



Kars-Ahılkelek hattı için maksimum tren hamule miktarının istatistiksel yöntemler ile belirlenmesi

Determination of maximum train load amount for Kars-Ahılkelek line with the statistical methods

Muammer TAHTALI^{1*}, Yasin ERTAŞ¹

¹TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.
muammer.tahtali@tubitak.gov.tr, yasin.ertas@tubitak.gov.tr

Geliş Tarihi/Received: 03.10.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 14.03.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 03.02.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.08703
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Son yıllarda, yük taşımacılığı için karayolundan demiryoluna doğru yönelim görülmekte ve bu sebeple yüksek kapasiteli demiryolu hatları tamamlanmaktadır. İçinde bulunduğumuz çağın en büyük krizlerinden olan iklim krizi de bu yönelimin en önemli nedenlerindendir. Bu konuda araştırmacılar çeşitli çalışmalar yapmakta olup yük trenlerinin taşıyabileceği yük (hamule) miktarının artırılması da etkili bir yöntem olarak görülmektedir. Şüphesiz ki yük miktarını arttırmak lokomotif-vagon teknik özellikleri ile birlikte yol şartları, yükleme karakteristiği, frenleme oranları gibi birçok etmene bağlıdır. Bu çalışmada ülkemiz yük taşımacılığında önemli bir noktada olan Kars-Ahılkelek hattı için yük trenlerinin taşıyabileceği maksimum yük miktarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için vagonlar arası boylamsal kuvvetlerin elde edilmesi ve olası tüm araç konfigürasyonları için istatistiksel yöntemler ile sonuca gidilmesi gerekmektedir. Mevcut işletilmiş trenlerin kuplörlerinde oluşan boylamsal kuvvetler UIC grubu tarafından geliştirilmiş bir yazılım ile tespit edilmiştir. Daha sonra bu trenler araç konfigürasyonu açısından istatistiksel olarak analiz edilmiş ve bunlara en yakın sanal trenler oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda yük trenlerinde tren uzunluğunun yükleme miktarına göre daha etkili bir parametre olduğu tespit edilmiş ve tren uzunluğunu kısıtlayarak daha yüksek hamule miktarlarına ulaşılabileceği görülmüştür. Farklı limit değerler için 800 m ve 850 m uzunluğuna kadar olan yük trenlerinde 3100 tona kadar hamule yüklemesinin emniyetli olabileceği ve bunun demiryolu taşımacılığında verimliliği arttırabileceği vurgulanmıştır. Çalışma proje kapsamında elde edilen sonuçların bir çıktısı olup kullanılan değerler gizlilik esasları gereği normalize edilerek verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yük treni, Boylamsal kuvvet, Hamule, İstatistiksel yöntem

Abstract

In recent years, there has been a tendency from road to railway for freight transportation, and for this reason, high-capacity railway lines are being completed. The climate crisis, one of the biggest problems of our age, is one of the most important reason for this trend. Researchers have been doing various studies on this issue, and increasing the amount of load that freight trains can carry is also seen as an effective method. Undoubtedly, increasing the amount of load depends on many factors such as road conditions, loading characteristics, braking rates, as well as locomotive-wagon technical specifications. In this study, it is aimed to determine the maximum amount of load that freight trains can carry for the Kars-Ahılkelek line, which is an important point in our country's freight transportation. For this purpose, it is necessary to obtain the longitudinal forces between wagons and reach a conclusion using statistical methods for all possible vehicle configurations. The longitudinal forces occurring in the couplers of currently operated trains were determined with a software developed by the UIC group. These trains were then analyzed statistically in terms of vehicle configuration and the closest virtual trains were created. As a result of the study, it was determined that the train length was a more effective parameter than the loading amount in freight trains and it was seen that higher freight quantities could be achieved by limiting the train length. For different limit values, it is emphasized that for freight trains up to 800 m and 850 m in length, it can be reliable to load up to 3100 tons of load weight and this can increase the efficiency in rail transportation. This study is an output of the results obtained within the scope of the project and the values used are normalized due to confidentiality principles.

Keywords: Freight train, Longitudinal force, Load, Statistical method

1 Giriş

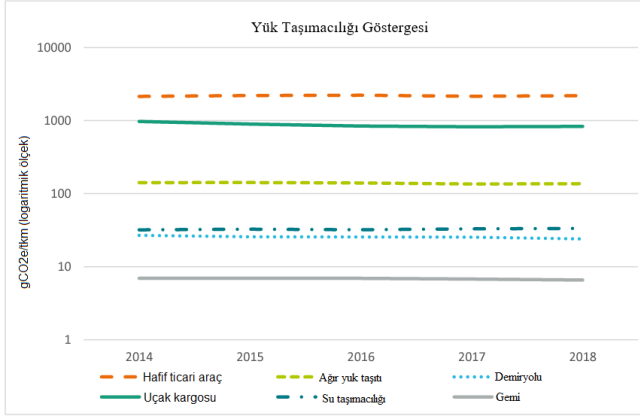
Son yıllarda, yük taşımacılığı için karayolundan demiryoluna doğru yönelim görülmekte ve bu sebeple yüksek kapasiteli demiryolu hatları tamamlanmaktadır. İçinde bulunduğumuz çağın en büyük krizlerinden olan iklim krizi de bu yönelimin en önemli nedenlerinden olmaktadır. Bilim insanları ve araştırmacılar bu etkinin en aza indirilebilmesi için yıllardır çalışmaları aralıksız sürdürmektedir. Krize sebep olan etmenlerden bir tanesi yüksek oranda atmosfere salınan CO₂ gazıdır. Türkiye'de ulaştırmadan kaynaklı CO₂ salınımları azaltılmalı ve ulaştırma bazında demiryolunun karbon emisyon oranı sadece %0.4'tür. Daha yeşil ve temiz bir dünya için ulaştırma alanında demiryolu kullanım oranının artırılması hedeflenmektedir. AB hedeflerinden bir tanesi de karayolu yük taşımacılığının

%30'unu demiryolu veya gemi taşımacılığına aktarmak, 2050 yılı itibarıyla de bu oranı %50 seviyelerine çıkarmaktır. Bu sayede karbon salınımının azaltılması hedeflenmektedir. Şekil 1' de farklı araçlar ile gerçekleştirilen yük taşımacılığının CO₂ salınımı oranları verilmiştir. Görüldüğü gibi demiryolu taşımacılığı, gemi taşımacılığı ile birlikte CO₂ salınımının en az olduğu yük taşımacılığı çeşidi olup bu alana yönelimin daha da artırılması gerekmektedir.

Dünya genelinde CO₂ salınım oranlarının tespiti ve nasıl düşürüleceği üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Amerika Çevre Koruma Ajansı tarafından yapılan araştırmada 1990-2022 yılları arasında yük taşımacılığında CO₂ salınımının %80 oranında karayolu taşımacılığından kaynaklandığı, demiryolunun ise %2 ile en düşük oranlı taşımacılık türü olduğu vurgulanmıştır[2]. Zitricky vd. [3] çalışmalarında karayolu ile demiryolu taşımacılığının avantajlarını

*Yazışılan yazar/Corresponding author

karşılaştırmak ile birlikte uzun mesafeli taşımalarda çevreci oluşu sebebi ile demiryolunun kullanılması gerektiğini vurgulamıştır. Rizet vd. [4] ise çalışmalarında CO₂ salınımını düşürmek için yük taşımacılığında yük faktörü kavramının öneminden bahsetmiştir.



Şekil 1. CO₂ salınım oranları [1].
Figure 1. CO₂ emission rates [1].

Demiryolu yük taşımacılığının kullanım oranını artırmak verimliliği artırmaktan geçmektedir. Verimlilikten bahsetmek istiyorsak da, birinci önceliğimiz hatların en etkili şekilde kullanılmasıdır. Bu etkinlik mevcut demiryolu altyapısında daha yüksek tonajlı trenler çalıştırılarak sağlanabilmektedir. Araç açısından bakıldığında, operasyonel hızı artırmak için vagonlar üzerinde yeni tasarım ve çeşitli modifikasyon çalışmaları sürdürülmektedir. Şekil 2’de Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD)’na ait bir yük treni görülmektedir.

Vagonlar arası kuvvetler, özellikle de tampon kuvvetleri, yük trenlerinde sürüş emniyetine etki eden en önemli faktörlerden biridir. Boylamsal kuvvet olarak da adlandırılan bu kuvvetler ardışık iki araç arasında oluşup, uzunluk, çeki, yük ve hızdan etkilenmektedir. Boylamsal kuvvetlerdeki artış aynı zamanda, hat geometrisine ve manevralara bağlı olarak ortaya çıkan bağıl hareketler neticesinde de oluşmaktadır. Viraj dönme eylemi, araçlar arasında moment ve kuvvetler sonucu kuplör sistemlerinde deformasyona sebep olmaktadır. Çekiş ve frenleme manevraları sonucu oluşan kuvvetler kuplör mekanizması tarafına doğru iletilmektedir. Bahsi geçen sebepler neticesinde kuplör kuvvetlerinde belirgin bir artış olmakta ve bu da kuplörlere zarar verip aracın raydan çıkmasına sebebiyet vermektedir [5].

Son dönemde birçok araştırmacı yük trenlerinde verimliliği artırma konusunda çalışmalar yapmaktadırlar. Bir çalışmada Avrupa’da yaklaşık 500 m uzunluğundaki yük trenleri kuplör ve tamponlarında, daha yüksek boylamsal kuvvet değerlerinin fren manevralarında ortaya çıktığı kanıtlanmıştır [6]. Bu durum özellikle makas bölgelerinde aracın seyir emniyetini etkilemektedir. Farklı iki çalışmada ise kuplör kısımlarında oluşan yalpa momentinin raydan çıkmaya olan etkisi vurgulanmıştır [7],[8]. Cole vd. [9] çalışmasında, kuplörlerden gelen yanıl kuvvetlerin vagon kararlılığını olumsuz etkilediğini görmüştür. Zhan vd. [10] kuplör bağlantısındaki sürtünmenin lokomotifin sürüş emniyetini etkilediğini ve bunun da tren setinin kararlılığına etkisi olduğunu ispatlamıştır. Rakshit vd. [11] çalışmasında, bir vagon tipinin farklı tipteki kuplörler ile kombinasyonunu 300 m’lik bir S karp üzerinde simüle edip, kuplörlerin boylamsal kuvvetler üzerindeki etkisini göstermiştir. Benzer şekilde Bosso vd. [12], kuplör sistemlerindeki direnç kuvvet denklemlerinin belirli

uzunluktaki trenlerde dinamik etkisini incelemiştir. Uzunluğu fazla olan yük trenlerinde karşılaşılan etkilerden bir tanesi de fren komutunun arka vagonlara geç ulaşmasıdır. Bu kapsamda, 4 farklı uzunluktaki trenler ile 3 farklı hız senaryosunda bilgisayar ortamında benzetim yapılarak tren uzunluğunun frenleme durumundaki boylamsal kuvvete etkisi incelenmiştir [13]. Bir başka önemli faktör de trenlerdeki yük dağılımıdır. Gialleonardo vd. [14] çalışmasında basit bir model oluşturularak, 500 adet farklı şekilde yüklenmiş tren setlerinin acil fren esnasında maksimum tampon kuvvetleri tahmin edilmeye çalışılmış; daha sonrasında her bir tren setindeki yük dağılımı optimizasyon algoritması kullanılarak değiştirilip oluşan maksimum tampon kuvvetleri düşürülmüştür. Uygun yük dağılımının incelendiği yöntemlerden biri yük trenlerinde kullanılan Kriging modelidir [15]. Kriging modeli kullanılarak fren performansı optimize edilir ve ardışık araçlar arasındaki boylamsal kuvvet düşürülmeye çalışılır. Burada fren kuvvetlerini optimize etmek için yük dağılımında değişiklikler yapılmaktadır. Dotoli vd.[16] çalışmalarında demiryolu taşımacılığında yük trenlerinin yükleme planlaması optimizasyonunun önemini vurgulamışlardır.



Şekil 2. TCDD yük taşımacılığı.
Figure 2. TCDD freight transport.

Mevcut yapılmış çalışmalar belli özel durumlara odaklanmış olsa da olası tüm tren konfigürasyonları ve yük dağılımları için operasyonel emniyetin belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Olası tüm konfigürasyonlar için bu tip bir sonuca ulaşmak ancak istatistiksel modellerle gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada mevcut altyapı kapasitesini en verimli şekilde kullanarak, azami tren hamulesini belirlemeye yönelik çalışmalar istatistiksel olarak elde edilmiş tüm tren konfigürasyonları ve yük dağılımları için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, iki lokomotifli trenler için üst hamule sınırı belirlenmiş ve TCDD tarafından kullanılan kanca/koşum takımları için tren hamulesinin üst sınırı incelenmiştir. Hazırlanan her bir tren uzunluğu aralığı için hedeflenen hamule değerine ulaşabilmek için on bin adet tren konfigürasyonu TrainDy yazılımında çalıştırılmıştır. Tren konfigürasyonları elde edilirken UIC (International Union of Railways) 421 [17] standardında var olan yöntem tren uzunluğu parametresi eklenerek yeni bir algoritma türetilerek kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda tren konfigürasyonları tek tip vagonlar üzerinde yapılırken, bu çalışmada bir tren setinde farklı tipte vagonlar da yer almıştır.

Bu çalışmada öncelikle dinamik bir manevra sırasında olası bir tren konfigürasyonunda oluşan maksimum boylamsal kuvvetin nasıl belirleneceği aktarılmıştır. Daha sonra olası tüm tren konfigürasyonlarının istatistiksel yöntem ile nasıl belirlendiği gösterilmiştir. Bu belirleme esnasında tren uzunluğunun da algoritmaya eklendiği yeni bir yöntem önerilmiştir. Son bölümde ise mevcut işletilen yük trenlerinin Traindy yazılımı

ile analizleri yapılmış ve buradan bir limit değeri elde edilmiştir. Mevcut işletilen yük trenlerinin konfigürasyonlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucu oluşan sanal trenlerin sonuçları da yazılımda elde edilerek bu belirlenen limit değeri ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilmiştir.

2 Metot

Yük trenlerinde hamule miktarı ile bağlantılı çalışmalarda vagonlar arası boylamsal kuvvetlerin tespiti önemli bir yer edinmektedir. Bu çalışmada, boylamsal kuvvetlerin hesaplanmasında UIC grubu tarafından geliştirilen TrainDy yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım demiryolu şirketlerinin ihtiyacı olan boylamsal tren dinamiği hesaplamasında kullanılmaktadır. Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) yayınlamış olduğu UIC 421 standardında yük trenlerindeki hamule miktarlarının belirlenmesine ilişkin istatistiksel bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca yine bu birlik içerisinde bir grup bu problemin çözümüne yönelik analiz ve testler yapmış, elde edilen veriler ile Traindy isimli boylamsal kuvvetler üzerinden sonuç elde eden yazılımı geliştirmişlerdir. Hamule miktarı artırımlarına yönelik uluslararası çalışmalar da bu standart ve yazılım kullanılarak yapılmaktadır. Program içerisine ilk olarak analizi gerçekleştirilecek tren setindeki vagonların ve lokomotiflerin verilerinin girilmesi gerekmektedir. Bu veriler; uzunluk, ağırlık, aks sayısı, tampon tipi, kuplör tipi, fren borusu uzunluğu ve çapı, kontrol valfi ve makinist fren valfi (MFV) gibi teknik özelliklerdir. Kuplör ve tamponlar farklı özelliklerde üretildiğinden vagon ve lokomotifte takılı olan ekipman özellikleri ayrıntılı şekilde programa aktarılmalıdır. Tüm veriler ve senaryolar girildikten sonra sonuç grafiği olarak kuplörlerde oluşan boylamsal kuvvet değerleri verilmektedir. Kuplörlerde oluşan boylamsal kuvvetlerin tespitine yönelik olarak Cantone [18] çalışmasında UIC planları çerçevesinde geliştirilmiş olan TrainDy yazılımı sonuçlarının test trenlerindeki boylamsal kuvvet sonuçları ile benzerliğini göstermiş ve yazılımı doğrulamıştır. Böylece boylamsal kuvvetlerin tespitinde yazılımın güvenilirliği ispatlanmıştır.

Boylamsal kuvvet tespitinde teorik hesaplamalar temel olarak pnömatik ve boylamsal dinamik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Pnömatik kısım içerisinde fren borularındaki ve silindirlerindeki basınç değerleri ile fren kuvvetleri hesaplanırken, dinamik kısım içerisinde vagonlar arası etkileşimden kaynaklı kuplör ve tamponlarda oluşan kuvvetler hesaplanmaktadır.

Fren hesaplamalarında fren borularının modellenmesi bir boyutlu (1B) Navier-Stokes denklemleri ile yapılmaktadır. Modellemesi yapılırken iki araç arasındaki boru çapının değişimi dikkate alınacak şekilde fren boruları dairesel olarak modellenir. Denklem (1) içerisindeki formüller sırasıyla kütle korunumu, momentum dengesi ve enerji korunumunu içermektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho}{S} \frac{\partial (uS)}{\partial x} &= \frac{\dot{m}}{Sdx} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\tau}{D} + \frac{u}{\rho} \frac{\dot{m}}{Sdx} \\ \frac{\partial q}{\partial t} + u \left(\frac{\partial q}{\partial x} + r \frac{\partial T}{\partial x} \right) + r \frac{T}{\rho S} \frac{\partial (\rho u S)}{\partial x} &= \\ 4 \frac{\Phi_T}{\rho D} - \frac{\tau u}{D} - \frac{\dot{m}}{Sdx} \frac{1}{\rho} \left[(c_v + r) T_1 + \frac{1}{2} u_1^2 - q \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Denklem 1 ρ , u ve q 'nin üçüncü derece Taylor serisi açılımı ile numerik olarak çözülmektedir. Yapı 1 m'lik ağ örgüsü ile

ayrıklaştırılarak çözülür. Fren sistemleri içerisinde yer alan makinist fren valfi (MFV), hızlandırma odası (AC) ve fren kaliperi (BC) parametreleri sabit olarak tanımlanmaktadır. MFV içerisindeki yapı karmaşık olduğundan, yapı nozüller ile basitleştirilir. MFV genel olarak üç kademedir oluşmaktadır: acil fren, servis freni ve hava boşaltımdır. Modelleme için her bir kademe nozül çapı ile tanımlanır. AC ise kontrol valfleri içerisinde yer almakta olup, hacimleri ve fren borusu ile arasındaki nozül çapı ile modellenir. Fren silindirlerinin modellenmesi kontrol valflerinin transfer fonksiyonu olarak tanımlanır.

Dinamik hesaplamalar cer, fren ve kuplör olarak üçe ayrılmaktadır. Cer kuvveti işletilen lokomotifin kuvvet-hız eğrisi girilerek doğrudan elde edilir. Bu değerler belirli noktalar üzerinden giriş yapılarak tanımlanmasının yanı sıra zamana bağlı olarak da tanımlanabilir. Çok yönlü bir model elde etmek içinse kuvvet eğrisi hem ivmelenme de hem de yavaşlamada eklenir

Araçlar üzerinde çoğunlukla mekanik disk fren kullanılır. Bunlara ek olarak otomatik-süreklilik cihazı ve boş yük cihazı adı verilen cihazlar kullanılarak, aracın frenlenen ağırlık yüzdesi sürekli olarak değiştirilir veya boş ve yüklü durumuna bağlı olarak fren yüzdesinde süreksizlik oluşturulur. Fren kuvvetlerinin hesabı UIC 544-1 standardına göre yapılmaktadır [19]. Pabuç frenlerde frenleme kuvveti hız ve basınca bağlı olarak değişkenlik gösterirken disk frenlerde sadece hıza bağlı değişiklik göstermektedir. Ayrıca program içerisinde farklı tipte sürünme yasaları bulunmaktadır. Bunlar arasında Karwazki yasası deneysel çalışmalarla iyi eşleşme derecesine sahiptir.

$$\mu(V, F_k) = 0.6 \left(\frac{(16/g)F_k + 100V}{(80/g)F_k + 100V} \right) \left(\frac{V + 100}{5V + 100} \right) \quad (2)$$

Denklem (2) 'de pabuç frenler için gerekli denklem verilmiştir. Disk frenlerde sabit olarak 0.35 değeri kullanılmakta olup, yukarıda da belirtildiği üzere hıza bağlı denklemi yazılabilir. Hıza bağlı değişim miktarı 30 km/h hız ve üzerinde değişiklik göstermediğinden bu değer çoğunlukla sabit alınır.

Araca etkiyen dinamik kuvvetlerden bir diğeri direnç kuvveti olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$F_{Res} = (1.1 + 0.00047v^2)gm_v \cos \phi \quad (3)$$

Tamponlar ve kuplörler ise karakteristik kuvvet-strok eğrisine göre modellenir. Strok boyuna denk gelen yüklü ve ayrılma kuvvet değerleri tabloya aktarılıp tampon ve kuplörün grafiksel tanımı yapılır. Eğer yükleme ve ayrılma belirtilen ekipman veri sayfasından verilen değerlerden farklıysa Denklem (4)'teki formülasyon uygulanır. Burada belirtilen $c(v_{rel})$, yükleme ve boşaltma eğrisini birleştiren bir üçüncü derece polinom olarak hesaplanmaktadır.

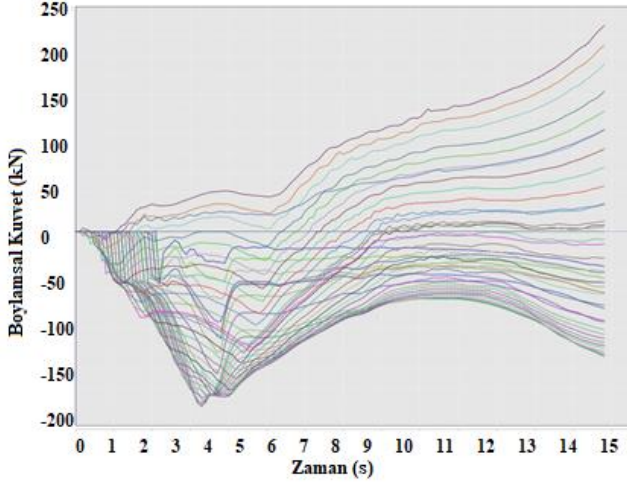
$$F_{Long}(x_{rel}, v_{rel}) = c(v_{rel})F_{unload}(x_{rel}) + [1 - c(v_{rel})]F_{load}(x_{rel}) \quad (4)$$

Her bir araç için tüm kuvvetler belirlendikten sonra aşağıdaki lineer olmayan hareket denklemi çözülmelidir:

$$\alpha = M^{-1}x[F_{Long}(x_{rel}, v_{rel}) + F_{Brake}(t, v) + F_{Loco}(t, v) + F_{Res}(v)] \quad (5)$$

Oluşturulan denklemler bir benzetim modeli üzerine aktarıldıktan sonra bu denklemde belirtilen ivme değeri kullanılarak ayrık zamansal bir model üzerinde dinamik

davranış ortaya konur. Bir raylı taşıt için dinamik davranışı gösterecek farklı modelleme yöntemleri bulunmaktadır [20]. Manevra sırasında oluşan maksimum kuvvetler zamana bağlı olarak model üzerinden analiz ile belirlenir. Şekil 3' te bir acil frenleme sonucunda vagonlar arası kuplörlerde oluşan boylamsal kuvvetlerin Traindy yazılımı ile elde edilmiş grafikleri görülmektedir. Her bir grafik bir vagonun kuplör kısmında oluşan boylamsal kuvvetleri temsil etmektedir.



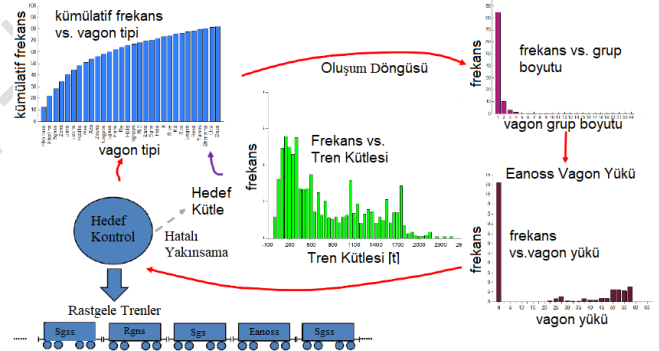
Şekil 3. Boylamsal kuvvet sonuçları.
Figure 3. Longitudinal force results.

2.1 Verilerin toplanması ve istatistiksel modelin oluşturulması

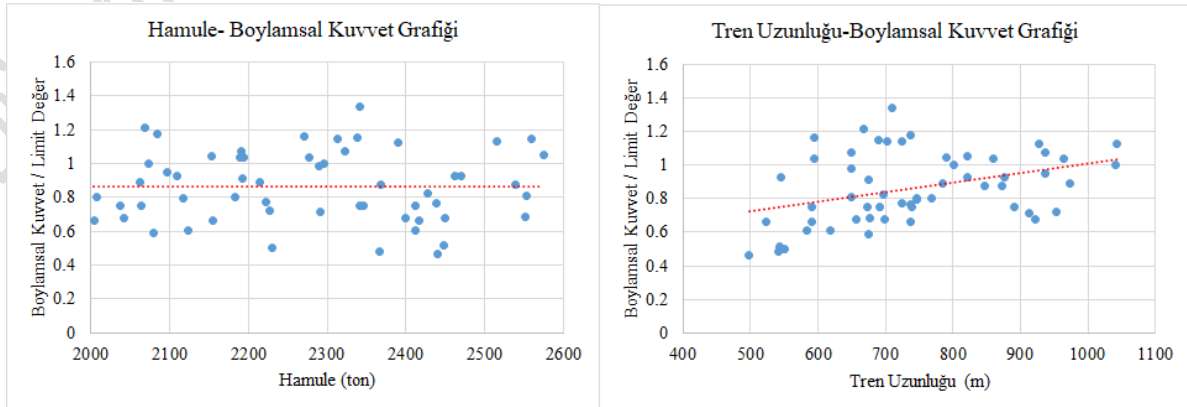
UIC 421 standardı yük trenlerinin değişen teknik özellikler veya hamule miktarları sonucunda emniyetli bir şekilde işletilebilirliğini tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu kapsamda standart, mevcut işletilmiş emniyetli trenler ile değişen koşullarda yeni işletilecek trenlerin karşılaştırmasını yapmaktadır. Mevcut işletilen emniyetli trenlere referans sistem, yeni işletilecek trenlere de yeni sistem denilmektedir. Yeni sistem trenleri mevcut işletilen trenlerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucu oluşturulan sanal trenlerdir. Referans sistem ile yeni sistem arasında emniyetli tren konfigürasyonları olasılıklarının karşılaştırılması standardın temel yöntemidir. Bu kapsamda mevcut işletilen trenlerin kuplörlerinde oluşan boylamsal kuvvetler ile oluşturulan farklı konfigürasyonlardaki sanal trenlerin sonuçları karşılaştırılır. Sanal tren grubunun sonuçları mevcut işletilen trenlerden daha düşük çıktığında yeni sisteme de emniyetli denilmektedir.

UIC 421'e göre sanal trenlerin oluşturulması için Şekil 4' te belirtilen adımlar izlenmelidir. Bir sanal tren oluşturmak için öncelikle kullanılan hat üzerindeki lokomotifler ve vagonlar incelenmelidir. Bu çalışmada, farklı vagon tiplerinin yoğun olarak kullanıldığı Kars-Ahılkelek hattı incelenmiştir. Çalışma için TCDD tarafından hatta işletilen trenlerin bilgilerini içeren THBF (Tren Hareket Bilgi Formu) dokümanları temin edilmiştir. Formlar bir yıllık süre boyunca her ay TCDD tarafından iletilmiştir. Toplanan formlar her gün bir gidiş ve bir dönüş yönü olmak üzere aylık 60 farklı yük treni verisi sunmuştur. Formlar trenlerin brüt/net ağırlığı, tren uzunluğu, fren yüzdesi, lokomotif tipi ve sayısı, vagon tipi ve sayısı, vagon net/brüt ağırlık gibi bilgileri içermektedir. Bu sayede sanal trenler oluşturmak için gerekli olan veriler toplanmıştır. Bir yıl boyunca toplanan bu verilerden, brüt 2000 ton üzerindeki çift lokomotifli tren setleri çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Sanal trenleri oluşturmak için aşağıda belirtilen tüm işlemler THBF dokümanları taranarak elde edilmiştir.

Sanal trenler oluşturulmadan önce yapılması gereken ilk işlem vagon tiplerini ve yükleme miktarlarını belirlemektir. Şekil 4'te bu işlem gösterilmektedir. Toplanan tren setlerindeki her bir vagon tipinin adedi toplam vagon sayısına bölünüp, vagonların tekrar oranı hesaplanır. Benzer bir işlem vagon tiplerinin yükleme sınıflandırılmasında da kullanılır; her bir vagon tipinde tekrar eden kütlelerin oranı belirlenir. Bu işlemler sonucunda sanal trenlerde kullanılacak vagon tipi ve yükleme miktarı istatistiksel olarak atanmış olur.



Şekil 4. Sanal trenlerin oluşturulma prensibi [21].
Figure 4. Principle of creation of virtual trains [21].

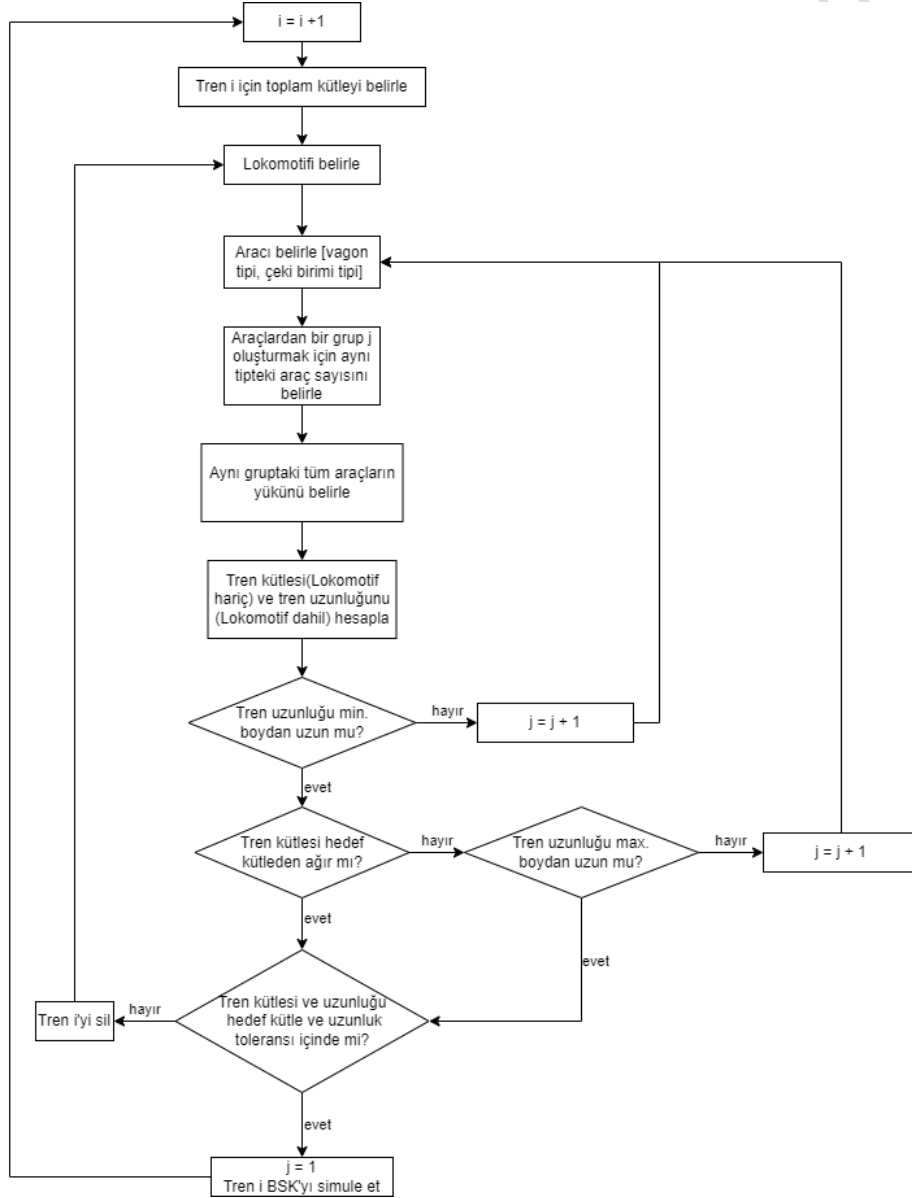


Şekil 5. Hamule miktarı ve tren uzunluğunun boylamsal kuvvete etkisi.
Figure 5. Effect of load and train length on longitudinal force.

2.2 Algoritma ile rastgele tren konfigürasyonlarının oluşturulması

Rastgele tren konfigürasyonları oluşturulurken öncelikle hedeflenen sanal trenin ağırlığı, uzunluğu ve tolerans miktarı belirlenir. Çalışmada mevcut işletilen trenlerdeki hamule miktarını arttırmak amaçlı olarak ağırlık aralığı 2500 ton-3100 ton olarak belirlenmiştir. Mevcut trenlerin boylamsal kuvvet değerlerinin Traindy yazılımı ile bulunmasının ardından Şekil 5'de verilen hamule miktarının ve tren uzunluğunun boylamsal kuvvete etkisinin görüldüğü grafikler çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tren uzunluğunun boylamsal kuvvet üzerinde çok daha büyük etkisi olduğu görülmüş ve tren uzunluğu baz alınarak sanal tren konfigürasyonları oluşturulmuştur. Bu sebeple 500 m uzunluktan başlanarak 100 m aralıklar ile tren uzunlukları arttırılacak şekilde konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Sanal tren oluşturmak için UIC 421 standardında verilen algoritmaya tren uzunluğunun da eklendiği Şekil 6'da ki algoritma kullanılmıştır.

Şekil 6'da bir sonraki adım gösterilmektedir. Çalışmalar çift lokomotifli olduğu için ilk iki sırada lokomotifler bulunur. Sonrasında verilerden hesaplanan istatistiksel oranların dağılımına göre vagon tipi ve yükleme miktarı atamaları yapılır. Tren uzunluğu ve hamule miktarı belirlenmiş limitler arasında kalmış ise bu tren setinin TrainDy programında analizi yapılarak boylamsal sıkıştırma kuvveti incelenir. Çalışma kapsamında yaklaşık 10000 sanal tren seti oluşturulup, hat üzerindeki maksimum boylamsal sıkıştırma kuvveti hesaplanmıştır. Sanal tren oluşturmak için gerçekleştirilmiş tüm bu işlemler ve Traindy sonuçlarının elde edilmesi Matlab yazılımı ile oluşturulmuş bir kodlama ile otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Yazılıma Şekil 6'da verilen algoritmaya uygun bir şekilde sanal tren ataması yapmasını imkân verecek kodlar yazılmış ve tren uzunluğu, tren kütlesi gibi sınır koşullarına uygun sonuçlar çıkarması için gerekli deneme döngüleri oluşturması sağlanmıştır.



Şekil 6. Sanal tren oluşturmak için uygulanan algoritma [21].

Figure 6. Algorithm for creating a virtual train[21].

Sanal trenlerin oluşturulması 500-600 m, 600-700m, 700-800m aralıklarında, uzunluk ile artacak şekilde 2500 ile 3100 ton arası yüklemeye göre oluşturulmuştur. Uygun kriterleri sağlayan trenleri bulduğunda bu trenleri Traindy yazılımında otomatik bir şekilde çalıştırmasını sağlayacak kodlama da yazılmıştır. Oluşturulan senaryolar gözlemlenip sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut işletilmiş tren setlerindeki maksimum değer (tolere edilebilir boylamsal kuvvet) ile karşılaştırılmıştır.

2.3 Tolere edilebilir boylamsal kuvvetin tespit edilmesi

Tolere edilebilir boylamsal kuvvet için iki farklı değer kullanılmıştır. Bunlardan ilki önceki bölümlerde de belirtildiği gibi mevcut işletilmiş trenlerin analiz sonuçlarından elde edilen maksimum değerdir. Çalışmada genel olarak güvenli kısımda kalabilmek adına bu değer göz önünde bulundurulmuştur.

Kullanılan diğer boylamsal kuvvet değeri ise UIC 530-2 [22] standardından gelmektedir. Bu standartta belirttiği üzere, en düşük boylamsal sıkıştırma kuvveti boji vagonlar için 240 kN olarak kullanılabilir. UIC 421 standardı bölüm B.3.4.2'ye göre ise 240 kN değeri mevcut işletme koşulları göz önünde bulundurularak artırılabilir. Bu doğrultuda aşağıdaki işlemler yapılarak limit değer tespit edilmiştir:

- 240 kN değeri en keskin kurp olan 150 m için kullanılmaktadır. 190-300 m arasındaki kurplarda limit değere iki boji vagonlar için 2kN/m olmak suretiyle artırma yapılır. Çalışmanın yapıldığı hatta en keskin kurp değeri 190 m'den büyük olduğu için gerekli eklemeler yapılır.
- Bir diğer artırma yöntemi ise tampon yarıçaplarının 1500 mm'den 2750 mm'ye çıkarılmasıyla olmaktadır. TCDD Taşımacılık'ın kullanmış olduğu vagonlar 2750 mm'lik tamponlarla donatılmış olduğundan limit değere standartta belirtilen miktarda ekleme yapılır.

Nihai olarak, kabul edilebilir boylamsal sıkıştırma kuvveti aşağıda belirtildiği gibi hesaplanmaktadır:

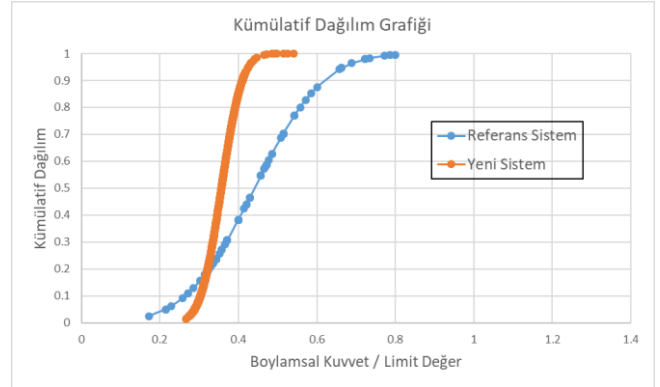
$$\begin{aligned} \text{LimitDeğer} &= 240 \text{ kN} + 2(\text{EnKeskinKurp} - 150) \text{ kN} \\ &+ \begin{cases} 40 & (\text{Kurp} = 150 \text{ m}) \\ 30 & (\text{Kurp} = 190 \text{ m}) \\ 15 & (\text{Kurp} = 300 \text{ m}) \end{cases} \text{ kN} \end{aligned} \quad (6)$$

3 Bulgular

Yapılmış olan çalışmada referans sistem olarak, 2000 ton yüklem kapasitesinden fazla olan ve 500 m-800 m uzunluğundaki çift lokomotif ile çalışan tren setleri esas alınmıştır. Bu şartları sağlayan tren setleri THBF dokümanları içerisinde seçilip, TrainDy programında benzetim çalışması yapılmıştır. Hesaplanan boylamsal sıkıştırma kuvvetlerinin kümülatif dağılımı ile oluşturulan sanal trenler karşılaştırılmıştır.

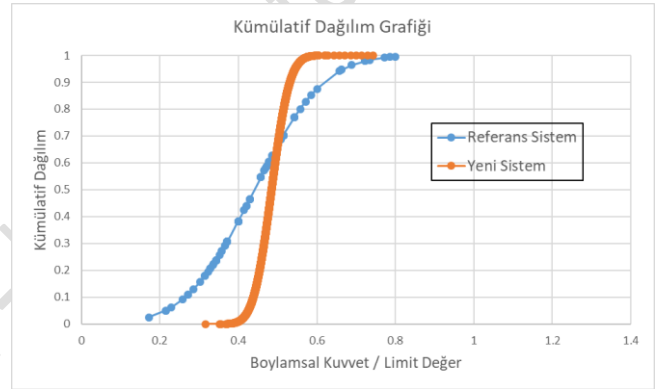
Referans sistem olarak tanımlanan işletilmiş gerçek tren setlerindeki en yüksek boylamsal sıkıştırma kuvvetinin hesaplanan (Denklem 6) tolere edilebilir boylamsal limit değerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple ilk olarak Şekil 7,8 ve 9'da görüleceği gibi 500 m-600 m ile başlanılarak, sırasıyla 600 m-700 m ve 700 m-800 m uzunluk aralığında oluşturulan sanal tren setleri referans sistem sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hamule değeri olarak 3100 tona kadar çıkmıştır. Hesaplanan sonuçlara göre 800 m uzunluğuna kadar olan sanal trenlerde oluşan boylamsal

sıkıştırma kuvvetinin referans sistemde hesaplanan boylamsal sıkıştırma kuvvetinden küçük olduğu tespit edilmiştir.



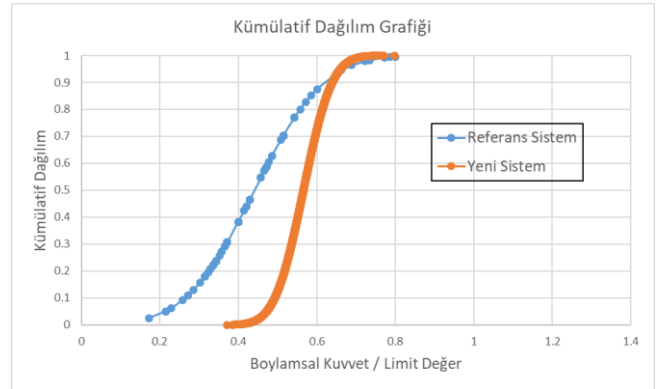
Şekil 7. 500 m-600 m Sonuçları.

Figure 7. Results of 500 m-600 m.



Şekil 8. 600 m-700 m Sonuçları.

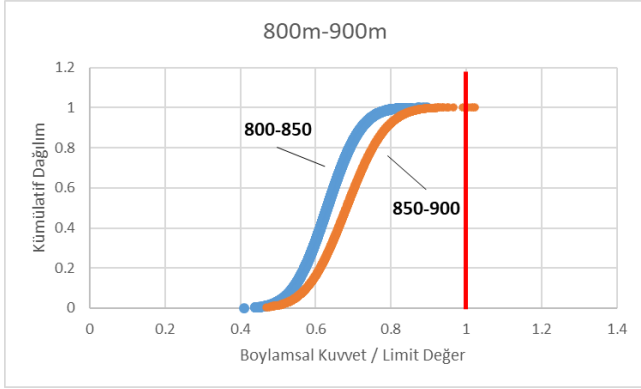
Figure 8. Results of 600 m-700 m.



Şekil 9. 700 m-800 m Sonuçları.

Figure 9. Results of 700 m-800 m.

Çalışma, UIC 421 standardından elde edilen limit değer için devam ettirilmiştir. Şekil 10'da 800 m-900 m için oluşturulan sanal trenlerin dağılımı gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre 850 m uzunluğa kadar belirlenen hamule değeri güvenli sınırlar içerisinde kalmaktadır.



Şekil 10. 800m-900 m Sonuçları.

Figure 10. Results of 800 m-900 m.

Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak elde edilmiş 10000 adet sanal trenler ile oluşturulduğu için istatistiksel olarak anlamlı bir yer elde etmektedir. İşletilmiş trenler referans alınarak oluşturulan sanal trenler, işletilebilecek tüm olasılıkları kapsayabileceği düşünülmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada demiryolu taşımacılığında önemli bir yer tutan yük trenlerindeki taşınan yük (hamule) miktarının belirlenmesi konusu incelenmiştir. Bu konuda UIC 421 standardında bahsedildiği gibi mevcut işletilmiş tren setleri ile yeni işletilecek sanal tren setlerinin boylamsal kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Standartın önerdiği algoritma yerine boylamsal kuvvet sonuçlarında en önemli etken olan tren uzunluğunun yer aldığı yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma ile işletilmiş trenlerin istatistiksel değerlendirmeleri sonucu elde edilen yeni sistem trenleri belli uzunluk aralıklarında oluşturulmuş ve sonuçları işletilmiş trenlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Boylamsal kuvvet sonuçları elde edilirken Traindy yazılımı kullanılmıştır.

Kars-Ahılkelek hattı için yapılan çalışmalarda iki farklı limit değere göre incelemeler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak işletilmiş tren setlerinden elde edilen limit değeri kullanıldığında, 800 m uzunluktaki tren setlerinin 3100 tona kadar olan hamule miktarının emniyetli sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. UIC 421 standardından gelen Denklem 6' da hesaplanan limit değeri kullanıldığında ise aynı hamule miktarı için 850 m uzunluğa kadar tren setlerinin emniyetli sınırlar içerisinde olduğu saptanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, ülkemiz demiryolu taşımacılığında verimliliği arttırmak adına taşınabilecek hamule miktarını arttırmak için teknik bir yöntem sunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler ile Kars-Ahılkelek hattında mevcut hamule miktarlarının üstüne çıkılabileceği kabul görmüş standartların önerdiği yöntemler ile gösterilmiştir. Yük taşımacılığında araç seyir emniyeti açısından tren uzunluğunun hamule miktarından daha etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmaya ek olarak gelecekte yazılım ile elde edilen boylamsal kuvvet sonuçlarının gerçek testler ile doğrulanması amaçlanabilir. Aynı zamanda farklı tren hatları için de benzer çalışmalar tekrarlanabilir. Tren uzunluğunun ön planda olduğu çalışmalar literatürde kısıtlı sayıda olup bu parametre önemli olduğundan vagon yüklemelerinin daha verimli yapılabilmesi için sektörel olarak da çalışmalar yapılabilir. Bu konuda ulusal ve uluslararası açıdan akademik çalışma eksikliği var olup ülkemizde yük taşımacılığında verimliliğin artırılması ile ilgili akademik çalışmaların sayısı artırılabilir.

5 Conclusions

In this study, the subject of determining the amount of load carried in freight trains, which has an important place in railway transportation, is examined. As mentioned in the UIC 421 standard, the longitudinal force values of existing operated train sets and new virtual train sets were compared. Instead of the algorithm suggested by the standard, a new algorithm is proposed in which the train length, which is the most important factor in the longitudinal force results, is included. With this algorithm, new system trains were created as a result of statistical evaluations of operated trains at certain length intervals and their results were compared with the results of operated trains. Traindy software was used to obtain the longitudinal force results.

In the studies carried out for the Kars-Ahılkelek line, investigations were carried out according to two different limit values. Firstly, when the limit value obtained from the operated train sets was used, it was seen that the load amount up to 3100 tons of 800 m long train sets remained within the safe limits. When the limit value calculated in Equation 6 from the UIC 421 standard was used, it was found that train sets up to 850 m in length were within reliable limits for the same load amount. The results of this study aim to provide a technical method to increase the amount of load that can be transported in order to increase the efficiency in railway transportation in our country. With the values obtained as a result of this study, it has been shown with the methods recommended by the accepted standards that the current load quantities can be exceeded on the Kars-Ahılkelek line. It has been seen that train length is more effective than the load quantity in terms of vehicle running safety in freight transportation. In addition to this study, it may be aimed to verify the longitudinal force results obtained with the software with real tests in the future. At the same time, similar studies can be repeated for different freight lines. There are a limited number of studies in the literature where train length is at the forefront, and since this parameter is important, industrial studies can be carried out to make wagon loading more efficient. There is a lack of national and international academic studies on this subject and the number of academic studies on improving efficiency in freight transportation in our country can be increased.

6 Yazar Katkı Beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 fikrin oluşması, modelin kurulması, analizlerin yapılması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Yazar 2 literatür taraması, istatistiksel algoritmanın oluşturulması ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur"

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır"

8 Kaynaklar

- [1] Fraunhofer-Institute for Systems and Innovation Research ISI. "Methodology for GHG Efficiency of Transport Modes". Final Report. Karlsruhe, Germany. November 2020.
- [2] United States Environmental Protection Agency " U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2022" May 2024.

[3] Zitricky V., Nedeliakova E., Valla M. "The position of road and rail transport in terms of carbon neutrality" *Transportation Research Procedia*, 74, 210-216, 2023.

[4] Rizet C., Cruz C., Mbacke M. "Reducing freight transport CO₂ emissions by increasing the load factor". *Social and Behavioral Sciences*, 48, 184-195, 2012.

[5] Cheli F, Di Gialleonardo E, Melzi S. "Freight trains dynamics: effect of payload and braking power distribution on coupling forces". *Vehicle System Dynamics*, 55(4), 464-479, 2017.

[6] Belforte P, Cheli F, Diana G, ve Melzi S. "Numerical and experimental approach for the evaluation of severe longitudinal dynamics of heavy freight trains". *Vehicle System Dynamics*, 46(1), 937-955, 2008.

[7] Cheli F, Melzi S, Di Gialleonardo E. "Numerical analysis of curving performances of low flatcar wagons". *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 18(2), 195-213, 2011.

[8] Di Gialleonardo E, Cazzulani G, Melzi S, Braghin F. "The effect of train composition on the running safety of low-flatcar wagons in braking and curving manoeuvres". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(6), 666-677, 2017.

[9] Cole C, McClanachan M, Spiriyagin M, Quan Sun Y. "Wagon instability in long trains". *Vehicle System Dynamics*, 50(1), 303-317, 2012.

[10] Zhang Z, Li G, Chu G, Zu H, Kennedy D. "Compressed stability analysis of the coupler and buffer system of heavy-haul locomotives". *Vehicle System Dynamics*, 53(6), 833-855, 2015.

[11] Rakshit U, Malakar B, Roy B. K. "Effect of different types of wagon connectors on longitudinal forces of a heavy freight train". *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2), 2-21, 2018.

[12] Bosso N, Magelli M, Rossi B. L, Zampieri N. "The influence of resistant force equations and coupling system on long train dynamics simulations". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 236(1), 35-47, 2022.

[13] Serajian R, Mohammadi S, Nasr A. "Influence of train length on in-train longitudinal forces during brake application". *Vehicle System Dynamics*, 57(2), 192-206, 2019.

[14] Di Gialleonardo E, Melzi S, Trevisi D. "Freight trains for intermodal transportation: optimisation of payload distribution for reducing longitudinal coupling forces". *Vehicle System Dynamics*, c. 0, 61(10), 2532-2550, Eyl. 2023.

[15] Arcidiacono G, Berni R, Cantone L, Placidoli P. "Kriging models for payload distribution optimisation of freight trains". *International Journal of Production Research*, c. 55, sy 17, ss. 4878-4890, Eyl. 2017,

[16] Dotoli M., Epicoco N., Falagario M., Palma D., Turchiano B. "A train load planning optimization model for intermodal freight transport terminals: a case study". *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2013.

[17] International Union of Railways. "UIC 421: Rules for the consist and braking of international freight trains." January 2012.

[18] Cantone L. "TrainDy: The New Union Internationale Des Chemins de Fer Software for Freight Train Interoperability". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(1), 57-70, 2011.

[19] International Union of Railways. "UIC 544-1: Brakes - Braking Power." June 2013.

[20] Bayraktar M, Tahtalı M. "Raylı taşıtlarda dinamik hareketler ve titreşim azaltma yöntemlerinin incelenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(1), 9-20, 2020.

[21] Cantone L, Durand T, Karbstein R, A. Ottati. "Methodology to admit new freight trains to international traffic according to the UIC". *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 11(6), 41-51, 2020.

[22] International Union of Railways. "UIC 530-2: Wagons - Running Safety." December 2011

Ek Tablo 1

Appendix Table 1

Ek Tablo 1. Simgeler.

Appendix Table 1. Symbols.

Simge	Tanım
f	Frekans
ρ	Yoğunluk
u	Eksenel hız
q	Özgül enerji
T	Sıcaklık
x	Apsis
S	Kesit alan
D	Çap
T	Sıcaklık
g	Yerçekimi ivmesi
m_v	Araç kütlesi (ton)
μ	Sürtünme
V	Araç hızı (km/h)
v	Araç hızı (m/s)
F_k	Fren bloğu ve teker arasındaki normal kuvvet
F_{Res}	Toplam direnç kuvveti
x_{rel}	Bağıl yer değiştirme
F_{Long}	Boylamsal kuvvet
F_{load}	Yüklü boylamsal kuvvet
t	Zaman
ϕ	Yol eğimi
D	Çap
τ	Kesme Kuvveti
c_v	Sabit hacimdeki özgül ısı
$\dot{m}$	Giren/Çıkan kütle akısı
r	Gaz sabiti
ϕ_T	Değiştirilmiş termal akı
F_{unload}	Yüksüz boylamsal kuvvet
F_{Brake}	Fren kuvveti
F_{Loco}	Çeki kuvvetleri
M	Kütle matrisi
a	İvme
v_{rel}	Bağıl hız