



## Raylı Sistemlerde Bir Sanal Kuplaj Uygulaması

Muhammed Mustafa KAYA\*<sup>1</sup> , Mehmet Turan SÖYLEMEZ\*<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*kayam21@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 13.08.2024, Kabul/Accepted: 01.10.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

**Öz:** Son yıllarda büyük şehirlerde artan nüfus ile trafik yoğunluğu artmaktadır. Trafik sorunu şehir içi ulaşımı kolaylaştıran raylı sisteme talebi artırmaktadır. Mevcut demiryolu hatları artan bu talebi karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu yüzden yeni raylı sistem hatlarına ihtiyaç vardır. Fakat bu yeni hatlar yüksek yapım maliyetinden dolayı çok uygun değildir. Şehirlerde kullanılan mevcut hatlar genelde Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) sinyalizasyon sistemi altında sabit blok veya hareketli blok prensibi kullanılmaktadır. Bu kontrol sistemini geliştirmek ve hat kapasitesini daha fazla arttırmak için yeni sinyalizasyon prensiplerine ihtiyaç vardır. Sanal Kuplaj, 2 veya daha fazla treni fiziksel bağlantı olmadan sanal olarak bağlar veya ayırır. Bu prensibin hattın kapasitesini arttırdığını gösteren çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada, literatürdeki sanal kuplaj çalışmalarından farklı olarak, Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolü kullanılarak bir sanal kuplaj çalışması gerçekleştirilmiştir. Araçtan araca (V2V) iletişim yoluyla yapılan kontrolde sanal kuplaj senaryoları için simülasyonlar yapılmıştır. Lider ve takipçi tren topolojisi ile tasarlanan senaryoların simülasyon sonuçlarına bakıldığında sanal kuplajın trenler arası mesafeyi kısalttığı görülmüştür. Ayrıca, önerilen kontrolör lider ve takipçi trenlerin hızlarını eşitlemiştir. İlk senaryoda trenler istenilen mesafe değerine 60 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. İkinci senaryoda takipçi trenin başlangıçta olduğu gibi yine istenilen pozisyona ve hıza 50 saniye civarında ulaştığı görülmektedir. Son senaryoda ise iki tren arasındaki mesafe istenilen değere 180 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sanal Kuplaj, Raylı Sistem, Sinyalizasyon, Hat Kapasitesi, CBTC, PID

### A Virtual Coupling Application in Railway Systems

**Abstract:** In recent years, the traffic density has increased with the increasing population in big cities. The traffic problem increases the demand for the rail system that facilitates urban transportation. Existing railway lines may be insufficient to meet this increasing demand. Therefore, new rail system lines are needed. However, these new lines are not very suitable due to their high construction costs. Existing lines used in cities generally use the fixed block or moving block principle under the Communication Based Train Control (CBTC) signaling system. New signaling principles are needed to improve this control system and further increase the line capacity. Virtual Coupling connects or separates 2 or more trains virtually without a physical connection. There are studies showing that this principle increases the capacity of the line. In this study, unlike the virtual coupling studies in the literature, a virtual coupling study was carried out using Proportional-Integral-Derivative (PID) control. Simulations were made for virtual coupling scenarios in the control made via vehicle-to-vehicle (V2V) communication. When the simulation results of the scenarios designed with the leader and follower train topology are examined, it is seen that virtual coupling shortens the distance between trains. Moreover, the proposed controller has equalized the speeds of the leader and follower trains. In the first scenario, the trains reached the desired distance value around 60 seconds and the speeds were equalized. In the second scenario, the follower train is seen to reach the desired position and speed again around 50 seconds as it was at the beginning. In the last scenario, the distance between the two trains reached the desired value around 180 seconds and the speeds were equalized.

**Keywords:** Virtual coupling, Railway system, Signaling, Line capacity, CBTC, PID

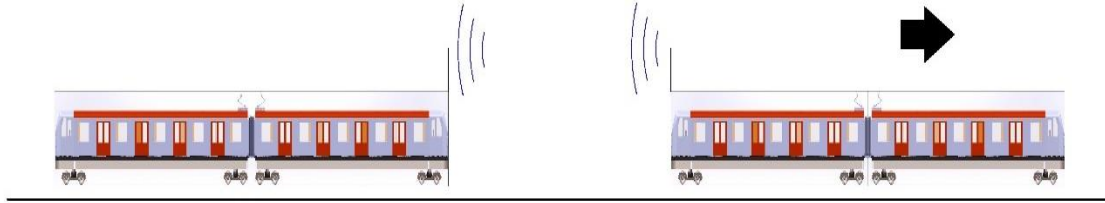
Atıf için/Cite as: M.M. Kaya, M.T. Söylemez, "Raylı sistemlerde bir sanal kuplaj uygulaması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 27-38, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1532577

## 1. Giriş

Büyük şehirlerde son yıllarda nüfus artmaktadır. Artan nüfus şehir içinde bazı sorunlar oluşturmaktadır. Bu sorunların başında trafik gelmektedir. Artan trafik ile ulaşım sorunu, çevre kirliliği ve gürültü kirliliği gibi sorunlar oluşmaktadır. Bu sorunlardan dolayı trafik problemi farklı ulaşım yöntemlerine ilgiyi arttırmıştır. Raylı sistemler trafik sorununu azaltan uygun bir yöntemdir. Fakat mevcut olan demiryolu hatları artan talebi karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Mevcut raylı sistem hatları dışında yeni hatlar inşa etmek yüksek maliyetlidir. Bu yüzden mevcut hatların hat kapasitesini arttırmak daha ekonomik bir çözüm olacaktır.

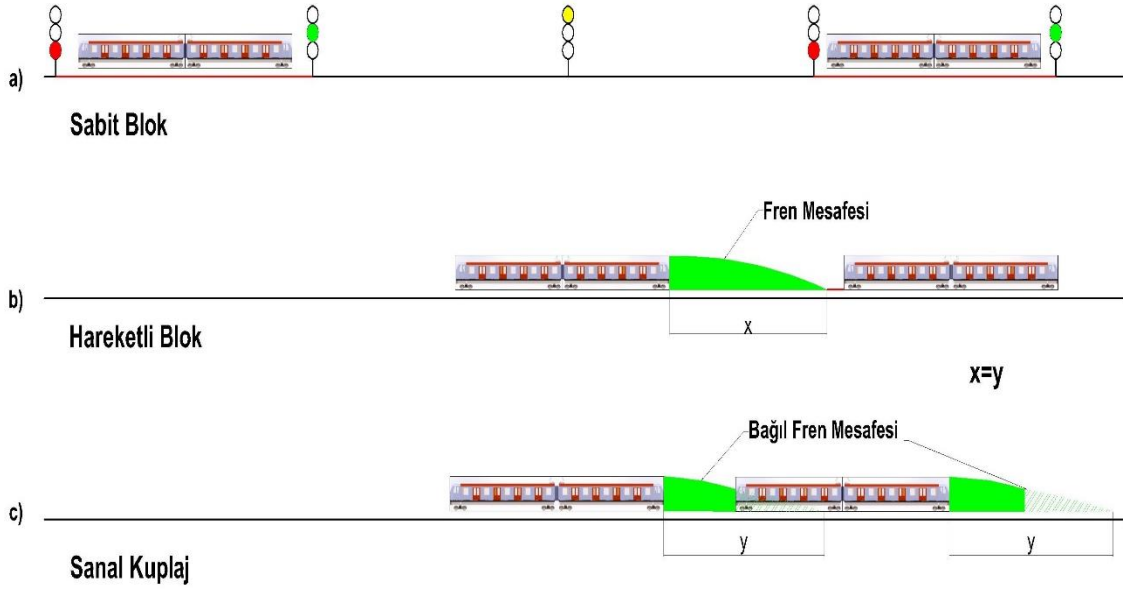
Günümüzde kent içi raylı sistemlerinde genellikle Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) sinyalizasyon sistemi kullanılmaktadır [1]. Bu kontrol sistemi sabit blok ve hareketli blok prensiplerine göre çalışmaktadır. CBTC sistemi altında kullanılan diğer sistemler mevcuttur. Bunlar Otomatik Tren Koruma (ATP), Otomatik Tren İşletimi (ATO), Otomatik Tren Kontrol (ATC) ve Otomatik Tren Denetleme (ATS)'dir.

Artan nüfus sebebiyle mevcut hatların kapasitesini arttırmak için mevcut sinyalizasyon sistemlerini geliştirmeye ihtiyaç vardır. Avrupa Ufuk 2020 kapsamında Shift2Rail Ortak Girişiminde geliştirilmesi gereken konulardan olan Sanal Kuplaj prensibi şehir içinde artan nüfus talebini karşılayacak bir prensiptir [2]. Sanal Kuplaj 2 veya daha fazla treni kendi arasında fiziksel bir bağlantı olmadan bağlar veya ayırır. Bu yeni prensip ile öndeki yani lider tren arkadaki yani takipçi trene anlık olarak konum, hız ve ivme bilgilerini iletir. Takipçi trende bu bilgiler ile hızını ayarlayarak öndeki trene yaklaşır. Böylece trenler arası mesafe ve süre (headway) daha kısalmır. Mevcut demiryolu hattında daha fazla tren işletilebilir. Böylelikle mevcut demiryolu hat kapasitesi iyileşmiş olur. Şekil 1'de sanal kuplajın haberleşme gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 1. Sanal kuplaj haberleşme gösterimi

Demiryollarındaki hat kapasitesi problemi için sanal kuplaja yönelik literatürde farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler ve sonuçlarından bazıları aşağıdaki metinde bahsedilmektedir. Bu çalışmada literatürde bulunan sanal kuplaj çalışmalarından farklı olarak PID denetleyicisi ile sanal kuplaj çalışması yapılacaktır. Matlab ortamında yapılan simülasyon çalışmalarında farklı senaryolarda 2 trenin durumları incelenmiştir. Şekil 2'de kullanılmakta olan sinyalizasyon sistem prensipleri ve sanal kuplaj prensip gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2. Sinyalizasyon sistem prensipleri gösterimi a) Sabit blok prensibi b) Hareketli blok prensibi c) Sanal kuplaj prensibi

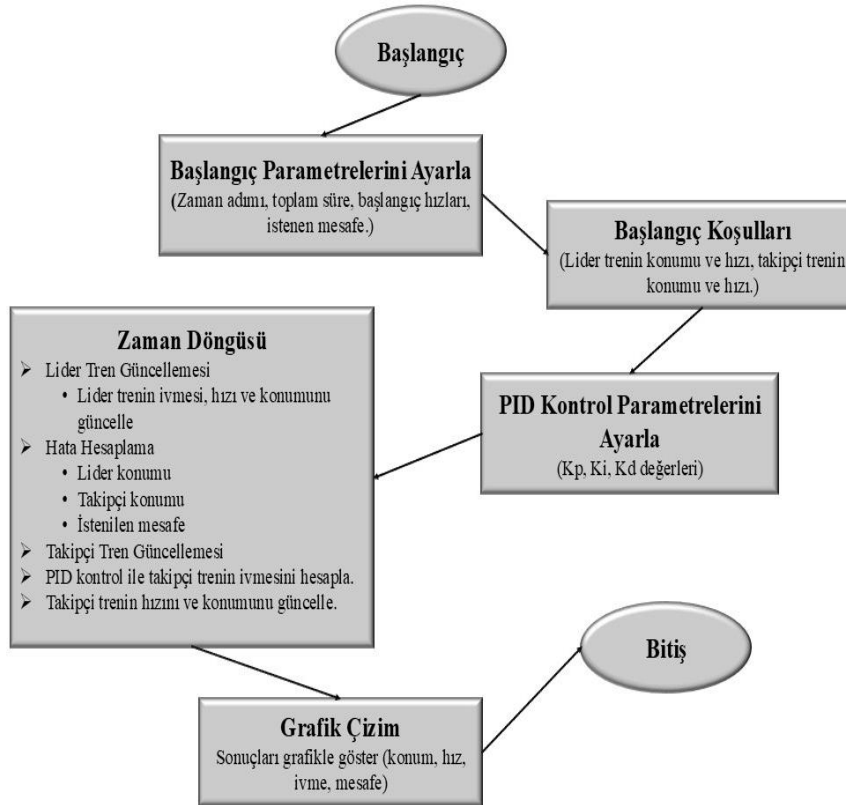
Sanal kuplaj prensibi üzerine yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıdaki paragrafta detaylandırılmaktadır.

Göreceli Mesafe Frenleme Modu (GMFM) ve Mutlak Mesafeli Frenleme Modu (AMFM) karşılaştırıldığında, GMFM tabanlı yaklaşımın daha verimli olduğu ve hat kapasitesini yaklaşık %70,23 oranında artırdığı tespit edilmiştir [3]. Bir diğer çalışmada, yüksek hızlı trenler, ana hat trenleri, bölgesel trenler, kentsel trenler ve yük trenleri üzerinde yapılan incelemelerde, sanal kuplajın hareketli blok sistemine göre daha yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir [4]. Tren Koruma Uyarı Sistemi (TPWS), ETCS 2 ve ETCS 3 ile Araçtan Araca (V2V) iletişim mimarisi olan sanal kuplajın gerçek hat üzerindeki bir simülasyon çalışmasında, trenler arası mesafenin sırasıyla %79, %77 ve %43 oranında azaldığı bulunmuştur [5]. Bir diğer çalışmada, metro hattında merkezi olmayan bir Model Kestirimli Kontrol (MPC) yöntemi ile sanal kuplaj kullanılarak yapılan simülasyon, hareketli blok ve diğer kontrol yaklaşımlarına kıyasla trenler arasındaki mesafeyi önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir [6]. Bir diğer çalışmada, sanal kuplajın metro hatlarında otomatik tren kontrolü için merkezi olmayan bir model tahminli kontrol sistemi tasarlanmış ve iki farklı senaryoda trenlerin istenen duruma kendilerini otomatik olarak ayarladığı gözlemlenmiştir [7]. Çin'deki gerçek bir hat verileri kullanılarak yapılan bir çalışmada simüle edilen trenlerin sanal kuplaj kullanarak hat kapasitesini artırdığı ve artan tren sayısı sayesinde yolcu konfor oranının da yükseldiği belirtilmiştir [8]. Çin'de yapılan bir başka çalışmada bir metro treninde ATC, ATP ve ATO sistemlerinden yararlanılarak sanal kuplaj yönteminin kullanıldığı ve bu sayede istasyonda gereksiz bekleme süresinin %90,7 oranında azaldığı ve hat kapasitesinin %4,9 oranında arttığı tespit edilmiştir [9]. Sanal kuplajı ERTMS/ETCS bağlamında tanıtan bir çalışmada, ETCS çalışma modları olan Tam Denetim (FS) ve Kısmi Denetim (PS) üzerinden Tam Denetim Sanal Kuplaj (FSVC) şeklinde yeni bir çalışma modu sunularak yapılan analizde gecikme sürelerinin azaldığı ve hattaki tren sayısının arttığı görülmüştür [10]. Rusya'daki bir hatta yapılan bir diğer çalışmada, sabit blok ve sanal kuplaj ile 2 trenin hat verimi karşılaştırıldığında, sanal kuplaj ile trenler arası mesafenin 1500 metreye kadar düştüğü ve hat veriminin %19,05 oranında arttığı tespit edilmiştir [11]. Son olarak, Pekin-Şangay hızlı treninin bir bölümünde sanal kuplaj için tren işletim kontrolü ve kazaları önleme amacıyla yerel lider-takipçi uygulama şeması önerilmiş ve trenlerin minimum takip mesafesi ile öngörülen takip mesafesi hesaplanarak en iyi performans için en fazla dört tren önerilmiştir [12].

Bu makale beş ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, çalışmanın amacı, kapsamı, önemi, konuyla ilgili literatür taraması, mevcut araştırmalar ve bu çalışmaların literatüre katkıları gibi unsurları içeren giriş kısmı sunulmaktadır. İkinci bölümde, araştırmada kullanılan yöntemler ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde kullanılan parametreler tanıtılmaktadır. Dördüncü bölümde, araştırma sonuçları grafiklerle desteklenmiş olarak sunulmakta ve bu bulgular üzerine tartışmalar yapılmaktadır. Son olarak, beşinci bölümde, çalışmanın bulguları değerlendirildikten sonra gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunmaktadır.

## 2. Yöntem

Bu bölümde tren hareketinin konum ve hız hesaplaması için formüller verilmiştir. Bu çalışmada, bir lider ve bir takipçi tren arasındaki dinamik etkileşim, Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrol mekanizması kullanılarak sanal kuplaj için belirlenen senaryolar altında simüle edilmiştir. PID kontrolör devamlı olarak sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkı yani hata değerini hesaplayarak buna bağlı bir çıkış üretir [13]. Kontrolörde bulunan oransal (P) bileşen, mevcut hataya bağlı bir çıkış üretir. İntegral (I) bileşeni, hatanın toplam değeri ile ilgili bir çıkış üretir ve sürekli haldeki hataları düzeltir. Türev (D) bileşeni ise sistemin gelecekteki davranışını tahmin ederek sistemin geçici hal yanıtının düzeltilmesine yardımcı olur. Bu üç bileşenin birleşimi, geniş bir yelpazedeki kontrol problemleri için etkili ve esnek bir çözüm sunar. Şekil 3'te sanal kuplaj uygulaması akış diyagramı gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3. Sanal kuplaj uygulaması akış diyagramı

Hata değeri, takipçi trenin lider trene olan gerçek mesafesinin, hedeflenen mesafeden ne kadar sapma gösterdiğini ifade eder. PID kontrolörü, bu hatayı kullanarak, hata değerine orantılı bir şekilde (P-Oransal), hatanın zaman içindeki toplamına bağlı olarak (I-İntegral) ve hatanın zamana göre değişim hızına bağlı olarak (D-Türev) bir kontrol sinyali ( $u(t)$ ) üretir. Bu kontrol sinyali, takipçi trenin ivmesini ayarlayarak lider tren ile arasındaki mesafeyi hedeflenen değere

getirmek için kullanılır. Pozitif bir hata değeri, takipçi trenin liderden daha uzakta olduğunu ve bu mesafeyi azaltması gerektiğini gösterirken, negatif bir hata değeri, takipçi trenin lider trene hedeflenen mesafeden daha yakın olduğunu ve mesafeyi artırması gerektiğini gösterir. PID kontrolörü, sistem çıktısını istenen referans değerlere ulaşacak şekilde otomatik olarak ayarlar. Bu şekilde, lider ve takipçi trenler arasındaki mesafe, PID kontrolörü kullanılarak istenen mesafede tutulur ve trenler arasında sanal kuplaj sağlanır.

PID kontrolü için aşağıdaki formüller, PID kontrolörünün, sistem çıktısını istenen referans değere ulaştırmak için nasıl çalıştığını matematiksel olarak gösterir. Hız hesaplaması için (Denklem (1)) tanımlanmaktadır.

$$dV = a * dt \quad (1)$$

Bu denklemde dV hızda oluşan fark, a ivme ve dt geçen zamandır. Alınan yol hızı ve geçen zamana bağlıdır. Yol denklemi (Denklem 2) ile tanımlanabilmektedir.

$$dx = V * dt \quad (2)$$

Bu denklemde dx trenin toplam ilerlediği yol, V hızı ve dt zamandır. Buradan sanal kuplaj için bir hata mesafesi denklemi (Denklem (3)) elde edilir.

$$e(t) = (x_{lider}(t) - x_{takipci}(t)) - d_{hedef} \quad (3)$$

Bu denklemde e(t) zamana bağlı olarak hesaplanan hata değeri,  $x_{lider}(t)$  zamana bağlı lider trenin konumu ve  $x_{takipci}(t)$  zamana bağlı takipçi trenin konumudur. Integral bileşeni, hata teriminin zaman içindeki toplamını alarak uzun süreli hatalara karşı düzeltme yapar. Bu, sistemdeki sürekli hal hatasını düzeltmeye yardımcı olur ve sistem çıkışının istenen değere ulaşmasını sağlar. İntegral hesaplama denklemi (Denklem (4)) ile tanımlanmaktadır.

$$I(t) = I(t - 1) + e(t) * dt \quad (4)$$

Bu denklemde I(t) zamana bağlı olarak hesaplanan integral değeri, I(t-1) önceki adımda hesaplanan integral değeri, e(t) mevcut hata ve dt zaman adımıdır. Türev bileşeni, hatanın zamana göre değişim hızını hesaplar. Bu, sistemdeki ani değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt verilmesini sağlar ve aşırı salınımların önlenmesine yardımcı olur. Türev hesaplama denklemi (Denklem (5)) ile tanımlanmaktadır.

$$D(t) = (e(t) - e(t - 1)) / dt \quad (5)$$

D(t) zamana bağlı olarak hesaplanan türev değeri, e(t) ile e(t-1) sırasıyla mevcut ve önceki hata değerleri ve dt zaman adımıdır. PID çıkışı, oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) bileşenlerin toplamıdır ve sistem üzerinde uygulanacak olan kontrol sinyalini temsil eder. PID çıkışı (Denklem (6)) ile tanımlanmaktadır.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * I(t) + K_d * D(t) \quad (6)$$

Bu denklemde u(t) kontrol sinyali,  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  sırasıyla oransal, integral ve türevsel kazançlar ve e(t), I(t) ve D(t) sırasıyla hata, integral ve türev değerleridir.

### 3. Simülasyon Verileri

Trenlerin hareketlerini PID kontrolü ile simüle etmek için Matlab programı kullanılmıştır. Bu kod yazılımında bir lider tren ile bir takipçi tren arasındaki mesafeyi ve hızlarını PID kontrolörü

kullanarak simüle edilmiştir. Simülasyonda trenler belirlenen hız ve ivme sınırlamaları ile hareketi sağlanacaktır. Bu simülasyon çalışması için farklı senaryolar belirlenmiştir. Belirlenen senaryolar için aynı tipte 2 tren aracı kullanılmıştır. Simülasyon parametrelerine göre trenlerin hareketleri incelenmiştir. 3 farklı senaryoda incelenen simülasyon parametreleri alt başlıklarda verilmiştir.

### 3.1. İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryosu

İlk senaryo olan İstasyon Çıkışında Sanal Kuplaj senaryosunda, başlangıçta farklı hız ve farklı konumda olan trenlerin benzetimi yapılmıştır. Lider tren sabit bir hızla ilerlerken, başlangıçta durağan halden hızlanan takipçi tren hızını ve konumunu PID kontrolörü ile ayarlayarak istenen mesafe ve hızda korumasını sağlar. İstasyon Çıkışında Sanal Kuplaj Senaryosu, parametre değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 2.** İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryo parametreleri

Parametreler	Değerler	Birim
Lider Tren Başlangıç Hızı	72	km/sa
Takipçi Tren Başlangıç Hızı	54	km/sa
2 Tren Arası Hedef Mesafe (hata)	200	m
2 Tren Arası Başlangıç Mesafesi	500	m
Lider Tren Hedef Hız	Sabit	km/sa
Takipçi Tren Hedef Hız	Liderin Hızı	km/sa
Maksimum İvme	1,2	m/sn <sup>2</sup>
Minimum İvme	-1.2	m/sn <sup>2</sup>
Maksimum Hız	30	km/sa
Minimum Hız	10	km/sa
PID K <sub>p</sub> Değeri	1	
PID K <sub>i</sub> Değeri	0,01	
PID K <sub>d</sub> Değeri	5	

### 3.2. Fren manevrası senaryosu

Fren Manevrası senaryosu, başlangıçta aynı hız ve istenen konumda olan 2 trenin frenleme durumunu simüle eder. Lider tren hareketinden belirli bir zaman sonra hızını azaltmaya başlar. Takipçi tren, liderle arasındaki mesafeyi istenen seviyede tutmak ve hızları eşitlemeye çalışmak için PID kontrolü ile hızını azaltmaya başlar. Fren manevrası senaryosu, parametre değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Fren manevrası senaryo parametreleri

Parametreler	Değerler	Birim
Lider Tren Başlangıç Hızı	20	km/sa
Takipçi Tren Başlangıç Hızı	20	km/sa
2 Tren Arası Hedef Mesafe	200	m

2 Tren Arası Başlangıç Mesafesi	200	m
Lider Tren Hedef Hız	10	km/sa
Takipçi Tren Hedef Hız	Liderin Hızı	km/sa
Lider Tren Fren Başlangıç Zamanı	20	sn
Maksimum İvme	1,2	m/sn <sup>2</sup>
Minimum İvme	-1.2	m/sn <sup>2</sup>
Maksimum Hız	30	km/sa
Minimum Hız	10	km/sa
PID Kp Değeri	1	
PID Ki Değeri	0,01	
PID Kd Değeri	5	

### 3.3. Hatta sanal kuplaj senaryosu

Hatta Sanal Kuplaj senaryosu, başlangıçta farklı konum ve hızlarda bulunan 2 trenin hareketini simüle eder. Bu senaryo daha gerçekçi parametreler içerir. Diğer senaryolardan farklı olarak lider tren değişen ivme ve farklı başlangıç koşulları ile hareket etmektedir. Bu hareket için belirlenen bir saniyede lider tren hızını artırır. Artan hız istenen hedef hıza ulaştığında sabit ilerler. Takipçi tren başlangıçta aralarında olan mesafe ve hızı kapatmaya çalışırken lider trenin değişen ivmesini de hesaba katar. Lider tren ile aralarındaki mesafeyi istenen mesafede tutmaya ve hızı eşitlemeye çalışır. Hatta sanal kuplaj senaryosu, parametre değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 6.** Hatta sanal kuplaj senaryo parametreleri

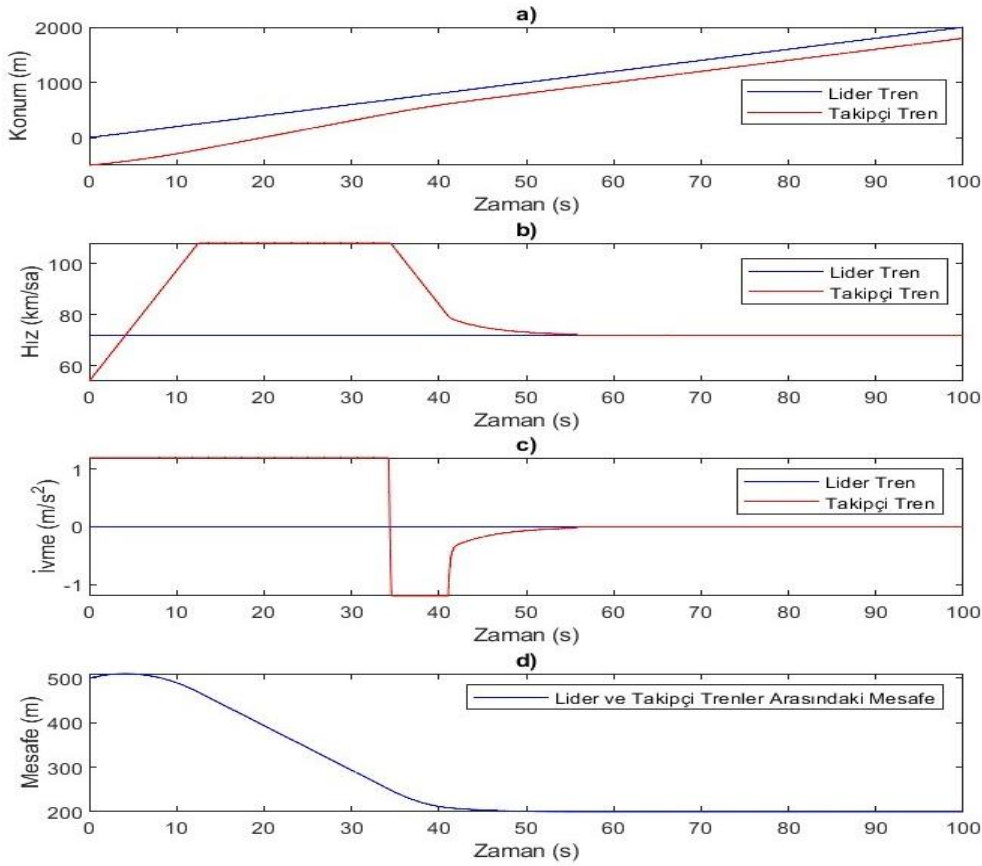
Parametreler	Değerler	Birim
Lider Tren Başlangıç Hızı	20	km/sa
Takipçi Tren Başlangıç Hızı	15	km/sa
2 Tren Arası Hedef Mesafe	200	m
2 Tren Arası Başlangıç Mesafesi	400	m
Lider Tren Hedef Hız	25	km/sa
Takipçi Tren Hedef Hız	Liderin Hızı	km/sa
Lider Tren Hızlanma Zamanı	10	
Maksimum İvme	1,2	m/sn <sup>2</sup>
Minimum İvme	-1.2	m/sn <sup>2</sup>
Lider Tren Hızlanma İvmesi	1	m/sn <sup>2</sup>
Maksimum Hız	30	km/sa
Minimum Hız	10	km/sa
PID Kp Değeri	1	
PID Ki Değeri	0,01	
PID Kd Değeri	5	

#### 4. Bulgular

Belirlenen senaryolarda elde edilen simülasyon sonuçları alt başlıklarda verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ele alınan senaryolarda PID kontrolör kullanılarak 2 tren arasında sanal kuplajın sağlanabildiği görülmektedir.

##### 4.1. İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryosu

İlk senaryo olan “İstasyon Çıkışında Sanal Kuplaj” ile sabit hızla hareket eden lider tren ile istenen mesafeyi ayarlamaya ve aynı hıza ulaşmaya çalışan ve bir istasyondan harekete başladığı varsayılan takipçi trenin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmiştir. Sonuç grafikleri değerlendirildiğinde 60. saniye civarında 2 tren arası mesafe istenen değere ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. Sanal kuplaj bu senaryo çerçevesinde sağlanmıştır. Sonuçlar, Şekil 4’te konum-zaman, hız-zaman, ivme-zaman ve mesafe-zaman grafikleri olarak verilmiştir.



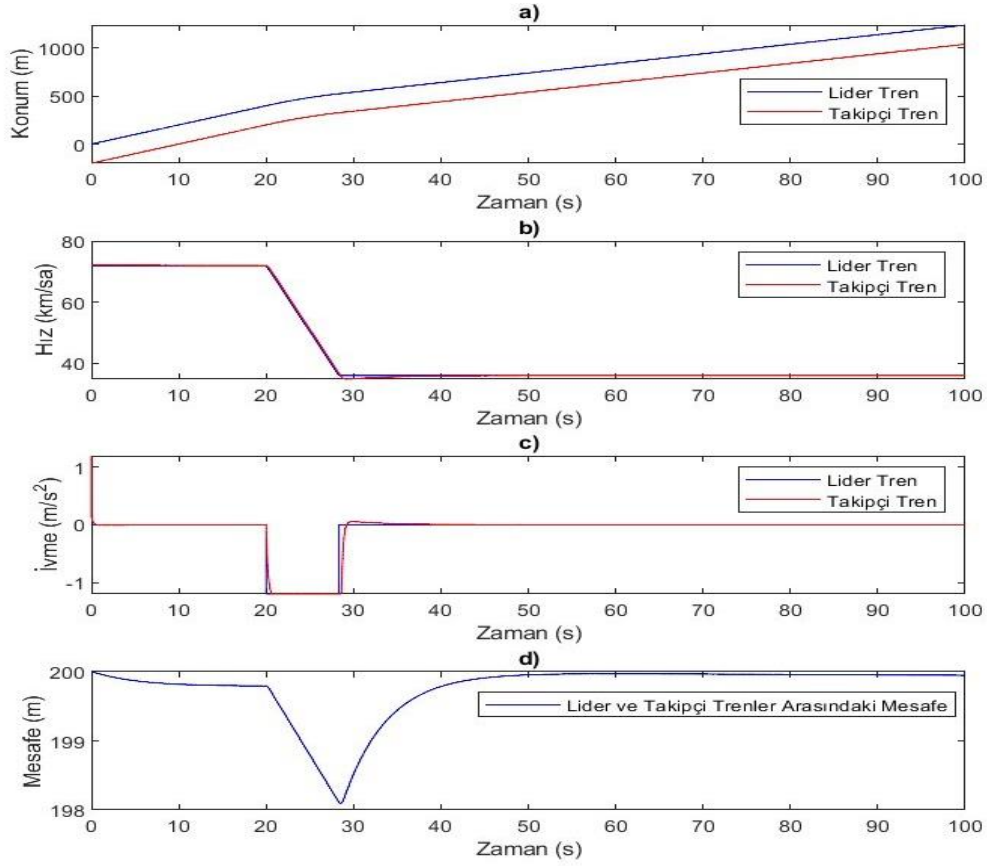
Şekil 4. İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryo grafikleri a) Konum-zaman grafiği b) Hız-zaman grafiği c) İvme-zaman grafiği d) Mesafe-zaman grafiği

##### 4.2. Fren manevrası senaryosu

İkinci senaryo olan “Fren Manevrası” ile aynı hız ve istenen konumda hareket eden trenlerden lider trenin frenleme yaparak yavaşlaması halinde takipçi trenin bu değişen harekete uyumu simüle edilmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 2’de verilmiştir. Grafiklere bakıldığında takipçi trenin 50. saniye civarında istenen konuma ve hıza başlangıçta olduğu gibi tekrar ulaştığı görülmektedir. Sonuçlar, Şekil 5’te konum-zaman, hız-zaman, ivme-zaman ve



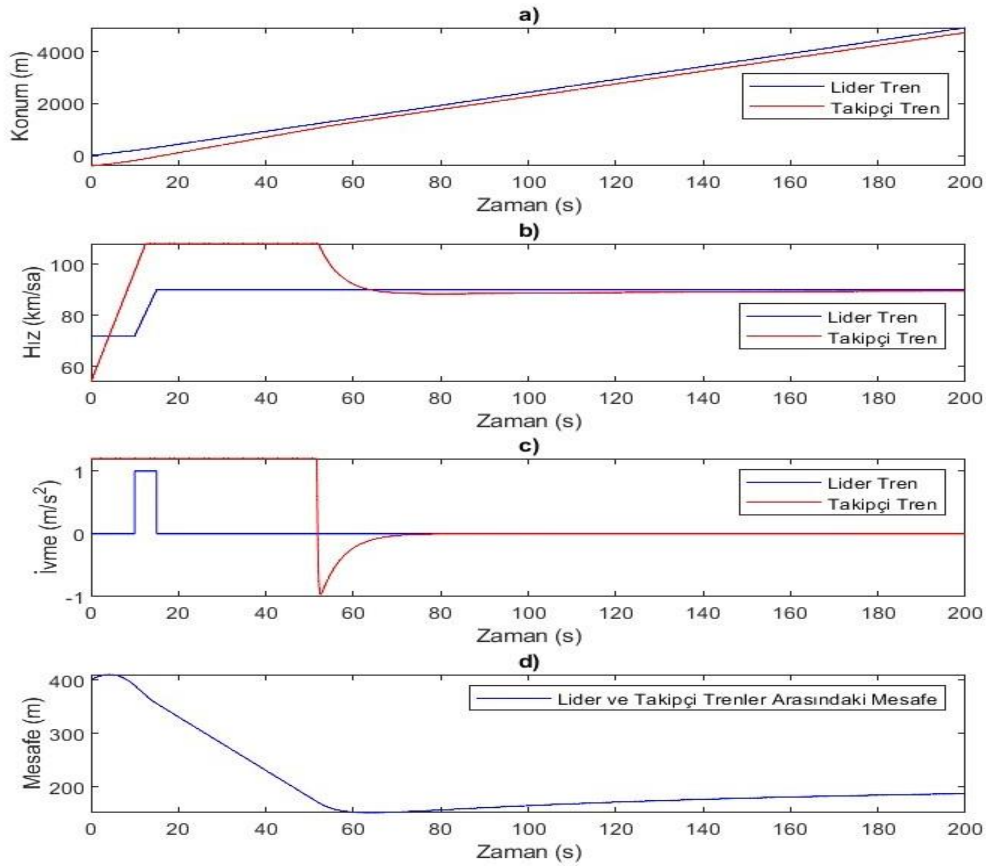
mesafe-zaman grafikleri olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. Fren manevrası senaryo grafikleri a) Konum-zaman grafiği b) Hız-zaman grafiği c) İvme-zaman grafiği d) Mesafe-zaman grafiği

#### 4.3. Hatta sanal kuplaj senaryosu

Son senaryo olan “Hatta Sanal Kuplaj” ile farklı hızlarda ve farklı konumlarda hareket eden trenlerden lider trenin ivmeli hız değişimine takipçi trenin uyumu simüle edilmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 3’te verilmiştir. Çıkan grafiklere bakıldığında 180. saniye civarında 2 tren arası mesafe istenen değere ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. Sonuçlar, Şekil 6’te konum-zaman, hız-zaman, ivme-zaman ve mesafe-zaman grafikleri olarak gösterilmektedir.



**Şekil 6.** Hatta sanal kuplaj senaryo grafikleri a) Konum-zaman grafiği b) Hız-zaman grafiği c) İvme-zaman grafiği d) Mesafe-zaman grafiği

## 5. Sonuç

Bu çalışma, raylı sistemlerde sanal kuplaj sinyalizasyon prensibi uygulanması için endüstride sıklıkla kullanılan PID kontrolör yapısının kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Sanal kuplaj mevcut raylı sistemlerdeki sınırlamaları azaltarak trenler arasındaki mesafeyi azaltmaktadır.

Matlab yazılımında yapılan simülasyonlar, sanal kuplajın etkinliğini değerlendirmek için tasarlanmıştır. PID kontrolörü kullanılarak lider ve takipçi trenler arasındaki mesafe hedeflenen değerde tutulmuştur. Simülasyon sonuçları, sanal kuplajın başarılı bir şekilde sağlanarak trenlerin sanki aralarında fiziksel bir kuplaj varmış gibi hareket edebildiklerini göstermiştir. Önerilen PID kontrolör yapısı trenler arasındaki mesafeyi istenen değere getirmek ile kalmayıp aynı zamanda sürekli halde iki tren arasındaki hız farkını da ortadan kaldırarak trenlerin aynı hızda seyretmelerini sağlamıştır. Sistemin yanıt süreleri bu takip işleminin emniyetli bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir.

İlk senaryoda, trenler istenilen mesafe değerine 60 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. İkinci senaryoda, takipçi trenin başlangıçta olduğu gibi yine istenilen pozisyona ve hıza 50 saniye civarında ulaştığı görülmüştür. Son senaryoda ise iki tren arasındaki mesafe istenilen değere 180 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. Bu sonuçlar, sistemin farklı koşullarda ve hız profillerinde dahi trenler arası mesafeyi istenilen mesafede düzenleyebildiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma bir simülasyon ortamında hazırlanmıştır. Daha gerçekçi sonuçlar için gerçek hat üzerinde denenmesi gerekir.

Bu çalışmanın sonuçları, sanal kuplajın demiryolu sistemlerinde potansiyel olarak önemli bir rol

oynayabileceğini göstermektedir. Daha fazla inceleme ve saha testleri, bu hızla gelişen değişen teknolojinin reel dünya uygulamalarında etkinliğini daha detaylı bir biçimde değerlendirebilir ve demiryolu ağlarının verimliliğini artırabilir. Önümüzdeki çalışmalarda farklı ve daha gerçekçi senaryolarda sanal kuplaj sinyalizasyon prensibi için simülasyon çalışmaları yapılması planlanmaktadır.

### Kaynakça

- [1] *IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*, IEEE Std 1474.1-2004 (Revision of IEEE Std 1474.1-1999), 2004. doi: 10.1109/IEEESTD.2004.95746
- [2] Shift2Rail Joint Undertaking, "Multi-Annual Action Plan," 2015. [Online]. Available: [https://www.shift2rail.org/wp-content/uploads/2013/07/MAAP-final\\_final.pdf](https://www.shift2rail.org/wp-content/uploads/2013/07/MAAP-final_final.pdf). [Accessed 26-Nov-2015]
- [3] S. Su, W. Liu, Q. Zhu, R. Li, T. Tang, and J. Lv, "A cooperative collision-avoidance control methodology for virtual coupling trains," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 173, 2022, Art. no. 106703. doi: 10.1016/j.aap.2022.106703
- [4] J. Aoun, E. Quaglietta, R. M. P. Goverde, M. Scheidt, M. Blumenfeld, A. Jack, and B. Redfern, "A hybrid delphi-AHP multi-criteria analysis of moving block and virtual coupling railway signalling," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 129, 2021, Art. no. 103250. doi: 10.1016/j.trc.2021.103250
- [5] E. Quaglietta, M. Wang, and R. M. P. Goverde, "A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 15, 2020, Art. no. 100195. doi: 10.1016/j.jrtpm.2020.100195
- [6] J. Félez, Y. Kim, and F. Borrelli, "A model predictive control approach for virtual coupling in railways," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, pp. 2728–2739, 2019. doi: 10.1109/TITS.2019.2914910
- [7] X. Luo, H. Liu, L. Zhang, and J. Xun, "A model predictive control based inter-station driving strategy for virtual coupling trains in railway system," in *Proc. IEEE Int. Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Indianapolis, IN, USA, 2021, pp. 3927–3932. doi: 10.1109/ITSC48978.2021.9564895
- [8] Z. Qianqian and W. Hongwei, "A multi-train cooperative control method of urban railway transportation based on artificial potential field," in *Proc. Chinese Autom. Congr. (CAC)*, Hangzhou, China, 2019, pp. 1350–1355. doi: 10.1109/CAC48633.2019.8997212
- [9] M. Chai, H. Wang, T. Tang, J. Chai, and H. Liu, "A relative operation-based separation model for safe distances of virtually coupled trains," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, 2023. doi: 10.1109/TIV.2023.3301009
- [10] F. Flammini, S. Marrone, R. Nardone, A. Petrillo, S. Santini, and V. Vittorini, "Towards railway virtual coupling," in *Proc. IEEE Int. Electr. Syst. Aircraft, Railway, Ship Propulsion Road Veh. Int. Transp. Electric. Conf. (ESARS-ITEC)*, Nottingham, UK, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607523
- [11] V. Olentsevich, V. Konyukhov, A. Olentsevich, and D. Lysenko, "Efficiency of implementation of interval traffic regulation by the virtual coupling system on the section of the railway line in the framework of the digital railway project," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1661, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012106
- [12] Y. Cao, J. Wen, and L. Ma, "Tracking and collision avoidance of virtual coupling train control system," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 120, pp. 76–90, 2021. doi: 10.1016/j.future.2021.02.014.
- [13] Wikipedia katılımcıları, "PID," 2024. [Online]. Available: <https://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=PID&oldid=31190908>. [Accessed: 20-Ağu-2024]

**Özgeçmiş****Muhammed Mustafa KAYA**

1998 yılında Malatya’da doğdu. Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü’nde tamamlamıştır. Yüksek lisans öğrenimine İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Raylı Sistemler Mühendisliği Programı’nda devam etmektedir. TCDD Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. Firmasında Sinyalizasyon Mühendisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: kayam21@itu.edu.tr

**Mehmet Turan SÖYLEMEZ**

İTÜ Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nden lisans (1991), Manchester Üniversitesi’nden yüksek lisans (1994) ve doktora (1999) derecelerini almıştır. Bir kitap, 25 bilimsel dergi makalesi ve 150’den fazla ulusal ve uluslararası bildirinin yazarıdır. Tamamlanmış 8 adet doktora ve 43 yüksek lisans tezine danışmanlık yapmıştır. Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi genel sekreterliği, İTÜ Raylı Sistemler Ana Bilim Dalı Başkanlığı, IEEE CBTC Standart Komisyonu üyeliği, İTÜ Arı Teknokent’te kurulu olan HI-SIM Teknoloji Mühendislik Ltd. Şti. Genel Müdürlüğü gibi değişik görevleri yürütmektedir.

E-Posta: soylemezm@itu.edu.tr

**Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Muhammed Mustafa KAYA: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Mehmet Turan SÖYLEMEZ: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol, Gözden geçirme ve düzenleme.