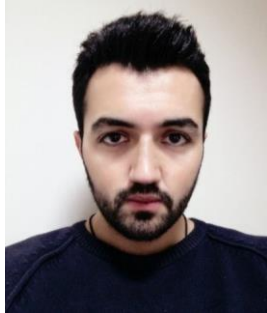
Bu çalışmada oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan CBTC sisteminin alt sistemi ATP, hem yekpare yaklaşımla hem de önerilen yaklaşım ile modellenmiştir. Önerilen modelde her düşük seviyeli model ve yüksek seviyeli model için bireysel denetimsel gözetleyiciler tasarlanmıştır. Yekpare yaklaşımla ATP modelinin durum sayısı 87 olarak hesaplanmıştır. Vurgulamak gerekir ki yekpare yaklaşımla modellemeye CBTC'nin diğer alt sistemleri ATO ve ATS'de dahil edildiğinde durum-uzayı patlaması kaçınılmazdır, bunun sonucunda modellerdeki durumların izlenmesi oldukça zor bir hal alırken, modele ait denetimsel gözetleyici tasarımı oldukça karmaşık bir hal almakta ve denetimsel gözetleyicilerin sentezlenmesi için geçen süre oldukça uzun olmaktadır veya denetimsel gözetleyici sentezlenmemektedir. Bu çalışmada dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi ile durum uzayının patlamasının önüne geçilmiştir, sistem modeli daha basit hale getirilmiştir. Uygulanan yaklaşımla ATP modelinin durum sayısı 48'e indirilmiş ve ayrıca denetimsel gözetleyicilerin modelleri daha basit hale getirilmiştir. Son olarak, dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisindeki seviyeler arasındaki hiyerarşik tutarlılık ve tüm seviyedeki sistem modellerinin kilitlenmesiz olma özelliği sağlanmıştır.

Kaynakça

- [1] H. Sömbül , A. Bogrek ve A. Tunçer , "Demiryolu ulaşım güvenliği için makinist uyarım sistemi kavramsal tasarımı ve simülasyonu", *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 14, ss. 1-13, Temmuz, 2021, doi:10.47072/demiryolu.832113
- [2] R. Pascoe, T.Eichorn, "What is communication-based train control?," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 4, no. 4, pp. 16-21, Aralık, 2009, doi: 10.1109/MVT.2009.934665
- [3] T. Yüksel, Z. Öztürk, "A study on communications based train control (CBTC) system and its benefits," in *4th International Symposium on Railway System Engineering-ISERSE*, Karabük, Türkiye 2018.

- [4] S. Jiang, R. Kumar, "Decentralized control of discrete event systems with specializations to local control and concurrent systems," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part B*, vol. 30, no. 5, pp. 653-660, Ekim, 2000, doi: 10.1109/3477.875442
- [5] A.E.C. da Cunda, J.E.R. Cury, B.H. Krogh, "An assume-guarantee reasoning for hierarchical coordination of discrete event systems," in *6th International Workshop on Discrete Event Systems*, Zaragoza, İspanya, 2002.
- [6] K.C. Wong, W.M. Wonham, "Hierarchical control of discrete event systems," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 241-273, Temmuz, 1996, doi: 10.1007/BF01797154.
- [7] K. Schmidt, J. Reger, T. Moor, "A hierarchical architecture for nonblocking control of decentralized discrete event systems," in *IEEE International Federation of Automatic Control Workshop Discrete Event Systems*, Reims, France, 2004.
- [8] K. Schmidt, T. Moor, S. Perk, "Hierarchical control for structural decentralized des," in *7th International Symposium on Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control*, Limasol, Kıbrıs, 2005.
- [9] X. Wang, T. Tang, S. Liu, "Study on modeling and verification of CBTC interlocking system," in *5th International Conference on Wireless Mobile and Multimedia Networks*, Beijing, Çin, 2013.
- [10] O. Kaymakci, V.G. Anik, I. Ustoglu, "A local modular supervisory controller for a real railway station," in *5th International Conference on System Safety*, Manchester, İngiltere, 2010.
- [11] A.E. Haxthausen, J. Peleska, "Formal development and verification of a distributed railway control system," *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 26, no. 8, pp. 687-701, Ağustos, 2000, doi: 10.1109/32.879808
- [12] L.H. Vu, A.E. Haxthausen, J. Peleska, "Formal modelling and verification of interlocking systems featuring sequential release," *Science of Computer Programming*, vol. 133, no. 2, pp. 91-115, Mayıs, 2017, doi: 10.1016/j.scico.2016.05.010
- [13] J. Qian, J. Liu, X. Chen, J. Sun, "Modeling and verification of zone controller: The SCADE experience in China's railway systems," in *International Workshop on Complex Faults and Failures in Large Software Systems*, Floransa, İtalya, 2015.
- [14] J. Farooq and J. Soler, "Radio communication for communications-based train control (CBTC): A Tutorial and Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1377-1402, Ocak, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2661384.
- [15] C. G. Cassandras, S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, USA: LLC/ Springer Science +Business Media, 2008
- [16] S.H. Lee, K.C. Wong "Structural decentralized control of concurrent discrete event systems," *European Journal of Control*, vol. 8, no. 5, pp. 477-491, Aralık, 2002, doi: 10.3166/ejc.8.477-491
- [17] H. Zhong, W.M. Wonham "On the consistency of hierarchical supervision in discrete event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 35, no. 10, pp. 1125-1134, Ekim, 1990, doi: 10.1109/9.58555

Özgeçmiş



Cem ATILGAN

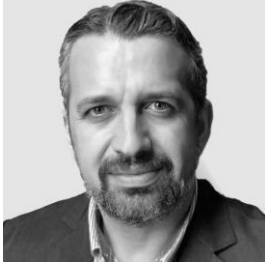
1989 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Erciyes Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır, doktora Yıldız Teknik Üniversitesinde devam etmektedir. Kırklareli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliğinde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları; ayırık olaylı sistemler, yapay zeka ve görüntü işleme konularıdır.

E-Posta: cematilgan@klu.edu.tr

**Özgür Turay KAYMAKÇI**

1976 tarihinde doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Hali hazırda Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Doçent olarak görev yapmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları; raylı sistemler ve sinyalizasyon, fonksiyonel güvenlik ve endüstriyel otomasyondur.

E-Posta: okaymakci@comu.edu.tr

**Tarık Veli MUMCU**

1980 tarihinde doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Hali hazırda İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesinde bulunan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Doktor Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları; bilgi sistemleri, haberleşme ve kontrol mühendisliğidir.

E-Posta: tarik.mumcu@iuc.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Cem ATILGAN: Literatür taraması, Analiz ve sistem modellemesi. Özgür Turay KAYMAKÇI: Fikrin oluşmasına, Analizlerin ve sonuçların kontrol edilmesi. Tarık Veli MUMCU: Sonucun kontrol edilmesi, Makalenin yazım ve içerik yönünden kontrol edilmesi.