

Üst Denetimli Kontrol Yöntemiyle Raylı Sistemlerde Anklaşman Tasarımı

Interlocking Design in Railway Systems by Supervisory Control Method

Emin Karaman^{1,2,a}, Mehmet Turan Söylemez^{1,b}

¹Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

²Ulaşım Sistemleri Sistem Mühendisliği Müdürlüğü
ASELSAN A.Ş., Ankara

^aeminkaraman@aselsan.com.tr

^bsoylemezm@itu.edu.tr

Özetçe

Demiryolu sinyalizasyon sistemleri, trenlerin emniyetle işletilmesi için birçok alt sistemden oluşan tümleşik bir yapıdır. Anklaşman, bu karmaşık yapının karar mekanizması konumunda bulunan emniyet-kritik bir sistemdir. Sinyaller, ray devreleri, makas motorları ve hemzemin geçitleri kapsayan hat boyu alt sistemi, anklaşman tarafından kontrol ve kumanda edilmektedir. Üst denetimli kontrol, çok sayıda alt sistemden oluşan, isterlerin mümkün olduğu mertebe yerine getirilerek, kontrol edilen sistemin davranışını sınırlandırmayı amaçlayan ayırık olay tabanlı bir yöntemdir. [1-3]. Bu çalışmada, anklaşman sisteminin üst denetimli kontrolle tasarlanması için hiyerarşik ve modüler bir mimari ve yeni bir Petri Ağı modeli önerilmektedir. Bu mimari ile tasarım değişiklikleri ve modifikasyonların anklaşman üzerindeki etkisinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Abstract

Railway signalling systems comprise many subsystems for safe train operation in an integrated structure. Interlocking ((IXL) is a safety-critical system, and the decision-maker of this complicated system. The trackside subsystem covering signals, track circuits, switches and level crossings is controlled and commanded by IXL. The supervisory control theory is a discrete event-based method and aims at limiting the behavior of the system while satisfying the requirements at the same time. In this paper, hierarchical and modular architecture and a new Petri Net model are introduced for the design of interlocking systems by supervisory control. The purpose of this research is minimize the impact of modification and design changes on interlocking.

1. Giriş

Sinyal sisteminin asıl amacı, emniyetli işletmeciliğin sağlanmasıdır. Bunun yanında, işletmeciliğin otomatik olarak yapılması, kontrolün insandan alınıp yüksek emniyet mertebesindeki hatada emniyetli bilgisayar tabanlı sisteme devredilmesi, hat kapasitesinin artırılması sistemin faydaları arasında ilk sıralarda yer almaktadır.

Geçmiş dönemlerde kullanılan sinyal sistemlerinin ağırlıklı olarak röle tabanlı olması ve yol boyu sinyali, makas motoru ve ray devresini kontrol eden rölelerin uyumsuz hareketlere donanımsal yapıları sayesinde izin vermemesinden dolayı, istenmeyen işletme koşulları ve çakışan güzergâh tanzimlerinin anklaşman tarafından fiziksel olarak önlenmesi mümkün olmuştur.

Bugün ise, sinyal sisteminin en hayati bileşeni olan anklaşman mimarisinin tamamen PLC (Programlanabilir Lojik Kontrolör) veya mikro işlemci kontrollü ve yazılım tabanlı hale gelmesi sebebiyle, tasarım, modelleme, test, doğrulama, geçiş ve devreye alma süreçlerinin önemi ve zorluğu daha da artmıştır.

Konvansiyonel, banliyö ve hızlı tren işletmeciliğini barındıran demiryolu hatları; istasyon topolojilerinin yeknesaklıktan uzak olması, ana hat sayısının değişkenliği, makasların sayısı, konum ve yönlerinin farklılığı, hat üzerinde işletilen tren tipleri ve karakteristiklerinin çok geniş ölçekli olması sebebiyle sistem mimarisinin tek tip olarak modellenmesini zorlaştırmaktadır.

Demiryolu anklaşman sistemleri; karmaşık ve çok değişkenli yapısı, model üzerine etkileyen bileşen ve parametre sayısının fazlalığı, yazılım ve donanım bazında sağlanması gereken standart, norm ve isterler ile hatada güvenli bir sistemdir.

Yol boyu sinyal sistemi bileşenlerinin tamamı anlaşılanın kontrolünde ve kumandasındadır. İşletmede olan sisteme yeni bir bileşen eklenmesi, anlaşmanın tasarımının zorunlu olarak modifiye edilmesini gerektirir.

Modifikasyon işleminin zaman, maliyet ve mühendislik bakımından minimum düzeyde sınırlandırılabilmesi anlaşmanın tasarım mimarisi ile doğrudan ilişkilidir.

Sinyalizasyon sisteminin çatısı altında yer alan ve çok bileşenli bu yapının en önemli ve karar mekanizması konumunda bulunan anlaşmanın sisteminin modüler yapıda tasarımı, anlaşmanın etkileyen bir tasarım değişikliğinde ihtiyaç duyulan revizelerin kısa sürede yapılabilmesine olanak sağlayabilecektir.

Bu amaca ulaşabilmek için, üst denetimli kontrol yaklaşımı ve hiyerarşik mimari, bu çalışmada sabit blok anlaşmanın sistemleri modellenmesinde ve tasarımında kullanılmıştır.

İlk olarak P.J. Ramadge & W.M. Wonham (1987) tarafından geliştirilen ve “Ayrık olay sürecinin üst denetimli kontrolü” başlıklı makalede ele alınan üst denetimli kontrol yaklaşımında, kontrol edilebilir ayrık olay sistemlerin basit ve soyut yapıda modellenmesi üzerine çalışılmış ve kontrol probleminin nitelik bakımından yapısal özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu karakteristikteki sistemlerin öne çıkan özellikleri ayrık, asenkron ve deterministik olmayan olarak tanımlanmıştır [1].

Üst denetimli kontrol ve sinyal sistemleri alanında yapılan araştırma ve çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Gua ve Seatzu “Demiryolu şebekesinin Petri ağlarıyla üst denetimli kontrolü”, 2001 ve “Demiryolu şebekesinin Petri ağlarıyla modellenmesi ve üst denetimli kontrolü”, 2008, çalışmalarında emniyet ve canlılık (liveness) kriterlerini sağlayan sistem kontrolörlerini otomatik olarak tasarlayabilmek için üst denetimli kontrol yaklaşımı ve Petri ağlarını kullanmışlardır [4,5].

Durmuş, Akın ve Söylemez 2010 yılında yayınladıkları “Demiryolu sahasının sinyalizasyon ve anlaşmanın tasarımı için önleyici yaylar ile üst denetimli kontrol yaklaşımı” çalışmalarında, demiryolu bileşenlerini Petri ağları ile modelleyerek erişilebilirlik grafları ile denetleyicileri atamışlardır [6].

Önleyici yayları içeren üst denetimli kontrol şeması, Petri ağları, denetleyiciler ve denetleyicileri kontrol edilemeyen modele bağlayan önleyici yaylardan oluşmaktadır.

Raylı sistemler sinyalizasyonu kategorisinde yer alan CBTC (Haberleşme Tabanlı Tren Kontrolü) sistemleri üzerine Atılğan ve Kaymakçı tarafından 2018 yılında “CBTC'nin modellenmesi ve hiyerarşik kontrolü” çalışması yayınlanmıştır [7].

“Gerçek demiryolu istasyonu için lokal modüler üst denetimli kontrolör”, 2010, çalışmalarında Kaymakçı, Anık ve Üstoğlu, ayrık olay sistem tabanlı lokal modüler kontrolör mimarisi ile anlaşmanın sistemlerinin tasarımını gerçekleştirmiştir [8].

“Otomasyon Petri ağları ile demiryolu sinyalizasyonu ve anlaşmanın tasarımı” konusunda 2009 yayın tarihli

makalelerinde Durmuş ve Söylemez, Petri ağlarını genişleterek demiryolu sahası için yaptıkları çalışmada modelin programlanabilir lojik kontrolörler üzerinde uygulanabilir olduğunu ve böylelikle hatanın tespiti ve takibi ile model üzerinde istenen modifikasyonların kolaylıkla yapılabilir olduğunu göstermişlerdir [9].

Durmuş, Yıldırım ve Söylemez, “ERTMS/ETCS için anlaşmanın sistem tasarımı: batches Petri ağları yaklaşımı” çalışmalarında, hareketli blok tek hat sinyal sistemini, hibrit tasarım tekniği kullanarak ayrık ve sürekli işletme koşulları için batch Petri ağları ile modellemişlerdir [10].

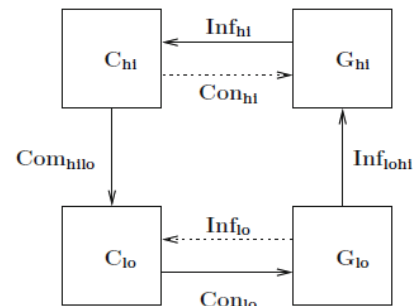
Önerilen mimari model kullanılarak yapılan örnek çalışma ile hedeflenen çıktılar aşağıda belirtilmiştir.

- Modüler yapının sağlanması,
- Uygulamada kolaylık ve esneklik sağlanması,
- Matematiksel iş yükünün azalması,
- Maksimallik prensibinin sağlanması
- Sistemin tıkanmaya gitmesinin önlenmesi
- Anlaşmanın sisteminin test, doğrulama, geçirme süreçlerinin kısılması,
- Modifikasyonların sadece ayrıştırılan alt sistemlerde yapılması

2. Üst Denetimli Kontrol

Üst denetimli kontrol (supervisory control) yaklaşımı, geniş ölçekli ve karmaşık yapı sistemlerin alt sistemlere ayrılarak tasarım ve uygulama adımlarının kolaylaşmasını sağlamaktadır.

İlk olarak Ramadge&Wonham [1-3] tarafından geliştirilen ve literatüre kazandırılan üst denetimli kontrol ile büyük ölçekli ve çok bileşenden oluşan sistemlerin tasarım ve modelleme sürecinde, üstel artış eğilimindeki matematiksel hesaplama yükü azaltılmaktadır.



Şekil 1: Hiyerarşik Kontrol Mimarisi [11].

Üst denetimli kontrol esaslı birden fazla metot olup, bunlardan bazıları hiyerarşik kontrol, denetleyici konumlandırma ve durum ağacı yapısı olarak sıralanabilir. Bu uygulamaların dağıtık (decentralized) yapıdaki varyasyonları da mevcut bulunmaktadır. Bu sayede karmaşık topolojideki sistemlerin alt bileşenlere ayrıştırılması ve sistemin daha kolay biçimde modellenmesi mümkün olmaktadır.

Üst denetimli kontrol ile bir yandan, sistemin durum uzayı, merkeze bazında aşağı seviyeye indirgenmekte ve böylece, olası hareket ve eylem sayısı azaltıldığından hesaplama adımları ve işlemler daha basit bir hale gelmektedir. Diğer taraftan, matematiksel iş yükü azaltılırken sistemin tıkanmadan (nonblocking) modellenmesi gerekmektedir.

2.1. Ayrık Olay Sistemler

Beş değişkenden oluşan bir ayrık olay sistemin matematiksel eşitliği ve her bir değişkenin sembol ve anlamı aşağıdaki denklemde tariflenmektedir [11-12].

$$G = (\Sigma, Q, \delta, q_0, Q_m) \quad (1)$$

Σ : Sonlu olaylar kümesi

Q : Durumlar kümesi

$\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$: geçiş fonksiyonu

q_0 : başlangıç durumu

$Q_m \subseteq Q$: Sistemde mevcut olan ve geçiş yapılan (işaretçi) durumların altkütmesi

2.2. Kontrol edilebilir ve Kontrol edilemeyen Olaylar

Sonlu olaylar kümesi, demiryolu sabit blok sinyal sisteminde, yol boyu sinyalleri, makas motorları, ray devreleri, hemzemin geçitler ve rota kurulumu için sırasıyla $\Sigma_s, \Sigma_p, \Sigma_t, \Sigma_{lx}, \Sigma_r$ sembolleriyle gösterildiğinde sistemdeki olayların tamamı Σ_{sis} altında birleştirilmiştir. Aşağıda verilen denklem, bu ifadenin matematiksel karşılığını göstermektedir.

$$(\Sigma_s \cup \Sigma_p \cup \Sigma_t \cup \Sigma_{lx} \cup \Sigma_r) \subseteq \Sigma_{sis} \quad (2)$$

Genel bir kabul ve kural olarak, denetleyiciler sadece kontrol edilebilir olaylar üzerinde etkin olacağından, bir olayın

$$\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc} \quad (3)$$

eşitliğini sağlayacak biçimde, sistemdeki tüm kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen olayların ayırt edilmesi ve mimari yapıda tanımlanması gerekmektedir.

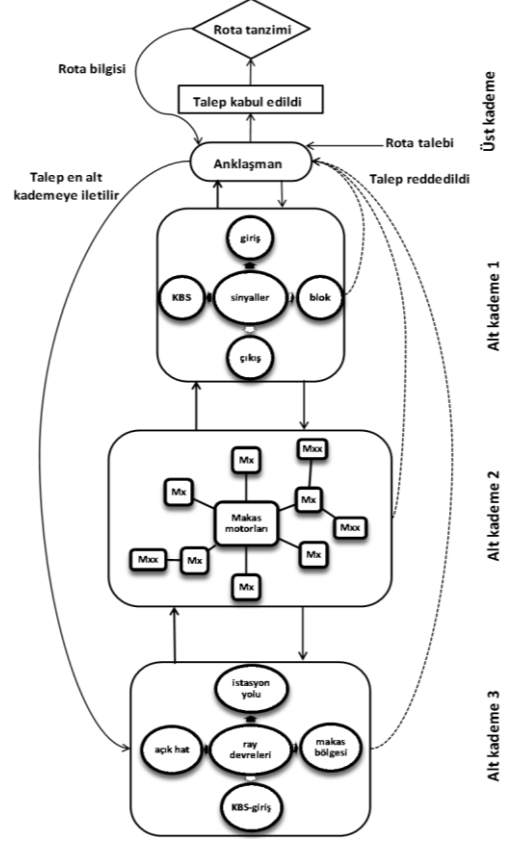
3. Anlaşman Kontrol Mimarisi

Üst denetimli kontrolün bir yöntemi olan hiyerarşik yapı, sabit blok demiryolu hat kesimi için alt kademelere ayrılan anlaşman sistemine uygulanmıştır.

Sabit blok anlaşman sistemleri modellemesi ve tasarımı için önerilen hiyerarşik temeline dayanan kontrol yöntemi mimarisi Şekil-2'de yer almaktadır.

Bu mimaride, ray devreleri, makas motorları ve sinyalleri merkeze olarak sırasıyla en alttan en üste doğru yer almaktadır.

Rota tanzim talebi için gerekli şartlar, en alt kademedeki başlanarak sırasıyla değerlendirilmekte ve istenilen sağlanırsa talep daha üst kademelere doğru ilerlemektedir.



Şekil 2: Anlaşman sisteminin hiyerarşik kontrol mimarisi.

3.1. Petri Ağ Modeli

Petri Ağları, yapılandırılabilir ve esnek yapı yaklaşımıyla modellenmiştir. Model, Petri Ağ yapısında bir jetonun ateşlenme ve hedefe varış sürecinde izlediği yolda koşullu olarak ilerlemesine ve mertebeler arası geçiş esasına dayanmaktadır.

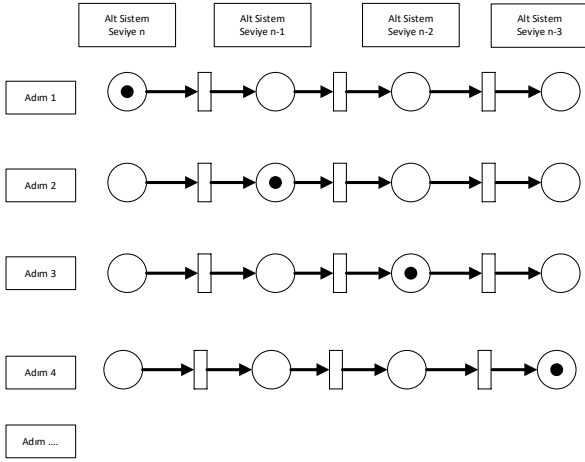
Kontrol edilemeyen ancak gözlenebilir olay kümesinde yer alan durumlar, önerilen modelde ilk olarak denetlenecek sonrasında diğer adımlara ilerlenecektir.

Amaç, jetonun akışını engelleyen bir başlangıç koşulu ile karşılaşılması halinde, daha önce eyleyici hareketi ile harcanan süre ve enerjinin önlenmesi ve hat kesiminin olabildiğince yüksek kapasitede kullanımına imkân sağlanmasıdır.

Görsel olarak akış diyagramı verilen anlaşman sisteminin, Petri ağları ile kontrolü için kullanılması planlanan mimari, sıralı adım olarak nitelendirilebilecek modele karşılık gelmektedir.

- Yer
- Yay
- Geçiş
- Jeton

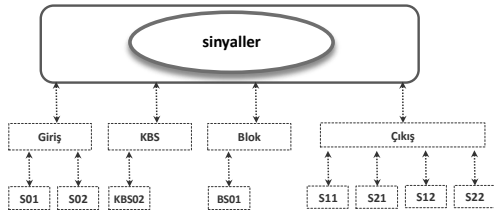
bileşenlerinden oluşan Petri Ağları ile önerilen mimariye göre alt sistemlerin birbirlerine ardışık olarak veri aktarımını nasıl yaptıkları aşağıda verilen akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 3: Hiyerarşik katmanlı sinyal sisteminin önerilen Petri Ağ Modeli

Modelde her bir yer, bir alt sisteme karşılık düşmekte ve en düşük mertebedeki sistem, “gereksinimlerin yerine getirilmesi halinde” jetonu bir üst mertebedeki alt sisteme iletmektedir. Bu süreç, en üst mertebedeki alt sisteme jeton ulaşmaya kadar devam etmekte ve şartlar yerine getirildiyse anlaşılan tarafından rota kurulmaktadır.

Alt sistemler, bileşen olarak da ayrıştırılmış ve karmaşık yapının olabildiğince basit bir yapıya indirgenmesi ve en alt katman olarak bileşen bazında bir model elde edilmesi hedeflenmiştir. Şekil-4 yol boyu sinyalleri alt sisteminin bileşen bazında türlerine ayrılmasını göstermektedir.



Şekil 4: Yol boyu alt sistemlerinin bileşenlerine ayrılması

Önerilen modelde kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen (gözlenebilir) olayların bir arada bulunması sebebiyle, anılan türden olayları içeren alt sistemler için farklı yapıda Petri ağları modeli tanımlanmıştır.

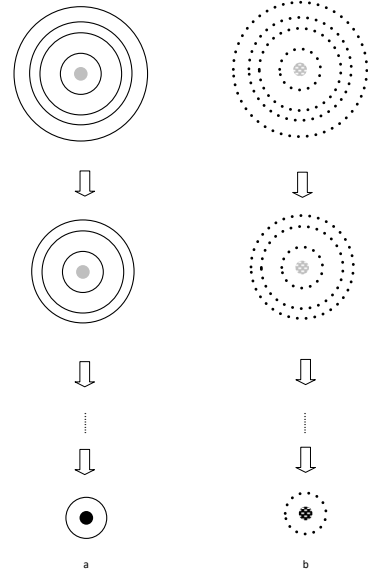
Kontrol edilebilir olaylardan oluşan alt sistem için bilinen ve yukarıda tariflenen geleneksel Petri Ağ modeli kullanılmıştır.

- Makas motoru, sinyalizasyon sistemi içinde eyleyiciye sahip olan ve kumanda edilebilir bir bileşen olduğundan, normal ya da sapan konumlara tanzimi ve durumlar arası geçişi sağlayan olaylar kontrol edilebilir olay kümesindedir.

Kontrol edilemeyen (gözlenebilir) olayları kapsayan alt sistemler için, alışlagelen Petri Ağ modelinden farklı olarak yer-yay-geçiş bileşenlerinin yerine “denetim” esaslı veri akışı ve işlenmesi yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu yaklaşımda da veri bir döngü boyunca “jeton” gibi ileriye doğru hareket etmektedir, ancak yaylar, ağırlıklar ve yerler yerini, verinin uçtan uca dolaşması ve çıkışa ulaştığında alt sistemdeki bilginin bütün olarak bir üst sisteme jetonun gönderilmesine bırakmıştır.

- Ray devreleri, sinyalizasyon sistemi içinde eyleyiciye sahip olmayan ve kumanda edilebilir bir bileşen olmadığından, meşgul ya da serbest durumlar arası geçişi sağlayan olaylar kontrol edilemeyen olay kümesindedir.



Şekil 5: Çoklu yer tabanlı Petri Ağ modeli

Görselde iç içe geçmiş olarak gösterilen her bir yer, bulunduğu alt sistemin bir alt kümesi ve aynı zamanda bileşendir. Modelin esası, tek yer kalana kadar, dıştan içe doğru kabukların kırılması (yerler arası geçişin sağlanması) ve aday jetonun, jeton statüsüne geçmesiyle iki ayrı alt sistem arasında geçiş yapmasına dayanmaktadır.

Düz çizgi, kontrol edilebilir olaylardan oluşan bir alt sistemi gösterirken, kesikli çizgi ait olduğu alt sistemin kontrol edilemeyen ancak gözlenebilir olayları içerdiğini göstermektedir.

Başlangıç yerindeki jeton, ilk durumda aday statüsünde olup diğer alt sisteme geçebildiğinde asıl jeton statüsüne geçmektedir. Bir üst mertebeye sistemde ilerlediğinde ise tekrar aday jeton olarak modelde yer almakta ancak mertebeye bir derece kazanmaktadır.

Önerilen üst denetimli kontrol ve Petri Ağ modelinde, geleneksel yaklaşımın aksine, sistem bileşenleri kendi alt sistemlerinde kümelenmektedir ve güzergâh üzerindeki saha ekipmanları Petri Ağ modelinde ray devresi-makas motoru-sinyal biçiminde ardışıl olarak sıralanmamaktadır.

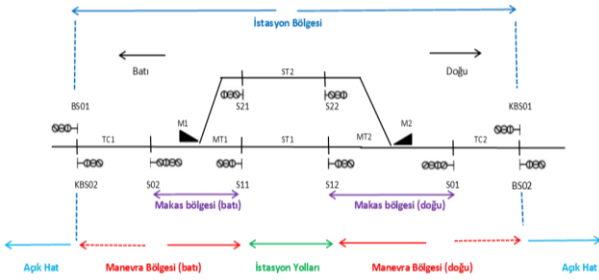
Kontrol edilemeyen ya da sadece gözlenebilir bir olayı Petri Ağında iki yer arası bir geçiş olarak modellemek yerine veri okuma ve işleme süreci tek bir yer olarak modellenerek alt sistemin istenen durumları sağlanması halinde jetonun

ateşlenerek bir üst mertebeye hareket etmesi mümkün kılınmaktadır.

Kontrol edilebilir olaylar ise alışlagelmiş Petri Ağında iki yer (durum) arası bir geçiş olarak tanımlanmaktadır.

3.2. Demiryolu Uygulama Örneği

Önceki bölümlerde açıklanan anlaşılan kontrol mimarisi ve önerilen Petri Ağ modeli, basit bir demiryolu istasyonuna uygulanmıştır.



Şekil 6: İstasyon şematik planı

Şekil 6'da örnek olarak alınan iki yöllü basit bir istasyon, alt sistemlerin bileşenlerine indirgenebilmesi amacıyla kesimlere ayrılmıştır.

Uygulama örneğinde, KBS02 sinyali önünde hazır bulunan ve doğu yönünde ilerleyen bir tren için istasyon tali yolu S22 sinyalinde sonlanan bir rota talebi model üzerinde anlatılmaktadır. Tablo-1 bu güzergâh kurulumu için gerek şartları belirtmektedir.

Tablo 1: Anlaşılan tablosu

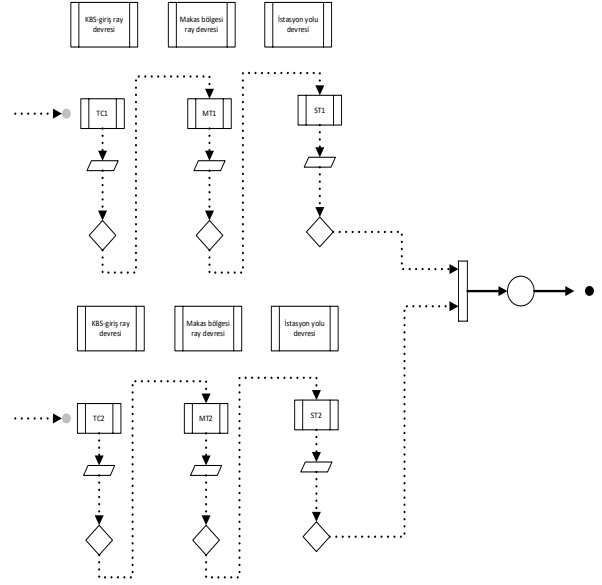
| Güzergâh | | |
|------------------|---------------|--------------|
| BTC1-TC1-MT1-ST2 | | |
| Sinyaller | Ray Devreleri | Makas konumu |
| KBS02:S | TC1:Se | M1: Sapan |
| BS01:K | MT1:Se | M2:Normal |
| S02:SS | ST1: | |
| S11:K | ST2:Se | |
| S21:K | MT2:Se | |
| S12:K | | |
| S22:K | | |
| S01:K | | |

Y: Yeşil S:Sarı K:Kırmızı SY: Sarı üzeri Yeşil SS:Sarı üzeri Sarı Se:Serbest

Rota tanzim koşulu için ray devreleri verilerinin sıralı olarak denetlenmesi Şekil-6 da görsel olarak verilmiştir.

Ray devreleri alt sisteminde yapılan sınıflandırmaya uygun olarak, önce KBS-giriş kesimi, takiben makas bölgesi ve son olarak istasyon yolu ray devrelerinin sıralı olarak denetimi yapılmaktadır. Modelde, aynı anda ateşlenen iki jeton kullanılmakta ve

her biri istasyonun her iki yönündeki denetimleri sağlamaktadır.



Şekil 6. Ray devrelerinin hiyerarşik denetim modeli

Her bir alt sistem için tanımlanan örnek durumlar aşağıda sıralanmaktadır.

Ray devreleri için durumlar

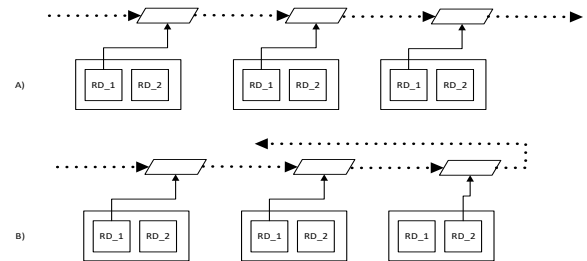
- Serbest : RD_1
- Meşgul : RD_2

Makas motorları için durumlar

- Makas normal konumda ve mutabakat var: MM_1
- Makas sapan konumda ve mutabakat var: MM_2
- Makasta güzergâh bloke var: MM_3

Yol boyu sinyalleri için durumlar

- Sinyal bildirimini açık: YS_1
- Sinyal renk bildirimini yeşil: YS_11
- Sinyal renk bildirimini sarı: YS_12
- Sinyal renk bildirimini sarı üzeri yeşil: YS_13
- Sinyal renk bildirimini sarı üzeri sarı: YS_14
- Sinyal bildirimini kapalı: YS_2
- Sinyal renk bildirimini kırmızı: YS_21



Şekil 7: Ray devreleri alt sistemi için veri akış adımları

Ray devrelerinin durum bilgisini bir sonraki bileşene iletmeleri yukarıda gösterilmektedir.

Şekil 7'de A kısmında rota açılması için gereken durum bilgileri alındığından veri akışı devam etmektedir. B kısmında ise gerek koşul sağlanmadığından veri akışı sonlanmaktadır.

Benzer yapı, yol boyu sinyalleri için de tanımlıdır ve her bir rota tanziminde yer alan sinyallerinin bilgileri alınmaktadır. Makas motorları için ise bilinen Petri Ağ yapısı kullanılmaktadır.

Önerilen modelde, farklı alt sistemlerde bulunan bileşenlerin geçişleri kendi mertebeleri içinde sınırlandırılmıştır. Ray devresi, makas motoru ve sinyal bileşenleri arasında, standart Petri Ağ yapısından farklı olarak yer geçişi bulunmamaktadır. Geçişler, alt kademeler arasında yapılabilmektedir.

Bu model ile aralarında doğrudan etkileşim bulunmayan farklı alt sistemlerdeki bileşenlerde yapılacak değişikliklerin sisteme etkisinin azaltılması modüler yapı sayesinde mümkün olmaktadır.

Rota talebinin üst denetimli kontrol mimarisi ve önerilen Petri Ağ modelinde nasıl değerlendirildiği yukarıda yerleşim planı verilen hat kesimi için, KBS02 sinyalinden başlayan ve S22 sinyalinde sonlanan BTC1-TC1-MT1-ST2 güzergâhı için örneklenmektedir.

Bu rotanın KBS02-S22 kısmı için, 2 makas motoru, 4 ray devresi ve 8 sinyal durum kontrolü yapılmaktadır ve gereken bütün koşulların sağlanması halinde rota kurulabilmektedir.

Bu temelde yapılan örnek güzergâh tanziminde, alt sistem bileşenleri olan ray devreleri, makas motorları ve yol boyu sinyallerinin sadece tanımlanan üst durumları modelde işlenmektedir.

Bu yaklaşımda, aynı anda demiryolu hattının farklı kesimlerinde çok fazla güzergâh tanzim talebi alan anlaşılan, sinyal sistemindeki tüm ekipmanların durum bilgisini her zaman ve en detaylı (en alt mertebeden) biçimde almamaktadır. Alt sistem bileşenlerinin durum bilgileri gereken zamanda ve yeter seviyede aktarılmaktadır.

Üst denetimli kontrolün hiyerarşik mimarisi ve önerilen Petri Ağ modeli ile sinyal sisteminin alt sistem ve bir adım sonrasında bileşenlerine kadar ayrıştırılması, anlaşılma yalın ve yeter seviyede bilgilerin iletilmesi hedeflenmektedir.

4. Sonuçlar

Üst denetimli kontrol ve hiyerarşik mimarinin önerilen Petri Ağ modelinde gerçek bir demiryolu istasyonuna uygulandığı bu çalışmada, modüler yapının sağlanabilmesi için alt sistemler de her bir alt sistem bazında daha alt kademelere ayrıştırılmış, böylece sinyal sisteminde yapılacak bir değişikliğin etkisinin minimal mertebeye indirilmesi amaçlanmıştır.

Alt sistemler ve bileşenler sadece kendi sistemleri ile sınırlandırılmış, zorunlu değişikliklerin her bir alt kademede bileşen bazında yapılmasının yeterli olacağı bir model önerilmiştir.

Bu mimaride tasarlanan bir sinyal sisteminde, eklenecek ya da çıkarılacak bileşenin etkisi, kendi alt sistemi içinde minimize edildiğinden, karmaşıklıktan uzak biçimde modifikasyonlar yapılabilmektedir.

Bunların yanında, sistemde tanımlanmayan bir durum olmaması sebebiyle sistemin tıkanma durumuna gitmesi önlenmekte ve mümkün olan bütün güzergâhların tanımlanmasıyla maksimallik prensibi de sağlanmaktadır.

Kaynakça

- [1] P.J. Ramadge ve W.M. Wonham, "Supervisory control of a class of discrete event systems," *SIAM Journal Control and Optimization*, 25: p. 206-230, 1987.
- [2] P.J. Ramadge ve W.M. Wonham, "Supervision of discrete event processes" *Proc. 21st IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1228-1229, Dec.1982.
- [3] P.J. Ramadge ve W.M. Wonham, *Supervisory control of discrete event processes, in Feedback Control of Linear and Nonlinear Systems, Lecture Notes in Control and Information Sciences 39, Springer-Verlag, New York, pp. 202-214, 1982.*
- [4] A.Giua ve C. Seatzu, "Supervisory control of railway networks with petri nets" *Proc. of the 40th IEEE Conf.on Decision and Control*, vol. 5, pp. 5004-5009, 2001.
- [5] A.Giua ve C. Seatzu, "Modeling and supervisory control of railway networks using petri nets" *IEEE Trans. Trans. On Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 431-445, July 2008.
- [6] M.S. Durmuş, K. Akın ve M.T. Söylemez, "Supervisory control approach by inhibitor arcs for signalization and interlocking design of a railway yard", *Int. Symp. on Innovations in Intelligent Systems and App.-INISTA'10, Kayseri&Cappadocia, Turkey*, pp. 12-16, 2010.
- [7] C. Atılğan ve Ö.T. Kaymakçı, "Modelling and hierarchical control of CBTC" *6th Int. Conference on Control Eng. & Info. Tech. (CEIT)*, pp. 1-6, Oct.2018.
- [8] O. Kaymakci, V.G. Anik ve I.Ustoglu, "A local modular supervisory controller for a real railway station", *5th IET Int. Conference on System Safety*, pp.1-6, Oct.2010.
- [9] M.S. Durmuş ve M.T. Söylemez, "Railway signalization and interlocking design via automation petri nets", *Proc. of 7th Asian Control Conference, Hong-Kong, China*, pp. 1558-1563, 2009.
- [10] M.S. Durmuş, U. Yıldırım ve M.T. Söylemez, "Interlocking system design for ERTMS/ETCS:an approach with batches petri nets", *IFAC Proceedings*, vol. 45, no. 29, pp. 110-115, 2012.
- [11] W.M.Wonham ve K. Cai, *Supervisory control of discrete-event systems, Communications and Control Engineering, Springer, 2019.*
- [12] M.S. Durmuş, K. Akın ve M.T. Söylemez, "Supervisory control approach by inhibitor arcs for signalization and interlocking design of a railway yard", *Int. Symp. on Innovations in Intelligent Systems and App.-INISTA'10, Kayseri&Cappadocia, Turkey*, pp. 12-16, 2010.