



Tren Makinistliğinin Otomasyonu İçin Lokomotif Hız Kontrolcüsü Tasarımı ve Kapalı Çevrim Simülasyonu

Ege GÜNİNDİ*^{ID}, Hakan ÜLKER^{ID}

*Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Bursa, Türkiye*

*gunindiege@gmail.com

(Alınış/Received: 13.11.2023, Kabul/Accepted: 09.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Açık demiryolu şebekesinde işletilen, lokomotif ve vagonlardan müteşekkil trenlerin makinistliğindeki otomasyon henüz kapalı demiryolu şebekesindeki nazaran çok daha düşük seviyededir. Türkiye açık demiryolu şebekesindeki tren makinistliğinin otomasyonu için PID (oransal-integral-türev) kontrol stratejisinde, Türkiye'nin ilk yerli ve milli elektrikli anahat lokomotifi E5000 ile benzer özelliklerdeki bir lokomotifte cer ve dinamik fren kuvvetleriyle hız kontrolü yapılması amacıyla PI (oransal-integral) kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan PI kontrolcü, tren seyrinin dinamik sistem modellenmesi için MATLAB Simulink ortamında oluşturulan modele entegre edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan kapalı çevrim sistemde, halihazırda işletilen bir yük treninin seyrinden gerçek işletmecilik şartlarına uygun şekilde seçilen safhalarda bazı parametrelerin farklı değerleri için yapılan simülasyon sonuçlarında, tasarlanan PI kontrolcünün yeterince başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: PID, Otomasyon, Lokomotif, Tren, Demiryolu, Kontrol sistemi

Designing of Locomotive Speed Controller and Closed Loop Simulation for Train Driving Automation

Abstract: Automation of the driving of trains consisting of locomotive and wagons operated in open rail networks is still at a much lower level than in closed rail networks. In the PID (proportional-integral-derivative) control strategy for the train driving automation in Türkiye's open rail network, a PI (proportional-integral) controller has been designed to control the speed by the use of traction and dynamic brake forces in a locomotive with similar specifications to Türkiye's first domestic and national electric mainline locomotive E5000. The designed PI controller is integrated into the model created in the MATLAB Simulink for dynamic system modeling of the cruise of the train. In the closed loop system created in this way, the simulation results for different values of some parameters in selected phases of the cruise of a currently operated freight train in accordance with the real operating conditions have shown that the designed PI controller is successful enough.

Keywords: PID, Automation, Locomotive, Train, Railway, Control system

1. Giriş

Çoklu ünite setlerinin aksine katarların (lokomotif ve vagonlardan müteşekkil tren dizilerinin) idaresinde, farklı durumlar için kumandaların doğru kademede ve doğru zamanda verilmesinin mesleki tecrübeyi şart koşması ve fiziki müdahale icap eden rutin ve arıza işlerin insan tarafından yapılması gibi sebeplerle tren makinistliğindeki otomasyon henüz çok düşük seviyededir [1]. Otomasyon seviyelerinin tasnifini ve muhtelif otoritelerin taksonomilerini inceleyen Ramírez vd. gibi; halihazırda yüksek seviyede otomasyon ve otonomiye haiz, çoklu ünite setleri ile tren işletilen “kapalı demiryolu şebekesi” ve bu çalışmanın da konusu olan “açık demiryolu şebekesi” ifadeleri tercih edilmiştir [2]. Açık demiryolu şebekesinde tren idaresinin tam otomatik olduğu henüz tek uygulamada blok yük trenleri tıpkı bir kapalı demiryolu şebekesi gibi devamlı aynı tren teşkilatında ve aynı yolda [1]; bir başka tabir ile “kapalı hizmet” işletilmektedir [2]. Bu çalışmanın

Atıf için/Cite as: E. Günindi, H. Ülker, “Tren makinistliğinin otomasyonu için lokomotif hız kontrolcüsü tasarımı ve kapalı çevrim simülasyonu,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 133-146, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1390378

konusu olan, “açık hizmet” işletilen trenler için geliştirilen bir üründe yapay zeka (AI) tabanlı kontrolcü tarafından cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılmakta olup halen seyrüsefer emniyeti makinistin mesuliyetindedir [3]. Benzer bir üründe belirli yol kesimlerinde takriben 20 km/h ve üzeri hızlar için kontrolcü tarafından cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılırken dik rampa inişi gibi hava frene ihtiyaç duyulan yerlerde fren atması ve tahliye vermesi makinistten talep edilmekte; sistemin hava frene müdahalesi bu hız kontrol süreci haricinde, Otomatik Tren Koruma (ATP) sisteminden alınan müteakip sinyal bildirisi ve tren sevk bilgilerine bağlı duruş ve kalkış süreçlerinde vuku bulmaktadır [4]. Fransa’daki bir örnekte ülkemiz modern elektrikli anahat lokomotifine yakın modelde bir lokomotif; Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi (ERTMS) dahilindeki bir hat kesiminde makinist nezaretinde tek lokomotif olarak otomatik seyretmiş, ERTMS öncesi sinyalizasyon sistemli hatlarda da aynı otomasyonun hedeflendiği belirtilmiştir [5]. Bu otomasyonun şebeke kapasitesinde artış, livre optimizasyonu, operatif verimde artış, enerji verimliliğinde artış ve haliyle daha yeşil ulaşımına vesile olacağı belirtilmiştir [6]. Bu hususların, demiryolu altyapı işletmecisinin (DAİ) demiryolu tren işletmecilerine (DTİ) sunduğu hizmetin esaslarından olan kapasite yönetim alanındaki kapasite geliştirme hedeflerine [7]; ayrıyeten ülkemiz açık demiryolu şebekesinin DAİ kuruluşu TCDD’nin ilgili eylem planındaki katenerde enerji tasarrufu hedefine katkısı muhtemeldir [8].

Fransa’daki tek lokomotifin otomasyonu projesi Avrupa Tren Kontrol Sistemi (ETCS) tabanında, GOA2 otomasyon seviyesinde ifade edilmektedir [5]. Bu ifadede tercih edilen taksonomi (Grade of Automation, GOA) esas itibari ile kent içi toplu taşımadaki raylı sistemlerin otomasyon seviyesini tasnif etmektedir [9]. Bu noktada, ülkemizin zorlu coğrafyası gibi sebeplerle insana ihtiyaç duyulan yoğun iş yükü hatırlanmalıdır [1]. Zira ülkemizdeki tren işletmeciliği, Avrupa ekseriyetinin aksine tıpkı Kuzey Amerika’daki gibi henüz katarın esas lokomotifinde iki adet makinist iktiza etmektedir [2]. Buna mukabil halihazırda tek makinist ile katar idaresi de yapılan Avrupa’da vidalı koşum takımının yerini alması için Dijital Otomatik Koşum Takımı (DAC) geliştirilmektedir [10]. Çoklu ünite setlerinde kullanılan Scharfenberg misali mekanik, pnömatik ve elektrik bağlantıları havi bu yeni koşum takımı vasıtasıyla, insana ihtiyacı artıran işler olan dizi muayenesi ve fren tecrübesinde de otomasyon tesis edilecektir [11].

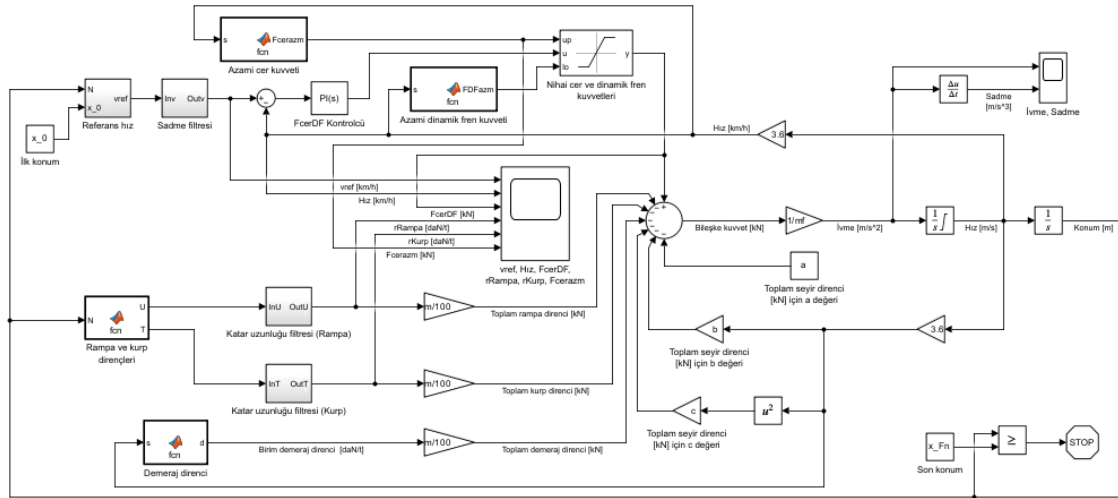
PID (oransal-integral-türev) kontrol stratejisi; endüstriyel otomasyon, kimyasal prosesler, enerji ve savunma sanayii gibi alanlardaki dinamik sistemlerde genellikle referans takibi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca otomotiv alanında çeşitli kara araçlarının sürücü modelini temsil ettiği çalışmalar da mevcut olup örnek bir çalışmada modellenen hibrit elektrikli aracın boylamsal hız kontrolü için ihtiyaç duyulan sürücü modeli olarak %0,01 maksimum aşma ve 4 s oturma zamanı şeklindeki performans kriterlerini karşılayan iki farklı PI (oransal-integral) kontrolcü tasarlanmıştır [12]. Bir başka örnek çalışmada elektrikli yarış aracının istikamet ve boylamsal hız kontrolü için geliştirilen sürücü modelinde boylamsal hız kontrolü için Simulink-Carsim simülasyon platformunda oluşturulan modelde kullanılan PID kontrolcünün yavaş tepki ve yüksek aşma zafiyeti için PID kontrol stratejisinin ileri beslemeli yapısından istifade edilerek nihayetinde kapalı çevrim sistemin geçici rejim cevabı iyileştirilmiştir [13]. Kara araçlarındaki boylamsal hız kontrolü örneklerinden tahmin edileceği üzere PID kontrol stratejisi raylı sistemlerde kapalı demiryolu şebekelerinde de kullanılmaktadır. Modern metro araçlarının ATO (Otomatik Tren İşletme) sistemlerinde PID ile hız kontrolü hayli yaygındır [14].

Bu çalışmada, ülkemiz açık demiryolu şebekesindeki tren makinistliği işinin otomasyonu için bir anahat lokomotifinde cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılması amacıyla PID kontrol stratejisinde PI kontrolcü tasarlanmış ve MATLAB Simulink ortamında oluşturulan dinamik sistem modeline entegre edilmiştir. Oluşturulan kapalı çevrim modelde, halihazırda işletilen bir yük treninin seyrinden seçilen safhalarda bazı cer mekaniği parametrelerinin farklı değerleri için kapalı çevrim simülasyonlar yapılarak sistem davranışı ve kontrolcünün başarısı incelenmiştir. Amerikan Demiryolları Birliği (AAR) tarafından tavsiye edilen taksonomi (Automated Rail Taxonomy) ile ifade edildiği takdirde [15]; bu çalışma kapsamında tasarlanan

kontrolcü vasıtasıyla, hızlanma ve yavaşlamanın kısmen otomatik olduğu “Initial Automation” seviyesindeki tren makinistliği otomasyonunun ülkemiz açık demiryolu şebekesinde tesis edilmesi amaçlanmaktadır.

2. Metot

Bu çalışmada, cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılması için PID kontrol stratejisinde PI kontrolcü tasarımı yapıp The MathWorks, Inc. firması tarafından yayımlanan MATLAB paket programı içerisinde yer alan Simulink ortamında, önceki çalışmada tren seyrinin modellenmesi için oluşturulan modele entegre edilmiş [1]; ayrıyeten modelin bazı kısımları takviye edilerek nihayetinde Şekil 1.’de gösterilen dinamik sistem modeli oluşturularak kapalı çevrim simülasyonlar bu modelde yapılmıştır.



Şekil 1. MATLAB Simulink ortamında oluşturulan kapalı çevrim sistem modeli

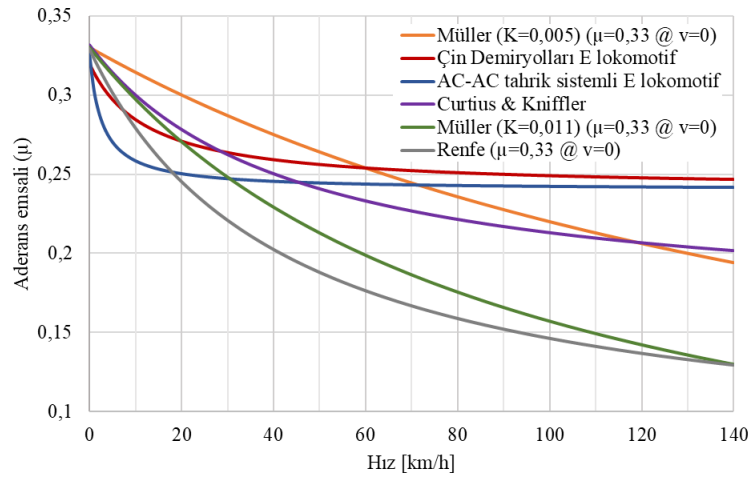
Seyri modellenen 23256 numaralı blok yük treninin güzergahı elektrifikasyonlu ve elektrifikasyonsuz, trafik muhtelif sistemlerle idare edilen hat kesimlerinden geçmekte, tren servis boyu dizel cer ile işletilmektedir. Önceki çalışmada mukayese edilen parametrelerin trenin seyrindeki tesirlerinin gösterilmesi için seçilen safhalar şebekenin Irmak-Yerköy kısmında olup bu kısmı ihtiva eden Irmak-Boğazköprü hat kesiminde elektrifikasyon mevcut, trafik idaresi ETCS Seviye 0 sinyalizasyonlu TSİ (Trafığın Sinyallerle İdaresi) ve azami dingil basıncı 22,5 t'dur [16]. Bu hat kesiminde elektrikli cer ile tren işletmeciliği de yapılmaktadır. Buna istinaden, yine aynı hamulenin (Rgns tipi 14 vagon, 56 dingil, 1092 t) modern bir elektrikli anahat lokomotifini ile cer edilmesi için kontrolcü tasarlanmıştır.

Sistem için tasarlanan kontrolcünün cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapacağı lokomotifin, ülkemizin ilk yerli ve milli elektrikli anahat lokomotifini olarak tasarlanan E5000 ile benzer özelliklerde olması adına B₀B₀ dingil tertibinde [17], 88 t servis kütlelerinde, azami cer gücü için 5000 kW anma gücünde [18], AC-AC tahrik sistemli, dinamik frende rejeneratif frenleme kabiliyetindeki bir elektrikli anahat lokomotifini kabulü yapılmıştır.

2.1. Cer ve dinamik fren eğrileri

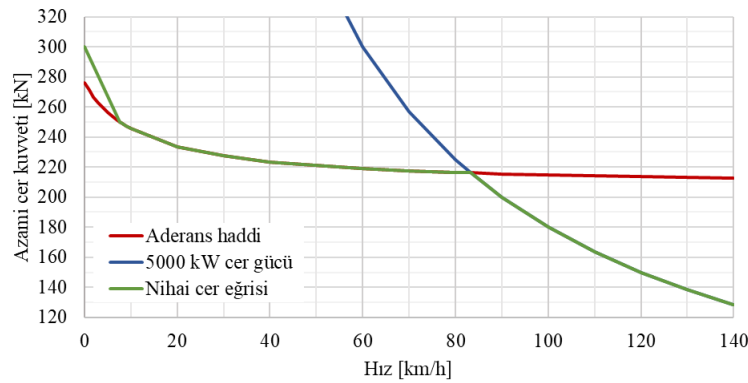
Lokomotifin azami cer ve dinamik fren kuvvetlerinin hıza bağlı değişimleri için cer mekaniği literatürü ve modern lokomotif tasarımlarına itibar edilerek lokomotif kabulü için çizilen eğrilerin denklemleri modele kontrol sinyalinin asgari ve azami değerleri olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmadaki gibi yüksek cer gücüne sahip elektrikli lokomotiflerin cer eğrilerinde azami cer gücü bölgesi dizel lokomotiflere nazaran çok daha yüksek hızlarda başlamaktadır. Şayet tekerlek ile ray arasındaki aderans haddi aşılar ise lokomotif patinaja düşeceğinden kuvvetin mecburen kısıtlandığı bölgedeki kuvvet-hız karakteri modern lokomotif tasarımlarının çoğunda sabit kuvvet, hızdaki artış ile ekseriyetle lineer azalan kuvvet, bazen de ikisi birden olmakta; gelişmiş patinaj önleme sistemlerinden istifade edilerek düşük aderanslı koşullarda dahi bu eğriler temin edilmeye çalışılmaktadır. Aderans; araç, yol ve temas yüzeyine bağlı çok sayıda faktörden etkilenmektedir [19]. Anlık da olsa patinaj daima muhtemel olduğundan bu riski minimize etmek adına kısıtlı kuvvet bölgesindeki cer eğrisi için (çok düşük hızlar hariç) bir aderans denklemi tercih edilmiştir. Literatürden örnekler teşkil etmesi adına Müller [20], Çin Demiryolları elektrikli lokomotif (bu çalışmada tercih edilmiştir) [21], AC-AC tahrik sistemli elektrikli lokomotif [22], Curtius & Kniffler [23] ve Renfe (İspanya Demiryolları) [24] aderans denklemlerinin hıza bağlı değişim eğrileri Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Muhtelif aderans denklemlerinin hıza bağlı değişim eğrileri

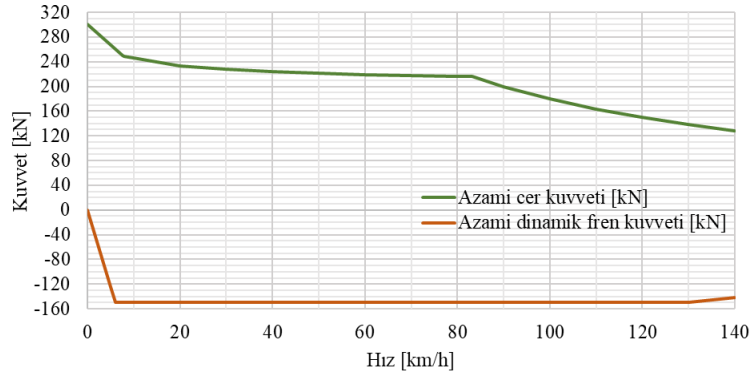
Çalışmada tercih edilen aderans denklemi lokomotifin ağırlığı (88 t_r) ile çarpılarak elde edilen aderans haddi kalkışta 276 kN cer kuvvetine cevaz vermektedir. Demeraj direnci ile bilhassa dik rampa kalkışlarındaki yüksek kuvvet ihtiyacı sebebiyle çok düşük hızlarda cer eğrisi kalkışta 300 kN'dan aderans haddinin 250 kN olduğu hıza (7,62 km/h) kadar lineer azaltılmıştır (Şekil 3.).



Şekil 3. Lokomotifin cer eğrisinin izahatı

Bu çalışmadaki lokomotif kabulüne, haliyle E5000 tasarımına benzer özelliklerdeki modern bir elektrikli lokomotif tasarımında olduğu gibi azami dinamik fren gücü 5500 kW kabul edilmiştir [25]. Bu güç bölgesine kadar yine bu konseptteki modern lokomotif tasarımlarının çoğunda olduğu gibi sabit kuvvet karakteri, azalma için tercihen 6 km/h; sabit kuvvetin şiddetinde ise

boylamsal kuvvetler sebebiyle 30 km/h ve altındaki hızlar için bahsedilen 150 kN değeri kabul edilmiştir [26]. Lokomotif kabulünün cer ve dinamik fren eğrileri Şekil 4.'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Lokomotifin cer ve dinamik fren eğrileri

Çok düşük hızlarda dinamik fren kuvvetindeki azalma sebebiyle duruş anlarındaki fren kuvveti yetersiz kaldığından, azalma ile orantılı şekilde fren silindirleri direkt fren havası ile doldurularak kuvvet zafiyetinin izalesi kabul edilmiştir. Benzer telafi metodundan, endirekt fren atıldığında lokomotifte dinamik fren kullanan sistemlerde de istifade edilmektedir [27]. Dinamik fren ve hava frenden eş zamanlı istifade halinde, tekerlek ile ray temasında kızaklama olmaması adına toplam fren kuvveti tahdit edilmelidir [28]. E5000 tasarımı gibi modern elektrikli anahat lokomotiflerinde ekseriyetle diskli fren kullanılmaktadır. Lokomotiflerde tekerleğe monte disk ile balata arasındaki anlık sürtünme hızla bağlı çok az değişmektedir ve ortalama sürtünmenin itibari değeri yüksek hızlara kadar sabittir [29]. Diskli frenin sabolu frene nazaran bu avantajından istifade edilerek, dinamik fren kuvvetinin azaldığı hızlarda 150 kN toplam fren kuvveti muhafaza edilmiştir.

2.2. Cer ve dinamik fren arası geçişler

Önceki çalışmada seyir simülasyonu yapılan treni temin eden DE 22000 tipi lokomotiflerde, hatta yıllar sonra envantere giren daha güçlü ve geliştirilmiş modeli DE 33000 tipi lokomotiflerde DC (doğru akım) fırçalı cer motorları kullanıldığından cerden dinamik frene geçişte flashover (alevlenme) riski sebebiyle gazı kapatınca bir süre beklenmelidir [30]. AC-AC tahrik sistemli lokomotiflerde ise AC (alternatif akım) asenkron cer motorları kullanılmakta olup bu tahrik sisteminin gerçek sistem üzerinden tetkiki için çalışma kapsamında AC-AC tahrik sistemli modern lokomotifler ile tecrübeler yapılmış ve araçların TCMS (Tren Kontrol ve Yönetim Sistemi) veri kayıtları incelenmiştir. Aslen kontrolcü tasarımında kontrol sinyalinin işaret değişimleri için delay (tehir) yapısı da tasarlanmakta iken; bu tetkikler neticesinde, lokomotive verilen cerden dinamik frene ve dinamik frenden cerre geçişli kumandaların cer motorlarında tehirsiz tatbik edildiğine kani olunarak, tasarlanmakta olan delay yapısı iptal edilmiştir.

2.3. Referans hız, ivme, sadme ve dinamik sistem modeli takviyeleri

Livre hızları ile birlikte gerçek işletmecilikteki hız kısıtları ve trenin gerçek seyirindeki makul duruş konumları tespit edilerek referans hız sinyali, konuma bağlı fonksiyonlar ile modele tanımlanmış ve 300 m katar uzunluğu daima nazarda tutulmuştur. Daha yüksek hız bölgesine geçişlerde dizinin sonu ilgili konumu geçince referans hız sinyali artırılmaktadır. Antrparantez, insan kumandasında mesafe tahmini mesleki tecrübe, konum işaretleri, cisimler ve gölgelerden istifade kabiliyetine bağlı olduğundan bu konumun tayininde sıkça hatalar yapılmaktadır. Daha düşük hız bölgesine geçişlerde ise ilgili konuma gelindiğinde yeni hedef hıza düşülecek şekilde referans hız sinyali azaltılmaktadır.

Düşük hızlanma ivmesi enerji sarfiyatını azaltmakta, düşük yavaşlama ivmesi de rejeneratif frenleme ile katenerin daha fazla beslenmesine vesile olmaktadır [31]. Daha az sadme, daha az enerji sarfiyatını intac edecektir [32]. Buna istinaden, gerçek yük treni seyri için makul değerler de olduğundan demeraj ivmesi $0,1 \text{ m/s}^2$ ve frenaj ivmesi $-0,1 \text{ m/s}^2$ tercih edilmiş, farklı rejim hızları arası hızlanmalar ve yavaşlamalar için de bu değerlere itibar edilmiştir.

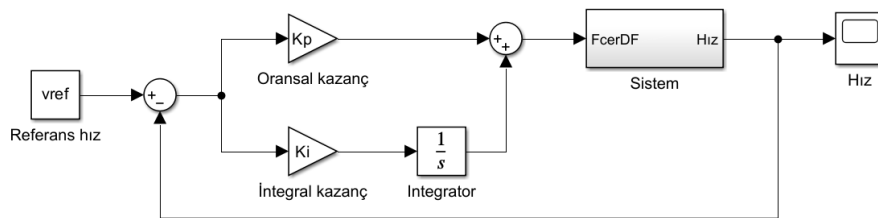
İvmeli hareketin başladığı ve bittiği noktalarda referans hız sinyalinin yumuşatılması için sadme filtresi tasarlanarak referans hız değişimindeki yüksek sadme engellenmiştir. Nitekim referans hız sabitken dahi muhtelif sebeplerle tren hızının referans hızdan uzaklaşmasının kontrol sinyalinde sebep olacağı agresyonlara tedbir olarak kontrolcü tasarımında oturma zamanı artırılarak kuvvet değişim tahdidi 75 kN/s değerine ayarlanmak istense de bu değerde kontrolcü başarısının düştüğü görülmüş, ayrıyeten cer kuvvetinin 1 s içinde 0 kN 'a düşebilmesi adına kontrolcü tasarımında bu ayar 300 kN/s için yapılmıştır [27]. Yine de hem normal seyirde kontrolcü davranışının yumuşatılmasına vesile olması hem de modelin takviyesi adına; önceki çalışmada farklı değerler arası geçişleri ilgili blok içinde yazılan kodlar ile yumuşatılan rampa ve kurp dirençleri için bu çalışmada ise katar uzunluğu filtreleri tasarlanmış, filtre parametrelerinde katarın maddesel noktaya intibakı hassas şekilde ayarlanarak seyir esnasında katar tesir eden rampa ve kurp dirençleri de optimize edilmiştir.

2.4. PID kontrol stratejisi ve PI kontrolcü tasarımı

Kapalı çevrim sistemin kararlılığı, kalıcı ve geçici rejim cevabında etkisi olan P (oransal), doğruluğunu artıran I (integral), sönümünü artırıp dolaylı olarak kalıcı rejim cevabında etkili olan D (türev) bileşenlerinden oluşan PID kontrol stratejisinin basit yapısı ve kolay ayarlanabilmesi sebebiyle endüstrideki yaygın kullanımı devam etmektedir. Literatürde Ziegler-Nichols açık ve kapalı çevrim, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick, Wang-Juang-Chan, Haalman, Dahili Model Kontrol, kutup yerleştirme ve hatanın integraline ilişkin ISE (hatanın karesinin integrali), IAE (hatanın mutlak değerinin integrali), ITAE (hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı integrali) gibi PID kontrolcü tasarım yöntemleri mevcuttur. Bu çalışmada hem kapalı çevrim sistemin kararlılığının ve doğruluğunun sağlanabilmesi hem de geçici rejim cevabının hedeflenen performans ölçütlerine ulaştırılabilmesi amacıyla PI kontrolcü yapısı seçilmiş ve kutup yerleştirme yöntemiyle tasarımı gerçekleştirilmiştir. PI kontrolcünün frekans domeninde transfer fonksiyonunu gösteren Denklem 1.'de " K_p " oransal kazanç ve " K_I " integral kazançtır [33].

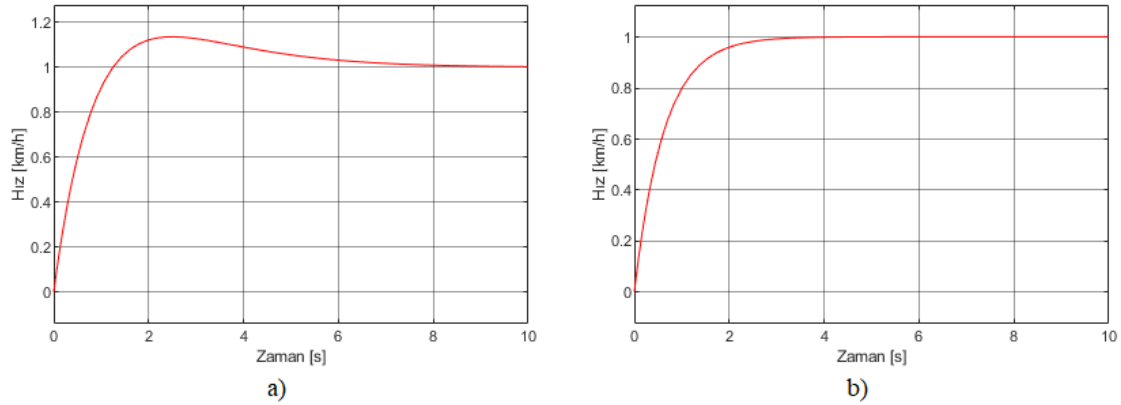
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (1)$$

PI kontrolcülü kapalı çevrim sistemin blok diyagramı Şekil 5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Entegre edilen PI kontrolcülü kontrol sisteminin blok diyagramı

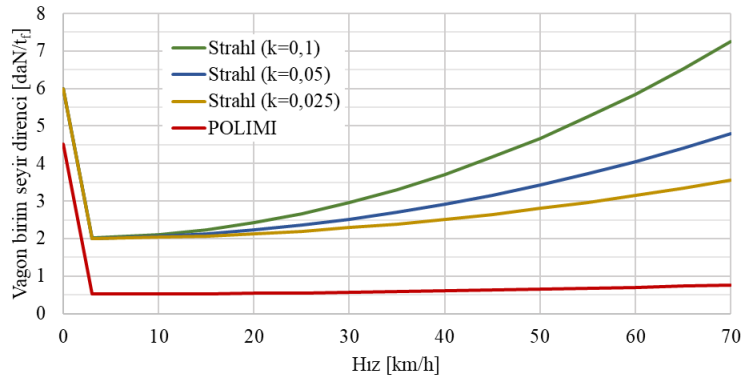
Kutup yerleştirme yöntemi ile bulunan K_p ve K_I değerleri için sistemin birim basamak cevabı Şekil 6. (a)'da gösterilmiş olup %2 kriterinde oturma zamanı $6,8 \text{ s}$, maksimum aşma %14 ve kalıcı rejim hatası %0'dır. Bu değerler üzerinden, 300 kN/s kuvvet değişim tahdidine itibar edilerek yapılan ayarlama neticesi Şekil 6. (b)'de gösterilen birim basamak cevabında %2 kriterinde oturma zamanı $2,4 \text{ s}$, maksimum aşma %0 ve kalıcı rejim hatası %0'dır.



Şekil 6. Sistemin birim basamak cevabı a) Kutup yerleştirme ile ilk değerler b) Ayarlama neticesi

2.5. Mukayese parametreleri

Ülkemize en uygun vagon seyir direnci formülünün tespit edilmesi için yapılan deneysel bir çalışmada deney verileri ile en uyumlu formülasyonun POLIMI regresyon metodu [34] olduğu görülmektedir [35]. Ülkemiz otoritelerince uzun yıllardır tercih edilen formülasyon ise $k=0,05$ için Strahl formülüdür [36]. Tasarlanan kontrolcünün vagon seyir direncinin asgari ve azami değerlerindeki başarısının mukayese edilmesi için POLIMI ve $k=0,1$ için Strahl formülleri ile seyir simülasyonları yapılmış olup hem bu formüller hem de Strahl formülünde farklı vagon özelliklerine bağlı “k” değerinin tesiri (demeraj direnci ilave edilerek) Şekil 7.’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Strahl ve POLIMI formülleri ile vagon birim seyir dirençleri

Rgns tipi vagonun dingil yataklamasında rulmanlı yataklar kullanılmaktadır. Strahl formülü aslen kaymalı yataklar ve $k=0,1$ değeri boş vagonlar içindir [36]. Gerçek tren işletmeciliğinde karşılaşılan tekerlek ve yatak arızaları ile meteorolojik hadiseler gibi seyir direncini artıran faktörler bu parametreye intibak edilerek, tasarlanan kontrolcünün gerçek sistemdeki başarısının tahmini amaçlanmıştır.

Tasarlanan kontrolcünün, kütle faktörünün asgari ve azami değerlerindeki başarısının mukayese edilmesi için; her ne kadar dolu katarlar için 0,06 kütle faktörü değeri verilse [22] ve modern cer mekaniği hesaplamalarında da sıkça buna uygun olarak hakiki kütlelerin %6 ve civarında artırıldığı görülse de gerçek tren işletmeciliğinde karşılaşılan tonaj hataları bu parametreye intibak edilerek kontrolcünün gerçek sistemdeki başarısının tahmini adına kütle faktörünün 0 ve 0,30 değerleri ile seyir simülasyonları yapılmıştır.

Seyir direnci ve kütle faktörünün asgari ve azami değerli durumları için kısaca “asgari direnç” ve “azami direnç” ifadeleri kullanılacaktır.

2.6. Seyirden seçilen safhalar

Trenin seyirinden iki safha seçilmiştir. İlk safha, livre hızının istasyon giriş-çıkışlarından müstakilen hattı caride değişmesi sebebiyle farklı rejim hızlarını ihtiva eden Irmak-Yahşihan arasında trenin seyri; ikinci safha, güzergahın devamı olan Yahşihan-Kırıkkale arasında trenin seyridir. Safhalar seçilirken kesintisiz kumanda için nötr bölgelerden imtina edilmiştir. 23256 numaralı blok yük treninin seyir cetveli Şekil 8.’de gösterilmiştir.

İSTASYONLAR	Azami Hız	Asgari Müddet	Tabii Müddet
Irmak	30	1	2
Km.080+200	50		
Km.083+800	60		
Yahşihan	55	19	20

a)

İSTASYONLAR	Azami Hız	Asgari Müddet	Tabii Müddet
Yahşihan	55	19	20
Km.086+200	55		
Km.091+400	70		
Kırıkkale	55	6	8

b)

Şekil 8. 23256 trenin seyir cetvelinden ilgili kısımlar: a) Irmak-Yahşihan b) Yahşihan-Kırıkkale

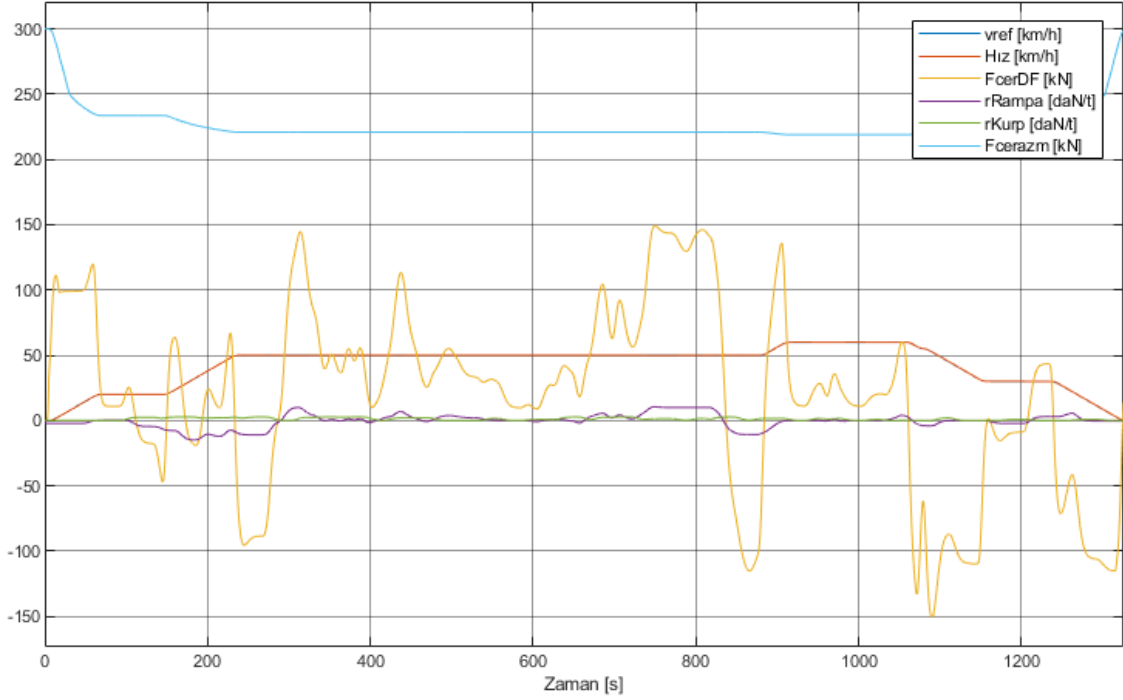
Trenin mevcut seyir cetveli, anavan vaziyetteki DE 22000 tipi dizel lokomotif teminatında Kalecik’ten Irmak’a gelen trene alt-üst manevrası yapılması halinde lokomotif anarya vaziyete düşeceği için trenin kalkış sonrası Irmak kuşak hattında Yahşihan cihetine tevcihi için çizilmiştir. Bu çalışmada ise vagon dizisinin homojen olmasından istifade edilerek Irmak’ta dizi torna edilmeden, dizel lokomotif diziden kesilip dizinin diğer ucuna bağlanan elektrikli lokomotif teminatında Yahşihan cihetine devam edilmesi amaçlanmıştır. Gerçek işletmecilik açısından yeni tren teşkilatında mevzuata muvafık bir husus bulunmamakta, personelce ilgili modele trenin terkinin ters sırayla tekrar işlenmesi ve basit fren tecrübesi yapılması gerekmektedir. Her iki safhada trenin çıkışından; tüm istasyon giriş ve çıkışlarında makaslardan sapmalı geçilen, açık sinyallerden ilerleyerek mücavire varışına kadarki seyri simüle edilmiştir.

Referans hız değişim konumları belirlenirken livre hızlarına ilaveten gerçek işletmeciliğin simülasyonu adına diğer hız kısıtlarına da riayet edilmiştir. Mevzuata uygun olarak bu hat kesiminde sapmalı geçişlerde azami 30 km/h hız ile seyredilmiştir. Tüm yaklaşma ve koruma sinyallerinde sarı bildiriden geçildiği için ATS (Otomatik Tren Durdurma) sisteminin şartı olarak 20 s içinde hız 65 km/h’in altına düşürülmüştür. Bu noktada “Initial Automation” seviyesindeki işletmeciliğe örnek teşkil eden bir husustur ki 10 s içinde ATS Sistem Kontrol Birimi’ndeki “Sistem Uyarı Onay” anahtarına halen makinist tarafından basılmaktadır. Giriş sinyallerinde sarı üzeri sarı ya da sarı üzeri yeşil bildiriden geçildiği için sinyalden 300 m önceki 40 km/h hız tahdit yolu boyu magnetine varmadan hız 40 km/h’in altına düşürülmüştür. Halihazırda Irmak gar sahası boyunca km 70+450’ye kadar azami 20 km/h tekayyüdata ve Kırıkkale batı giriş evvelindeki km 91+450 – km 91+650 arası azami 30 km/h tekayyüdata da itibar edilmiştir.

3. Bulgular

Trenin Irmak-Yahşihan ve Yahşihan-Kırıkkale arası asgari ve azami direnç durumları için yapılan seyir simülasyonlarında referans hız (lejantta “vref”) [km/h], hız (lejantta “Hız”) [km/h], kontrol sinyali (lejantta “FcerDF”) [kN], birim rampa direnci (lejantta “rRampa”) [daN/t_r], birim kurp direnci (lejantta “rKurp”) [daN/t_r] ve azami cer kuvveti (lejantta “Fcerazm”) [kN] parametrelerinin zamana [s] bağlı değişim grafikleri verilmiştir.

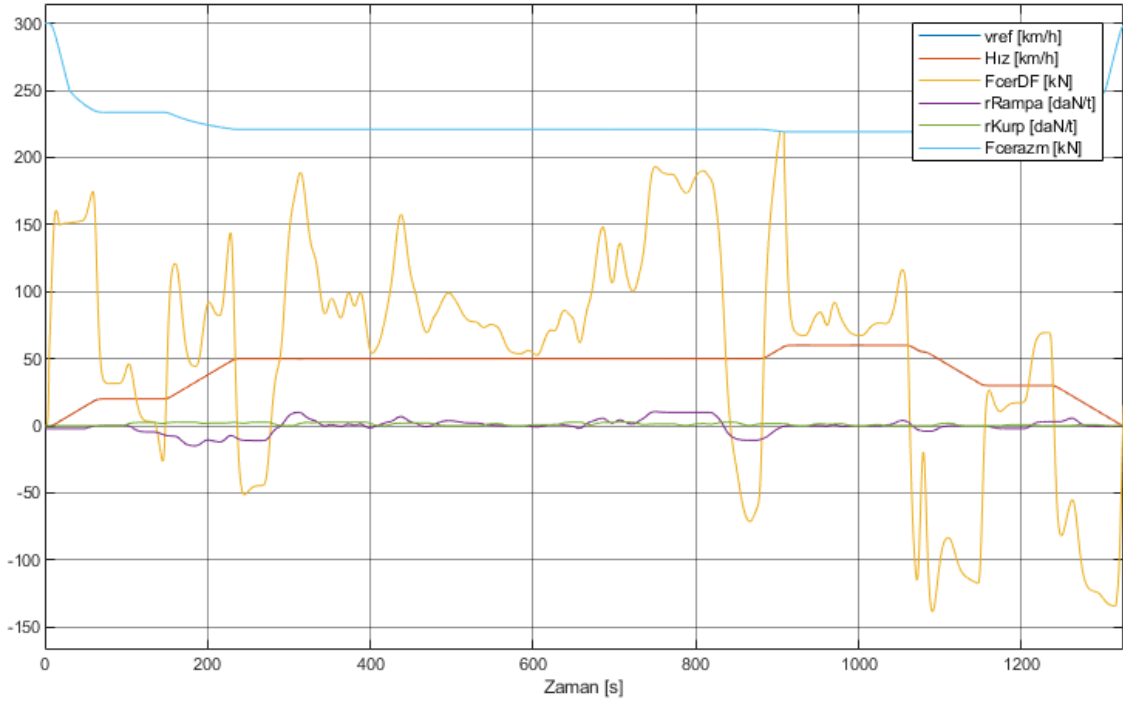
Irmak-Yahşihan, asgari direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 9.’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Irmak-Yahşihan, asgari direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 9.'da görülen simülasyon boyunca referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiş ve seyir süresi 1325 s'dir.

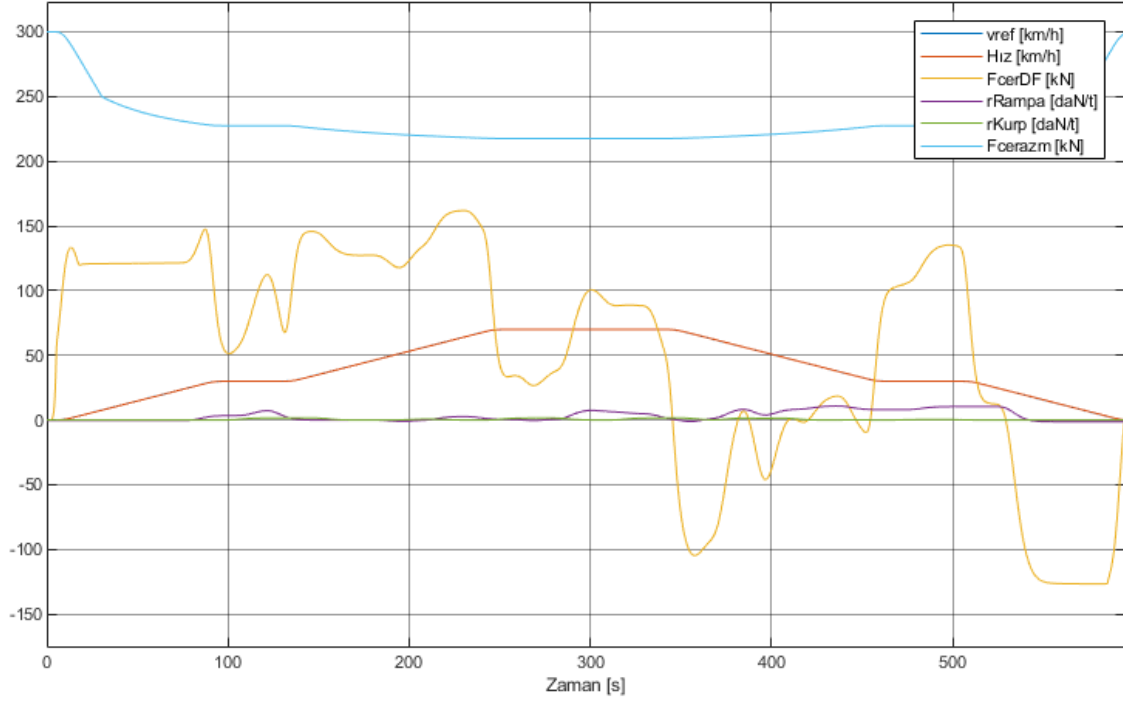
Irmak-Yahşihan, azami direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 10.'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Irmak-Yahşihan, azami direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 10.'da görülen simülasyon boyunca referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiş ve seyir süresi yine 1325 s'dir. İlk duruma kıyasla harekete karşı gelen kuvvetlerin şiddetlerindeki farka rağmen aynı seyir süresi temin edilmiştir.

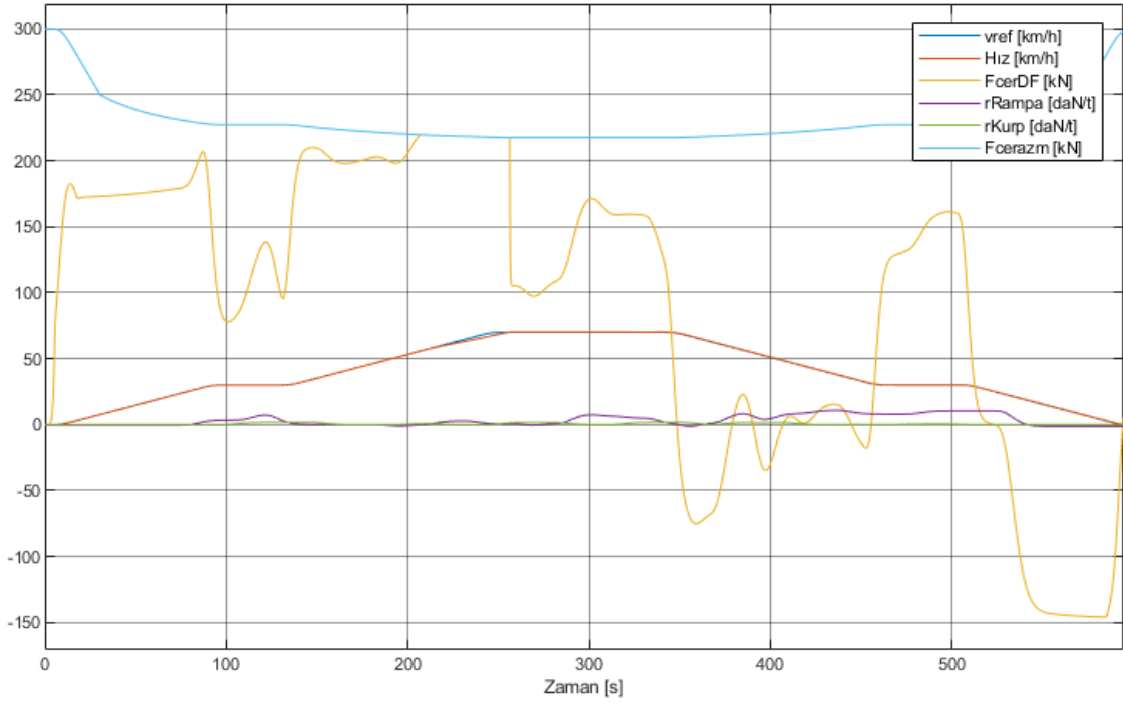
Yahşihan-Kırıkkale, asgari direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 11.'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Yahşihan-Kırıkkale, asgari direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 11.'de görülen simülasyon boyunca referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiş ve seyir süresi 594 s'dir.

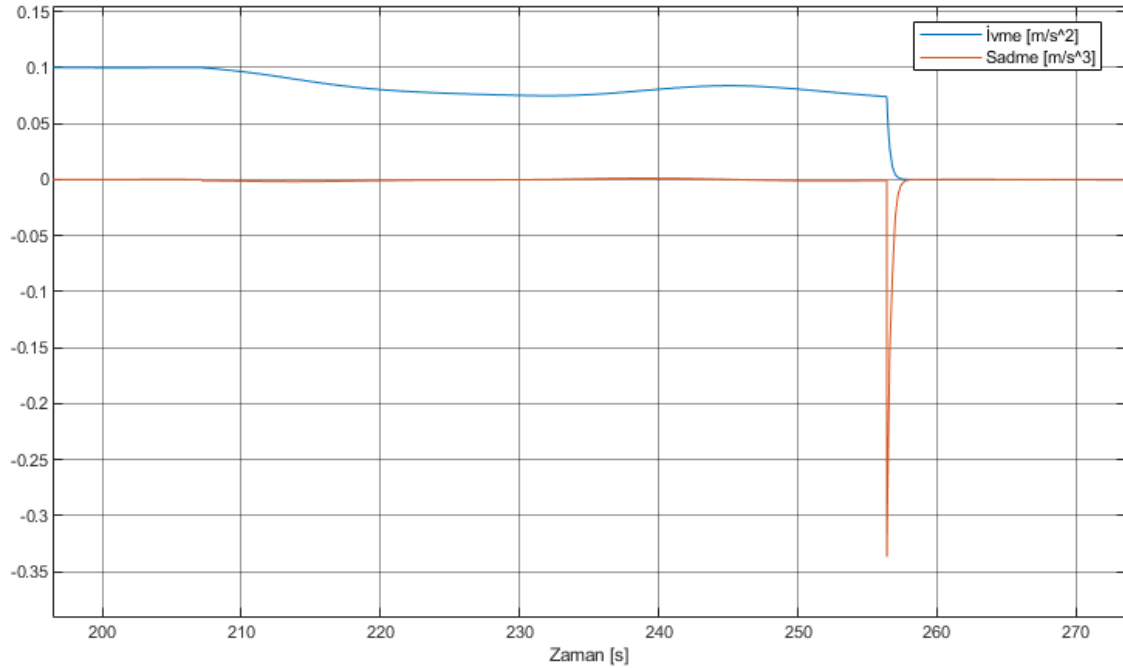
Yahşihan-Kırıkkale, azami direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 12.'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Yahşihan-Kırıkkale, azami direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 12.'deki simülasyonda kontrol sinyalinin azami cer kuvveti ile sınırlandırıldığı süreç haricinde referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiştir. Kuvvet sınırlı süreçte, referans hızın peyderpey 2,5 km/h'e kadar altına düşülmesini müteakip referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile tekrar yakalanmıştır. 50 s süren kuvvet sınırlı süreçte hafif hız kaybının yeterince hızlı geçici rejim cevabı ile telafi edilmesi ile kayıp yaşanmamış olup seyir süresi 596 s'dir.

Kontrol sinyalinin azami cer kuvveti ile sınırlandırıldığı süreçte ivmenin [m/s^2] ve sadmenin [m/s^3] zamana [s] bağlı değişimi Şekil 13.'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Yahşihan-Kırıkkale, azami direnç durumundaki kuvvet sınırlı süreçte ivme ve sadme

Şekil 13.'te görüldüğü üzere, 206. saniyeden sonra kontrol sinyali sınırlanmaya, nihayetinde referans hızdan uzaklaşmaya başlanmaktadır. Bu süreçte daha çok yola bağlı dirençlerin (rampa ve kurp) tesiriyle ivme hafif değişerek, sabit değere oturmuş olan referans hızda da haliyle yaklaşılmaktadır. 256. saniyede referans hız yakalandığı için kontrol sinyali süratle takriben 110 kN azalarak sistemde $-0,34 \text{ m/s}^3$ değerinde sadmeye sebep olmaktadır. DC cer motorlu lokomotiflerde şöntleme ve transisyon anlarında benzer kuvvet değişimleri meydana geldiğinden bu sadmenin ciddi problem teşkil etmeyeceği mülahaza olunmuştur.

4. Sonuç

Modern bir elektrikli anahat lokomotifinde cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılması için PI kontrolcü tasarlanmış ve tren seyir simülasyonu için MATLAB Simulink ortamında oluşturulan dinamik sistem modeline entegre edilmiştir. Halihazırda işletilen bir yük treninin seyrinden seçilen iki safhada, seyir direnci ve kütle faktörünün farklı değerleri için kapalı çevrim simülasyonlar yapılarak sistem davranışı ve kontrolcünün başarısı incelenmiştir.

Hızlı geçici rejim cevabı, %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası kriterleri için yapılan kontrolcü tasarımının modele entegrasyonu neticesi; simüle edilen her iki safhada da seyir direncinin ve kütle faktörünün asgari ve azami durumlarında yolun aynı sürede katedildiği, yani harekete karşı gelen kuvvetlerin şiddetlerindeki farklı değerler için kontrolcünün başarılı olduğu görülmüştür.

Kontrol sinyalinin lokomotif tasarımından kaynaklı azami kuvvet ile sınırlanması sebebiyle referans hızdan uzaklaştığında, kontrolcü tasarımında riayet edilen performans kriterleri sayesinde sistem yeterince hızlı bir geçici rejim cevabı ile kısa müddette referans hızı geri yakalamaktadır.

Tasarlanan kontrolcünün gerçek sisteme entegrasyonu halinde, tren idaresinin esası olan hız kontrolünün kısmen otomatikleşmesi suretiyle henüz dünya tarihinde da çok az örneği bulunan, açık demiryolu şebekesindeki katarlarda tren makinistliğinin otomasyonu için ülkemiz demiryollarında önemli bir merhale katedilecektir.

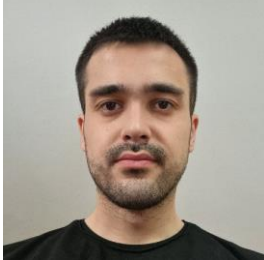
Kaynakça

- [1] E. Günindi, T. Efil, and H. Ülker, "Lokomotif ve vagonlardan müteşekkil bir trenin dinamik modellenmesi ve açık çevrim simülasyonu," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 171–183, Jul. 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1324847.
- [2] R. C. Ramírez, I. Adin, J. Goya, U. Alvarado, A. Brazalez, and J. Mendizabal, "Freight train in the age of self-driving vehicles. A taxonomy review," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 9750–9762, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144602.
- [3] Progress Rail, *Talos™ Train Automation*. (Nov. 22, 2019). Accessed: Oct. 11, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wB6VC1JldU>
- [4] Wabtec Corporation, *Wabtec's Trip Optimizer™*. (Aug. 26, 2020). Accessed: Oct. 11, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=kCwajO3dMGs>
- [5] Alstom, "SNCF and its partners run the first semi-autonomous train of the national railway network," [Online]. Available: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/12/sncf-and-its-partners-run-first-semi-autonomous-train-national-railway> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [6] SNCF, "Driverless trains: On track for a rail revolution," [Online]. Available: <https://www.sncf.com/en/innovation-development/innovation-research/driverless-trains-to-run-in-2023> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [7] TCDD, "Kapasite Yönetim Dairesi Görevleri," [Online]. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/kapasite-yonetim-dairesi-gorevleri> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [8] TCDD, "Enerji yönetimi ve iklim değişikliği eylem planı 2023-2025," T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, Nov. 28, 2022. Accessed: Oct. 11, 2023. [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/eylemplani/eylemplani.pdf>

- [9] *Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts*, IEC 62290-1, 2014.
- [10] L. Cantone, T. Durand, A. Ottati, G. Russo, and R. Tione, “The digital automatic coupler (DAC): an effective way to sustainably increase the efficiency of freight transport in Europe,” *Sustainability*, vol. 14, no. 23, pp. 15671, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142315671.
- [11] A. M. Rilo Cañas, T. Rozynek, and W. Sawczuk, “Test train with digital automatic couplers DAC in Poland,” *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*, Dec. 2022, doi: 10.53502/RAIL-158487.
- [12] E. Taşkaya, “Fotovoltaik-yakıt hücreli bir hibrit elektrikli aracın modellenmesi ve simülasyonu,” M.S. thesis, Bursa Tech. Univ. Graduate School, Bursa, Türkiye, 2022.
- [13] J. Wang, W. Li, J. Li, Y. Liu, B. Song, and H. Gao, “Modeling a driver’s directional and longitudinal speed control based on racing track features,” *Shock and Vib.*, vol. 2018, Art. no. 7487295, doi: 10.1155/2018/7487295.
- [14] X. Wang, Z. Xiao, M. Chen, P. Sun, Q. Wang, and X. Feng, “Energy-efficient speed profile optimization and sliding mode speed tracking for metros,” *Energies*, vol. 13, no. 22, pp. 6093, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13226093.
- [15] K. D. Kirmayer and S. G. Yurasko, “Automation comments,” The Association of American Railroads, Washington, DC, USA, May 7, 2018. Accessed: Oct. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.aar.org/wp-content/uploads/2018/05/AAR-Automation-comments.pdf>
- [16] TCDD, “2024 Şebeke Bildirimi,” T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, Version 8.1, 2023. Accessed: Oct. 11, 2023. [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/sebekebildirimi/2024/2024sebekebildirimi801.pdf>
- [17] *Standard designation of axle arrangement on locomotives and multiple-unit sets*, UIC Code 650, 1983.
- [18] *Definition of the rated output of electric locomotives and motive power units*, UIC Code 614, 1990.
- [19] H. A. Marta and K. D. Mels, “Wheel-rail adhesion,” *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 91, no. 3, pp. 839–846, Aug. 1969, doi: 10.1115/1.3591704.
- [20] A. E. Müller, “Adhesion and wheel slip,” *The Brown Boveri Review*, vol. 38, no. 7–8, Jul./Aug. 1951.
- [21] W. Zhang, J. Chen, X. Wu, and X. Jin, “Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig,” *Wear*, vol. 253, no. 1–2, pp. 82–88, 2002. doi: 10.1016/S0043-1648(02)00086-8.
- [22] C. Urlu, *Demiryolu araçlarının ileri dinamiği*. Ankara, Türkiye: TCDD Yayınları, 1999.
- [23] E. W. Curtius and A. Kniffler, “Neue erkenntnisse über die haftung zwischen treibrad und schiene,” *Elektrische Bahnen*, vol. 21, no. 9, pp. 201–210, 1950.
- [24] Renfe, “Determinación de cargas máximas y rampas características,” Gerencia de Gestión de Capacidades de la U.N. de Circulación, Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles, Madrid, Spain, Rep. Norma Técnica NT – GGC – 6, May 1, 2001.
- [25] Škoda Transportation a.s., “Cer Eğrileri ve Seyir Simülasyonları TCDD Elektrikli Lokomotifler,” 2011.
- [26] *Specific sub-system requirements (traction, braking, etc.) for EMU/DMU, locomotives and driving coaches (Rolling stock sub-system requirements, requirements for economic purposes, requirements for railway standardisation)*, UIC Code 612-2, 2009.
- [27] *Driver machine interfaces for EMU/DMU, locomotives and driving coaches - Functional and system requirements associated with harmonised driver machine interfaces*, UIC Code 612-0, 2009.
- [28] *Conditions to be observed by the dynamic brake of locomotives and motor coaches so that the extra braking effort produced can be taken into account for the calculation of the braked-weight*, UIC Code 544-2, 1983.
- [29] *Brakes - Disc brakes and their application - General conditions for the approval of brake pads*, UIC Code 541-3, 2010.
- [30] *GT26CW-2 Lokomotif Servis El Kitabı*, 2nd ed., Electro-Motive Division of General Motors Co., La Grange, IL, USA, 2003.
- [31] Ö. Akbayır, “Demiryolu araçlarında enerji verimliliği ve tasarrufu,” in *3. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'16)*, Karabük, Türkiye, Oct. 13–15, 2016, pp. 457–465.
- [32] Eress - Erex, “Article: NMBS Logistics reduces energy consumption by 25%,” Dec. 21, 2015. [Online]. Available: <https://eress.eu/news/news/article-nmbs-logistics-reduces-energy-consumption-by-25> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [33] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson Educ. Inc., 2017.
- [34] C. Somaschini, D. Rocchi, G. Tomasini, and P. Schito, “Simplified estimation of train resistance parameters: full scale experimental tests and analysis,” in *Proc. 3rd Int. Conf. Railway Tech. Res. Develop. and Maintenance*, Stirlingshire, Scotland, 2016, Paper 58.

- [35] Ö. Akbayır and B. Başeğmez, “Türkiye şartlarına uygun vagon seyir direnci formülünün enerji verimliliği açısından deneysel olarak belirlenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 65–75, Jan. 2021, doi: 10.47072/demiryolu.796392.
- [36] G. Strahl, “Verfahren zur bestimmung der belastungsgrenzen der dampflokomotiven,” *Z. Des. Vereins Dtsch. Ing.*, vol. 57, pp. 251, 1913.

Özgeçmiş



Ege GÜNİNDİ

Bursa Teknik Üniversitesinde makine mühendisliği lisans eğitimine devam etmektedir. İlgi alanına giren araştırma konuları demiryolu cer mekaniği konularıdır.

E-Posta: gunindiege@gmail.com



Hakan ÜLKER

Lisans eğitimini Gaziantep Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde, doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. 2018 yılından bu yana Bursa Teknik Üniversitesinde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: hakan.ulker@btu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ege GÜNİNDİ: Yazma-orijinal taslak hazırlama, Metodoloji, Kaynaklar, Yazılım, Görselleştirme. Hakan ÜLKER: Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Metodoloji, İnceleme, Yazılım, Kaynaklar.