



## Raylı Sistemlerde Kullanılan Cer Kancasının Topoloji Optimizasyonuna Uygunluğunun Değerlendirilmesi

Cevat ÖZARPA<sup>1</sup>, Hüseyin BOTSALI<sup>1</sup>, Bahadır Furkan KINACI\*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Karabük, Türkiye  
<sup>2</sup> Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği, Karabük, Türkiye

\*bahadirfurkan@outlook.com

(Alınış/Received: 29.10.2021, Kabul/Accepted: 29.11.2021, Yayımlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Yük ve yolcu taşımacılığı için raylı sistem taşıtları, çeken ve çekilen araçların birleştirilerek setler halinde kullanılması ile oluşturulmaktadır. Birden fazla vagon ve lokomotifin birleştirilmesi koşum takımları ismi verilen, cer ve fren kuvvetlerini ileten ekipmanlar ile gerçekleştirilir. Sıklıkla birden fazla taşıt birleştirilirken kanca kavramalı, yarı otomatik ve tam otomatik koşum takımları kullanılmaktadır. Koşum takımları taşıtlar arası statik ve dinamik yüklerle maruz kalması ve özellikle çeken ve çekilen araçlar arasında hareketin direkt aktarılması için en kritik ekipman olması açısından özel incelenmesi gereken ekipmanlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Son yıllarda eklemeli imalat benzeri üretim metotlarında gerçekleşen gelişmeler, geleneksel metotlarla üretilemeyecek geometrik ve yapısal farklılığa sahip malzemelerin üretilmesine olanak sağlamıştır. Geometrik ve yapısal olarak üretim kolaylığı malzeme üretiminde ağırlık, hacim, doğal frekans, yer değiştirme ve reaksiyon kuvvetlerine göre en uygun tasarımların yapılmasına imkân tanımaktadır. Belirtilen en uygun geometrik ve yapısal tasarımlar topoloji optimizasyonu gibi yapısal optimizasyon çözümleri kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Çalışmamızda kanca kavramalı koşum takımında yüklerle direkt maruz kalan cer kancası üzerinde yoğunluk tabanlı yöntemden üretilmiş olan simp yöntemi kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ekipmanın optimizasyon öncesi statik analizleri yapıp, yeterli iterasyon kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve ortaya çıkan grafik model tersine mühendislik yapılarak katı modele çevrilmiştir. Uygulama sonucu 100 kN kuvvete maruz kaldığında yeterli dayanımı sağlamaya devam eden yeni katı modelin %8,33 oranında ağırlık kazanımı sağladığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışma ile cer kancası tertibatının topoloji optimizasyonu yapılmasına uygun olma durumu değerlendirilecektir.

**Anahtar kelimeler:** Cer Tertibatı, Sonlu Elemanlar Analizi, Topoloji Optimizasyonu, Yoğunluk Tabanlı Yöntem, Simp Yöntemi.

### Evaluation of the Suitability of Draw Hook Used in Rail Systems for Topology Optimization

**Abstract:** Rail system vehicles for freight and passenger transportation are formed by combining tractive and hauled stocks and using them in sets. When combining more than one vehicle, hook clutch, semi-automatic, and fully automatic coupling are used. Coupling emerges as equipment that needs to be specially examined in terms of being exposed to static and dynamic loads between vehicles and being the most critical equipment for the direct transfer of movement, especially between towed and towed vehicles. In recent years, developments in production methods like additive manufacturing have enabled the production of materials with geometric and structural differences that cannot be produced with traditional methods. Geometrically and structurally, the ease of production allows the most appropriate designs to be made in the material produced according to weight, volume, natural frequency, displacement, and reaction forces. The specified optimal geometric and structural designs can be realized by using structural optimization solutions such as topology optimization. In our study, topology optimization was carried out using the simp method, which was produced from the density-based method, on the drawbar hook, which is directly exposed to loads in the hook coupling. Before the optimization, static analysis of the equipment were made, topology optimization was carried out using sufficient iterations, and the resulting graphic model was converted into a solid model by reverse engineering. As a result of the application, it has been determined that 8.33% weight gain can be achieved in the new solid model, which continues to provide sufficient

Atıf için/Cite as: C. Özarpa, H. Botsalı, B.F. Kınacı, "Raylı sistemlerde kullanılan cer kancasının topoloji optimizasyonuna uygunluğunun değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 1-12, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1016373

strength when exposed to a force of 100 kN. With the study, the suitability of the traction hook assembly for topology optimization will be evaluated.

**Keywords:** Draw Hook, Finite Element Analysis, Topology Optimization, Density Based Method, Simp Method

## 1. Giriş

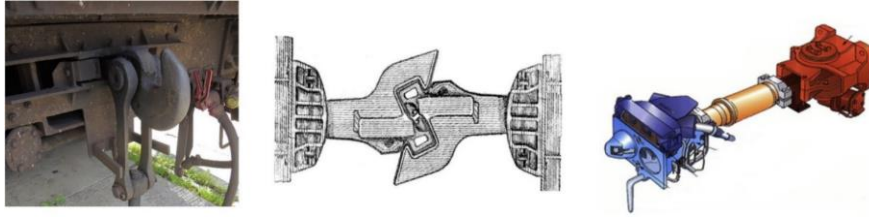
Raylı sistem taşımacılığı gelişen endüstrileşme, ulaşım metotları içerisindeki güvenliği ve taşıma maliyeti etkinliği benzeri sebepler ile gelişmekte olan bir taşıma metodudur. Raylı sistem taşıtları yük ve yolcu taşımak amacı ile birleşik setler ve birden fazla çeken, çekilen taşıtlardan oluşan setler olarak hizmet vermektedir. Diziler halinde çalışmayı sağlaması, cer ve fren kuvvetlerinin taşıtlar arasında iletilmesi için koşum takımları kullanılmaktadır. Gerekli bağlantıların sağlanabilmesi için, sıklıkla kanca kavramalı, yarı otomatik ve tam otomatik koşum takımları kullanılmaktadır. Tüm benzer yapılarda olduğu gibi raylı sistem yapılarında da mekanik sistem elemanları yoğun şekilde yorulma ve aşınmalara maruz kalabilmektedir. Mekanik yorulma ömürleri ve aşınma dayanımları dışında üretim yöntemi kriterleri, malzeme miktarları sistemlerin tasarımlarında önemli parametreler olarak karşımıza çıkabilmektedir. Genellikle tasarlanan sistemlerin en düşük hacimle en iyi dayanımı sağlaması beklenir. Belirtilen şartların sağlanması için üretim safhasına geçmeden önce sonlu elemanlar analizi yazılımları aracılığıyla yapısal mukavemet testleri ve topoloji optimizasyonu benzeri uygulamalar yapılmaktadır. Yapısal optimizasyon çalışmalarından olan topoloji optimizasyonu ile elde edilen ve geometrik olarak üretimi zor olan modeller eklemeli imalat gibi ileri imalat teknolojileri sayesinde üretilebilmektedir. Topoloji optimizasyonu uygulamaları gerçekleştirildikten sonra incelenen modellerin geometrik, ağırlık, dayanım ve doğal frekans gibi parametrelerinde üretilebilirlik ölçüğünde iyileştirmelerin ortaya çıkması ve bunun neticesinde ilave ortaya çıkan üretim zorluklarının göze alınması gerekmektedir. Topoloji optimizasyonunun uygulanabilmesi için geometrik, ağırlık, dayanım ve doğal frekans gibi iyileştirmelerinin ortaya çıkacak olan üretim zorluklarının göze alınması için yeterli seviyede olması gerekmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde raylı sistem taşıtlarında kullanılan komponentler ile ilgili oldukça az çalışma olduğu, raylı ulaşım ile ilgili yapılan sınırlı çalışmaların ise çoğunlukla taşıt mekanik aksamlarından ziyade demiryolu ve zemini hakkında olduğu görülmüştür. Varandas vd. [1] sonlu elemanlar analizi ile doğrusal olmayan davranışları dikkate alarak demiryolu hatlarının uzun vadeli davranışını incelemiş, Ferdous vd. [2] sonlu elemanlar analizi yardımıyla yenilikçi bir kompozit demiryolu traversi geliştirmiş ve incelemiş, Kaewunruen vd. [3] sonlu elemanlar analizi ile demiryolu raylarının hareketli tren yüklerine dinamik tepkilerini incelemiştir ve Yazdani vd. [4] yüksek hızlı trenlere maruz kalan demiryolu düz beton kemer köprülerini sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir. Taşıt bileşenleri ve mekanik davranışları ile ilgili de birtakım çalışmalar literatürde mevcuttur. Yang vd. [5] demiryolu taşıtlarının çarpışma bölgesini, Srivastava vd. [6] yük treni boji desteğini, Kim vd. [7] ise demiryolu taşıtlarının körüklü bağlantılarını sonlu elemanlar analizleri ve topoloji optimizasyonu kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca literatürde yapılan genel araştırmada bir modelin yerini topolojik olarak optimize edilmiş yenisinin alması için en az %20 oranında kütleli kazanım sağlanmasının tasarım ve üretim akışının değişmesi, yeni üretim yöntemleri uygulanması gibi ortaya çıkacak zaman ve maliyet giderlerini karşılamak için gerekli görüldüğü gözlenmiştir [8]–[10]. Bu oran, optimizasyonun uygulanacağı malzemeye, geometriye ve kullanım alanına göre daha küçük değerlerde kabul edilebilir. Bu durumun yalnızca sorunsuz işleyen yapılarda kütleli kazanım hedeflenen çalışmaları kapsadığı, dayanımı arttırmak veya doğal frekansı iyileştirmek gibi hedeflerle gerçekleştirilen çalışmalarda kütleli kazanım aranmayabileceği unutulmamalıdır. Yapılan çalışmada raylı sistem araçlarında kullanılan kanca kavramalı cer takımı, standartlardaki verilere göre malzeme özellikleri ve yükler altında analiz edilip topoloji optimizasyonu uygulaması

gerçekleştirilmiş ve geometrik olarak değişiklik yapılarak üretim yöntemi değişiminin gerekli olup olmadığı tespit edilecektir.

### 1.1. Raylı sistemlerde kullanılan koşum takımları

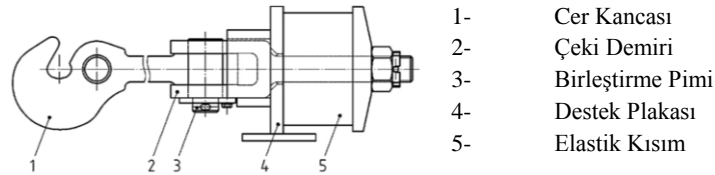
Raylı sistem taşıtları, birleşik taşıtlar ve birden fazla çeken, çekilen araçlardan oluşan setler olarak kullanılmaktadır. Birlikte kullanılan çeken ve çekilen araçlar dizileri tren olarak isimlendirilmektedir. Tren dizisi içerisinde araçların birlikte hareket edebilmesi, cer ve fren kuvvetlerinin aktarılması koşum takımları ile mümkün olmaktadır. Koşum takımları bu görevlerinin yanı sıra, özelliklerine göre taşıtlar arasında çarpışmayı önleyebilmek için tampon görevi, araçlar arası elektriksel bağlantı sağlanması ve hava bağlantıları benzeri görevleri yerine getirmektedir. Raylı sistem setlerinde genellikle kanca kavramalı, yarı otomatik ve tam otomatik koşum takımı olmak üzere 3 ayrı yapıda koşum takımı kullanılmaktadır. Kanca kavramalı koşum takımı en basit yapıda olan taşıtlar arası bağlantı ve ayrılma işlemleri bir personel tarafından gerçekleştirilen koşum takımlarıdır. Yarı otomatik koşum takımı bağlantı işlemi 2 taşıtın birbirine yaklaşması sonucu otomatik olarak ve ayrılma işlemi bir personel tarafından gerçekleştirilen ayrıca taşıtlar arası tampon görevi gören koşum takımlarıdır. Tam otomatik koşum takımlarında ise bağlantı işlemi 2 taşıtın birbirine yaklaşması sonucu otomatik olarak gerçekleşmekte ve ayrılma işlemi de taşıt içerisindeki butonlar ile otomatik olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca tam otomatik koşum takımları araçlar arası tampon görevi, elektriksel ve hava bağlantılarının gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 1’de kanca kavramalı, yarı otomatik ve tam otomatik koşum takımları gösterilmiştir [11]–[13].



Şekil 1. Kanca kavramalı, yarı otomatik ve tam otomatik koşum takımı türleri [11]–[13]

### 1.2. Kanca kavramalı cer takımı

Raylı sistem taşıtlarının birlikte kullanılabilmesi için gerekli olan koşum takımlarından kanca kavramalı cer takımı, yaygın olarak kullanılmaktadır. Kanca kavramalı cer takımı bağlantı ve ayrılma işlemi bir personel tarafından gerçekleştirilen yapıya sahiptir. Şekil 2’de kanca kavramalı cer takımının temel bölümleri gösterilmiştir.



Şekil 2. Temel cer kancası yapısı [11]

Tren hareketleri ile kanca kavramalı cer takımı üzerinde çeşitli kuvvetler birikir. Biriken bu kuvvetler kanca kavramalı cer takımı üzerinde sönmülemeye maruz kalır. Denklem 1’de ortaya çıkan bu sönmülemenin yüzdelik olarak hesaplaması verilmiştir. Sönmüleme miktarı emilen enerjinin depolanan enerjiye oranıdır [11].

$$d\% = \frac{W_a}{W_e} \cdot 100 \% \quad (1)$$

### 1.3. Sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar yöntemi kısmi diferansiyel denklemlerin nümerik çözümü şeklinde tanımlanabilir. Genel mantığı fiziksel sistemlerin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Bu yöntem sayesinde çözüm olabildiğince basite indirgenir hatta çözülmesi imkânsız problemler bile çözülebilir hale getirilir. Bu yöntemde gerçek sistemin varsayımlar ve yaklaşımlar ile basitleştirilmesi esas alındığı için kesin doğru sonuç vaad etmez [14]. Ancak 60 yılı aşkın süredir yapısal mukavemet analizleri için kullanılmakta olan sonlu elemanlar yöntemi geçirdiği teknolojik gelişim ile bugün %98'e kadar doğruluk sağlayabilen yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ciddi oran ile sonlu elemanlar analizleri mühendislik problemlerinin çözümünde ciddi kolaylıklar sağlamakta, prototip üretimini en aza indirmekte ve doğrudan üretime geçebilme hızına büyük katkı yapmaktadır. Günümüzde pek çok paket program içerisinde kullanılabilen sonlu elemanlar analizi ile doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik problemler çözülebilmektedir [15]. Fiziksel sistemler genellikle doğrusal olmayan problemler içermektedir. Benzer şekilde zamandan tamamen bağımsız olması da genellikle mümkün değildir. Ancak sonlu elemanlar analizinin temelinde fiziksel sistemi olabildiğince basitleştirmek yer aldığı için belirli varsayımlar yaparak çoğu sistem doğrusal ve statik olarak kabul edilebilir. Bu durum uygulama adımlarından, çözücü işlemci gereksiniminden ve çözüm süresinden oldukça fazla tasarruf sağlayacak önemli bir basitleştirme [16]. Bir sistemin doğrusal olmayan bir probleme dönüşmesinde en büyük etkenlerden biri plastik şekil değişimine maruz bırakacak kadar büyük deformasyona uğramasıdır. Bu tür durumlarda problemi doğrusal olarak çözmek deformasyon miktarı arttıkça sonucu daha yanlış bir yere götürmektedir. Bu bilgiler ışığında doğrusal olarak çözülmüş bir problemin ancak plastik deformasyonun başladığı noktaya, yani akma dayanımına kadar hesaplamaları doğru şekilde yapabildiği söylenebilir. Burada yapılacak statik varsayımı ise matematiksel formülde zamana bağlı tüm değişkenleri devre dışı bırakacağı için hesaplama süresi ve kolaylığı açısından büyük fayda sağlayacaktır. Bu varsayımda bulunabilmek için kuvvetin uygulandığı süreyi ve yapının ilk doğal frekansının bilinmesi gerekmektedir. Uygulanan kuvvetin frekansı yapının ilk doğal frekansının 1/3'ünden daha az ise sistem statik olarak kabul edilebilmektedir [17].

## 2. Metot

Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmada, raylı sistem kanca kavramalı cer takımının en kritik parçalarından olan cer kancası, sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal mukavemet analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler ile cer kancası ekipmanı için topoloji optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçların yeterliliği, üretilebilirliği ve verimliliği değerlendirilmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar analizi uygulamaları gerçekleştirilerek statik analizler yapıp yoğunluk tabanlı yöntemden türetilen simp yöntemi ile topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin uygulanış şekilleri başlıklar altında detaylandırılmaktadır.

### 2.2. Doğrusal statik analiz

Bir sonlu elemanlar analizine başlamadan önce ilk olarak geometri basitleştirme yapmak tavsiye edilir. Bu aşamada kritik öneme sahip olmayan detaylar düzlenir, delik içleri doldurulur. Böylece sonlu elemanlar ağı ideal şekilde oluşturulabilir ve bu sayede analiz sonucunda daha doğru veriler elde edilebilir. Basitleştirme işlemi tamamlandıktan sonra malzeme özellikleri tanımlanır. Doğrusal statik analizler için elastikiyet modülü ve poisson oranı tanımlamak yeterlidir. Yer çekimi ivmesi analizde kullanılacaksa yoğunluk da ayrıca tanımlanmalıdır. Sonraki işlem çoklu gövde analizlerine mahsustur. Bu analizlerde sonlu eleman ağı oluşturulmadan önce temas ilişkilerinin belirtilmesi gereklidir. Bu ilişkileri tek tek tanımlamak yerine genel temas ilişkisi vermek de güncel yazılımlarda gayet başarılı sonuçlar sunmaktadır. Doğru yerde kullanımında

çözüm için oldukça fayda sağlayan kabuk ve kiriş gibi gövde elemanlarının seçimi de ağ oluşturulmadan yapılmalıdır. Bu işlemlerin tamamlanmasıyla sonlu eleman analizinin en hayati aşaması denilebilecek sonlu eleman ağı oluşturulabilir [18]. Katı gövdeler için altı yüzlü ve dört yüzlü, kabuk ve kiriş gibi iki boyutlu gövdeler içinse dörtgen ve üçgen gibi çok sayıda çeşitli ağ elemanları en iyi ağ örgüsünü elde etmek üzere seçilebilir. Sonlu eleman ağının birinci veya ikinci mertebeden bir polinoma göre oluşması tercih edilebilmektedir. İkinci mertebeden ağ yapısında daha fazla düğüm noktası oluşacağı için daha hassas sonuçlar elde etmek mümkün hale gelmektedir. Seçenek olarak sunulan adaptif ağ ise modelin tamamına küçük boyutlu ağ oluşturmak yerine daha büyük boyuttan başlayarak kademeli olarak ağı inceltmeye imkân tanır. Böylelikle eleman sayısı ve düğüm noktası azalarak çözüme ulaşmak kolaylaşmaktadır [19]. Ağ oluşturulduktan sonra matematiksel olarak sisteme dahil edilecek sınır koşulları tanımlanır. Bunların en önemlileri yapının rijit cisim dinamiğine uğramaması için tanımlanması gereken sabitlemeler ve sistemin çalışma prensibinde yer alan yükleme durumlarıdır. Bu aşamaları gerçekleştirerek ön işlemler tamamlanmış olur ve sonlu elemanlar analizi çözdürülebilir. Sonlu elemanlar yönteminin basit işlemlerinde kullanılabilen seyrek matris metodu büyük sistemlerde çok uzun vakit aldığı için sonlu elemanlar analizi paket programları genellikle Newton-Raphson metodu kullanarak nümerik çözüm elde eder. Yapılan tüm basitleştirmeler ve çözüm yönteminin iteratif olması nedeniyle kesin doğru sonuç yerine %98 doğruluk temin edilir [20].

$$\{F\} = [K] \cdot \{u\} \quad (2)$$

Doğrusal statik sonlu elemanlar analizinin çözümünde kullanılan denklem en temel haliyle Denklem 2'deki gibi ifade edilir. Burada F sisteme uygulanan kuvvet matrisini, K içerisinde Young modülü, atalet momenti, kesit alanı gibi malzemesel ve geometrik özellikleri barındıran rijitlik matrisini ve u ise yer değiştirme matrisini temsil etmektedir. Doğrusal statik yapısal analizlerde bilinmeyen, yer değiştirme ve analiz sonucunda bu değer elde edilmiş olur. Bunun neticesinde gerilme ve gerinim gibi istenilen diğer değerler matematiksel formüller ile üretilerek karşımıza çıkmaktadır. Sonlu elemanlar çözücüsü ağ örgüsünün her bir düğüm noktası için değerleri hesaplar ve her elemanın ortak düğüm noktalarındaki değerleri interpolasyon yaparak eleman değerlerini ortaya çıkarır. Yukarıda bahsedildiği gibi kritik değerlerin olduğu bölgeleri daha hassas ölçümleyebilmek için bu bölgelerin sonlu eleman sayısı artırılabilir. Yeterli ağ örgüsünü elde ettiğimizi anlamamızın bir yöntemi nispeten kaba bir ağ eleman boyutu ile analizi çözdürüp daha sonra aşamalı bir şekilde inceltmek sonuçların yakınsamasını gözlemlemektir. Daha fazla yakınsamadığını fark edildiğinde ağ örgümüzü yeterli olarak görebiliriz. Bunun dışında ağ kalitesini ölçmek için gözlemlenebilecek kalite parametreleri de sonlu elemanlar yazılımlarında mevcuttur [21]. Analiz sonuçları gözlemlenirken reaksiyon kuvvetleri de izlenebilmektedir. Sabitleme bölgelerinde oluşan reaksiyon kuvvetlerinin sisteme uygulanan kuvvetleri karşılayıp karşılamadığı analizin doğru kurgulanıp doğru sonuçlar verdiğine dair önemli ipuçları sunar. Doğrusal statik analiz sonuçlarının yorumlanmasında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise çözümün yalnızca elastik bölgede doğru sonuçlar sağlayabildiğidir. Çünkü büyük deformasyon olarak adlandırılan yapının plastik şekil değişimine maruz kalacağı ölçüde deformasyona uğramayacağını varsayarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle analiz sonuçları akma noktasına kadar olan bölgede yorumlanmalı ve kopma, kırılma gibi kalıcı deformasyonların burada gözlemlenemeyeceği bilinmelidir. Okunabilecek en anlamlı sonuçlardan biri sistemin akmaya karşı ne oranda emniyetli olduğudur. Sünek malzemelerde emniyet katsayısı akma dayanımının yapıda oluşan en yüksek gerilmeye bölümü ile elde edilir [22].

## 2.2. Topoloji optimizasyonu

Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonlarını içeren yapısal optimizasyon yaklaşık 100 yıllık bir maceraya sahiptir. Topoloji optimizasyonu ilk tasarımdan tümüyle bağımsız elde edilebildiği için diğer iki metoda kıyasla kütle ve dayanım bakımından en verimli sonuçları verir [23]. Fakat bu

yöntemle elde edilmiş geometrilerin geleneksel yöntemlerle üretilmesi oldukça zor olduğu için yakın zamana kadar tasarım ve üretim alanlarında beklenen etkiyi gösterememiştir. Son 20 yıllık süreçte eklemeli imalat alanındaki gelişmelere paralel olarak topoloji optimizasyonu alanında da pek çok çalışma yapılmış ve hızlı bir gelişim göstermiştir [24]. Geleneksel imalat için topoloji optimizasyonu çalışmasında geometri, ilk optimizasyon sonucu elde edildikten sonra imalat için tasarım kriterlerine göre yeniden tasarlanır. Bu geometri, optimize edilmiş değerlerden sapabileceği için yeniden optimizasyona tabi tutulur. Genellikle bu tekrarlı sürecin sonunda çok verimli sonuçlar sağlanamaz [25]. Eklemeli imalat için tasarım kriterleri, tasarım kısıtlamalarını en aza indirgediği için en optimum sonuçlarla üretime olanak sağlar. Bu yönüyle eklemeli imalat topoloji optimizasyonu alanında yeni bir çağ açmıştır [26]. Topoloji optimizasyonu, belirli kısıtlamalara bağlı olarak bir geometrinin belirli bir hacimdeki yerleşiminin matematiksel bir formül aracılığıyla en verimli halini bulmaya çalışmaktır. Farklı parametreleri baz alarak oluşturulmuş çeşitli optimizasyon formüllerine dayanan topoloji optimizasyonu türleri mevcuttur. Bunlardan başlıcaları homojenizasyon yöntemi, seviye seti yöntemi, faz alanı yöntemi, evrimsel yapısal optimizasyon ve yoğunluk tabanlı yöntem olarak sayılabilir [27]. Topoloji optimizasyonu çalışmasında en önemli adımlardan biri hedefleri ve sınırlamaları doğru belirlemektir. Her topoloji optimizasyonu türü farklı formül ile çözüme ulaşsa da bu adım tüm yöntemler için ortak olarak gerçekleşir. Topoloji optimizasyonu parametrik bir işlem olmadığı için sınırlamalar belirlemememiz halinde beklenenin çok uzağında ve kullanışsız bir geometri elde edilmesi büyük olasılıktır. Bu nedenle özellikle sabitleme veya yük uygulama gibi nedenlerle sabit kalması gereken bölgelerin belirlenmesi önemlidir. Ayrıca hacim, doğal frekans, yer değiştirme ve reaksiyon kuvveti gibi değerleri de sabit kalması veya belirli bir aralıkta kalması yönünde sınırlama olarak belirlenebilir. Optimizasyon çalışmasının amacına ulaşabilmesi içinse istenen oranlarda hacmi azaltmak, rijitliği artırmak, yer değiştirmeyi azaltmak, ilk doğal frekansı artırmak veya reaksiyon kuvvetini azaltmak gibi hedefler belirlenebilir [28].

### 2.3. Yoğunluk tabanlı yöntem ve simp yöntemi

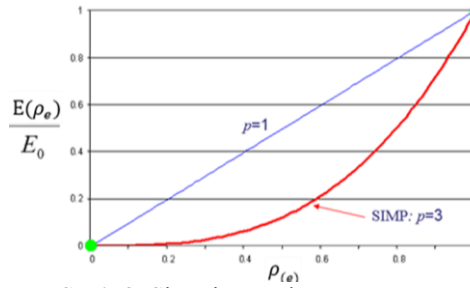
Topoloji optimizasyonunun 30 yıllık evriminde çeşitli yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu alandaki çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmekte ve bu yöntemlerin çoğunda yeni gelişmeler meydana gelmektedir. Bu yöntemler arasında en önde gelen ikisi evrimsel yapısal optimizasyondan türetilmiş olan çift yönlü evrimsel yapısal optimizasyon (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)) ve yoğunluk tabanlı yöntemden türetilmiş olan cezalandırılmalı katı izotropik malzemedir (Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)) [29]. Simp metodu sonlu elemanlar tabanlı kullanıma en uygun yöntem olarak öne çıkmış ve pek çok sonlu elemanlar yazılımına entegre edilmiştir. Simp metodunda 0 boş elemanı ve 1 katı elemanı temsil edecek şekilde sonlu eleman modelinde her elemana yoğunluk değerleri atanır ve optimizasyon işlemi elastikiyet modülüne bağlı bir fonksiyon ile iteratif olarak gerçekleştirilir [30]. Simp metodu popülerliği ve kullanışlılığı nedeniyle çok fazla akademik çalışmalar yapılmış ve sonlu elemanlar analizi yazılımları ile daha verimli hale gelmesi için geliştirilmiştir. Özellikle sonlu elemanlar analizi yazılımları ile uyumlu hale gelmek üzere geliştirmeler yapılmıştır. Mevcut kullanımda optimizasyon için matematiksel fonksiyonun kararlı bir şekilde işleme alınabilmesi ve sonlu elemanlar analizinin doğru bir şekilde çözülebilmesi için yoğunluk değerinin 0'dan farklı alınması gereklidir. Eleman yoğunluk değeri  $\rho$  ile ifade edilir. En küçük boş elemanı ise  $\rho_{min}$  değeri temsil eder. Bu değerinden 0'dan farklı verilmesi gerektiği, Denklem 3'te verilen simp metoduna göre rijitlik matrisi hesabından anlaşılabilir. Boş eleman yerine 0 değeri verilmesi halinde formülasyonda kullanılan denklemden anlamlı sonuçlar almak zorlaşacaktır. Malzeme yoğunluğunun elemanlar arasında değişiklik göstermesi nedeniyle elastikiyet modülü de değişiklik göstermektedir. Her eleman için elastikiyet modülü Denklem 4'teki gibi hesaplanmaktadır. Denklemden anlaşıldığı gibi cezalandırma faktörü  $p$ , her elemanı boş veya katı eleman olmaya zorlamakta, ara değerlerdeki yoğunluğa sahip elemanların etkisini azaltmaktadır. Belirlenen hedefe ve kısıtlamalara göre kullanılan farklı denklemler de mevcuttur. Simp metodu

algoritması yinelemeli bir işlemle verilen hedefe ulaşmaya çalışır. Bu yinelemeler hedef fonksiyonlarındaki değişimler istenen yakınsama kriterlerini sağlayana kadar devam eder [31].

$$K = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e \quad (3)$$

$$E = E_0 \cdot \rho^p \quad (4)$$

Simp metodu Ansys, Simulia Abaqus, Altair Hyperworks, SW Simulation gibi önde gelen sonlu elemanlar analizi yazılımlarında kullanılmaktadır. Geçmiş çalışmalardan cezalandırma faktörü  $p$  için en iyi sonucu 3 değerinin verdiği saptandığı için genellikle varsayılan olarak bu değer tanımlanmakta isteğe göre farklı değerler kullanılabilir. Cezalandırma faktörü  $p$ 'nin farklı değerleri için interpolasyon şeması Şekil 3'de verilmiştir. Bu şema Denklem 4 kullanılarak  $E/E_0$ 'ın  $\rho^p$ 'ye göre durumunu göstermektedir. Simp metodunda verimli sonuçlar alabilmek için eleman boyutlarının olabildiğince küçük olması gerekmektedir. Tavsiye edilen değerler doğrusal bir statik analizde kullanılan ideal değerlerin yaklaşık dörtte biridir. Ayrıca elemanlar arası hassasiyetin sağlanabilmesi için en/boy oranının da 1,1'i geçmemesi önemle tavsiye edilmektedir [32]–[34].



Şekil 3. Simp interpolasyon şeması

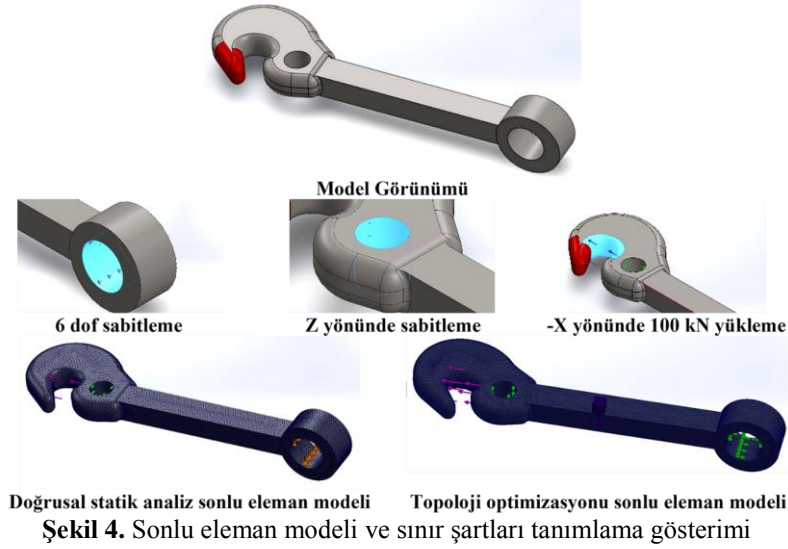
### 2.3. Uygulama detayları

Yapmış olduğumuz çalışmada raylı sistem taşıtlarının koşum takımlarından olan kanca kavramalı cer takımının, cer kancası parçası SW Simulation sonlu elemanlar analizi paket programı kullanılarak doğrusal statik analiz ve topoloji optimizasyonu uygulamaları ile incelenmiştir. İncelenecek malzeme seçilirken, EN 15566 “Cer kancası tertibatlı koşum takımı standardı” malzeme seçiminde EN 10083 standardına göre malzeme seçimi yapılması gerektiğini belirtilmiştir [35]. Çalışmamızda, EN 10083 standardının ortaya koymuş olduğu malzeme seçimi parametreleri sonucu dökme karbon çelik malzemesi tercih edilmiştir [36]. Tablo 1’de dökme karbon çeliğinin doğrusal statik analiz ve topoloji optimizasyonu için gerekli olan malzeme parametreleri verilmiştir.

Tablo 1. Dökme karbon çeliği malzeme özellikleri	
Elastikiyet Modülü (E)	$2 \times 10^5$ MPa
Poisson Oranı ( $\nu$ )	0,32
Akma Dayanımı ( $\sigma_A$ )	248,17 MPa
Yoğunluk ( $\rho$ )	7800 kg/m <sup>3</sup>

Optimizasyon öncesi ve sonrası yapılan statik analizlerin sonuçlarının doğru karşılaştırmayı sağlayabilmesi için tüm analizlerin matematik modelleri malzeme, sabitleme ve yükleme koşulları aynı şekilde tanımlanmıştır. Sadece topoloji optimizasyonu uygulaması için sonlu eleman ağı daha ince ve geçiş oranı daha düşük şekilde oluşturulmuştur. Bunun gerekçeleri

yoğunluk tabanlı yöntem başlığı altında açıklanmıştır. Sabitleme ve yükleme koşulları ise gerçek çalışma mantığına uygun ve doğru sonuçları verecek şekilde tanımlanmıştır. Yükleme değerini hesaplarken parçanın akmaya karşı dayanım oranını ifade eden emniyet katsayısını 2 kat sağlaması baz alınmış ve 100 kN değeri belirlenmiştir. Standartlarda cer kancası dayanım kriteri 1000 kN olarak verilmesine karşın bu uygulamada sistemin tek bir parçası incelendiği için bu şekilde kabul yapılmıştır [37]. Topoloji optimizasyonu çalışmaları da 2 emniyet katsayısını sağlayarak kütleyi düşürmek hedefiyle gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonları gerçekleştirilirken parça xy düzlemine göre simetrik olduğu için bu düzleme göre simetrik olması imalat kısıtı olarak eklenmiştir. Şekil 4'te sonlu eleman modeli ve sınır şartları, tablo 2'de ise sonlu eleman modelleri ile ilgili gerekli tanımlamalar gösterilmiştir [38].



Şekil 4. Sonlu eleman modeli ve sınır şartları tanımlama gösterimi

Tablo 2. Sonlu eleman ağı detayları

Doğrusal statik analiz sonlu eleman ağı		Topoloji optimizasyonu sonlu eleman ağı	
Ağ tipi	Katı eleman	Ağ tipi	Katı eleman
Ağ oluşturucu	Karışık eğrilik tabanlı ağ	Ağ oluşturucu	Karışık eğrilik tabanlı ağ
Ağ kalitesi	2.mertebe eleman	Ağ kalitesi	2.mertebe eleman
En küçük eleman boyutu	4 mm	En küçük eleman boyutu	3 mm
En büyük eleman boyutu	6 mm	En büyük eleman boyutu	4 mm
Eleman boyutu geçiş oranı	1,4	Eleman boyutu geçiş oranı	1,1
Toplam eleman sayısı	147518	Toplam eleman sayısı	418391
Toplam düğüm sayısı	214409	Toplam düğüm sayısı	596093

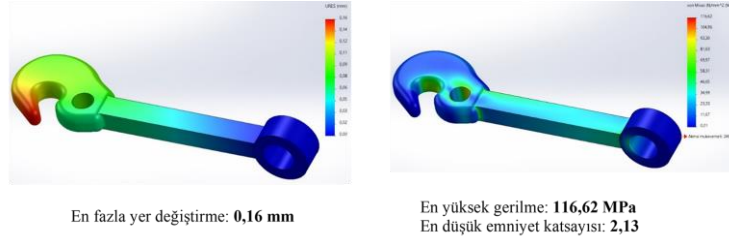
### 3. Bulgular

Doğrusal statik analiz etüdünün sonuçlanmasının ardından statik analizlerin öncelikli hesapladığı değer olan yer değiştirme miktarına ve sıklıkla tercih edilen gerilme hesaplama yöntemi olan von mises gerilmesine bakılmıştır. Emniyet katsayısı, von mises gerilmesinin akma mukavemetine oranı olarak hesaplanmıştır. Ardından diğer üretim kısıtları ile birlikte bu emniyet katsayısı değeri kısıt olarak belirlenerek topoloji optimizasyonu etüdü gerçekleştirilmiş ve istenen limitasyonları sağlayan en düşük kütleye sahip grafik verisi elde edilmiştir.

#### 3.1. Doğrusal statik analiz bulguları



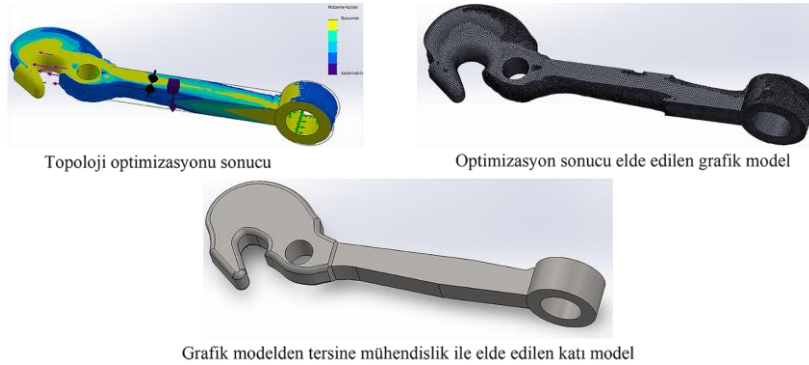
Doğrusal statik analiz sonucunda en yüksek yer değiştirme miktarı 0,16 mm olarak ölçülmüştür. En yüksek von mises gerilmesi ise 116,62 MPa'dır. Bu gerilme değeri kullanılarak hesaplanan en düşük emniyetli bölgedeki emniyet katsayısı değeri 2,13'tür.



Şekil 5. Doğrusal statik analiz sonuçları

### 3.2. Topoloji optimizasyonu bulguları

Doğrusal statik analiz sonucu elde edilen 2,13 değeri dikkate alınarak 2 emniyet katsayısını ve diğer limitasyonları sağlayacak şekilde kütleyi hafifletme hedefiyle topoloji optimizasyonu etüdü uygulanmış ve sonucunda elde edilen .stl uzantılı grafik verisi SOLIDWORKS modelleme ortamında tersine mühendislik işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak ortaya çıkan katı modele dökme karbon çeliği malzemesi tanımlanmış ve kütle değeri 26,73 kg olarak görülmüştür. Topoloji optimizasyonu sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Topoloji optimizasyonu sonuçları

## 4. Sonuç

Teknoloji, üretim ve bilgisayar destekli mühendislik alanlarında gerçekleşen gelişmeler geometrik ve yapısal olarak geleneksel yöntemler ile üretilmesi mümkün olmayan tasarımlara ait ürünlerin üretilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmeler ile ortaya çıkan eklemeli imalat gibi yöntemler sıklıkla kullanılan yöntemler arasındadır. Ortaya çıkan bu geniş çalışma alanı ile ekipmanların ağırlık, hacim, doğal frekans, yer değiştirme ve reaksiyon kuvvetlerine göre en uygun olacak modelin tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. En uygun yapısal özelliklerin belirlenebilmesi için boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde topoloji optimizasyonu analizi gerçekleştirilen ekipmanın ilk şeklinden tamamen bağımsız olarak analizi gerçekleştirmekte olması nedeniyle çok daha verimli sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Topoloji optimizasyonu, yoğunluk tabanlı yöntem, evrimsel yapısal optimizasyon ve seviye seti yöntemleri gibi farklı yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Çalışmamızda sıklıkla kullanılmakta olan yoğunluk tabanlı yöntemden türetilmiş simp yöntemi kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Uygulamada doğrusal statik analiz ve topoloji optimizasyonu SW Simulation sonlu elemanlar analizi paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizi gerçekleştirilen ekipmanın teknik detayları EN 15566 Cer kancası tertibatlı koşum takımı standardına göre belirlenmiş ve EN 10083 standardına göre; 200 GPa elastikiyet modülü, 0,32 poisson oranı, 248,17 MPa akma dayanımı ve 7800 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk değerlerine sahip olan dökme karbon çeliği malzemesi seçilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda kanca kavramalı cer takımının 1000 kN dayanım değerine sahip olması gerektiği belirlenmiş ve sistemin tek bir parçası incelendiğinden literatürdeki topoloji optimizasyonu uygulamaları baz alınarak en düşük emniyet katsayısı 2 olacak şekilde 100 kN dayanım değeri uygulanmıştır. Doğrusal statik analiz sonucunda 0,16 mm en yüksek yer değiştirme ve 116,62 MPa von mises gerilmesi ölçülmüştür. Bu çalışma yeterli emniyet katsayısını sağlayarak geometriyi hafifletme hedefiyle gerçekleştirildiği için reaksiyon kuvvetleri ve doğal frekanslar dikkate alınmamıştır. Von mises gerilmesine göre 2,13 hesaplanan emniyet katsayısının 2 değerine sahip olması yeterli kabul edilmiş ve bu kısıta göre gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu sonucunda istenen dayanım değerlerini ve üretim limitasyonlarını sağlayan hafif model elde edilmiştir.

Başlangıçta 29,16 kg olarak yazılım tarafından hesaplanan cer kancası ekipmanı, optimizasyon uygulandıktan sonra 26,73 kg'a düşerek toplamda %8,33 oranında kütleli kazanım elde edilmiştir. Topoloji optimizasyonu uygulanan modelin mevcut modelin yerini alması için dikkate değer bir kazanım sağlanması gerekmektedir. Üretim yöntemlerindeki zorluklar ve maliyet bu konudaki temel kısıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürdeki uygulamalar incelendiğinde, bu gibi sade karbon çeliğinden imal edilen döküm parçalarda, ortaya çıkan kütleli kazanımın tasarım ve üretim akışını değiştirmeye ve yeni ürünü devreye almaya değer görülmesi için yaklaşık %30 tasarruf sağlaması gerektiği görülmüştür. Mevcut uygulama yapısı ile kanca kavramalı cer takımını içerisinde bulunan cer kancası ekipmanı için topoloji optimizasyonu uygulaması yapılarak üretim değişikliğine gidilmesi gerekmediği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonrası, diğer koşum takımı türleri üzerinde gerekli uygulamaların yapılmasının, ayrıca taşıtın dinamik hareket gösterdiği durumlar da göz önüne alınarak eksenel çift yönlü kuvvetlere maruz kalan yapıların farklı yük durumları ile yapısal optimizasyon çalışmalarının yapılması literatür için faydalı olacaktır.

## Kaynakça

- [1] J. N. Varandas, A. Paixão, E. Fortunato, B. Zuada Coelho, ve P. Hölscher, "Long-term deformation of railway tracks considering train-track interaction and non-linear resilient behaviour of aggregates – a 3D FEM implementation," *Comput. Geotech.*, c. 126, s. 103712, Eki. 2020, doi: 10.1016/j.compgeo.2020.103712.
- [2] W. Ferdous, A. Manalo, G. Van Erp, T. Aravinthan, ve K. Ghabraie, "Evaluation of an innovative composite railway sleeper for a narrow-gauge track under static load," *J. Compos. Constr.*, c. 22, sy 2, s. 04017050, 2018.
- [3] S. Kaewunruen, T. Lewandrowski, ve K. Chamniprasart, "Dynamic responses of interspersed railway tracks to moving train loads," *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, c. 18, sy 01, s. 1850011, 2018.
- [4] M. Yazdani ve P. Azimi, "Assessment of railway plain concrete arch bridges subjected to high-speed trains," içinde *Structures*, 2020, c. 27, ss. 174-193.
- [5] C. Yang ve Q. M. Li, "Structural optimisation for the collapse zone of a railway vehicle," *Int. J. Mech. Sci.*, c. 165, s. 105201, Oca. 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105201.
- [6] P. K. Srivastava ve S. Shukla, "Reducing Weight of Freight Bogie Bolster Using Topology Optimization," *Rev. GEINTEC-GESTAO INOVACAO E Tecnol.*, c. 11, sy 3, ss. 324-339, 2021.
- [7] C.-S. Kim ve J. M. Kim, "A Study on the Durability Improvement of the Connection Passage Assembly for Railway Vehicles," içinde *2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, 2019, ss. 518-522.
- [8] K. Tajs-Zielińska ve B. Bochenek, "Multi-Domain and Multi-Material Topology Optimization in Design and Strengthening of Innovative Sustainable Structures," *Sustainability*, c. 13, sy 6, Art. sy 6, Oca. 2021, doi: 10.3390/su13063435.

- [9] H. Völkl, D. Klein, M. Franz, ve S. Wartzack, "An efficient bionic topology optimization method for transversely isotropic materials," *Compos. Struct.*, c. 204, ss. 359-367, Kas. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.07.079.
- [10] F. Mezzadri, V. Bouriakov, ve X. Qian, "Topology optimization of self-supporting support structures for additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, c. 21, ss. 666-682, May. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.04.016.
- [11] R. Ulewicz, F. Nový, P. Novák, ve P. Palček, "The investigation of the fatigue failure of passenger carriage draw-hook," *Eng. Fail. Anal.*, c. 104, ss. 609-616, 2019.
- [12] S. M. zadeh Noughabi, K. Dehghani, ve M. Pouranvari, "Failure analysis of automatic coupler SA-3 in railway carriages," *Eng. Fail. Anal.*, c. 14, sy 5, ss. 903-912, 2007.
- [13] E. V. Rosa, L. Rios, ve V. Queral, "Progress on the interface between UPP and CPRHS (Cask and Plug Remote Handling System) tractor/gripping tool for ITER," *Fusion Eng. Des.*, c. 88, sy 9-10, ss. 2168-2172, 2013.
- [14] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, P. Nithiarasu, ve J. Z. Zhu, *The finite element method*, c. 3. McGraw-hill London, 1977.
- [15] J. N. Reddy, *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education, 2019.
- [16] L. J. Segerlind ve H. Saunders, "Applied finite element analysis," 1987.
- [17] D. V. Hutton, *Fundamentals of finite element analysis*. McGraw-hill, 2004.
- [18] B. C. L. Vanam, M. Rajyalakshmi, ve R. Inala, "Static analysis of an isotropic rectangular plate using finite element analysis (FEA)," *J. Mech. Eng. Res.*, c. 4, sy 4, ss. 148-162, 2012.
- [19] S. E. Benzley, E. Perry, K. Merkley, B. Clark, ve G. Sjaardama, "A comparison of all hexagonal and all tetrahedral finite element meshes for elastic and elasto-plastic analysis," içinde *Proceedings, 4th international meshing roundtable*, 1995, c. 17, ss. 179-191.
- [20] E. Carrera, M. Cinefra, M. Petrolo, ve E. Zappino, *Finite element analysis of structures through unified formulation*. John Wiley & Sons, 2014.
- [21] M. E. Botkin ve H.-P. Wang, "An adaptive mesh refinement of quadrilateral finite element meshes based upon a posteriori error estimation of quantities of interest: linear static response," *Eng. Comput.*, c. 20, sy 1, ss. 31-37, 2004.
- [22] T. J. Hughes, *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation, 2012.
- [23] L. Meng vd., "From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap," *Arch. Comput. Methods Eng.*, c. 27, sy 3, ss. 805-830, Tem. 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09331-1.
- [24] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, ve W. Zhang, "A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges," *Chin. J. Aeronaut.*, 2020.
- [25] K. Mhapsekar, M. McConaha, ve S. Anand, "Additive Manufacturing Constraints in Topology Optimization for Improved Manufacturability," *J. Manuf. Sci. Eng.*, c. 140, sy 5, May. 2018, doi: 10.1115/1.4039198.
- [26] S. N. Reddy K, I. Ferguson, M. Frecker, T. W. Simpson, ve C. J. Dickman, "Topology optimization software for additive manufacturing: A review of current capabilities and a real-world example," içinde *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2016, c. 50107, s. V02AT03A029.
- [27] T. Zhan, "Progress on different topology optimization approaches and optimization for additive manufacturing: a review," *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 1939, sy 1, s. 012101, May. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1939/1/012101.
- [28] J. Wu, O. Sigmund, ve J. P. Groen, "Topology optimization of multi-scale structures: a review," *Struct. Multidiscip. Optim.*, c. 63, sy 3, ss. 1455-1480, Mar. 2021, doi: 10.1007/s00158-021-02881-8.
- [29] J. Gao, M. Xiao, Y. Zhang, ve L. Gao, "A Comprehensive Review of Isogeometric Topology Optimization: Methods, Applications and Prospects," *Chin. J. Mech. Eng.*, c. 33, sy 1, s. 87, Kas. 2020, doi: 10.1186/s10033-020-00503-w.
- [30] B. Yunfei, C. Ming, ve L. Yongyao, "Structural topology optimization for a robot upper arm based on SIMP method," içinde *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II*, Springer, 2016, ss. 725-733.
- [31] S. Zhang, H. Li, ve Y. Huang, "An improved multi-objective topology optimization model based on SIMP method for continuum structures including self-weight," *Struct. Multidiscip. Optim.*, c. 63, sy 1, ss. 211-230, Oca. 2021, doi: 10.1007/s00158-020-02685-2.
- [32] H. S. Gebremedhen, D. E. Woldemichael, ve F. M. Hashim, "Three-dimensional stress-based topology optimization using SIMP method," *Int. J. Simul. Multidiscip. Des. Optim.*, c. 10, s. A1, 2019.

- [33] V. Kandemir, O. Dogan, ve U. Yaman, "Topology optimization of 2.5D parts using the SIMP method with a variable thickness approach," *Procedia Manuf.*, c. 17, ss. 29-36, Oca. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.009.
- [34] W. Zuo ve K. Saitou, "Multi-material topology optimization using ordered SIMP interpolation," *Struct. Multidiscip. Optim.*, c. 55, sy 2, ss. 477-491, 2017.
- [35] E. Standards, "UNE EN 15566:2017 Railway applications - Railway rolling stock - Draw gear and screw coupling," <https://www.en-standard.eu>. <https://www.en-standard.eu/une-en-15566-2017-railway-applications-railway-rolling-stock-draw-gear-and-screw-coupling/> (erişim Eki. 29, 2021).
- [36] "EN 10083-1:2006 - Steels for quenching and tempering - Part 1: General technical delivery conditions," *iTeh Standards Store*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/bf8239bb-e515-40b3-a79f-5ffdb0c3e7a6/en-10083-1-2006> (erişim Eki. 29, 2021).
- [37] "EN 10083-2:2006 - Steels for quenching and tempering - Part 2: Technical delivery conditions for non alloy steels," *iTeh Standards Store*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/753c07e8-18e1-4904-83ae-fec50f911beb/en-10083-2-2006> (erişim Eki. 29, 2021).
- [38] F. Nový, M. Jambor, M. Petrů, L. Trško, S. Fintová, ve O. Bokůvka, "Investigation of the brittle fracture of the locomotive draw hook," *Engineering Failure Analysis*, c. 105, ss. 305-312, Kas. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.019

### Özgeçmiş



#### Cevat ÖZARPA

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Doktor Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. Lisans eğitimini Gaziantep Üniversitesi'nde, Yüksek Lisansını İstanbul Teknik Üniversitesi'nde, Doktorasını Sakarya Üniversitesi'nde Makine Mühendisliği ve Doktora sonrası çalışmalarını ABD'de Virginia Commonwealth Üniversitesi Makine Mühendisliği Tasarım Üretim Laboratuvarı'nda tamamlamıştır. Evli ve 5 çocuk babasıdır.

E-Posta: cevatözarpa@karabuk.edu.tr



#### Hüseyin BOTSALI

Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliğinde tamamlamıştır. Yüksek lisansına Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliğinde devam etmektedir. Evlidir.

E-Posta: huseyinbotsali@gmail.com



#### Bahadır Furkan KINACI

Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans eğitimini Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Doktora eğitimine Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliğinde devam etmektedir. Evlidir.

E-Posta: furkankinaci@karabuk.edu.tr

### Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları:

Cevat ÖZARPA: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Doğrulama, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Hüseyin BOTSALI: Doğrulama, İnceleme, Yazılım uygulaması, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Bahadır Furkan KINACI: Kaynaklar, Görselleştirme, Yazma-oriijinal taslak hazırlama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



## Dünyadaki Son Gelişmeler Çerçevesinde Yüksek Hızlı Demiryolu Tünel Tasarımı ve Türkiye'deki Durum

Evren POŞLUK 

*İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Büyükdere Yerleşkesi G Blok Kat:2 Büyükdere, İstanbul, Türkiye*

*evrenposluk@gmail.com*

*(Alınış/Received: 02.11.2021, Kabul/Accepted: 16.12.2021, Yayımlama/Published: 31.01.2022)*

**Öz:** Yüksek standartlı demiryolları, kat ettiği mesafeler ve içerdiği karmaşık mühendislik yapıları açısından oldukça zorlu imalatlardır. Gerek imalat gerekse işletmecilik faaliyetleri sırasında maliyet etkin olması istenir. Güzergâh çalışmalarından mühendislik yapılarının tasarımına kadar bu durumu etkileyen birçok parametre vardır. Bu çalışmada, yüksek hızlı demiryollarında tünel tasarımı konusuna odaklanmaktadır. Bu amaçla öncelikle yüksek hızlı demiryolu tünel tasarımında kullanılan ana hat ve tünel güvenliği konuları uluslararası standartlar çerçevesinde irdelenmiş, bu konuda dünyada yapılan son çalışmalar derlenmiştir. Ardından Türkiye’de geçmişi yaklaşık 20 yılı bulan yüksek hızlı demiryolu tünel imalat tecrübeleri aktarılmıştır. İlk tasarımından bu yana neredeyse hiç değişmeyen tünel yapısında, işletme sırasında oluşan sorunlar çerçevesinde yapısal ve geometrik iyileştirmeler gerektiği sonucuna varılarak bu kapsamda öneriler sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Tünel, Tünel tasarımı, Yüksek hızlı demiryolu, Tren-tünel aerodinamiği

### High Speed Railway Tunnel Design in the Framework of Recent Developments in the World and the Situation in Turkey

**Abstract:** High standard railways are very demanding productions in terms of the distances they cover and the sophisticated engineering structures they contain. It is desired to be cost effective during both manufacturing and management activities. There are many parameters that affect this situation, from route studies to the design of engineering structures. This study focuses on tunnel design in high speed railways. For this purpose, first of all, the main line and tunnel safety issues used in high-speed railway tunnel design were examined within the framework of international standards, and the latest studies in the world on this subject were compiled. Then, the high-speed railway tunnel manufacturing experience in Turkey, which has a history of nearly 20 years, has been conveyed. In the tunnel structure, which has hardly changed since its first design, it was concluded that structural and geometric improvements are needed within the framework of the problems that occurred during operation, and suggestions were presented in this context.

**Keywords:** Tunnel, Tunnel design, High speed rail, Train-tunnel aerodynamics.

## 1. Giriş

Türkiye’de demiryolu serüveni 1866 yılında İzmir-Aydın demiryolu ile başlamış, cumhuriyetin ilk yıllarıyla birlikte ivme kazanmış ardından Sürat Demiryolu Projesi gibi atılımlar planlanıp imalata başlanmış olsa da sonuçlanamamıştır. Modern anlamda ilk Yüksek hızlı demiryolu (YHT) tüneli Ankara-Eskişehir hattında 2006 yılında tamamlanmıştır. Devamında Ankara-Konya ve Köseköy-Gebze arasında 31 farklı tünel (yaklaşık 46 km) işletmeciliğe açılmıştır. Halen Ankara-Sivas (test çalışmaları devam etmekte) Bursa-Yenişehir ve Ankara-İzmir hatlarında çalışmalar devam etmektedir.

Yüksek hızlı demiryolları yüksek maliyetli yapılardır. Bu nedenle dünyada ve ülkemizde optimum mühendislik çözümleri için araştırmalar on yıllardır devam etmektedir. Üzerinde en çok

Atıf için/Cite as: E.Poşluk, “Dünyadaki son gelişmeler çerçevesinde yüksek hızlı demiryolu tünel tasarımı ve Türkiye’deki durum,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 13-29, Jan. 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1018008

durulan konuların başında tren-tünel aerodinamiği gelmektedir. Yüksek Hızlı Demiryollarında (YHT) her ne kadar aerodinamik etkiler araç şekli ve yapısal özellikleriyle ilişkili gibi anlaşılabilir da trenin açık arazilerde hareketi sırasında bu açıdan büyük sorunlarla karşılaşmaz. Etrafı sınırlandırılmış bölgelerden geçerken aerodinamik etkiler belirginleşir. Bu çalışmada, ülkemizde yaklaşık 20 yıldır değiştirilmeden kullanılan tünel tasarımına odaklanılarak tünel güvenliği, tünel-tren aerodinamiği ve işletmecilikte yaşanan sorunlar çerçevesinde tünel tasarımı ve tünel yapısal tedbirlerine odaklanılmıştır.

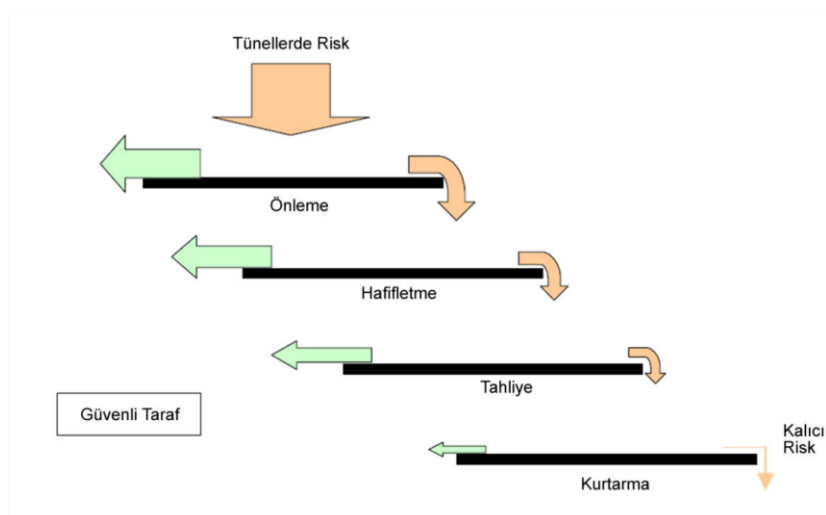
## 2. Demiryolu Tünellerinin Tasarımı

Demiryolları için inşa edilecek tünelin geometrik yapısı ve iç tasarımı demiryolu güzergâhı için belirlenen hız, işletmecilik türü (yük/yolcu; dizel/elektrik), tünel içerisindeki hat sayısı, tünel uzunluğu, güvenlik ihtiyacı, tünel içerisindeki su varlığı, çeken/çekilen araç aerodinamik yapısı gibi birçok etmene bağlıdır. Bu bölümde demiryollarındaki tünel tasarımı hakkında bilgi verilmiştir.

### 2.1. Demiryolu tünellerinde güvenlik

Demiryolu tünellerinde güvenlik, kaza risklerini veya bu kazaların insanlar ve demiryolu hatları üzerinde yarattığı etkileri azaltarak, kullanıcıya en uygun güvenlik seviyesi sağlamak amacı ile demiryolu tünellerinde ön etüt, proje, inşaat ve işletme aşamasında uygulanacak kriter ve teknik özelliklerdir [1]. Demiryollarında kaza olaylarının meydana gelme olasılığı hala oldukça düşük olarak kabul edilse de uzun tünellerde bu tür olayların olası sonuçları felaket olabilir [2].






Tünelde beklenmeyen durumlar olduğunda mutlaka tahliye sistemlerinin ve tahliye prosedürlerinin önceden hazır olması gereklidir. Demiryolu tünellerinde risk oluşturabilecek durumlar; sıcaklık yaratan olaylar (yangın), soğuk olaylar (deray, çarpışma) ve uzun durma (arıza) şeklinde özetlenebilir. Tünellerde riskler ve önlemlere ilişkin akış şeması Şekil 1'de verilmiştir [1].



Şekil 1. Demiryolu tünellerinde risk ve tedbirlere yönelik akış şeması [1]

Demiryolu tünellerinde güvenlik önlemleri alt yapı ve tesisat olarak 2 aşamada incelenmektedir. Alt yapı güvenlik önlemleri, tünelin içerisinde yolcuların en yakın çıkış noktalarına yönlendirilmeleri, çıkış noktalarına ilerleme sırasında sorun yaşamamaları ve çıkış işleminin sorunsuz yapılabilmesi aşamalarını içermektedir [3].

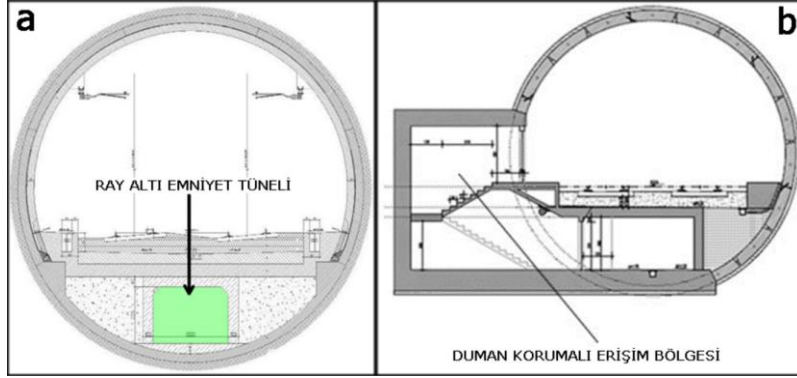
Tünel uzunluğuna ve tünel içi hat durumuna göre (tek tüp, çift tüp) kaçış tüneli gereksinimi ve türü değişmektedir. Dünyada ve ülkemizde en çok tercih edilen çift hatlı tek tüp tünellerdir. Bu tüneller şayet 1000 m'den uzun ise yapısal güvenlik önlemleri açısından değerlendirilmelidir [1]. 5000 m uzun tüneller için ise tek tüp yerine çift tüp tercih edilmelidir [2] (Şekil 2). Uzunluğu 20 km'den fazla olan tüneller özel tasarım ve planlama gerektirmektedir [4, 2]. Ek olarak birbirini takip eden (peş peşe) tüneller arasında 500 m'den daha az mesafe varsa veya açık kısımda bir güvenlik bölgesi yoksa her iki tünel tek bir tünel gibi düşünülmelidir [3].

SİSTEM		RİSK ORANI (%)
	ÇİFT HATLI TEK TÜNEL	100
	ÇİFT HATLI TEK TÜNEL + SERVİS TÜNELİ	~ 80
	TEK HATLI İKİ TÜNEL	50 - 60
	TEK HATLI İKİ TÜNEL + SERVİS TÜNELİ	~ 40
	ÜÇ TEK HATLI TÜNEL	< 40

Şekil 2. Tünel tüp çeşidine göre güvenlik seviyeleri [2]

Tünellerde tahliye işleminin yapılabilmesi için tünel içerisinde tahliye yolları ve kaldırımları planlanmalıdır. Tahliye kaldırımları için 75 cm genişlik; 2,25 m yükseklik ve en fazla 500 m yürüyüş mesafesi önerilmektedir [1, 4]. Tahliye yolları ise 1000 m uzun tünellerde düşünülmeli ve yolcunun 500 m'den az yürütecek şekilde tasarlanmalıdır [4]. Yaklaşım tüneli, paralel tünel shaft ve ray altı kaçış tüneli şeklinde tasarlanabilirler. Yaklaşım tünelleri 1000 m uzun olmamalıdır. Şayet sadece yolcu çıkışı için planlanıyorsa en az 1,50 m genişliğinde ve 2,25 m yüksekliğinde kurtarma hizmetleri için de planlanıyorsa en az 2,25 m genişliğinde ve 2,25 m yüksekliğinde olmalıdır. Shaftlar 30 m'den kısa olmalıdır ve merdivenler minimum 1,2 metre genişliğinde olmalıdır. Tünel içi eğim, araçlara ve yayalara göre ayarlanmalıdır [1].

Bir diğer acil durum tahliye tüneli tipi ise çift hatlı tek tüp TBM tünellerinde uygulanan ray altı emniyet tünelidir (Şekil 3). Poşluk ve Korkaç [3] tarafından ülkemizde ilk defa T-26 tüneli için önerilen bu modelde her 1000 metrede bir merdivenlerle 3 m genişliğinde ve 2,25 m yüksekliğinde rayların altında bulunan emniyet tüneline bağlantı sağlanmaktadır. Söz konusu model Eşme-Salihli T-1 tüneline uygulanmaktadır.



Şekil 3. ray altı emniyet tünelleri kesitleri (a-ray altı emniyet tüneli, b-ana tünel-ray altı emniyet tüneli bağlantı kesiti; [3])

Alt yapı tedbirleri ile birlikte güvenlik ve işletme sırasında devamlılığın sağlamak amacıyla tesisat tedbirleri de alınmalıdır. EN 50126 [5] göre tünellerde gereken tedbirler; Acil durum ışıklandırması (500 m uzun tünellerde); tahliye sinyalizasyonu, tünellerin içi su tesisatı ve makine-insan iletişim sistemleridir.

## 2.2. Tünel aerodinamiği

Tünellerden geçen trenlerin neden olduğu aerodinamik problemler, açık havadaki duruma göre daha karmaşık ve ciddidir. Ancak tren hızının düşük olduğunda tünellerdeki aerodinamik etkiler çok belirgin değildir [6, 7, 37, 46]. Genellikle bir trenin etrafındaki akış alanının kararsız, türbülanslı ve sıkıştırılabilir olduğu bilinmektedir. Bu durum; tünel içerisindeki trenin aerodinamik sürtünmesi, kayma akımı, piston etkisi, tünel ve tren içindeki basınç dalgaları, tünel çıkışındaki mikro basınç dalgaları, gürültü ve titreşim vb. kavramlarla ilintilidir (Tablo 1) [8].

Tablo 1. Tünellerde aerodinamik problemler [8]

Aerodinamik Problemler	
1	Hava akışı
2	Tünel çıkışında mikro basınç dalgası
3	Tünel ve demiryolu hattı Tünellerde termal ortam, havalandırma çalışması ve yangın önleme
4	Tünel ve demiryolu hattı Tünellerde basınç dalgalanması, insan konforu ve tünel kesit alanı için tasarım parametrelerinin belirlenmesi
5	Tünellerde çalışan ve ekipman güvenliğine piston etkisinin etkisi
6	Aerodinamik sürüklenme, tren hızı ve enerji tüketimi
7	Tren Yolcu konforu, tren iç ortamı (basınç değişimi ve klima havalandırması), tren yüzeyindeki basınç değişimi
8	Aerodinamik gürültü
9	Tren başı ve kuyruğunun aerodinamik özellikleri

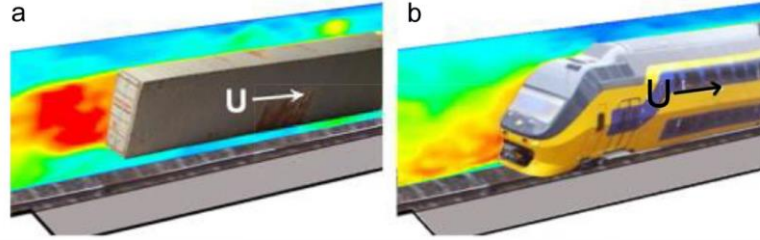
Piston etkisi: Tren, tünellerden geçtiğinde tünellerdeki hava tren tarafından sıkıştırılır ve onu takip eder. Negatif basınç bölgesi trenin arkasında oluşur ve dışarıdaki havayı tünel içine çeker. Bu durum "piston etkisi" olarak tanımlanır [9]. Tünel uzunluğunun azalması piston etkisini artıracak ve tren uzunluğunun ve tren hızının artmasıyla piston etkisi artacaktır [10]. Genel olarak, bir havalandırma şaftı, piston etkisini kontrol etmekte etkilidir ve şaftın konumunu optimize ederek, piston etkisini azaltılabilir [11, 38, 39, 40].

Tünellerdeki hava akımı: Tren, tünel gibi sınırlı bir boşluktan geçtiğinde, havanın viskozitesi nedeniyle sınır tabakasının yakınındaki hava trenle birlikte hareket eder ve ortaya çıkan hava



akımı açık havaya göre daha ciddidir. Tüneldeki tren kaynaklı hava akımı tüneldeki ekipman ve bakım personeli üzerinde büyük etkisi vardır [8].

Hava akımı hızı tünel uzunluğu, tren uzunluğu ve bunların oranından etkilenmektedir [15, 16]. Özellikle, hava akımı hızı uzun trenlerle artar. Önemli hız dalgalanmaları esas olarak trenin önünde meydana gelir ve basınç dalgasının genliğinde bir azalma ile zayıflar [12]. Tren kayma akımı tren şekline önemli ölçüde etkilenir, Khayrullina vd. [13] çalışmasında, arkası küt şekilli trene sahip yük araçlarının iz yoğunluğunun, akıcı kuyruklu yolcu araçlarınınkinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu bulunmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Bir tünelden geçen trenin simülasyonu: (a) Yük treni (b) Yolcu treni (Tren hareketi:U ok yönündedir [13])

Tüneldeki trenlerin aerodinamik sürüklenmesi: Açık hava ile karşılaştırıldığında, tünel içindeki çalışma ortamı nispeten kapalıdır, bu da trenin önünde ek aerodinamik sürüklenme getiren bir basınç artışına yol açar. Tünelde yayılan basınç dalgası tren etrafındaki basınç dağılımını değiştirecektir, bu nedenle trenin aerodinamik direnci, piston etkisi, kayma akımı ve titreşimi tüneldeki basınç dalgasından açıkça etkilenir [8, 41,42, 17].

Bazı çalışmalar, aerodinamik sürüklenme ile tren burun uzunluğu arasında doğrusal bir ilişki olduğunu öne sürmektedir [14, 15, 16, 21]. Tren burun uzunluğunun artmasıyla hem aerodinamik sürüklenme hem de basınç direnci azalır. Toplam basınç direnci 2 m'lik bir burun uzunluğuna kadar hızla azalır; burun uzunluğu 2 m'den uzun olduğunda, sürtünme azalma oranı önemli ölçüde azalır ve burun uzunluğundan bağımsız olarak viskoz sürtünme neredeyse sabittir [16].

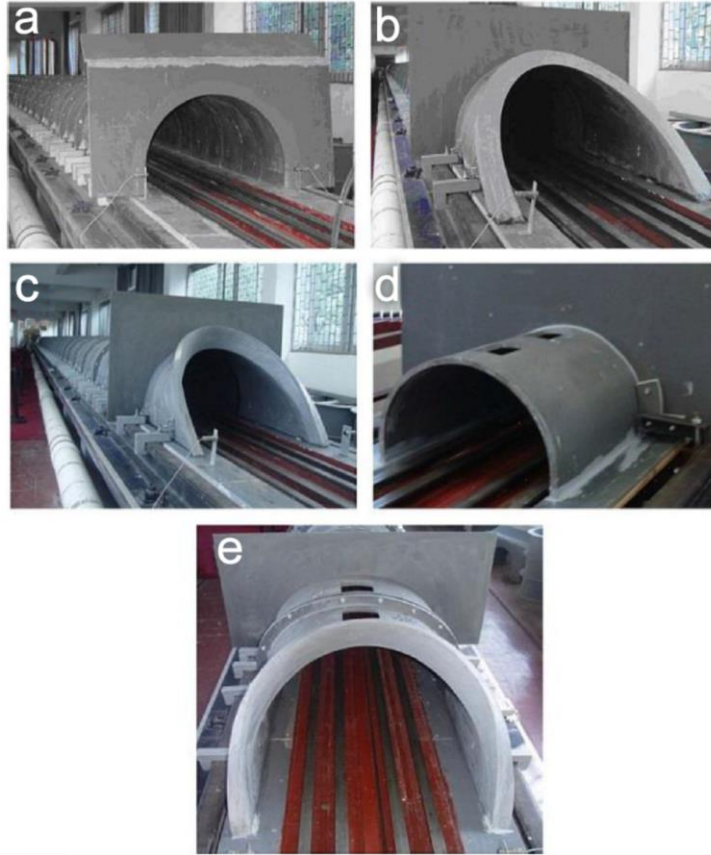
Tüneldeki hava akımının neden olduğu tren titreşimi: Tren, tünelin girişine ulaştığında tren üzerindeki aerodinamik kuvvetlerin yanal ve dikey dalgalanmaları nispeten büyüktür. Tren açık havadayken yalpalama momentinin küçük olduğunu ve tren tünele girerken yalpalama momentinin aniden arttığı bilinmektedir. Suzuki [17] yaptığı çalışmada çift hatlı tek tüp tünelde iki trenin tünel içerisinde karşılaştığı durumlarda trenin iki tarafı arasında bariz basınç farklılıkları oluştuğunu ve tünelin duvar tarafındaki basınç dalgalanmasının tünel merkez tarafına göre daha şiddetli olduğunu söylemiştir.

Demiryolu tren/tünel sisteminde basınç dalgası: Yüksek hızlarda tren tünele girdiğinde karmaşık bir dalga sistemi üretilir. Tünele trenin burun kısmı girdiğinde ilk sıkıştırma dalgası olarak adlandırılan hızlı bir basınç artışı oluşur. Tren gövdesinin daha fazla girişiyile basınçta hafif bir artış görülür, tren kuyruğu tünele girdiğinde, tünelde basınç düşüşüne yol açan bir sıkıştırma dalgası üretilir. Bu durum tren şekli, tren uzunluğu, trenin hızı, tünel uzunluğu ile doğrudan ilişkilidir [8]. Bunların dışında basınç dalgasının azaltılmasının yolu havalandırma şaftlarıdır. Havalandırma şaftlarının boyutu, sayısı ve konumu basınç dalgası üzerinde bariz bir etkiye sahiptir [18].

Tünel çıkışında mikro basınç dalgası: Tünellerdeki basınç dalgaları tünel çıkışına ulaştığında, sıkışma dalgasının bir kısmı genişleme dalgası olarak tünele geri yansır ve diğer kısmı genellikle tünelin dışına saçılmak üzere bir itme gürültüsü oluşturur. İlk sıkıştırma dalgasının neden olduğu gürültü yoğunluğu fazladır ve bir mikro basınç dalgası oluşturur [8]. Liu vd., [20] yaptıkları

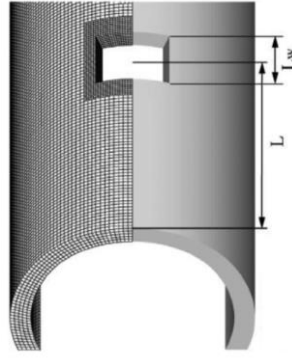
çalışmada mikro basınç dalgasının gücünün tren hızıyla arttığını, düşük frekanslı ve kısa süreli olduğunu, büyüklüğünün yaklaşık olarak tren hızının küpüyle orantılı olduğu söylemektedir.

Mikro basınç dalgasını azaltmak için tren kafasının şekli ve tünel giriş-çıkış yapısını optimize etmek iki ana yöntemdir [15, 21, 47]. İida vd. [22] optimal burun uzunluğunun 7 m'den fazla olduğunda, maksimum mikro basınç dalgasının parabolik burun şekillerine ve önceden optimize edilmiş burun şekillerine kıyasla %18-27 ve %12-19 oranında etkili bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Tünel giriş-çıkış bölgeleri (flüt yapıları) trenler için ani bir değişim bölgesidir. Bu kısımda sıkıştırma dalgaları, genişleyen dalgalar ve mikro basınç dalgaları gibi birçok karmaşık akış alanı oluşmaktadır. Bazı bilim adamları, tünel girişinde cihazlar kurarak bir tüneldeki basınç dalgasını veya tünel çıkışındaki mikro basınç dalgasını azaltmayı başarmışlardır. Bu çalışmalardan Zhang vd., [23] tarafından yapılan çalışmalar Şekil 5'de gösterilmektedir.



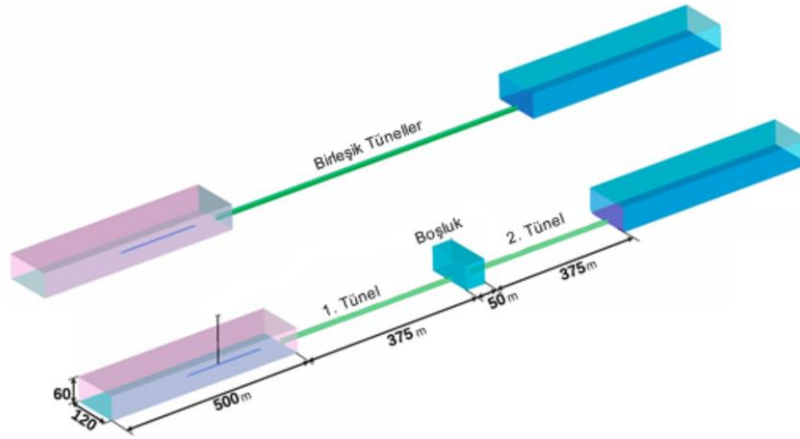
**Şekil 5.** Tünel portal modelleri: (a) duvar tip, (b) halka şekilli ve eğik yapılı, (c) şapka şekilli ve eğik yapılı, (d) üstü çift delikli düz şekilli (e) birleşik şapka eğik yapılı [23]

Pencereli bir flüt yapısı için ilk sıkıştırma dalgası ve mikro basınç dalgası üzerindeki etkisi Howe [24, 43, 44, 45] tarafından incelenmiştir. Pencerelerin konum, sayı ve boyutlarının etkilerine ilişkin analizler detaylı olarak yapılmış; önerilen bazı değerler ve formüller ortaya konmuştur. Buna göre Mikro basınç dalgası, flütün pencereli yapısından önemli ölçüde etkilenir. Liu vd. [8] mikro basınç dalgasını azaltmak için pencereli eşit kesitli bir flüt ve aç-kapa önermişlerdir. Ayrıca aç-kapa uzunluğu ile pencere kesit alanı arasında makul bir eşleşme olduğunu bulmuşlardır. Heine vd. [25], şapka şekilli flüt yapısı ve tünel arasındaki konumlandırılan yalnızca bir havalandırma deliğinin tüneldeki basınç gradyanını azaltmak için en iyi yöntem olduğunu söylemektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Tünel giriş-çıkış (Flüt) yapısı ( $L_w = 0.057\sim 0.514$ , ve  $L = 5\sim 120$  m; [26])

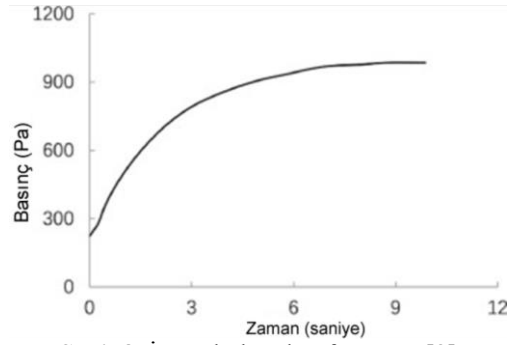
Bitişik ve ayrı tünellerden geçen yüksek hızlı bir trenin aerodinamik etkileri: Birbirine yakın iki tünelin arasında boşluğun kapatılması veya açık olmasının aerodinamik etkilerinin araştırılması güzergâh tasarımı açısından son derece önemlidir. Li vd. [27] tarafından iki farklı tünel konfigürasyonunda (trenin bir boşlukla ayrılmış iki bitişik tünelden geçtiği, uzun bir tünelden geçtiği) analizler yapılmıştır. Bu çalışmada her iki senaryo arasında ciddi bir fark saptanmamıştır. Ancak aerodinamik sorunlarla uğraşırken, tünel acil kurtarma da dahil olmak üzere kapsamlı hususlar düşünülmesi gerektiği ve kısa tüneller için aerodinamik etkileri her tünelin kendi kritik tünel uzunluklarına göre değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.



Şekil 7. Bağlantılı ve açık durumları diyagramı [27]

Yolcu kulağı rahatlığı: Tünelden geçen hızlı trenlerin oluşturduğu basıncın insan kulağının hissetmeyeceği belirli bir genişliği geçmemesi yolcu konforu açısından son derece önemlidir. Bu da yüksek hızlı bir demiryolu tasarımında, belirli bir zaman diliminde hava basıncının tekdüze değişimi, insan kulağının konfor kriterini belirlemek için geçici basıncın karakteristik parametresi olarak kullanılır. Geçici basınç konfor kriteri, yolculara tahsis edilmiş bir hat için tünel tasarımında önemli bir husustur ve aynı zamanda tünelin etkin boşluk alanını ve tren sızdırmazlığı gerekliliklerini belirlemenin temelidir [28].

1980'den 1985'e kadar, OREC149 Komitesi, tünellerden geçen yüksek hızlı bir trenin neden olduğu basıncın insan kulağı üzerindeki etkisi üzerine, hat testleri ve laboratuvar basınç odası testleri dahil olmak üzere bir dizi çalışma yürütmüştür. Bu çalışmaların sonucu olarak Şekil 8'deki grafik önerilmiştir. Buna karşın yüksek hızlı demiryolu çalışmalarında kullanılan kriterler ülkelere göre farklılık göstermektedir. İnsan kulağı konforunun farklı ülke ve bölgelerdeki değerlendirme indekslerinin analizine göre, genellikle değerlendirme indeksleri olarak basınç genişliği, basınç gradyanı ve basıncın bir süre içindeki değişimi kullanılmaktadır (Tablo 2).



Şekil 8. İnsan kulağı konfor sınırı [8]

**Tablo 2.** Yüksek hızlı demiryolları için kulak zarı konfor kriterleri (Tek tip) [8]'den değiştirilerek.

Ülke	Tren yolu	Eşik değeri			Zamanlar	Sızdırmazlık özelliği
		Genlik (kPa)	Gradyan (kPa/s)	Basınç değişimi (kPa)		
Japonya	Shinkansen	1	0.20.3~0.4	/	/	var
İtalya	FS	1,5	0,5	/	/	var
Güney Kore	KTX	/	/	0.8 (Tek hat tüneli)	3	var
Çin				1,25 (Çift hatlı tek tünel)		var
İsviçre	Demiryolu 2000	/	/	1,5	4	var
Almanya	Tek hat	0,5			1	
		0,8	/		3	yok
		1.0			10	
UIC	Tek ve çift hatlar	0,5			1	
		0,8			3	
		1.0	/		10	yok
		2.0			60	
ERRI C218/RP1	Tek ve çift hatlar	1.0			1	
		1,6			4	
		2.0	/		10	yok
		3.0			60	

Tünel serbet alanı hesabı: Tünel içi serbest alan hesabı "International Union of Railways-UIC Code / 779 -11 [28]" da tanımlanmıştır. Tünel içi serbest alan hesabını etkileyen faktörler, Tünel içinde izin verilen maksimum hız, tünel boyu, tren boyu, tren alanıdır (tren alanı için ilgili yayında [28] 10-12 m<sup>2</sup> arasında değer alınabileceği belirtilmektedir).

İzin verilen maksimum basınç değişimi: Trenin, tünel içinde izin verilen maksimum hızda giderken yaratacağı maksimum basınç değişiminin (pozitif ve negatif basınçların farkı olarak tanımlanır) 10 kPa değerini aşmaması gerekir. Bu değer, 12.09.2002 tarihli Avrupa Birliği Resmî Gazetesi'nde "23.06.1996 tarihli Avrupa ülkeleri arası hızlı tren ağı işletmesi konsey yönergesine" atıfta bulunan 30.05.2002 tarihli konsey kararları içinde verilmiştir (Denklem 1).

$$\Delta P (\text{maksimum basınç değişimi}) = 5.0 \text{ kPa} / 4 \text{ saniye} \quad (1)$$

Tren kesit alanını bulmak için [28]'in arkasında verilen grafiklerden uygun trafik tipine, araç cinsine ve tünel içinde izin verilen maksimum hıza uygun olan grafik seçildikten sonra (Tünel boyu) / (Tren boyu) oranı ile tünel içinde izin verilen maksimum basınç değişimini grafik üzerinde keşiştiği noktaya göre "B: Tren alanı ile tünel içi serbest alan arasındaki oran" bulunur. Bu değer hesaplandıktan sonra tünel içinde kullanılacak olan trenin kesit alanı, bu değere bölünerek "tünel içi serbest alan" hesaplanmış olur.

### 2.3. Tünelde drenaj sistemleri ve sorunlar

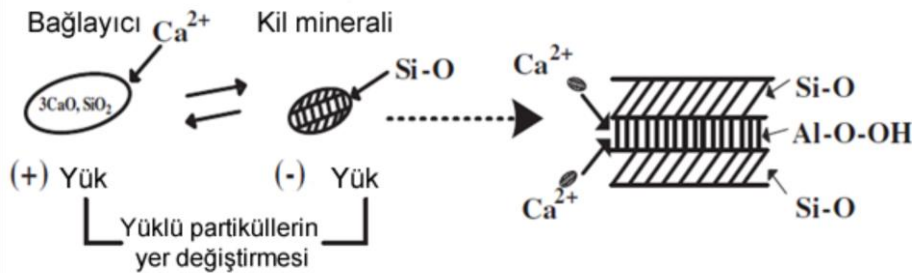
Tünelde drenaj sorunlarının temeli kalsit yığılımları kökenlidir. Kalsit yığılımları, demiryolu tünellerinin drenaj sistemlerinde barbakanların ve su oluklarının tıkanmasına neden olarak, demiryolu hatlarında ve akabinde tren sirkülasyonunda ciddi problemler ortaya çıkartmaktadır. Bu sızıntıyı boşluk suyu basıncındaki artış hızlandırabilir ve bunun sonucunda tünel kaplamasında ciddi şekilde bozulma oluşabilir [29, 30].

Genel olarak, tünel tasarımında drenaj tipi belirlenirken tünel kaplaması üzerinde etkin boşluk suyu basıncı ( $u$ ) dikkate alınmaz, yani  $u = 0$ 'dır. Çünkü suyun drenaj sistemi aracılığıyla tünele akmasına izin verilir. Bununla birlikte, birincil kaplama üzerindeki su basıncı, drenaj işlevi ile doğrudan bağlantılıdır. Bu nedenle, drenaj düzgün çalışmadığı takdirde küçük bir miktar içeri su girişi durumunda bile, su basıncı beton kaplama yapısı üzerinde yıkıcı bir etki yapabilir [31].

Kalsiyum karbonatın çökeltim mekanizması: Tünel drenaj sistemlerinde oluşan ana tortulaşma mekanizmasını Jung vd. [32] 3 farklı aşamada özetlemektedirler;

(1) Tünel içine akan noktasal olmayan kirlilik kaynağı ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , araç egzoz gazının ana bileşeni  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}_2$  vb. topraktaki mikrobiyal metabolik aktivitenin neden olduğu) su tarafından emilen tortuyu etkiler. Adsorbe edilen tortu elektrolit konsantrasyonunu değiştirir, ki bu tortunun birikmesine (kristalleşmeye) neden olan yapıstırıcı ve bağlayıcı görevi görür.

(2) Tünel içerisinden sızan yeraltı suyu ile beton yapılarda ayrıştırılan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  toprakla birleşerek reaksiyona girer ve buna Puzolanik reaksiyon denir. Diğer bir deyişle, drenaj açıklığı içinde negatif (-) yüklü özelliklere sahip toprak parçacıklarının çoğundan oluşan kil ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bileşenlerinin  $\text{Ca}^{2+}$  iyonu birbiriyle birleşerek bir kristal oluşturur (Şekil 9).



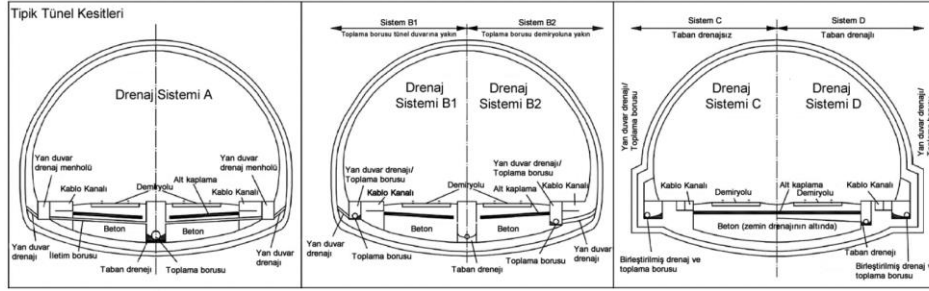
Şekil 9. Puzolanik reaksiyon [32]

(3) Toprak partiküllerinde adsorbe edilen suyun buharlaşması sonucu tortu kristalleşmeye (Kolloid → Kabalaşma) dönüşebilir. Kalsiyum karbonat oluşum süreci, Şekil 10'da gösterildiği gibi tünel drenaj açıklığında biriken tortuya neden olur.



Şekil 10. Kalsiyum karbonat oluşumu [32]

Dünyadaki son teknoloji drenaj ve su geçirmezlik sistemleri: Bu bölümde, dünyadaki drenaj ve su geçirmezlik sistemlerinin son durumu hakkında kısa bir inceleme yapılarak kullanılan yeni yöntemler özetlenmeye çalışılmıştır. Avrupa'daki hızlı tren tünellerindeki drenaj sistemleri Gamisch ve Girmscheid [33]'e göre, tüneldeki su durumuna göre konumlandırılmıştır (Şekil 11).



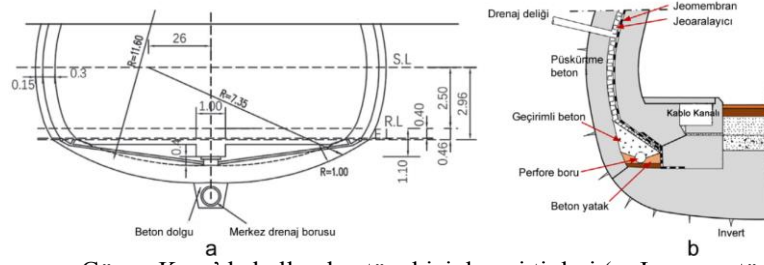
Şekil 11. Avrupa'daki bazı drenaj sistemleri (A; tünel tabanında ana drenaj borusu yer almaktadır. Su önce kenarlardaki drenaj borularına ardından enine borularla ana drenaj borusuna gelir. 88 metrede birde menhol bulunmaktadır. B tipinde orta drenaj ve yan drenajlar ayrıdır. C tipi orta drenaj yoktur. D tipi 2 yan drenaj içerir [33])

İsveç ve Norveç gibi kuzey Avrupa ülkelerinde sağlam kaya tünelleri bulunmaktadır. Kaya tünellerinde tek kat kaplama yaygın olarak uygulanır. Kaya tünellerinin su geçirmezlik ve drenaj sistemleri püskürtme beton ve bulondan oluşur. Farklı türde çelik bağlantı parçaları ile köpüklü bir polietilen kaplama monte edilerek püskürtme betonla kaplanır (Şekil 12). Su, şilteler üzerinde toplanır ve tünelin altındaki drenaj boruları ile tünelden dışarı yönlendirilir.



Şekil 12. Monte edilmiş standart drenaj matı [34]

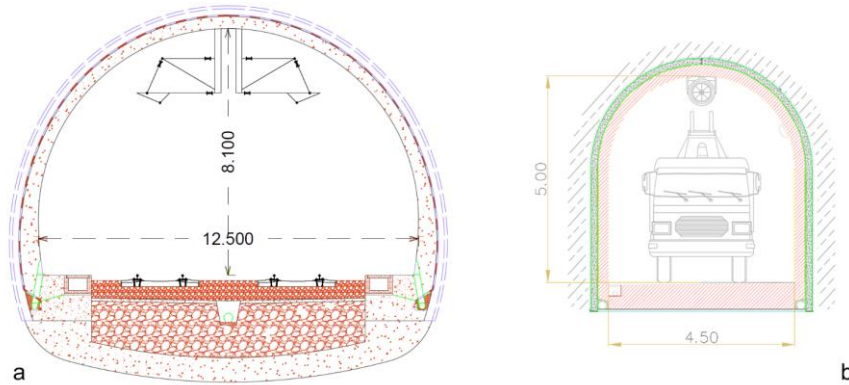
Japonya, Güney Kore ve Çin'deki çoğu tünelde uygulanan drenaj sistemi neredeyse birbiriyle aynıdır. Nihai kaplamanın arkasındaki su basıncını azaltmak için su boşaltılır. Su yalıtımı, membranın arkasında olduğu jeotekstil veya geokompozit bir tabaka ile sağlanır. Ek olarak bazı durumlarda su, yan duvar tahliye boruları vasıtasıyla toplanıp enine borular vasıtasıyla tünelin orta tabanındaki ana tahliye borusuna iletilmektedir. Ana gider hariç bu boruların üst kısımları deliklidir. Drenaj sistemi ise, boyuna drenaj borusu, dairesel drenaj borusu, merkezi drenaj kanalı, menhollerle oluşturulmaktadır. Buradaki ana unsur, merkezi drenaj kanalının ayarlandığı konumdur (Şekil 15).



**Şekil 13.** Japonya ve Güney Kore'de kullanılan tünel içi drenaj tipleri (a: Japonya, tünel tabanı drenaj kanalı [35]; b: Güney Kore, Birincil kaplama ile nihai kaplama arası geokompozit, membran ve tünel arkası su toplama borularının birlikte kullanımı; [48])

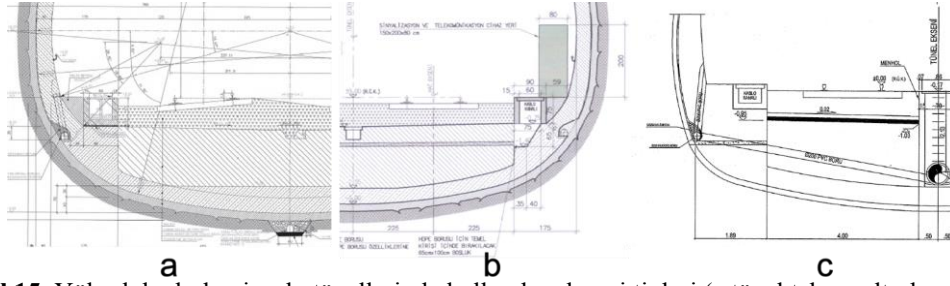
### 3. Türkiye'de YHT Tünelleri

2003 yılındaki adıyla Devlet Limanlar Havayolları Genel Müdürlüğü (DLH) tarafından proje genel esasları belirlenen ve sonrasında yayımlanan [49] Yüksek Hızlı Demiryolu (YHT) çalışmalarına yine aynı yıl Ankara-İstanbul YHT projelendirme çalışmaları ile başlanmıştır. Tünel kesiti olarak çift hatlı tek tüp tünel kesiti benimsenmiş, 85 m<sup>2</sup> minimum serbest alan olacak şekilde tünel boyutlandırılmıştır (12,5 m genişliğinde 7,5 m yüksekliğinde). O tarihten itibaren projelendirme çalışmaları bu esaslara göre ilerlemiştir. Günümüzde YHT proje ve imalat çalışmaları TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları) ve AYGEM (Alt Yapı Yatırımları Genel Müdürlüğü) tarafından yürütülmektedir. İşletmeye 99,63 km tünel açılca da farklı hatlarda 132,18 km tünel imalatı tamamlanmış 79,44 km tünel imalatı da devam etmektedir. 2003 yılında belirlenen tünel tasarımı neredeyse hiç değiştirilmeden 180 m uzunluktan 9700 m uzunluğa kadar tüm YHT tünellerinde uygulanmış veya uygulanmaya devam etmektedir (Şekil 14a). Tünel ve yolcu güvenliğinin YHT hatlarında sağlanması amacı ile UIC tarafından 2008 yılında yayımlanan Tünel güvenlik [4] standart belgesinin ardından Ankara-İstanbul YHT projesinde 2013 yılında ilk kez acil durum müdahalesi de düşünülerek 5 m yükseklikte ve 4,5 m genişlikte tünel kesiti planlanmış ve o tarihten itibaren, tamamlanan ve yapım aşamasında olan tüm ana hat YHT (Ankara-İstanbul; Bursa-Osmaneli; Ankara-Sivas; Ankara-İzmir) tünellerinde bu kesit kullanıma başlanmıştır. (Şekil 14b).



**Şekil 14.** Yüksek hızlı demiryollarında uygulanan tünel tip kesitleri (a: çift hatlı tek tüp ana hat tüneli [50], b: güvenlik tüneli [51])

Türkiye'deki YHT tünellerinde uygulanan tünel içi drenaj sistemleri dünyadaki uygulamalar özellikle Japonya ile paralellik göstermektedir. Tünellerin geçtiği jeolojik birimlerin geçirgenlik özelliklerinin değişkenliği nedeniyle tünellerdeki su durumuna göre farklı planlamalar yapılmaktadır. Buradaki temel farklılık taban altı drenaj sistemi ve bu sistemin yan drenaj sistemi ile bağlantısıdır. Tünel içine su geliş miktarına göre taban drenaj çapı, menhol ve yan drenaj bağlantı sıklığı artırılmaktadır (Şekil 15).



Şekil 15. Yüksek hızlı demiryolu tünellerinde kullanılan drenaj tipleri (a tünel tabanı altı drenajı, b: sadece tünel kaplama arkası drenajı, c: tünel taban drenajı ve menhollü; [52])

Ülkemizdeki YHT Tünellerinde giriş çıkış yapısı olarak (flüt yapısı) 2 farklı tip kullanılmaktadır. Bunlar düz 45° ve 33° eğimde yapılardır. (Şekil 16). Tünel içlerinde 1,25 m genişliğinde 2,25 m yüksekliğinde kablo kanalı üzerinde yürüme yolu ve her 750 m bir 20 m genişliğinde cep bölgesi oluşturulmuştur.



Şekil 16. Tünel giriş-çıkış yapıları (a: 45 derece; b: 33 derece)

#### 4. YHT Tünellerinde Yaşanan Sorunlar

Türkiye’de demiryolu serüveni 1866 yılında İzmir-Aydın demiryolu ile başlasa da modern anlamda ilk YHT tüneli Ankara-Eskişehir hattında yer alan ve 2006 yılında tamamlanan 471 metrelik Duatepe (Kartaltepe) tüneldir. Ardından Ankara-Konya ve Köseköy-Gebze arasında 31 farklı tünel (yaklaşık 46 km) işletmeciliğe açılmıştır. 2008 yılından günümüze işletmecilik faaliyetleri yürütülen tünellerde sorumlu personelin gayretleri ve alınan tedbirler ile herhangi bir sorun oluşmasına müsaade edilmese de tünel içi drenaj sorunları yaşandığı rapor edilmiştir.

##### 4.1. Tünel içi yapısal sorunlar

Tünel içi yapısal sorunların başında tünel girişlerinde yaşanan kısa süreli ve ani sarsıntı ve basınç artışları gelmektedir. Kısa süreli oluşan basınç farklılığı özellikle küçük yolcular tarafından hissedilmektedir. Bir diğer yapısal sorun ise kablo kanallarının konumudur. Kablo kanallarının konumu, yüksekliği ve kapak tasarımı sonucunda bakım sorunlarının oluştuğu bilinmektedir. Kablo kanalları tünel kenarında drenaj kontrol bacalarının yanında bulunmaktadır. Bu konum sonucu drenaj sorunu olan tünellerde kablo kanalının içerisi su dolmaktadır. Bir diğer konu ise kablo kanal kapaklarının tipleridir. Ülkemizde ve dünyada farklı tip kapaklar kullanılmaktadır. Ortası boşluklu (Şekil 17a) tip kablo kanallarında ince yapıldığında kırılmalar kalın yapıldığında da bakım sırasında kapağı kaldırmakta sorunlar yaşanmaktadır. Demir tutamaklı kanallarda ise tutamaklarla ilgili sorunlar olmakta zaman zaman kablo kapağı tutamak bağlantı noktalarında ve kapak kenarlarında kırılmalar gözlemlenmektedir (Şekil 17b).





Şekil 17. Tünel içi kablo kanalı kapak tipleri (a: iç tutamaklı, b: demir tutamaklı)

#### 4.2. Tünel içi drenaj sorunları

Tünel içi drenaj sorunlarının başında tünel içi kontrol bacalarından sızan sular gelmektedir. Yüksek hızlı demiryollarında uygulanan %16 maksimum eğim suyun akışını sağlasa da çakıl, beton parçası, inşaat atığı vb. yabancı maddeler akışı engellemekte, zamanla kalsit çökelmelerinin de etkisiyle tıkanıklıklar oluşmaktadır. Tıkanan noktalarda su kontrol bacasından taşmakta tünel eğimi boyunca birkaç ano katettikten sonra ano birleşim noktalarından tekrar tünel içerisinde kaybolmaktadır. Özellikle suların kontrol bacasından çıkışı sırasında su içerisinde çözülmüş halde bulunan kalsiyum karbonat gibi eriyik haldeki çözeltiler tünel içerisine çökelmektedir. Tıkanıklığın bulunduğu noktalarda bakım ekipleri su jeti ve çeşitli kimyasallar kullanarak tıkanıklığı açmaktadır.



Şekil 18. Tünel içi drenaj sorunları (a: beyaz renkli kalsit çökelimi; b: siyah renkli kalsit çökelimi; c: tünel tabanından su gelişi; d: tünel duvarından su gelişi ve kalsit çökelimi)

#### 5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, 20 yıldır dizaynı neredeyse hiç değişmeyen tek tüp, çift hatlı yüksek hızlı demiryolu tünellerinin dizaynına odaklanılmıştır. Bundaki temel gaye dünyada yaşanan son gelişmeler ve ülkemizde işletmecilik sırasında edinilen tecrübeler ile gelecekte yapılması planlanan projeler için önerilerde bulunmaktır. Bu kapsamda;

- 1- 1000 metreden uzun tünellerde güvenlik tüneli oluşturulması 5000 metreden uzun tünellerin tek hatlı çift tünel olarak planlanması tünel emniyeti açısından önerilmektedir. Ek olarak planlanan tünellerin güvenliğinin oluşturulabilmesi için UIC ve TSI standartlarında belirtilen özelliklere ek olarak her tünel araçla müdahale durumuna göre değerlendirilmelidir.
- 2- Demiryolu tünellerindeki aerodinamik etkileri azaltmak için kullanılacak araçlarda ve halihazırda ülkemizde tasarım-imalat aşamasında olan hızlı ve yüksek hızlı yük-yolcu araçlarında burun yapılarında hava akımına müsaade eden ve minimum 2 metre uzunluğunda bir yapının tercih edilmeli, tren arka yapılarında ise küt bir tasarım yerine akıcı (kavisli) bir yapı tercih edilmelidir.
- 3- Tünellerin giriş-çıkış yapılarında mikro basınç dalgalarına karşı oluşturulan yapılarda ülkemizde uygulanan düz-eğimli yapılar yerine farklı araştırmacılar tarafından verimliliği kanıtlanmış 33° eğimli şapka şekilli ve tepe noktasında tek pencere yapıları kullanılmalıdır.
- 4- Tünel şekli ve genişliği maliyeti doğrudan etkileyen en önemli parametredir. Dolayısıyla optimum tünel şeklinin ve genişliğinin belirlenmesi çok önemlidir. Tünel şeklinin ve genişliğinin belirlenmesi amacı ile UIC CODE 779-11 [28]'de tariflenen serbest alan hesabı kullanılmaktadır. Bu standartta temel alınan değer yolcu kulağı rahatlığıdır. Standartta belirtilen değerlerle birlikte kulağa uygulanan basınç değeri birbirinden bağımsız birçok farklı parametreye bağlıdır. Örneğin hava geçirgenliği düşük olan bir tren ile nispeten hava geçiren bir trende hissedilen değerler artmaktadır. Tünel içerisinde hava akımı şiddeti ve yönü de kulak rahatlığını etkilemektedir. Yine benzer şekilde tünelde havalandırma şaftının olması, acil kaçış ya da yaklaşım tünelinin olması gibi durumlarda kulak rahatlığını etkilemektedir. Dolayısıyla her tünel kendi özel koşullarına göre değerlendirilmelidir. Bir diğer önemli husus ise iki trenin tünel içerisinde karşılaştığı durumlardır. Böyle durumlarda trenlerin birbirine olan mesafesinden daha çok trenin tünel duvarına olan mesafesi önem kazanmaktadır. Bu noktada tren ile duvar arasındaki boşluk mümkün olduğunca arttırılmalıdır. Birbirine çok yakın tünellerin ayrı ya da birleşik olmasının aerodinamik açıdan bir farklılık oluşturmadığı anlaşılmıştır. Ancak böyle durumlarda acil kaçış ve müdahale durumları da değerlendirilerek iki tünel arasının açık bırakılması maliyet etkin bir çözüm olmaktadır.
- 5- Ülkemizdeki tünel içi drenaj sisteminde kullanılan boru tip ve yerleşim planları dünyadaki uygulamalar ile paralellik göstermektedir. Tünelde yaşanan drenaj sorunları da yine dünyada yaşanan sorunlarla paraleldir. Öncelikle halen tünelin bir kısmı için kullanılan su tutucu mat (membran) tüm tüneli kapsayacak şekilde (tünel tabanına) uygulanması gerekmektedir. Klasik su tutucu mat imalatı çift katlı kaynak ile yapılmakta ve dikkatli işçilik gerektirmektedir. İmalat sırasında oluşabilecek sorunlarını gidermek için likit (sürülebilir) drenaj matları tercih edilebilir.
- 6- Tünelde birincil kaplama ile ikincil kaplama arasında kullanılan Tünel Tipi PVC drenaj borusunun [36] tıkanmasını önlemek amacı ile düz ve delikli boru tipine geçilmesi gerekmektedir. Ayrıca su gelişi beklenen tünellerde Şekil 11-d'de gösterilen drenaj kanal tip kesitleri kullanılmalıdır.
- 7- Tünellerde sorun yaratan bir diğer konu ise kablo kanallarının konumu ve kapaklarıdır. Yaya yürüme yolu olarak da kullanılan bu yapılar zaman zaman kırılmakta veya bakım sırasında bakım yapan personele kaldırıp indirmekte zorluk oluşturmaktadır. Bu noktada kablo kanalının konumu tünel yan duvarı içerisine alınarak çözülebilir.

Yukarıda derlenmeye çalışılan bilgiler çerçevesinde yaklaşık 20 yıldır değişmeden yüksek hızlı demiryolu tünel kesitinde ve giriş-çıkış yapısında yapısal ve geometrik iyileştirmeler gerektiği, ek olarak açılacak olan tünelin uzunluğu, çevresiyle olan ilişkisi, hava akımı durumu, tünel içi

havalandırma bacası, yaklaşım tüneli içermesi durumlarına göre tünellerin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

### Teşekkür

Yazar bu çalışma kapsamında TCDD yetkili personeline göstermiş oldukları yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür eder.

### Kaynakça

- [1] Concerning the technical specification of interoperability relating to ‘safety in railway tunnels’ in the trans-European conventional and high-speed rail system, TSI, 2008/163/EC, 2008.
- [2] D. Diamantidis, F. Zuccarelli, A. Westha, “Safety of long railway tunnels,” *Reliability Engineering and System Safety*, 67, 135-145, 2000.
- [3] E. Poşluk, M. Korkanç, “Yüksek Hızlı Demiryolu Tünellerinde Güvenlik Tüneli Modellemeleri: Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 26 Numaralı Tünel Örneği,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6/2, 642-652, 2017.
- [4] Safety in railway tunnels, UIC Code 779-9, 2003.
- [5] Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), BS EN 50126, England, 1999.
- [6] J.A. Schetz, “Aerodynamics of high-speed trains,” *Annu. Rev. Fluid Mech.* 33 (1) 371–414, 2001.
- [7] C.J. Baker, “A review of train aerodynamics Part 1–Fundamentals,” *Aeronaut. J.* 118 (1201) 201–228, 2014.
- [8] J. Niu, Y. Sui, Q. Yu, X. Cao, Y. Yuan, “Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research,” *Energy and Built Environment*, 1(4), 351-375, 2020.
- [9] P. Xue, S. You, J. Chao, T. Ye, “Numerical investigation of unsteady airflow in sub-way influenced by piston effect based on dynamic mesh,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40 174–181, 2014.
- [10] T. Moreno, N. Pérez, C. Reche, V. Martins, E. de Miguel, M. Capdevila, S. Centelles, M.C. Minguillón, F. Amato, A. Alastuey, X. Querol, W. Gibbons, “Subway platform air quality: assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design,” *Atmos. Environ.*, 92 461–468, 2014.
- [11] M. Juraeva, J.H. Lee, D.J. Song, “A computational analysis of the train-wind to identify the best position for the air-curtain installation,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 99 (5) 554–559, 2011.
- [12] M. Fu, P. Li, X.F. Liang, “Numerical analysis of the slipstream development around a high-speed train in a double-track tunnel,” *PLoS ONE*, 12 (3) e0175044, 2017.
- [13] A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof, “CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 139 100–110, 2015.
- [14] M. Rabani, A.K. Faghieh, “Numerical analysis of air flow around a passenger train entering the tunnel,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45 203–213, 2015.
- [15] Y.C. Ku, J.H. Rho, S.H. Yun, M.H. Kwak, K.H. Kim, H.B. Kwon, D.H. Lee, “Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to minimize the tunnel micro-pressure wave,” *Struct. Multidiscipl. Optim.* 42 (6), 965–976, 2010.
- [16] J.K. Choi, K.H. Kim, “Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 62–73, 2014.
- [17] M. Suzuki, “Unsteady aerodynamic force acting on high speed trains in tunnel,” *Q. Rep. RTRI* 42 (2) 89–93, 2001.
- [18] T. Miyachi, T. Fukuda, S. Saito, “Model experiment and analysis of pressure waves emitted from portals of a tunnel with a branch,” *J. Sound Vib.* 333 (23), 6156–6169, 2014.
- [19] A. Baron, M. Mossi, S. Sibilla, “The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 89 (5), 365–401, 2001.
- [20] F. Liu, S. Yao, J. Zhang, Y.B. Zhang, “Effect of increased linings on micro-pressure waves in a high-speed railway tunnel,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52, 62–70, 2016.
- [21] K. Kikuchi, M. Iida, T. Fukuda, “Optimization of train nose shape for reducing micro-pressure wave radiated from tunnel exit,” *J. Low Frequency Noi. Vibrat. Act. Control*, 30 (1), 1–19, 2011.
- [22] M. Iida, T. Matsumura, K. Nakatani, T. Fukuda, T. Maeda, “Effective nose shape for reducing tunnel sonic boom,” *QR of RTRI*, 38 (4), 206–211, 1997.

- [23] L. Zhang, M.Z. Yang, X.F. Liang, J. Zhang, "Oblique tunnel portal effects on train and tunnel aerodynamics based on moving model tests," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 167, 128–139, 2017.
- [24] M.S. Howe, "The genetically optimized tunnel-entrance hood," *J. Fluids Struct.*, 23 (8), 1231–1250, 2007.
- [25] D. Heine, K. Ehrenfried, G. Heine, S. Huntgeburth, "Experimental and theoretical study of the pressure wave generation in railway tunnels with vented tunnel portals," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 176, 290–300, 2018.
- [26] X. Xiang, L. Xue, B. Wang, W. Zou, "Mechanism and capability of ventilation openings for alleviating micro-pressure waves emitted from high-speed railway tunnels," *Build. Environ.*, 132 245–254, 2018.
- [27] W. Li, T. Liu, P. Martinez-Vazquez, Z. Chen, Z. Guo, M. Li, H. Liu, "Aerodynamic effects of a high-speed train travelling through adjoining & separated tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 113, 103–973, 2021.
- [28] *Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations*, UIC code 779-11, 2005,
- [29] L.N. Reddi, X. Ming, M.G. Hajra, I.M. Lee, "Permeability reduction of soil filters due to physical clogging," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (3), 236–246, 2000.
- [30] J.H. Shin, T.I. Addenbrooke, D.M. Potts, "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour," *Geotechnique*, 52 (6), 391–403, 2002.
- [31] C. Oggeri, G. Ova, "Quality in tunnelling," *Tunnelling and underground space technology*, 19, 34, 2004.
- [32] H.S. Jung, Y.S. Han, S.R. Chung, Chun, B.S., Lee, Y.J., "Evaluation of advanced drainage treatment for old tunnel drainage system in Korea," *Tunnelling and underground space technology*, 38, 476–486, 2013..
- [33] T. Gamisch, G. Girmscheid, "Future trends in construction and maintenance management of drainage systems in traffic tunnels," *Tunnelling Towards Better Cities*, 5-2, 2005.
- [34] H. Stripple, L. Bostrom, T. Ellison, C. Ewertson, P. Lund, R. Melander, "Evaluation of two different drainage systems for rock tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 58, 40–48, 2016.
- [35] CARS, "Report on the Railway Tunnel Drainage Techniques," *Tech. rep. China Academy of Railway Sciences*, Beijing (Chinese), 2016.
- [36] *DIN 4262-1: 2009-10, "Rohre und Formstücke für die unterirdische Entwässerung im Verkehrswege- und Tiefbau – Teil 1: Rohre, Formstücke und deren Verbindungen aus, PVC-U, PP und PE*, 2009.
- [37] C.J. Baker, "A review of train aerodynamics Part 2–Applications," *Aeronaut. J.* 118 (1202), 345–382, 2014.
- [38] J.Y. Kim, K.Y. Kim, "Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 97 (5), 174–179, 2009.
- [39] M. Juraeva, J.H. Lee, D.J. Song, "A computational analysis of the train-wind to identify the best position for the air-curtain installation," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99 (5), 554–559, 2011.
- [40] [40] Y.D. Huang, L.I. Chan, N.K. Chang, "A numerical analysis of the ventilation performance for different ventilation strategies in a subway tunnel," *J. Hydrodyn. Ser. B* 24 (2), 193–201, 2012.
- [41] C.R. Chu, S.Y. Chien, C.Y. Wang, T.R. Wu, "Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 161–174, 2014.
- [42] B. Diedrichs, S. Krajnovi, M. Berg, "On The Aerodynamics Of Car Body Vibrations Of High-Speed Trains Cruising Inside Tunnels," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 2 (1) 51–75, 2008.
- [43] M.S. Howe, M. Iida, T. Fukuda, T. Maeda, "Theoretical And Experimental Investigation Of The Compression Wave Generated By A Train Entering A Tunnel With A Flared Portal," *J Fluid Mech* 425, 111–132, 2000.
- [44] M.S. Howe, M. Iida, T. Fukuda, "Influence of an unvented tunnel entrance hood on the compression wave generated by a high-speed train," *J. Fluids Struct.* 17 (6) 833–853, 2003.
- [45] M.S. Howe, A. Winslow, M. Iida, T. Fukuda, "Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood: short hoods," *J. Sound Vib.*, 311 (1–2), 254–268, 2008.
- [46] M. Suzuki, *Flow-induced vibration of high-speed trains in tunnels, The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*, Heidelberg: Springer, 2004.
- [47] J. Lee, J. Kim, "Approximate optimization of high-speed train nose shape for reducing micropressure wave," *Struct. Multidiscipl. Optim.* 35 (1) 79–87, 2008.
- [48] D. Kolymbas, *Tunnelling and Tunnel Mechanics A Rational Approach to Tunnelling*, Heidelberg: Springer, 2005.

- [49] P. Yüksel, "Demiryolları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları," Demiryolları, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Ankara: 2007.
- [50] Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., "Ankara- İstanbul Hızlı Tren Projesi Tünel Destek Paftaları," Yayınlanmamış, 2013.
- [51] O. Şimşek, E.B. Aygar, A. Ertin, "Ankara- İstanbul Hızlı Tren Projesi Güvenlik Tünelleri Paftaları," SIAL Yer Bilimleri Ltd. Şti., Yayınlanmamış, 2009.
- [52] O., Şimşek, E.B. Aygar, "Bursa-Yenişehir Yüksek Hızlı Tren Projesi Drenaj Paftaları," Fugro-SIAL Yer Bilimleri Ltd. Şti., Yayınlanmamış, 2014.

### Özgeçmiş



#### **Evren POŞLUK**

1981 yılında Niğde’de doğmuştur. Lisans ve yüksek lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Halen TCDD 1. Bölge Müdürlüğü’nde çalışmakta olup İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında doktora öğrenimine devam etmektedir.

E-Posta: evrenposluk@gmail.com

#### **Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



## Design of a Metro Train and Structural Analysis of the Metro Vehicle Body by Finite Element Method

Muhammed Emin ARI<sup>\*1</sup>, İsmail ESEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Karabük University, Institute of Graduate Programs / Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

<sup>2</sup> Karabük University, Engineering Faculty / Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

\*muhammedeminari@gmail.com

(Alınış/Received: 03.11.2021, Kabul/Accepted: 01.12.2021, Yayınlama/Published: 31.01.2022)

**Abstract:** Since metros are high capacity, fast and large in size compared to other urban rail vehicles, the importance of body strength is very critical. In this study, a four-car metro system was designed and structural analyses of the vehicle body were carried out using the finite element method according to EN 12663-1 standard. Structural analyses were performed under three different conditions. the total mass of the 22.7 m long vehicle with all its equipment was 35000 kg, and the total passenger mass was calculated as 27020 kg based on the presence of 8 passengers per square meter, and the total total mass was taken as 62020 kg. Various sizes of SUS304 stainless steel profiles and sheet materials have been selected for the body carrier skeleton system of the vehicle. In the analysis; vertical loads were made on the passenger side of the vehicle body and horizontal compression loads were made on the bumper areas and maximum stress and displacement amounts were determined. It was found that in the passenger compartment of the car body, the maximum amount of stress in vertical loads is below the yield stress, but in the case of compression loading in the bumper area, the maximum stress is above the yield stress. In order to provide the necessary stress conditions for the design of the buffer zone and its surroundings, solution proposals have been made to revise the design.

**Keywords:** Metro train, Urban rail system, Computer aided design (CAD), Finite element analysis (FEA), Structural analysis, Static-strength analysis

### Bir Metro Treni Tasarımı ve Metro Araç Gövdesinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapısal Analizi

**Öz:** Metrolar, diğer kent içi raylı araçlara göre yüksek kapasiteli, hızlı ve büyük boyutlu oldukları için gövde dayanımlarının önemi oldukça kritiktir. Bu çalışmada dört vagonan oluşan bir metro sistemi tasarlanmış ve araç gövdesinin EN 12663-1 standardına göre sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal analizleri yapılmıştır. Yapısal analizler üç farklı koşulda incelenmiştir. 22,7 m uzunluğundaki aracın, tüm ekipmanlarıyla birlikte toplam kütlesi 35000 kg, metre karede 8 yolcu bulunma durumuna göre toplam yolcu kütlesi 27020 kg hesaplanarak genel kütlelerin toplamı 62020 kg olarak alınmıştır. Aracın gövde taşıyıcı iskelet sistemi için değişik boyutlardaki SUS304 paslanmaz çelik profil ve sac malzemeler seçilmiştir. Analizde; araç gövdesinin yolcu bölümüne dikey yüklemeler, tampon bölgelerine de yatay olarak sıkıştırma yüklemeleri yapılarak maksimum gerilme ve yer değiştirme miktarları tespit edilmiştir. Araç gövdesinin yolcu bölümünde, dikey yüklemelerdeki maksimum gerilme miktarının akma gerilmesinin altında olduğu ancak tampon bölgesindeki sıkıştırma yüklemesi durumunda maksimum gerilmenin akma gerilmesinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Tampon bölgesi ve çevresinin tasarımında gereken gerilme şartlarını sağlamak amacıyla tasarımın revize edilmesi için çözüm önerilerinde bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Metro treni, Kent içi raylı sistem, Bilgisayar destekli tasarım (BDT), Sonlu elemanlar analizi (SEA), Yapısal analiz, Statik-mukavemet analizi

## 1. Introduction

There are many factors such as passenger volumes, topography, climate, station spacing, economy and vehicle aesthetics that are decisive in the creation of rail system vehicle designs

Atıf için/Cite as: M. E. Arı, İ. Esen, "Design of a metro train and structural analysis of the metro vehicle body by finite element method," *Railway Engineering*, no. 15, pp. 30-45, Jan. 2022 doi: 10.47072/demiryolu.1018663

[1], [2]. But the most fundamental factor in vehicle design is passenger volume. The amount of population in the cities and the size of this population's need for rail vehicles determine the type of vehicle to be preferred its carrying capacity and thus the body size. Adopting the understanding of modern urbanism in cities, city administrations prefer the rail system, which is efficient, fast, comfortable and economical transportation [3]. The most advanced mode of urban rail systems is metro transportation. Metro transportation is very preferred in crowded cities due to its fast, reliable, comfortable and high passenger capacity [4]. Metros are urban rail system vehicles that are mostly operated in underground tunnels, but can also operate on the ground when necessary, and are fully protected thanks to their signalling systems [5], [6]. The high importance of human influence in metro systems highlights the safety factor in vehicles. Therefore, vehicle body designs should be at a level to provide body strength conditions that will allow the maximum capacity of passenger density to be carried and to meet the need for intensive passenger transportation for many years.

Factors such as the number of wagons, seating capacities, body sizes, and number of passenger doors in metro systems vary according to the limits required by cities in vehicle capacities. In this study, a metro system consisting of four wagons and four passenger doors on the right and left of each wagon, a total of eight passenger doors, is designed. The length of the wagons at the front and rear ends is 22.7 m, and the length of each of the two wagons in the intermediate zone is 21.583 m. The total seating capacity of this four-car system is 202 people. The passenger capacity that can travel standing is 1044 people in total, according to the density of 6 passengers per square meter, and the total number of standing and seated passengers is 1246 people. The optimum number of standing passengers per square meter in metro vehicles is 6 people. However, since higher strength was aimed in the analysis conditions, the number of passengers per square meter was kept at the maximum level and 8 people were accepted and static strength analysis of the vehicle body was made under these conditions.

Kim et al. examined and carried out studies on a train body made of composite material, adhering to the operating conditions of the train. Kim et al. studied the vertical collapses and cross-sectional deformations with the help of finite element method (FEM) [7]. Kim and Jeong investigated the natural frequency analysis of the train body using the finite element method in their study on a 23 m long aluminium core carbon epoxy surface, composite structure Korean tilt train. As a result, Kim and Jeong compared the results of the obtained data with the measured data [8]. Kotil et al. investigated the static structural behaviour of a light metro vehicle using the finite element method [9]. Wu et al. have worked on subway collision animation based on ANSYS data and determined the deformations of the train body in the collision area [10]. Nas et al. carried out the structural designs of a light metro vehicle [11]. Küçükciçibıyık et al. examined the structural analysis of a light rail vehicle body using the finite element method and determined the stresses and displacements in the body [12]. In this study, the metros, which are the highest-capacity public transportation vehicles of urban rail transportation, are emphasized. The importance of body strength is very critical, as metros are faster, have more passenger carrying capacity and are larger in size compared to other urban rail transportation modes. The main purpose of this study is to determine the stresses and displacement amounts by examining the body strength of a sample metro vehicle under the required loading and operating conditions.

The structural designs of railway vehicle bodies depend on the loads to which they are subjected and the material properties of the body. The EN 12663-1 standard, which defines the structural requirements of railway vehicle bodies, has emerged to ensure that the structural designs in vehicle bodies are uniform. In the system designed within the scope of this study, the most critical metro vehicle in terms of loading conditions and design parameters was determined, and the created computer aided design (CAD) model is analysed in a computer environment with the finite element method according to the conditions in the EN 12663-1 standard. The 2018

version of SOLIDWORKS commercial software was used in the design process. ANSYS Workbench commercial software version 18.1 was used for finite element analysis. The stresses and displacement amounts formed at the end of the analysis are examined and interpreted.

## 2. Method

Rail system vehicles are products with high-tech equipment, containing tens of thousands of parts and dozens of systems. There are over 100000 parts in a train set consisting of four metro cars, including only the smallest parts such as screws, nuts, etc. in various areas on the body. Traction, brake, air conditioning, auxiliary power, battery, door, passenger information, etc. in each metro vehicle. There are about 20 subsystems. Each system consists of many equipment and parts within itself. Each of the vehicles has approximately 10-15 km of cable length and about 8000-10000 cable connection ends, hundreds of meters of hydraulic system and pneumatic system piping installations. Therefore, rail system vehicles are complex systems, and the designs and production of vehicles should be carried out with disciplined approaches, adhering to international standards [13]. The design process created within the scope of this study, the determination of the technical data of the design, the finite element analysis and the loading conditions of the analysis are shown in Figure 1 step by step.

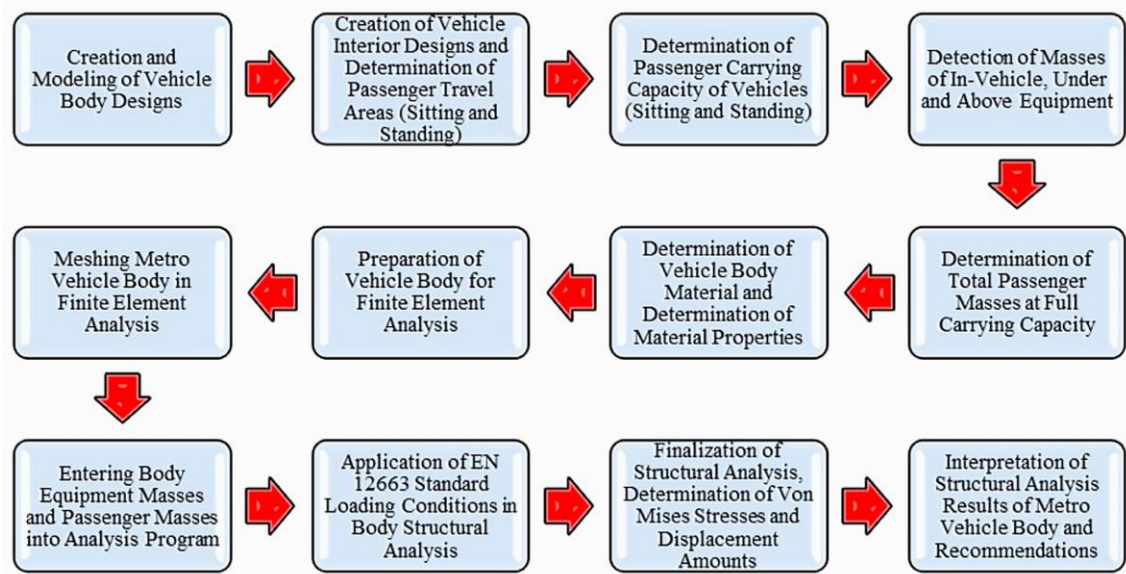


Figure 1. Design and analysis process

### 2.1. Designs of vehicle models

The design of the metro train set consists of four vehicles. These are MC1, T, M, and MC2 are vehicles. MC1 and MC2 are vehicles with propulsion systems located on both head parts of the train set. In other words, MC vehicles have a motorized bogie and driver's cabin. T and M vehicles represent the other two vehicles between the MC vehicles at the two ends of the set. The M vehicle is a vehicle with a motorized bogie but without a driver's cabin. T vehicle refers to a vehicle with a non-motorized bogie and no driver's cabin. The design of each of the metro vehicles was created using SOLIDWORKS commercial software. The general view of the vehicles in the metro set is shown in Figure 2.





Figure 2. Vehicles in the metro set

The views and chassis of MC1 and MC2 vehicles and T and M vehicles are as in Figure 3.

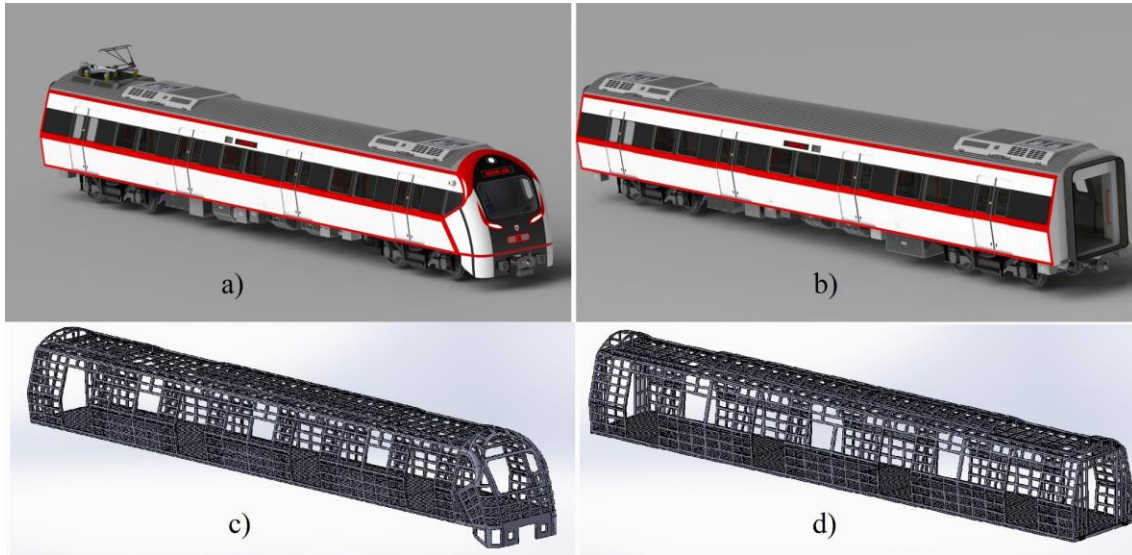


Figure 3. Metro vehicles and chassis a) MC vehicle b) M-T vehicle c) MC chassis d) M-T chassis

While designing metro vehicles, international standards and data obtained from literature research were adhered to. According to Vuchic's study, 90 vehicle models in different cities of the world were examined and based on the data obtained, the dimensions, capacities, weights and some performance data of tram, light rail, metro and suburban systems were determined. The data of the metro vehicles in this study by Vuchic are shown in Table 1 [1], [2].

Table 1. The data of a research conducted for the properties of metro vehicles [1], [2]

	Vehicle Length (mm)	Bogie Range (mm)	Body Width (mm)	Number of Motor Axles	Number of Doors on One Side	Number of Seats	Total Capacity	Empty Vehicle Weight (ton)
Minimum	14600	8200	2500	2	2	35	137	19
Average	18000	12000	2900	4	3	60	170	25
Maximum	22900	16500	3200	4	5	83	300	38

The characteristics, dimensions, passenger carrying capacities and masses of each of the MC1, T, M and MC2 vehicles in the four-car metro train designed within the scope of this study are shown in Table 2.

**Table 2.** Metro vehicle features, dimensions, passenger capacities and masses

Vehicles	Characteristics		Dimensions (mm)				Capacities (6 passenger/m <sup>2</sup> )			Mass (ton)
			Width	Length	Height	Bogie Range	Sitting	Standing	Total	
MC1	Yes	Yes	3185	22700	3725	15410	50	252	302	35
T	No	No	3185	21583	3725	14960	50	270	320	29
M	Yes	No	3185	21583	3725	14960	52	270	322	34
MC2	Yes	Yes	3185	22700	3725	15410	50	252	302	35
Total				88566			202	1044	1246	133

As seen in Table 2, the vehicles with the largest dimensions and the highest mass are the MC vehicles. Therefore, in finite element analysis, the most critical vehicles are MC when considering the relevant loadings. Therefore, in this study, the results obtained by analysing the MC wagon are interpreted.

## 2.2. EN 12663-1 Standard and vehicle body loading conditions

Design and manufacturing criteria of rail system vehicle bodies; It is specified in the standard "EN 12663-1 - Railway Applications - Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies" [14]. This European Standard; explains the rules to be considered regarding the structure of railway vehicle bodies. It describes the loads that vehicle bodies can carry and explains how to use material data where necessary. It explains the principles to be used in the control and verification of the vehicle body designs with the help of analysis and testing. Body structures in vehicle designs and load conditions applied to the body must meet the requirements of the relevant standard. The design masses to be used to indicate the vehicle load conditions according to the EN 12663-1 European Standard in the designs of railway vehicles are shown in Table 3.

**Table 3.** Definitions of rail system vehicle design masses [14]

Definition	Symbol	Description
Design mass of the vehicle body in working order	$m_1$	The design mass of the vehicle body in working order according to EN 15663 without bogie masses.
Design mass of one bogie or running gear	$m_2$	Mass of all equipment below and including the body suspension. The mass of linking elements between vehicle body and bogie or running gear is apportioned between $m_1$ and $m_2$ .
Normal design payload	$m_3$	The mass of the normal design payload as specified in EN 15663.
Exceptional payload	$m_4$	The mass of the exceptional payload as specified in EN 15663.

In the static-strength analyses of the designed metro vehicle body, three different loading scenarios are emphasized. The conditions for the loading scenarios in the static analysis are given in Table 4.

**Table 4.** Loading conditions

Condition	Load Status	Vertical Load	Horizontal Load
1	The biggest operating load (vertical load)	$F_z = 1.3 g (m_l + m_d)$	-
2	Compression force in the buffer or coupling area	$F_z = g m_l$	800 kN
3	Vertical loads with compression force in the buffer or coupling area	$F_z = g (m_l + m_d)$	800 kN

The  $g$  ( $m/s^2$ ) in Table 4 indicates the gravitational acceleration. The  $m$  (kg) values are the masses defined in Table 3.

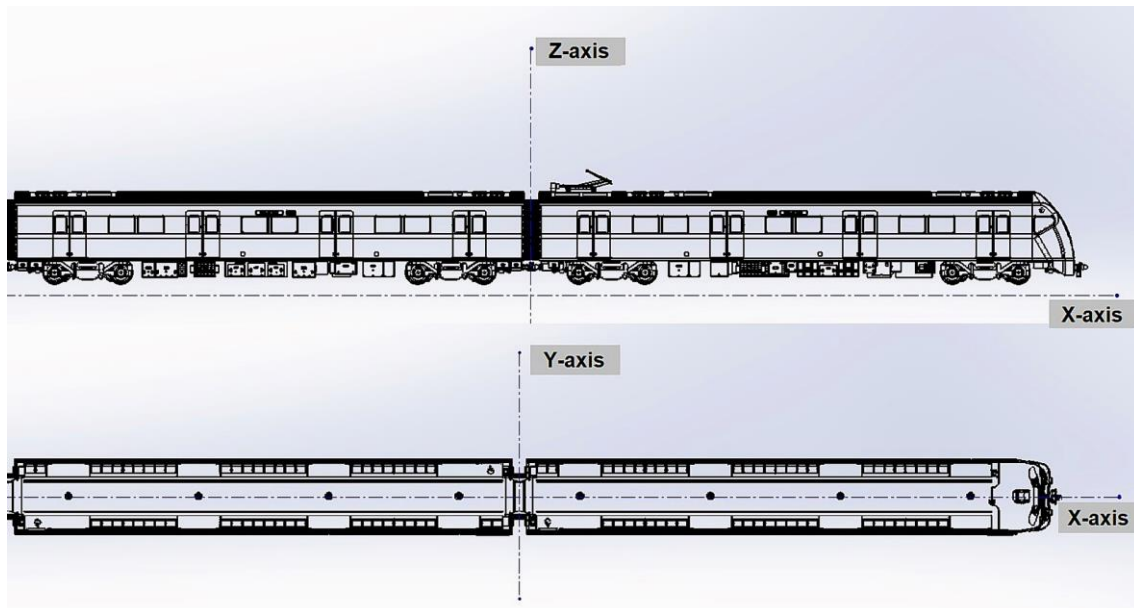
In the loading scenario in Condition 1; 1.3 times the weight of the passengers is applied in addition to the weights of all the equipment in the body of the metro vehicle. This coefficient refers to the maximum working load of the metro vehicle in the EN 12663-1 standard.

In the loading scenario in Condition 2; a compressive force of 800 kN is applied from the buffer or coupling area of the metro vehicle. This compression load; represents the resistance in the scenario of the vehicle being pushed by another vehicle.

In the loading scenario in Condition 3; in addition to all the equipment weights on the wagon body, the weights of the passengers and the 800 kN compression load on the bumper or coupling area of the metro vehicle are applied together to analyse the strength of the vehicle body.

### 2.3. Coordinate system

In the coordinate system, the X-axis corresponds to the longitudinal axis of the vehicle body. The direction of movement of the vehicle is the positive direction of the X-axis. The positive direction of the Z-axis indicates the upward zone, and this is the vertical axis of the vehicle body. The Y-axis is the transverse axis of the vehicle body. So, the Y-axis is the lateral direction (Figure 4).



**Figure 4.** Metro vehicle coordinate system

#### 2.4. Meshing process on vehicle body

The meshing is done by using 4-node shell elements in the finite element mesh structure of the vehicle body. The body structure of the vehicle is generally formed as a result of combining thin sheet metal and beams. The thickness of the thin sheets in many parts of the vehicle body is much smaller than the geometric shapes of other parts. Therefore, it would be appropriate to use shell elements in the finite element analysis of the structural parts of the vehicle body [12]. The total number of elements obtained as a result of the mesh operation is 883796 and the total number of nodes is 1591640 (Figure 5).

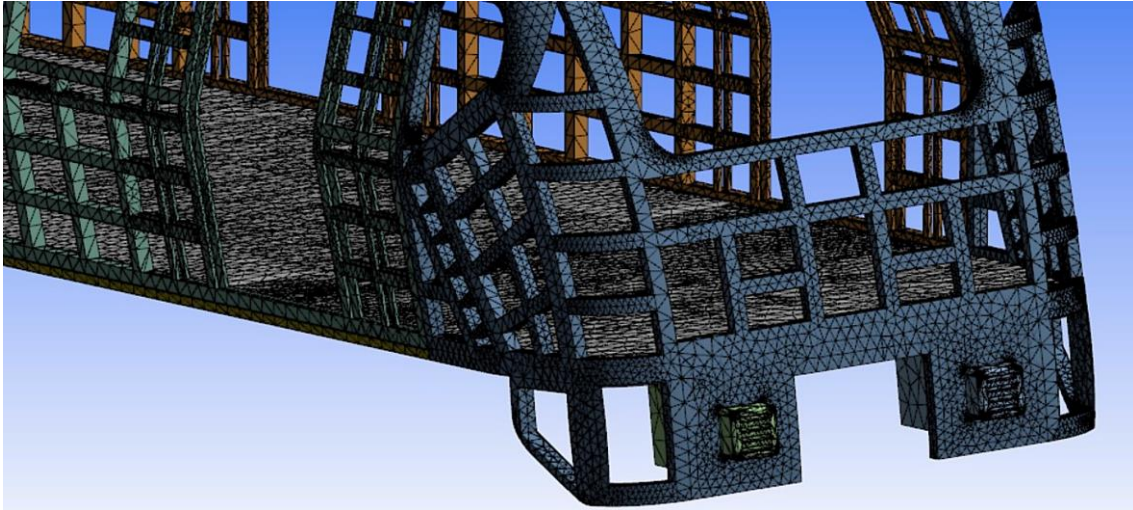


Figure 5. Mesh close-up

#### 2.5. Material

SUS304 type high tensile strength stainless steel material is used in the body design of the metro vehicle. This material is highly resistant to corrosion. Weldability is very good, all welding methods except gas melt welding can be applied to SUS304 type stainless steel. 304 quality stainless steel, which is one of the most widely used steel materials in the world, is also highly preferred in the machinery and manufacturing industry. The use of rail system vehicles in body materials is also very common. The chemical composition of SUS304 stainless steel is shown in Table 5.

Table 5. The chemical composition of SUS304 stainless steel (%) [15]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.08	2.00	1.00	0.040	0.03	18.00	8.00
Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	~ 20.00	~ 10.50

304 quality stainless steel is also called as 1.4301 or X5CrNi18-10 according to EN norm. In the mechanical properties entered while defining the material for the vehicle body in the ANSYS Workbench program, the numerical values determined for the material 1.4301 – X5CrNi18-10 from the material list in the SOLIDWORKS program are entered exactly. Table 6 shows the mechanical properties of SUS304 stainless steel material [16]. At the same time, values from the SOLIDWORKS program were added to the table.

**Table 6.** Mechanical properties of SUS304 stainless steel material

	%0.2 Yield Strength (MPa)	%1 Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Annealed	At least 200	At least 240	500
Cold Worked	Up to 500	Up to 500	600
Admission in the Program	400	400	600
Modulus of Elasticity (GPa)			200
Poisson's Ratio			0.28
Density (kg/m <sup>3</sup> )			7900

## 2.6. Vehicle body skeleton mass

In the MC vehicle in the metro set design, the skeleton (body) consist of the chassis floor, side walls, roof, rear panel, coupe, and pivot pad. The total mass of the skeleton with all these elements is 8150 kg.

## 2.7. Equipment masses

In the chassis section of the metro vehicle, there are inverter, inverter auxiliary equipment, traction system auxiliary equipment, brake resistor unit, filter reactor, battery, auxiliary power unit, compressor, air tank, ATC, automatic coupling, and fixed coupling equipment. On the roof of the vehicle, there are two air conditioning units, as well as a pantograph and its equipment. The mass data obtained from the vehicles of the Metro Istanbul company are used as a reference for the equipment masses. The mass data of all this equipment, both on the roof and on the chassis floor, are given in Table 7 and the locations of the equipment in the vehicle are given in Figure 6.

**Table 7.** Vehicle equipment masses

Equipments	Mass (kg) ( $m$ )	Actual Load (N) ( $F_{zg} = m \times g^*$ )	Exceptional Load (N) ( $F_{zi} = 1.3 \times m \times g^*$ )
Air Condition 1	620	6082.2	7906.86
Air Condition 2	620	6082.2	7906.86
Pantograph	250	2452.5	3188.25
Inverter	800	7848	10202.4
Inverter Auxiliary Equipment	260	2550.6	3315.78
Traction System Auxiliary Equipment	135	1324.35	1721.655
Brake Resistor Unit	285	2795.85	3634.605
Filter Reactor	500	4905	6376.5
Battery	250	2442.5	3188.25
Auxiliary Power Unit	1050	10300.5	13390.65
ATC	50	490.5	637.65
Compressor	250	2452.5	3188.25
Air Tank	25	245.25	318.825
Automatic Coupling	550	5395.5	7014.15
Fixed Coupling	210	2060.1	2678.13

$g^*$ : gravitational acceleration (m/s<sup>2</sup>)

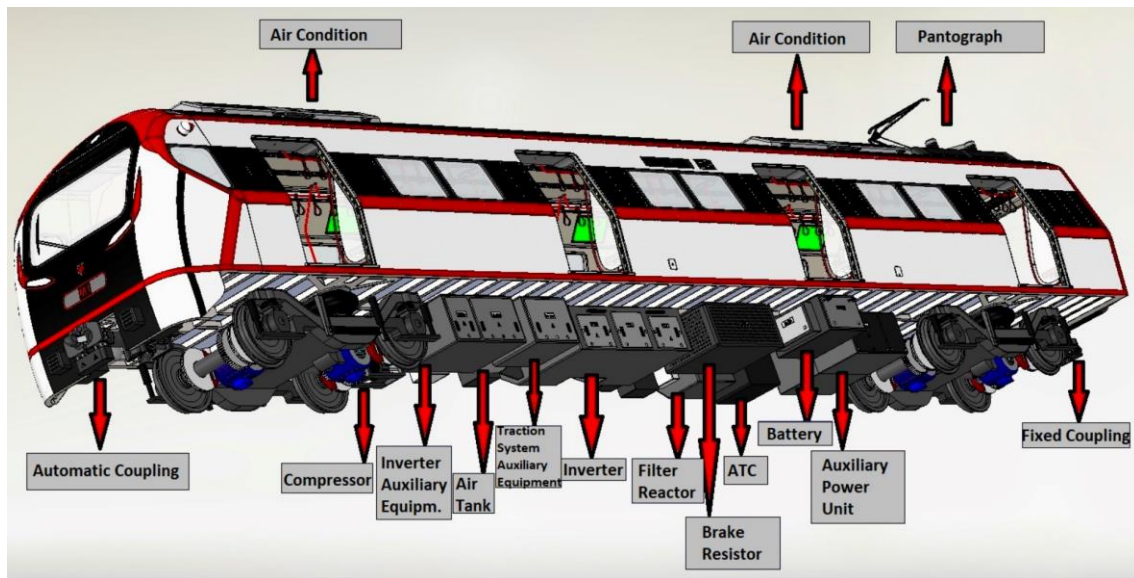


Figure 6. Under-vehicle and roof equipment

### 2.8. Vehicle interior-exterior coating (trim) masses

Floor coverings, passenger compartment glass panels, driver compartment glass panels, uprights, handrails, handles, passenger seats, driver's seat, vehicle driving panel, etc. were used in the interior of the metro vehicle. Elements are added to the relevant parts as a mass. In addition, the masses of structures such as doors, windows, side wall panels, roof panels, cup panels were also included in the calculation.

### 2.9. Passenger masses

The loading conditions in the standard "EN 12663-1 - Railway Applications - Structural Properties of Railway Vehicle Bodies" have been taken as reference for the passenger masses in the vehicle. According to this standard, the mass of each passenger is 70 kg. In addition, the driver mass is accepted as 80 kg as a standard requirement.

Each of the MC vehicles in the metro set has a total of 50 seats. Except for the seat areas, the size of the area where standing passengers can be accommodated is calculated as 42 m<sup>2</sup>. The maximum number of passengers that can travel standing is 8 passengers per square meter. The numerical values of the passenger mass created by looking at these data about passengers and vehicles are shown in Table 8.

Table 8. MC vehicle passenger masses and weights

	Passenger	Mass (kg) ( <i>m</i> )	Actual Load (N) ( $F_{zg} = m \times g^*$ )	Exceptional Load (N) ( $F_{zi} = 1.3 \times m \times g^*$ )
Sitting Passenger	50	3500	34335	44635.5
Standing Passenger (8 passenger/m <sup>2</sup> )	336 (42 m <sup>2</sup> )	23520	230731.2	299950.56
Total Passenger	386	27020	265066.2	344586.06

$g^*$ : gravitational acceleration (m/s<sup>2</sup>)

### 2.10. Static-strength analysis with finite element method

Finite element analysis is carried out by applying the loading scenarios for all three conditions specified in Table 4 to the body of the MC vehicle in the metro set. While analysing the vehicle, the body is fixed from the bogie connection points and the equipment and passenger loads were added to the relevant places. Necessary loading conditions have been provided for the determination of displacement amounts and stresses on the created model.

Stress is the amount of load acting on a unit surface. There are basically two types of stress. These are normal stress ( $\sigma$ ) and shear stress ( $\tau$ ). If the stress vector affects perpendicular to the surface of the relevant section, it is called normal stress, if it affects horizontally to the surface of the relevant section, it is called shear stress. Sometimes only one or both of these stresses can be found on the part [17].

In some engineering calculations, stress states can be complex. It can be subjected to both normal and shear stresses in many directions. It is difficult to determine the strength values of the part or system that is subjected to this type of loading. Some theories have been developed to make the necessary strength calculations when exposed to combined stresses in this way. Von Mises theory is one of them.

Von Mises theory is used as the fracture theory of ductile materials. Von Mises equivalent stresses are generally considered when evaluating stress results in finite element analysis. If the maximum equivalent stress obtained as a result of the applied loads in the analysis is greater than the yield stress of the preferred material, it means that the material is permanently deformed. That is, the value of the Von Mises stress in the fracture criterion should be less than the value of the yield stress of the material [18].

General equation of Von Mises stress [19];

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2)]} \quad (1)$$

Equation of Von Mises stress in terms of principal stresses [19];

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

Isotropic materials are materials that give the same response to thermal or mechanical loads in all directions. If the object returns to its original state when the loads are removed, this material has elasticity. According to Hooke's Law, there is a linear relationship between stress and strain. The most easily defined object in the finite element method is isotropic and linear elastic material. The stress-strain matrix [20];

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

In this matrix,  $\varepsilon$  denotes the displacements caused by longitudinal elongation,  $\gamma$  is the displacements caused by downward displacement,  $E$  is the modulus of elasticity,  $\nu$  is the poisson's ratio,  $G$  is the shear modulus, and  $\sigma$  is the normal stresses.

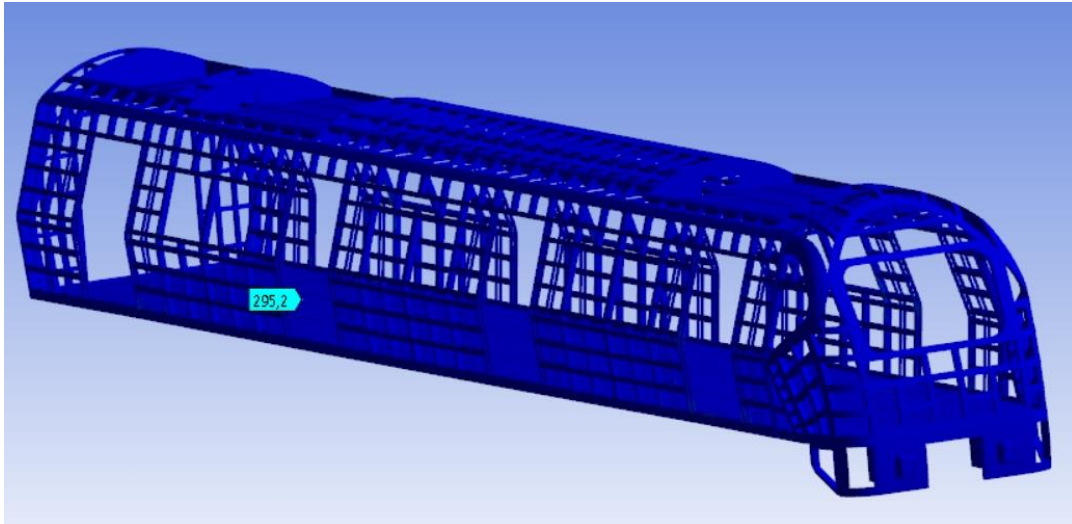
After the completion of the finite element analysis process of the metro vehicle model in the computer environment, the displacement amounts and Von Mises stresses were determined and the results were interpreted.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Analysis for largest operating load (Condition 1)

As shown in Table 4, static strength analyses are performed by taking 1.3 times of all vertical loads in the analysis of the largest operating load.

As a result of the finite element analysis, the maximum Von Mises stress is found to be 295 MPa. The region of maximum Von Mises stress is located under the vehicle, close to the pivot pad of the rear bogie. The general distribution of stresses is as in Figure 7.



**Figure 7.** Von Mises stress distribution for condition-1

The yield strength of SUS304 stainless steel material is 400 MPa as specified in Table 6. In conclusion; The resulting maximum Von Mises stress value is 295 MPa, which is below the yield strength value of the material. According to the results obtained, the structure is safe for "Condition 1".

The displacement resulting from the static analysis is shown in Figure 8. The zone of maximum displacement is in the middle of the passenger compartment, with a maximum value of 18.86 mm.



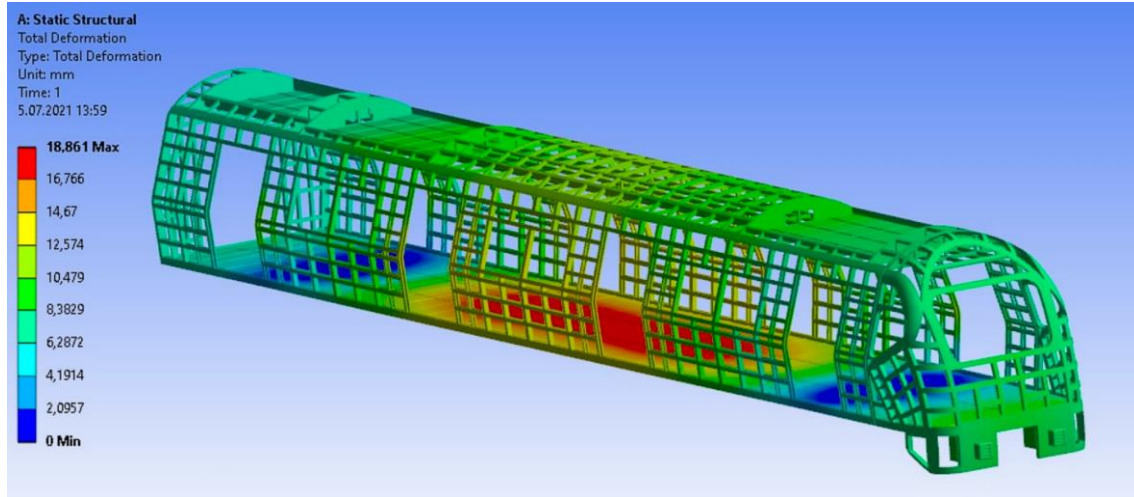


Figure 8. Maximum displacement for condition-1

### 3.2. Analysis for application of compressive force in the buffer zone (Condition 2)

There are no passengers in the vehicle under these analysis conditions. In addition, 800 kN compression force is applied to the buffer zones together with the weights of the MC vehicle equipment. As a result of the static analysis, the maximum Von Mises stress is above 1600 MPa in the periphery of the buffer zones and in the lower parts of the driver's cabin where the bumpers are mounted (Figure 9). This value is well above the 400 MPa yield stress of the material in the design. Therefore, under the conditions of the EN 12663-1 standard, it is not safe against impacts or pressure forces from the buffer zone. This issue should be addressed with design improvements in the lower part of the driver's cabin. In addition, no spring mechanism system is used in the bumpers in the design. By using spring mechanisms inside the bumpers, it can be possible to reduce the deformation by absorbing the possible impact intensity to the bumper area.

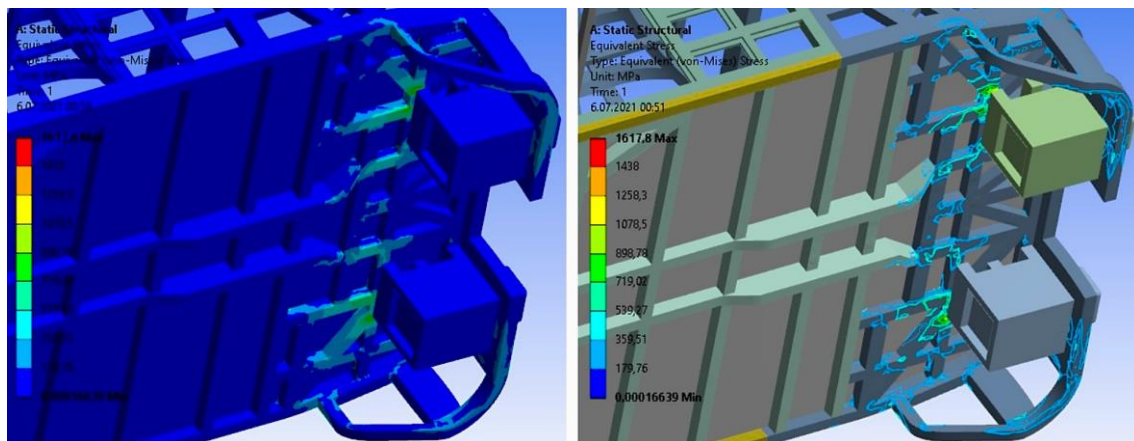


Figure 9. Von Mises stress distribution for condition-2

In this scenario, where the vehicle's equipment and body weights are analysed without a passenger load inside the vehicle, the maximum displacement in the bumper area was determined as 16 mm. Visual data showing the amount of displacement is given in Figure 10.

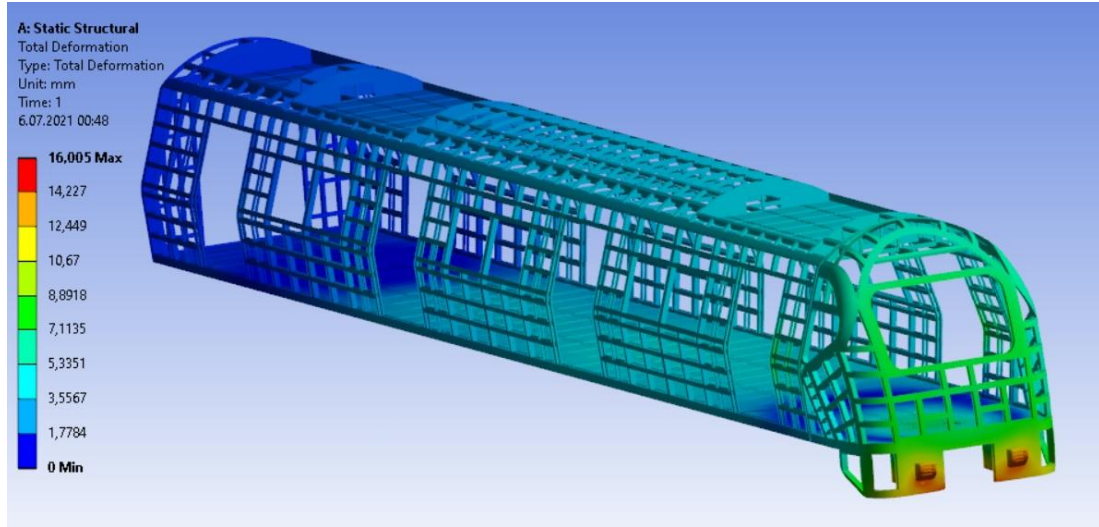


Figure 10. Maximum displacement for condition-2

### 3.3. Analysis of vertical load case including compression force and passenger loads in the buffer zone (Condition 3)

In addition to the application of 800 kN compression force to the buffer zones of the MC vehicle, the equipment load in the vehicle body and the passenger load of 8 passengers per  $m^2$  are analysed. As a result of the static analysis, the Von Mises stress of the vertical loads in the passenger cabin areas is below the 400 MPa yield strength of the material used in the body. However, the Von Mises stress value in the lower parts of the driver's cabin, where the bumper is mounted, is over 1500 MPa due to the compression force in the buffer zones (Figure 11). This value is well above the yield strength, so it is not safe against the compression force in the EN 12663-1 standard from the buffer zone. This problem should be addressed by making improvements in the design of the bumper and coupling areas of the driver's cabin, as well as other relevant areas. For the bumpers to absorb the incoming impact and the resulting pressure, improvements can also be made in the design by using an in-buffer spring mechanism.

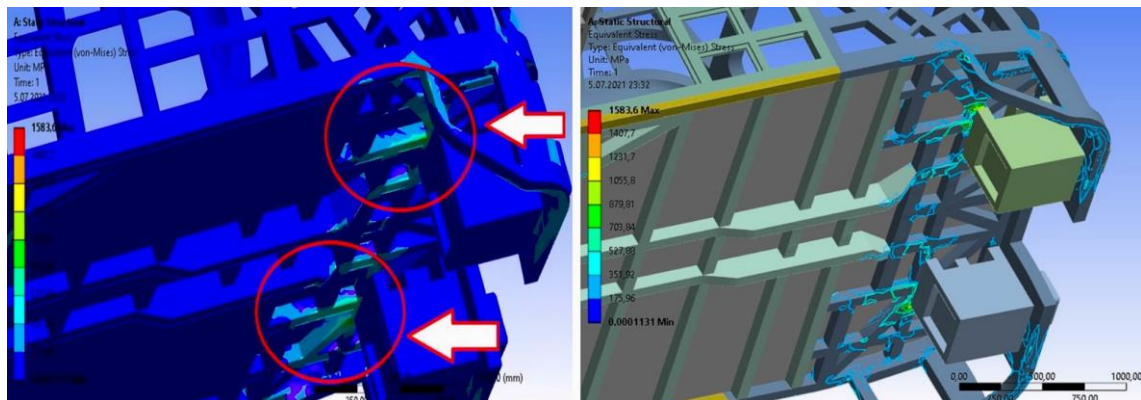


Figure 11. Von Mises stress for condition-3 driver cabin bottom

The maximum displacement when the 800 kN compression force applied to the bumper area as well as the passenger weights are included in the finite element analysis model is shown in Figure 12. The maximum displacement is 22.117 mm in and around the bumper of the driver's cabin area.

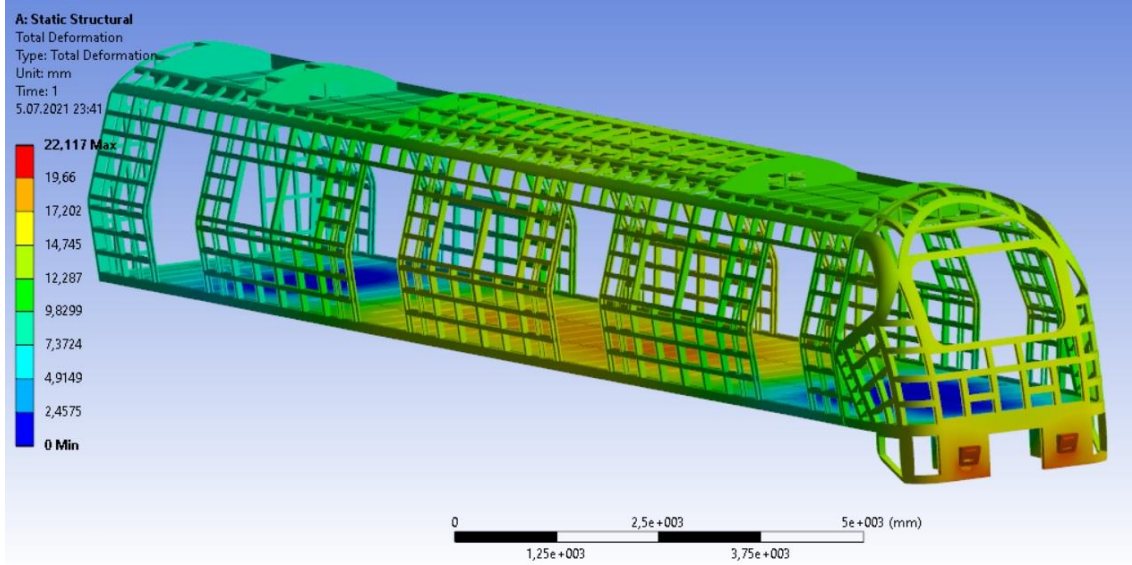


Figure 12. Maximum displacement for condition-3

#### 4. Conclusion and Recommendation

In this study, a sample metro train was designed by adhering to the data obtained from literature surveys and international standards. Since metros are faster, have a higher passenger carrying capacity and are larger in size than other urban rail transportation modes, the importance of body strength is very critical. The main purpose of this study is to examine and analyze the body strength of the designed metro vehicle under the necessary loading and operating conditions. A finite element model of the MC vehicle body in the metro set, the design of which has been completed, has been created and static strength analyses have been carried out according to the loading conditions determined in EN 12663-1 standard.

It has been observed that the deformation values caused by vertical loads in the conditions of three loading situations examined are not at a level that will have a negative impact on the performance of the vehicle during operation. No stress was encountered above the safety limit of the car body in the conditions of the greatest operating load. However, when a force of 800 kN specified in the standard for metro vehicles was applied to the buffer zones, high regional stresses were observed around the buffer zone and at the base of the driver's cabin chassis (Condition 2 and Condition 3). The components around the bumper and in the lower sections of the driver's cabin are not safe because they remain weak against stresses, albeit regionally. Therefore, the design of the driver's cabin and bumper areas should be revised and improved. In the material used in the chassis base, a material with a higher yield strength may be preferred. In addition, no spring mechanism was used in the buffer designs and therefore no dynamic motion analysis for this region was considered within the scope of this study. If spring-loaded mechanisms are used in the bumpers, the amount of deformation can be reduced by providing damping against impacts or compression forces that may occur.

#### References

- [1] V. R. Vuchic, *Kent İçi Toplu Ulaşım ve Yaşanabilir Şehirler*, vol. 1, 2 vols. İstanbul: İstanbul Ulaşım A.Ş., 2015.
- [2] V. R. Vuchic, *Urban Transit Systems And Technology*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2007.
- [3] E. Çekerek and M. Demir, "İstanbul Metrolarında Yolcu Konforunun Arttırılması: Sinyalizasyon Sistemi ile Otomatik Anons Kontrol Uygulaması," *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, no. 14, pp. 110–121, Jul. 2021, doi: 10.47072/demiryolu.932732.

- [4] A. Damat and Z. Utlu, "İstanbul Metro İstasyonlarında İş Güvenliği Uygulamaları," *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, no. 8, pp. 52–69, 2018.
- [5] V. Arlı, *Demiryolu Mühendisliği*. İstanbul, 2015.
- [6] V. R. Vuchic, "Urban Public Transportation Systems," *Department of Systems Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA*, no. 6.40.2.2.
- [7] J.-S. Kim, J.-C. Jeong, and S.-J. Lee, "Numerical and experimental studies on the deformational behavior a composite train carbody of the Korean tilting train," *Composite Structures*, vol. 81, no. 2, pp. 168–175, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.compstruct.2006.08.007.
- [8] J.-S. Kim and J.-C. Jeong, "Natural frequency evaluation of a composite train carbody with length of 23m," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 13, pp. 2272–2283, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.11.036.
- [9] T. Kotil, G. Yücesan, Z. Mecitoğlu, and E. Sevinçer, "Bir Hafif Metro Aracının Sonlu Elemanlar Metoduyla Statik Analizi," İstanbul, 1998, pp. 257–265.
- [10] L. Wu, S. Dong, and C. Yang, "Research on Subway Collision Animation Based on ANSYS Data," presented at the WSSE 2020: Proceedings of the 2020 The 2nd World Symposium on Software Engineering. doi: 10.1145/3425329.3425338.
- [11] S. Nas, T. Kotil, G. Yücesan, Z. Mecitoğlu, and Yıllıkçı, "Boğaziçi Hafif Metro Aracının Yapısal Tasarımı," İstanbul, 1999, pp. 383–396.
- [12] E. Küçükçibiyık, S. Sabırlı, R. O. Özge, S. Vatandaş, Ö. Demir, and Z. Mecitoğlu, "Bir Raylı Taşıt Gövdesinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapısal Analizi," Karabük, 2012, pp. 23–31.
- [13] H. L. Pandül and T. Toprak, "Metro Aracı Gövde Son Montaj Tesisinin Kurulumu ve Yatırımın Finansal Değerlendirilmesi," *Rolling stock final assembly facility installation and financial evaluation of the investment*, vol. 19, no. 38, 2020, Accessed: May 31, 2021. [Online]. Available: <http://acikerisim.ticaret.edu.tr/xmlui/handle/11467/4318>
- [14] "EN 12663-1 - Railway Applications - Structural Properties of Railway Vehicle Bodies."
- [15] "İç ve Dış Teçhizat - EM 32000, EM 64000 Mekanik Bilgisi," TCDD.
- [16] A. Aran and M. A. Temel, *Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları*, Acar Matbaacılık A.Ş. İstanbul, 2004.
- [17] İ. Çayiroğlu, "Bilgisayar Destekli Tasarım ve Analiz (Ansys)." Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi. [Online]. Available: <http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/BilgisayarDestekliTasarim/BilgisayarDestekliTasarimVeAnaliz-4-hafta.pdf>
- [18] C. Srinivasa-Murthy, D. Wang, S. P. Beaudoin, T. Bibby, K. Holland, and T. S. Cale, "Stress distribution in chemical mechanical polishing," *Thin Solid Films*, vol. 308–309, pp. 533–537, Oct. 1997, doi: 10.1016/S0040-6090(97)00433-1.
- [19] İ. Ovalı and C. Esen, *Ansys Workbench*, 2nd ed. İstanbul: KODLAB, 2017.
- [20] O. Ersoy, "Bir Raylı Taşıt Gövdesinin Standartlara Göre Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapısal Analizi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Katı Cisimlerin Mekaniği Programı, İstanbul, 2014.

**Resume****Muhammed Emin ARI**

Muhammed Emin Arı was born in 1993. He completed his undergraduate education in Karabük, Turkey in 2018 in the Department of Mechanical Engineering, Program of Railway Systems Engineering at Karabük University. He completed his master's degree in 2021 at Karabük University, Department of Mechanical Engineering. He started his doctorate in the Department of Mechanical Engineering at Karabük University in 2021 and is still continuing his education.

E-Posta: muhammedeminari@gmail.com

**İsmail ESEN**

İsmail Esen is currently an Associate Professor at Department of Mechanical Engineering of Karabük University. He got his BSc (1991), MSc (1994) and PhD Degrees (2009) from Istanbul Technical University, all in Mechanical Engineering. His research interests are rail vehicle dynamics, dynamic systems and control, robotics.

E-Posta: iesen@karabuk.edu.tr

**Ethics Statement:**

Authors confirm that the article is original, there is no plagiarism issue.

All authors contributed equally.



## DCGAN ve Siyam Sinir Ağını Kullanarak Demiryolu Bağlantı Elemanlarındaki Kusurların Tespiti

Emre GÜÇLÜ<sup>1</sup>, İlhan AYDIN<sup>1</sup>, Erhan AKIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Bölümü, Elazığ, Türkiye

\*emreguclu1367@gmail.com

(Alınış/Received: 28.10.2021, Kabul/Accepted: 18.12.2021, Yayımlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Bağlantı elemanlarındaki kusurların tespiti, demiryolu denetiminin önemli bir parçasıdır. Bu nedenle son yıllarda, bağlantı elemanlarının hızlı ve güvenilir bir şekilde denetlenebilmesi için otomatik denetim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Otomatik denetim sistemlerinde derin öğrenme gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu tür yöntemler, eğitim için çok fazla veri setine ihtiyaç duyarlar. Geleneksel bir evrişimli sinir ağı küçük bir veri seti ile özellikleri öğrenemez. Eğitim işlemi için sağlam bağlantı elemanlarından oluşan veri setini oluşturmak kolay olmasına rağmen kusurlu bağlantı elemanlarından oluşan veri setini oluşturmak oldukça zordur. Bu tür veri setini oluşturmak için yüzlerce kilometre demiryolundan görüntü toplanması gerekebilir. Bu nedenle bu çalışmada, DCGAN kullanılarak yapay deforme bağlantı elemanı görüntüleri oluşturulup veri seti çoğaltılmıştır. Ardından, siyam sinir ağı ile bağlantı elemanlarının kusur durumu incelenmiştir. Çalışmada, sağlam ve deforme olmak üzere iki bağlantı elemanı sınıfı bulunmaktadır. Her sınıf için farklı sınıfların görüntüleri arasındaki benzerlik puanları hesaplanmıştır. Temel fikir, bağlantı elemanlarını benzerlik puanlarını kullanarak ve karşılaştırma yaparak tanımlamaktır. Deneysel sonuçlarda, önerilen yöntem için %98,23 doğruluk oranı elde edilerek, geleneksel yöntemlere göre avantajı gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Siyam Sinir Ağı, Bağlantı Elemanı, Kusur Tespiti

### Detection of Defects in Railway Fasteners Using DCGAN and Siamese Neural Network

**Abstract:** Detection of defects in fasteners is an important part of railway inspection. Therefore, in recent years, automatic inspection systems are needed for fast and reliable inspection of fasteners. Methods such as deep learning are used in automatic control systems. However, such methods require a lot of datasets for training. A traditional convolutional neural network cannot learn features with a small dataset. Although it is easy to generate a dataset of solid fasteners for training, it is quite difficult to generate a dataset of defective fasteners. It may be necessary to collect images from hundreds of kilometers of railroad tracks to create this type of dataset. For this reason, in this study, artificial deformed fastener images were created using DCGAN and the dataset was reproduced. Then, the defect status of the connectors with the siamese neural network was examined. In the study, there are two fastener classes as healthy and deformed. Similarity scores between images of different classes were calculated for each class. The basic idea is to identify fasteners using similarity scores and comparing. In the experimental results, 98,23% accuracy rate was obtained for the proposed method and its advantage over traditional methods was demonstrated.

**Keywords:** Siamese Neural Network, Fastener, Defect Detection

## 1. Giriş

Ray bağlantı elemanları, rayları travers ile birlikte alttaki taban plakasına sabitlemek ve titreşimi azaltmak için kullanılır. Bağlantı elemanları demiryollarında çok sayıda bulunur. Bu nedenle, demiryolu bağlantı elemanları güvenliği etkileyen çok önemli bir bileşendir [1]. Uzun süreli çalışmalarda trenin geçişi sırasında oluşan ağırlık ve titreşim bağlantı elemanlarında hasara sebep

Atf için/Cite as: E. Güçlü, İ. Aydın, E. Akın, "DCGAN ve siyam sinir ağını kullanarak demiryolu bağlantı elemanlarındaki kusurların tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 46-59, Jan. 2022  
doi: 10.47072/demiryolu.1015962

olabilir. Hasar görmüş bağlantı elemanları trenlerin güvenliğini önemli ölçüde tehdit edecektir. Bu nedenle bağlantı elemanları, demiryolu denetiminde periyodik olarak kontrol edilmelidir. Bu bileşenlerin sürekli denetlenmesi, güvenli bir demiryolu ortamının oluşmasını sağlar ve meydana gelebilecek kazaların önlenmesi açısından büyük önem taşır.

Geleneksel olarak demiryolu denetimi görsel olarak yapılmaktadır. Ancak görsel incelemenin öznel, maliyetli, yavaş olması ve denetim esnasında rayı meşgul etmesi gibi dezavantajları vardır. Ayrıca, demiryolundan toplanan görüntüler, saatlerce süren video kayıtlarından elde edilmektedir. Bu devasa miktardaki veri, görüntüleri manuel olarak incelemeyi ve kusur tespitini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle son yıllarda bazı araştırmacılar, otomatik inceleme yöntemleri üzerinde çalışmalar yapmaktadır [2]. Yapılan çalışmalarda, hata tespiti için bilgisayarlı görme ve makine öğrenimi tabanlı teknikler uygulanmaktadır. Özellikle, görüntü işlemeye dayalı teknikler sıklıkla kullanılmaktadır. Bağlantı elemanı algılama yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar, temel olarak görüntü toplama ve işleme üzerine odaklanmıştır [3-4].

Son yıllarda görüntü işleme tekniklerinin yanı sıra derin öğrenme gibi teknikler de sıklıkla kullanılmaya başlandı. Yakın zamana kadar bilgisayar algoritmaları insan görsel denetimine yaklaşmıyordu. Ancak, bu durum derin öğrenme mimarilerinin geliştirilmesiyle birlikte değişti [5]. Kusur tespitinde derin öğrenmenin kullanılması insan hatasını azaltabilir ve uzun süreli çalışmaya uygundur. Yapılan çalışmalarda derin öğrenme tekniklerinin doğru bir şekilde uygulandıkları takdirde kusur tespiti için iyi performans gösterdiği ispatlanmıştır. Derin öğrenme teknikleri, kusur tespitinde gösterdikleri performanstan dolayı birçok kusur tespit alanında kullanılmaktadır. Bunlar arasında; döküm hatalarının tespiti [6], ahşap kaplama kusur tespiti [7-8], fotovoltaiik panellerde bulunan kusurların tespiti [9], yüzey kusur tespiti [10] bulunmaktadır. Ayrıca, demiryollarında bulunan bağlantı elemanlarındaki kusurları da tespit için derin öğrenmeye dayalı yöntemler kullanılmaktadır.

Faghih-Roohi vd. [11] yaptıkları çalışmada, ray yüzeyindeki kusurların tespiti için Derin Evrişimli Sinir Ağı (DCNN) kullanmışlardır. Wei vd. [12], bağlantı elemanlarının durumu için gelişmiş bir YOLOv3 modeli önermişlerdir. Cui vd. [13]'te, bağlantı elemanlarının kontrolü için nokta bulutu derin öğrenme tabanlı yöntem önermişlerdir. Bai vd. [14]'de, bağlantı elemanı tespiti için değiştirilmiş Daha Hızlı Bölge Tabanlı Evrişim Sinir Ağı (Faster R-CNN) ve Destek Vektör Veri Tanımı (SVDD) algoritmalarına dayanan iki aşamalı bir sınıflandırma modeli önermiştir.

Güçlü vd. [15]'te, bağlantı elemanlarındaki kusurları YOLOv4 ve bulanık mantık kullanılarak tespit etmiştir. Ou vd. [16]'da, bağlantı elemanlarını normal, kısmen aşınmış, eksik ve kapalı olmak üzere dört tipe ayırabilen bir bağlantı elemanı sınıflandırma modeli önermiştir. Liu vd. [17]'de, bağlantı elemanlarının kusur durumlarını otomatik algılamayı sağlamak için DCNN'e dayalı bir inceleme modeli önermiştir. Ayrıca çalışmada, kusurlu bağlantı elemanlarının zor bulunması nedeniyle kusurlu ve sağlam bağlantı elemanları arasındaki dengesizliği önlemek için veri setini büyütme amacıyla sağlam bağlantı elemanlarından kusurlu bağlantı elemanları üretilmiştir.

Bu çalışmada, demiryolu bağlantı elemanlarında oluşabilecek kusurların tespiti için siyam ağlarına dayalı bir teknik sunulmuştur [18]. Çalışmanın amacı, yapısı bozulan bağlantı elemanlarını siyam sinir ağı ile tespit etmektir. Siyam sinir ağı, giriş görüntülerinin benzerliğini hesaplamak için çok kullanışlı olan iki özdeş sinir ağına dayanan bir bağlantı çerçevesidir. Kullanılan siyam ağı, eğitim verisi gereksinimlerini önemli ölçüde azaltarak bağlantı elemanlarında bulunan kusurları etkin bir şekilde tanımayı sağlamaktadır.

Siyam ağlarının iki kanallı yapısı, eğitim için çok sayıda örneğe olan bağımlılığı azaltır. Geleneksel sinir ağlarından farklı olarak bu yöntemde farklılıklar, tek bir görüntüden değil belirli

yapısal benzerlikler içeren görüntü çiftlerinden öğrenilir. Bu yaklaşımda, kusurlu veya sağlam sınıfına ait birkaç görüntüyle bile kusurlu bağlantı elemanını etkin bir şekilde tespit edebilmektedir. Siyam sinir ağlarını kullanarak kusur tespiti ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çelik yüzeylerde bulunan kusurların tespiti [19], düğmelerdeki kusurların tespiti [20], trafik işaretlerindeki kusurların tespiti [21] bu çalışmalara örnek olarak verilebilir.

Siyam ağında kullanılacak veri kümesini, eğitim için yeterli hale getirebilmek için deforme bağlantı elemanlarının yeterli sayıda olması gerekmektedir. Deforme bağlantı elemanı görüntülerinin yapay olarak üretilmesi ile yeterli eğitim verisi oluşturulabilir. Yapay görüntü üretimi bilgisayarla görmeye önemli bir sorundur. Gerçek görüntülerden oluşturulan yapay bağlantı elemanı görüntüleri, daha çeşitli eğitim sonuçları elde etmek için kullanılabilir. Son yıllarda, çekişmeli üretici ağlar (GAN), görüntü oluşturma uygulamalarına başarıyla uygulanmıştır [22]. Yeni bir görüntü oluşturma modeli türü olan GAN'lar, giderek gelişmektedir ve DCGAN, CGAN, Pix2Pix gibi çok sayıda türü bulunmaktadır. Bu çalışmada, yapay bağlantı elemanı görüntüsü üretmek için Derin Evrişimli Çekişmeli Üretici Ağlar (DCGAN) kullanımı önerilmiştir. Ardından, veri setini büyütmek ve bağlantı elemanlarının durumları hakkında bilgi almak için üretilen yapay görüntüler gerçek görüntülerle birleştirilmiştir.

Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de önerilen yöntem açıklanmıştır. 2.1'de kullanılan veri kümesi tanıtılırken, 2.2'de veri kümesine uygulanan görüntü ön işleme algoritması açıklanmıştır. 2.3'te çeşitliliği artırmak için DCGAN algoritması kullanılarak yapay veri oluşturulmuştur. 2.4'te siyam ağı modeli tanıtılırken, deneyler ve değerlendirmeler Bölüm 3'te verilmiştir. Sonuç bölümünde ise değerlendirmeler yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

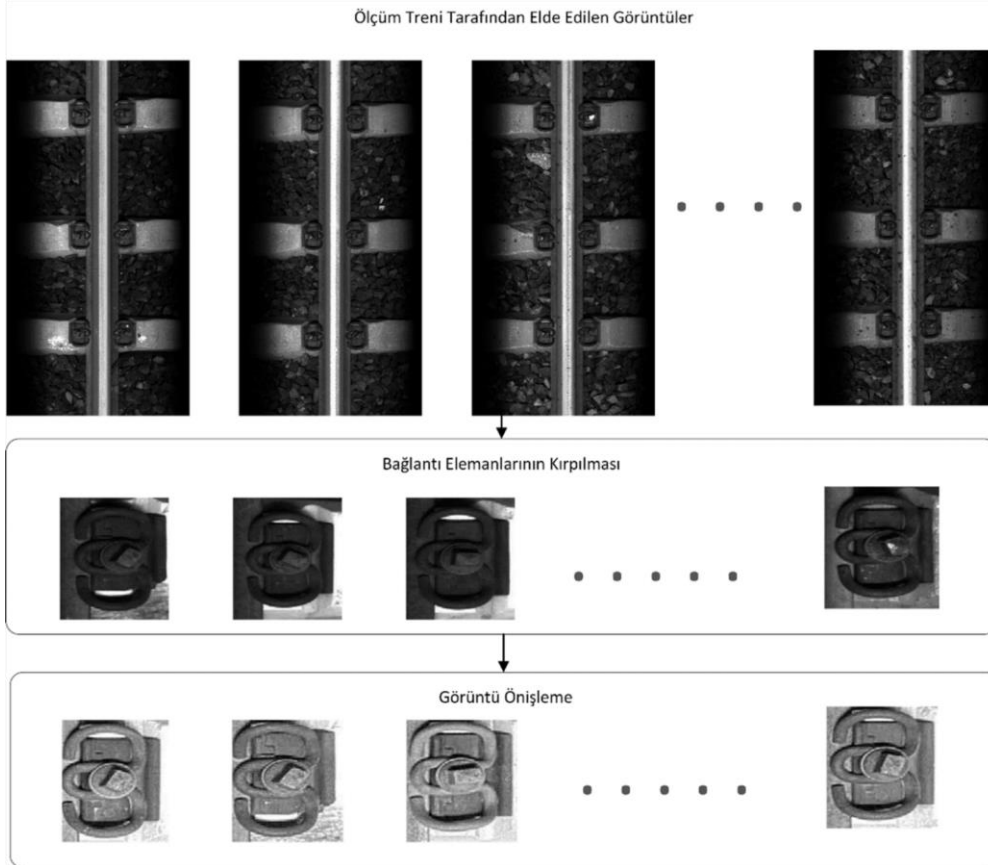
Yaklaşımımız, kusur tespiti için iki katmanlı bir sinir ağı oluşturmaktır. Önerilen bu yöntemde, geleneksel sinir ağlarından farklı olarak farklılıklar tek bir görüntüden ziyade belirli yapısal benzerlikler içeren görüntü çiftlerinden öğrenilir. Kusur tespiti için ikili bir Siyam sinir ağı kullanılmıştır. Veri kümesi, DCGAN ile üretilen yapay görüntülerle genişletilerek Siyam ağının başarısını artırılmıştır.

### 2.1. Kullanılan veri kümesi

Veri kümesi Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Araştırma Merkezi (DATEM) tarafından bir ölçüm treni üzerinden elde edilen görüntülerden oluşturulmuştur (Şekil 1). Bu çalışmada, bağlantı elemanlarındaki kusur tespiti incelendiği için bağlantı elemanlarından oluşan veri kümesi elde edilmiştir. Bu amaçla, ölçüm treni tarafından elde edilen görüntüler üzerinden bağlantı elemanı görüntüleri, manuel olarak kırılarak elde edilmiştir. Veri kümesinde, eğitim için 400 sağlam ve 400 kusurlu olmak üzere toplam 800 adet bağlantı elemanı görüntüsü bulunmaktadır. Bu görüntülere yapay bağlantı elemanı görüntüleri dâhildir. Kusurlu bağlantı elemanı görüntüleri kırık veya eğilmiş bağlantı elemanı görüntülerinden oluşmaktadır. Test için ise 100 sağlam ve 100 kusurlu olmak üzere toplam 200 bağlantı elemanı görüntüsü vardır. Veri kümesi toplamda 1000 görüntüden oluşmaktadır ve bulunan her örnek görüntünün çözünürlüğü  $227 \times 227$  pikseldir.

Test görüntülerinde yapay görüntü bulunmamaktadır. Buradaki amaç, yapay olarak üretilen bağlantı elemanlarını eğitimde kullanarak gerçekten kusurlu bağlantı elemanlarını tespit edebilmektir.





Şekil 1. Ölçüm treninden elde edilen görüntülerden bağlantı elemanı veri kümesinin oluşturulması

## 2.2. Görüntü önleme

Ölçüm treninden alınan görüntüler, parlak olmadığından tanıma görevi için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajın üstesinden gelebilmek için veri kümesinde bulunan görüntülere görüntü iyileştirme işlemi uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan görüntü iyileştirme algoritması, [23]'e dayanmaktadır. Görüntülere uygulanan algoritma, giriş olarak düşük ışıklı görüntüyü alır. İlk olarak alınan görüntünün tersi alınır ve ardından ters çevrilmiş videoya optimize edilmiş bir görüntü bulanıklığı giderme algoritması uygulanarak daha net görüntüler elde edilir. Bu nedenle, giriş olarak alınan düşük görüntü  $I$  için ilk olarak aşağıdaki denklem kullanarak ters çevirme işlemi yapılır.

$$R^c(x) = 255 - I^c(x) \quad (1)$$

Denklem 1'de  $c$  renk kanalı,  $I^c(x)$ , düşük aydınlatmalı görüntüyü temsil eden  $I$ 'nin piksel  $x$ 'in renk kanalının yoğunluğu ve  $R^c(x)$ , ters çevrilmiş görüntü olan  $R$  ile aynı yoğunluğu ifade etmektedir. Elde edilen görüntüye Denklem 2'de verilen denklem kullanılarak bulanıklık kaldırma uygulanmaktadır [24].

$$R(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (2)$$

Burada  $A$ , küresel atmosferik ışıktır.  $R(x)$ , kameranın yakaladığı piksel  $x$ 'in yoğunluğudur.  $J(x)$ , orijinal nesnelerin veya sahnenin yoğunluğudur.  $t(x)$ , nesnelere veya sahneden yayılan ışığın yüzde kaçının kameraya ulaştığıdır. Atmosfer homojen olduğunda,  $t(x)$  şu şekilde ifade edilebilir:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (3)$$

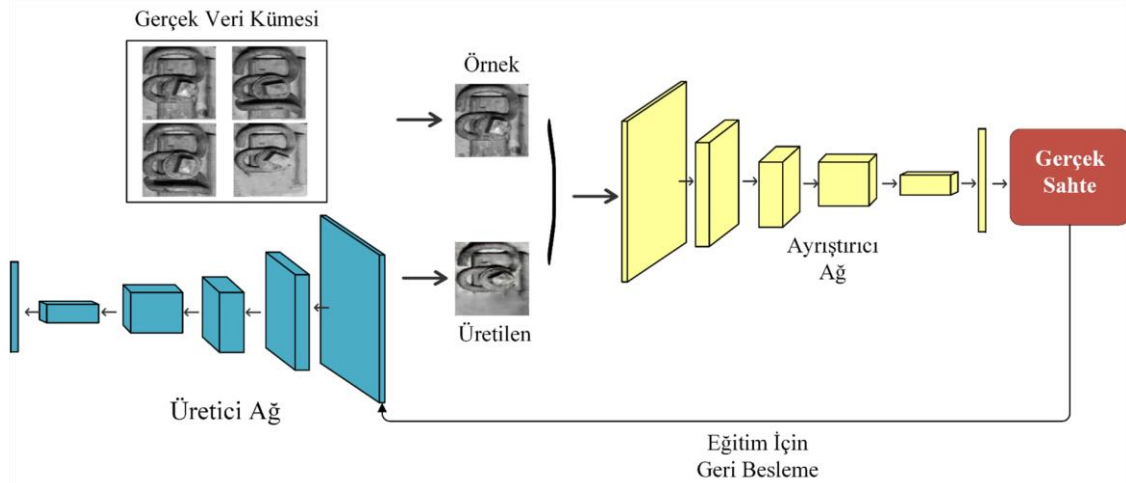
Burada  $\beta$  atmosferin saçılma katsayısı ve  $d(x)$  piksel  $x$ 'in sahne derinliğidir.  $\beta$ 'nın sabit olduğu aynı görüntüde,  $t(x)$ , nesne ile kamera arasındaki mesafe olan  $d(x)$  tarafından belirlenir. [23]'e göre  $J(x)$  Denklem 4'teki gibi hesaplanmıştır:

$$J(x) = \frac{R(x) - A}{P(x)t(x)} + A \quad (4)$$

Denklem 4'e göre eğer  $t(x)$  0,5'ten küçük ise, pikselin güçlendirilmesi gerektiği anlaşılır. Bu pikselin RGB yoğunluğu  $P(x)t(x)$ 'i daha da küçültmek için  $P(x)$ 'e daha küçük bir değer atanarak artırılır. Ters durumda piksel yoğunluğu aşırı derecede artırılamaz. Görüntü iyileştirme işleminden sonra oluşturulan yeni veri kümesinden bazı örnek görüntüler Şekil 1'de verilmiştir.

### 2.3. DCGAN ile eğitim görüntülerinin çoğaltılması

Demiryollarından deforme bağlantı elemanı görüntülerinin toplanması zor bir görevdir. Kusur tespiti yapabilecek ağı eğitmek için yüzlerce veri gerekirken toplanan deforme bağlantı elemanı görüntü sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, ağın başarımını artırmak için veri setinde deforme bağlantı elemanı görüntülerinin sayısının artırılması gerekmektedir. Derin öğrenme yapay görüntü üretiminde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır [25]. Derin öğrenmenin görüntü üretiminde kullanımı ilk olarak Goodfellow [26] tarafından önerilmiştir. GAN yapısı bir adet üretici (generative) ve bir adet ayırıştırıcı (discriminator) olmak üzere iki farklı derin ağa sahiptir. Bu çalışmada, Derin Evrişimli Çekişmeli Üretici Ağlar (DCGAN) kullanılmıştır. DCGAN, çekişmeli üretici ağların alt dallarından biridir. DCGAN, denetimli öğrenme kullanan bir CNN ile denetimsiz öğrenme algoritması kullanan bir GAN'ı birleştirir [27]. DCGAN yapısı Şekil 2'de verilmiştir. DCGAN yapısında iki model, çekişmeli olarak aynı anda eğitilir. Eş zamanlı olarak eğitilen üretici ve ayırıştırıcı ağ olmak üzere iki bölümden oluşur. Ayırıştırıcı model, bir örneğin gerçek mi yoksa sahte mi olup olmadığını belirlemeye yöneliktir.

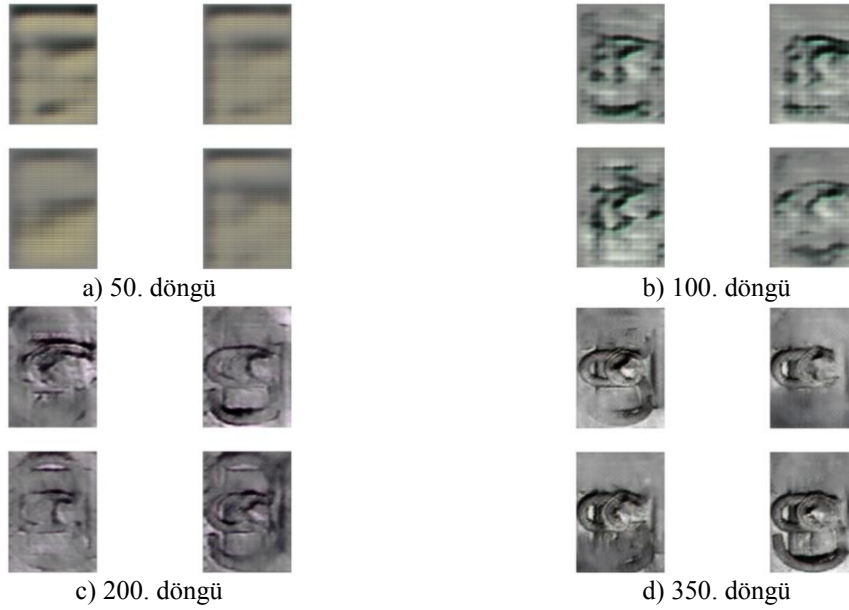


Şekil 2. DCGAN yapısı

Ayrıştırıcı model, eğitim sisteminde üretici modelin verilerini gerçekçi ve gerçekçi olmayan olarak sınıflandıran ikili bir sınıflandırıcıdır. DCGAN modelinin çekişmeli eğitim süreci Denklem 5 kullanılarak hesaplanır.

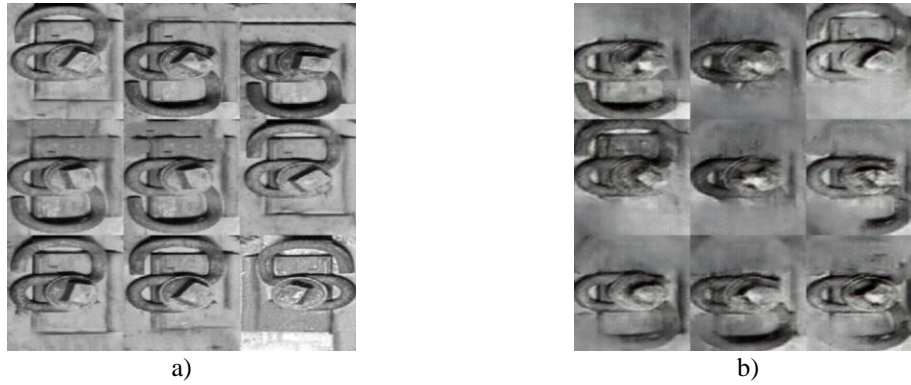
$$\min \max(D, G) = E_{x \sim p_{data}(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim p(z)} \log [1 - D(G(z))] \quad (5)$$

Üretici ağ gerçeğe en yakın görünen görüntüler yaratmayı öğrenirken, ayrıştırıcı ağ ise gerçek görüntüleri sahte olanlardan ayırmayı öğrenir. Eğitim sırasında sürekli geri besleme yapılır. Bu şekilde, üretici ağ giderek daha gerçek görünen görüntüler yaratır. Ayrıştırıcı ağ ise sahte görüntüler ile gerçek görüntüleri ayırt etmede daha iyi hale gelir. Bu süreç dengeye ulaştığında ayrıştırıcı artık gerçek görüntüleri sahtelerden ayırt edemez. Bu şekilde, en gerçekçi yapay görüntüler elde edilmiş olur. Üretici ağın ürettiği sonuçlar devir sayısına göre Şekil 3'te verilmiştir.



**Şekil 3.** Eğitim aşamasında devir sayısına göre DCGAN ile üretilen bazı deforme bağlantı elemanı görüntüleri

DCGAN ile üretilen deforme bağlantı elemanları eğitim için kullanılmıştır. Buradaki amaç, eğitim için daha fazla deforme bağlantı elemanı örneği kullanarak doğruluğu artırmaktır. Toplam 300 adet yapay görüntü üretilmiştir. Hâlihazırda 100 adet deforme bağlantı elemanı bulunan veri kümesi 300 yapay görüntü ile birleştirilerek eğitim için 400 adet görüntü içeren deforme bağlantı elemanı veri kümesi oluşturulmuştur. DCGAN ile görüntü üretmek için kullanılan bazı deforme bağlantı elemanı görüntüleri ile üretilen görüntüler için bazı örnekler Şekil 4.a'da verilmiştir. DCGAN ile oluşturulan bazı yapay görüntü örnekleri ise Şekil 4.b'de verilmiştir.



**Şekil 4.** Oluşturulan deforme veri kümesi a) Görüntü üretimi için kullanılan veri kümesinden bazı deforme bağlantı elemanı görüntüleri b) Eğitim için kullanılmak üzere DCGAN ile üretilen görüntüler

#### 2.4. Siyam ağı modeli

Siyam ağları, 90'ların başında bir görüntü karşılaştırmalı öğrenme problemi olan imza doğrulamasını gerçekleştirmek için Bromley vd. [28] tarafından önerilmiştir. Siyam ağları, diğer ağlara oranla güçlü ağlardır. Kullanım alanları arasında yüz tanıma ve imza doğrulama gibi alanlar vardır. Siyam sinir ağı, iki adet aynı alt ağ içeren bir sinir ağı mimarisi türüdür. Alt ağlar aynı parametreler ve ağırlıklarla aynı konfigürasyona sahiptir. Parametre güncellemeleri her iki alt ağa da yansıtılır. Siyam ağlarındaki ana fikir, giriş görüntülerinin verimli bir şekilde karşılaştırılması için gereken uygun benzerlik fonksiyonunu öğrenmektir. Siyam ağlarında sinir ağı, girdilerini sınıflandırmayı öğrenen bir model yerine, özellik vektörlerini kullanarak iki girdi arasında ayırım yapmayı öğrenir. İki adet aynı ağa sahip olduğu için girişte birbirine benzeyen görüntüler kullanıldığında fark fazla olmayacaktır. Farklı görüntüler kullanıldığında ise fark fazla olacaktır. Böylece, iki görüntünün aynı olup olmadığı tespit edilebilir. Siyam sinir ağının modeli Şekil 5'te verilmiştir. Bu iki alt ağ aynı mimariye ve parametrelere sahiptir. Bir alt ağdaki ağırlıklar güncellenirse diğer alt ağlardaki ağırlıklar da güncellenir. Bu alt ağlardaki son katmanlar olarak çıktılar arasındaki Öklid mesafesini hesaplayabildiğimiz ve alt ağların ağırlıklarını doğru kararı verecek şekilde ayarlayabildiğimiz katmanlardır.

Bu çalışmada, bağlantı elemanlarının kusurlu veya sağlam olup olmadığını araştırmak için siyam ağı kullanılmıştır. Siyam ağı sayesinde veri kümemizdeki her bağlantı elemanı görüntüsünü doğru bir şekilde sınıflandırmak için bir sınıflandırma modeli eğitmek yerine, eğitim setimizden iki görüntü alıp sinir ağına girdi olarak vererek aynı olup olmadığı belirlenecektir. Elde edilen benzerlik oranına göre iki bağlantı elemanının benzerliği belirlenecektir.

Şekil 5'teki diyagramda, sağlam ve deforme bağlantı elemanı görüntüleri, aynı ağırlık ve parametrelere sahip olan iki alt ağa girdi olarak verilir. Bu görüntüler, evrimsel katmanlardan geçtikten sonra görüntüler için özellik vektörleri elde edilir. Elde edilen  $h_1$  ve  $h_2$  özellik vektörleri, iki görüntünün ne kadar benzer olduğunu bilmek için karşılaştırılır. Karşılaştırma işlemi için özellik vektörleri arasındaki mesafe ölçülür. Aralarındaki mesafe küçükse vektörler benzerdir, mesafe büyükse vektörler farklıdır. Mesafe genellikle Öklid uzaklığı ile ölçülür. Öklid formülü Denklem 6'da verilmiştir. Denklemde,  $x$  ve  $y$  modelin ürettiği iki vektörü ifade etmektedir.

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

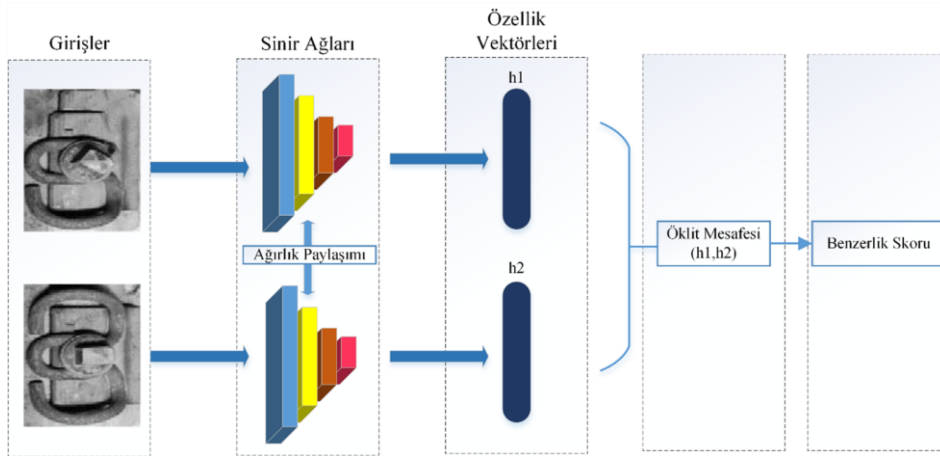
Eğitim sırasında farklı hata fonksiyonları kullanılabilir. Hata fonksiyonunun amacı, ağın belirli bir görüntü çiftini ne kadar iyi ayırt ettiğini değerlendirmektir. Karşılaştırmalı hata fonksiyonu ve ikili çapraz entropi, siyam ağları için tercih edilen hata fonksiyonlarıdır. Bu çalışmada, hata fonksiyonu olarak ikili çapraz entropi kullanılmıştır. Amaç, girdilerin aynı sınıfta olup olmadığını sınıflandırarak çıktıda ikili sınıflandırma gerçekleştirmektir. İkili çapraz entropi'de kayıp şu şekilde hesaplanabilir:

$$L = -y \log p + (1 - y) \log(1 - p) \quad (7)$$

Burada  $L$  kayıp fonksiyonu,  $y$  sınıf etiketi (0 veya 1) ve  $p$  tahmindir. Ağ benzer ve farklı nesnelere arasında ayırım yapmak üzere eğitmek için, her seferinde bir pozitif ve bir negatif örnek beslenebilir ve kayıplar toplanabilir. Bu kayıp işlevi, pozitif ve negatif kategorilerden bir eğitim örneği sağlanırsa ve her iki kayıp Denklem 8'deki gibi toplanırsa, benzer ve farklı görüntüler arasında ayırım yapabilmesi için ağ eğitmek için kullanılır.

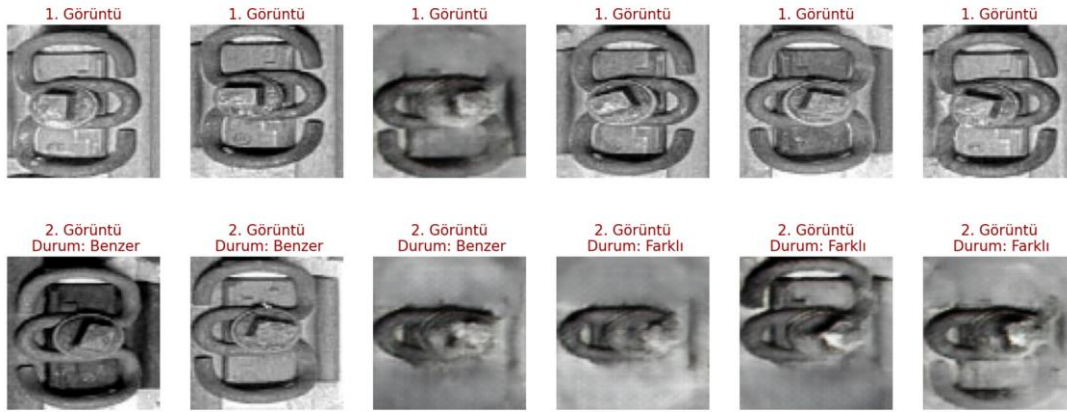
$$L = L_{pozitif} + L_{negatif} \quad (8)$$

Şekil 5'te görüldüğü gibi iki adet alt ağ olduğundan, siyam modeline iki girişimiz olmalıdır. Siyam ağlarını eğitirken aynı çiftlere ve farklı çiftlere ihtiyaç vardır. Aynı çiftler, aynı sınıfa ait iki görüntüyü ifade eder. Farklı çiftler ise farklı sınıflara ait iki görüntüyü ifade etmektedir. Siyam ağı eğitilirken, aynı ve farklı çift örnekleri rastgele seçilmiştir. Bu çiftler, siyam ağının benzerliği öğrenebilmesi için eğitim verileri olarak kullanılmaktadır. Pozitif çiftler aynı sınıfa ait iki ayrı görüntüden oluşmaktadır. Negatif çiftler ise farklı sınıflara ait iki görüntüden oluşmaktadır. Deforme bir bağlantı elemanı ile sağlam bağlantı elemanı negatif çift oluşturmaktadır. Sağlam iki bağlantı elemanı ise pozitif çift oluşturmaktadır.



Şekil 5. Siyam sinir ağı yapısı

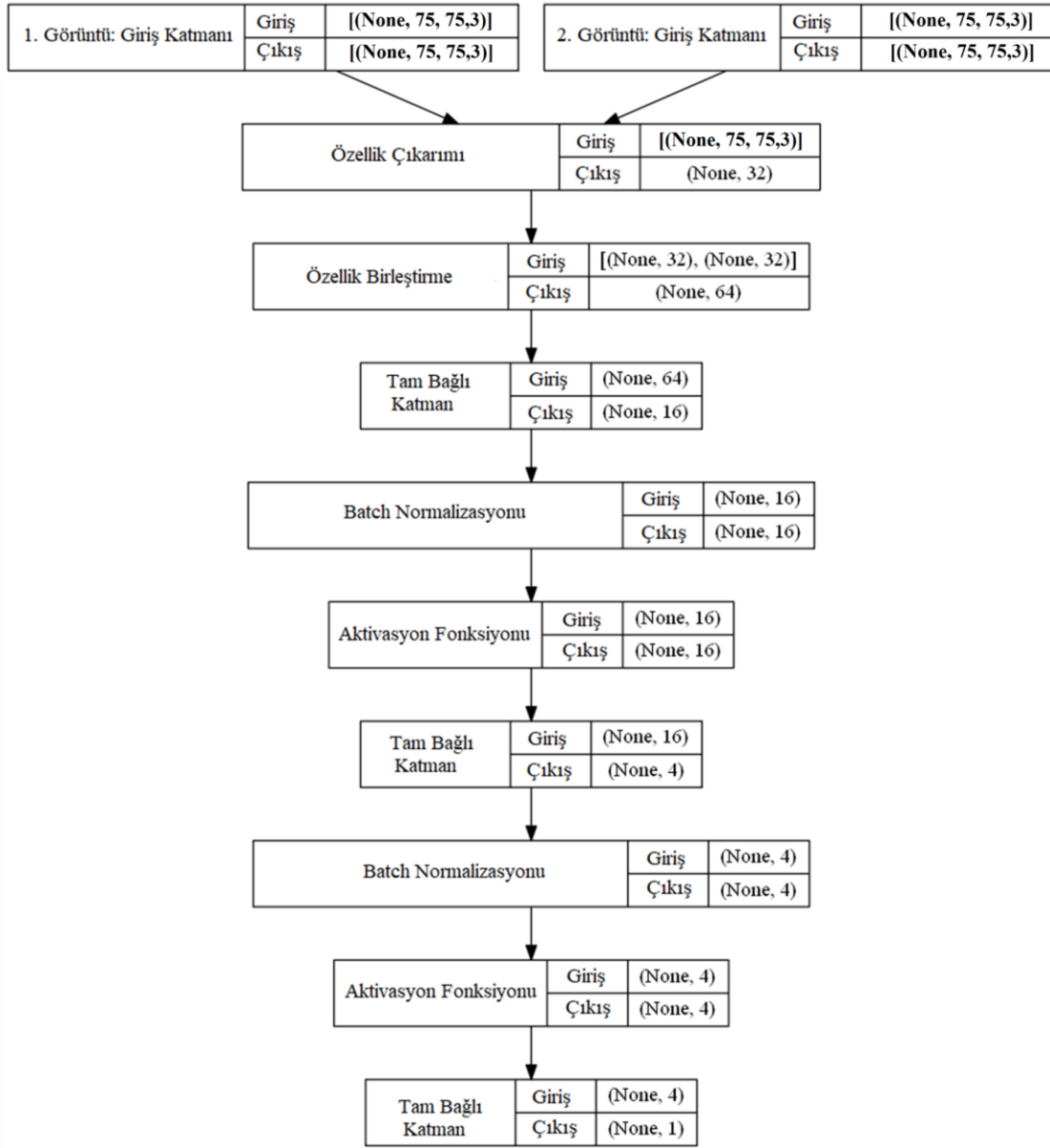
Siyam ağı eğitilirken, pozitif ve negatif çift örnekleri veri kümesinden rastgele örneklenir. Şekil 6'da rastgele seçilen bazı görüntü çiftleri verilmiştir. Seçilen görüntüler, pozitif çift oluşturuyorsa benzer, negatif çift oluşturuyorsa farklı olarak nitelendirilmiştir.



Şekil 6. Rastgele seçilen bazı görüntü çiftleri

Ağlar için giriş görüntülerinin uzamsal boyutları genişlik, yükseklik ve sayı kanalı şeklindedir. Veri kümemiz için giriş görüntüleri 75x75x3 şeklindedir. Evrişimli sinir ağları, sınıflandırma ve özellik çıkarma kullanılır. Bu çalışmada, önerilen sinir ağı sınıflandırma için kullanılan sinir ağından farklıdır. Önerilen sinir ağının çıktısı bir özellik vektörüdür. Aktivasyon fonksiyonu

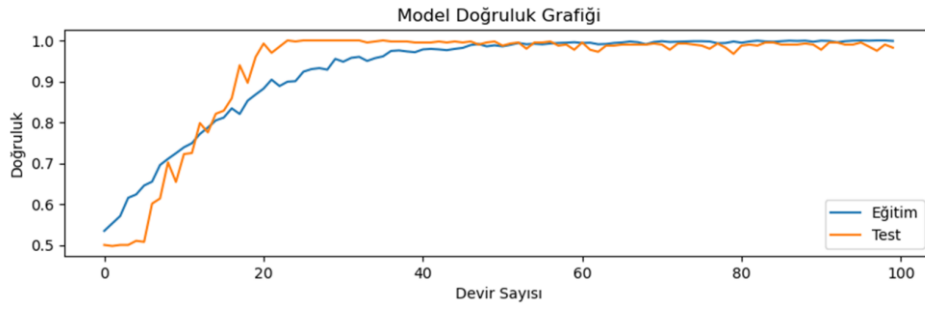
olarak Relu [29] fonksiyonu kullanılmıştır. Siyam ağında kullanılan ağın yapısı Şekil 7’de verilmiştir.



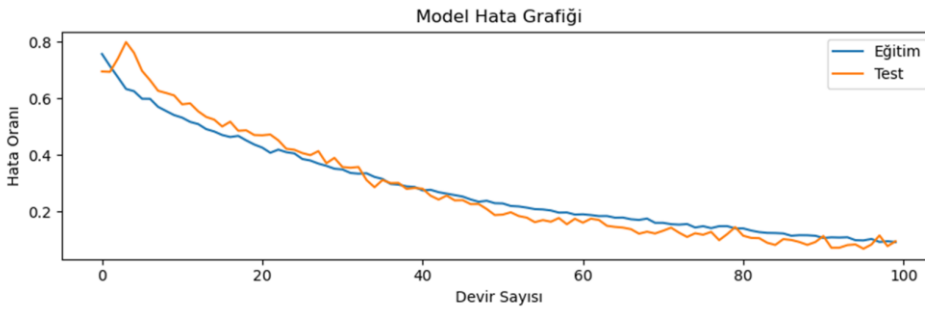
Şekil 7. Siyam sinir ağı modelinde kullanılan katmanlar ve parametreler

### 3. Deneysel Sonuçlar

Önerilen sinir ağı mimarisi, bağlantı elemanı görüntüsünün deforme veya sağlam olup olmadığı tahmin etmede kullanılmıştır. Yapılan deney, Windows 10 üzerine kurulu Python 3.8’de derlenmiştir. Önerilen algoritma TensorFlow çerçevesiyle uygulanmıştır ve model bir NVIDIA GeForce GTX 1060 kullanarak eğitilmiştir. Yöntemde batch değeri 32 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak Adam Optimizer kullanılmıştır [30] ve öğrenme hızı 0,0001 olarak belirlenmiştir. Deforme ve sağlam olmak üzere iki sınıf ile öğrenme sağlanmıştır. Devir sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Eğitim işlemi sonucunda oluşan eğitim ve test görüntülerinin başarımları Şekil 8 ve Şekil 9’da verilmiştir.

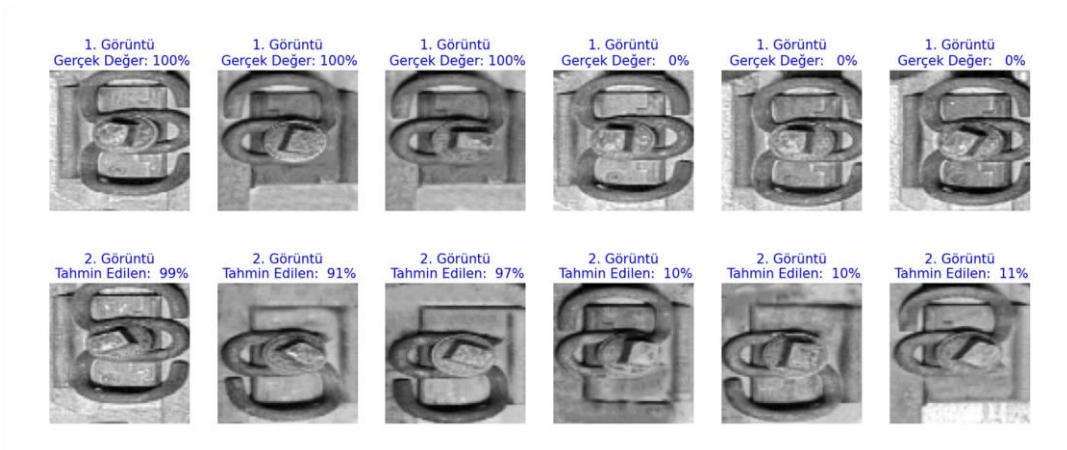


Şekil 8. Deney sonucunda oluşan model doğruluk grafiği



Şekil 9. Deney sonucunda oluşan model hata grafiği

Eğitim işlemi tamamlandıktan sonra eğitilmiş siyam ağı modeli iki görüntü çifti arasındaki benzerliği tahmin etmek için kullanılmıştır. Ağın son katmanında Sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Sigmoid aktivasyon fonksiyonunun  $[0, 1]$  aralığında bir çıktısı vardır. Bu nedenle, siyam ağına bir görüntü girdi olarak verildiğinde çıkış değeri, 0 ile 1 arasında bir değer olacaktır. Elde edilen 0 değeri, iki görüntünün birbirinden tamamen farklı olduğu anlamına gelirken, 1 değeri, görüntülerin aşırı benzer olduğu anlamına gelir. Örnek olarak, deforme bağlantı elemanı ile sağlam bağlantı elemanı karşılaştırılırsa 0'a yakın bir değer elde edilirken, sağlam bağlantı elemanı ile başka bir sağlam bağlantı elemanını karşılaştırıldığında 1'e yakın sonuç elde edilir. Bu çalışmada, karşılaştırma sonucunda elde edilen çıkış değeri 100 ile çarpılarak benzerlik oranı yüzde cinsinden verilmiştir. Rastgele yapılan bazı karşılaştırma sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi tahmin değerleri gerçek değerlere yakın çıkmıştır. Eğer tahmin değeri %50'nin altında ise görüntü farklı, %50'nin üzerinde ise görüntüler aynı olarak belirlenmiştir. Test verilerindeki eşleştirme sayısı 396 olarak belirlenmiştir. Eşleştirmelerden elde edilen karmaşıklık matrisi sonucu Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Eğitilen siyam ağına göre iki görüntünün benzerlik oranına göre karşılaştırılması

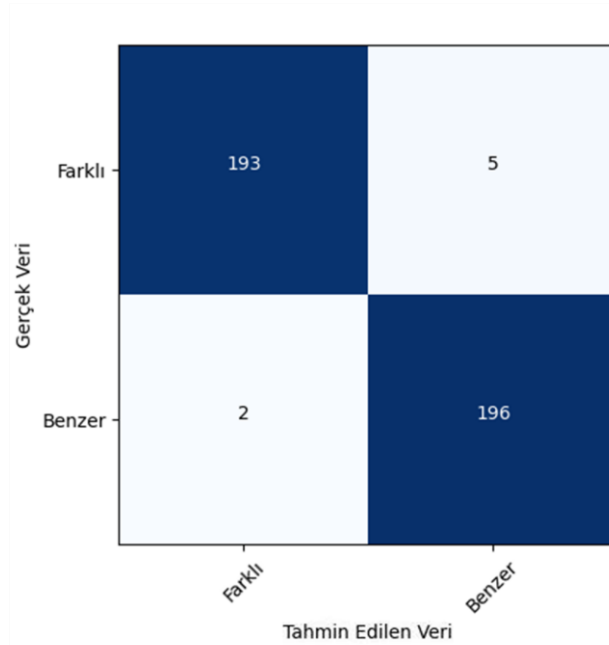
Karmaşıklık matrisi doğruluk, duyarlılık, özgünlük ve F1 değerlerini ölçmek için son derece kullanışlıdır. Bu değerleri hesaplamak için gerekli denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + YN + YP + DN} \quad (9)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (10)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (11)$$

$$\text{F1} = \frac{2 \times DP}{2 \times DP + YP + YN} \quad (12)$$



**Şekil 11.** Test görüntülerinin eşleştirilmesi sonucu oluşan karmaşıklık matrisi

**Tablo 1.** Önerilen yöntemin performans sonuçları

Doğruluk (%)	Duyarlılık (%)	Kesinlik (%)	F1 (%)
98,23	98,98	97,51	98,25

Önerilen yöntemin ölçüm sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Demiryolu bağlantı elemanlarının sınıflandırılmasında kullanılan mevcut yöntemler ile karşılaştırma sonuçları ise Tablo 2’de verilmiştir. Wei vd. [12]’de, algılama doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için ölçek azaltma ve özellik birleştirmeyi entegre eden geliştirilmiş bir YOLOv3 modeli önermiştir. Bai vd. [14]’te, Faster R-CNN ve SVDD algoritmalarına dayanan iki aşamalı bir sınıflandırma modeli önerilmiştir. İlk olarak, Faster R-CNN’e dayalı sınıflandırma ve algılama modeli, pratik bağlantı elemanı görüntülerinin özelliklerine göre oluşturulmuştur. Daha sonra, Faster R-CNN tarafından tespit edilen sonuca göre, eğilmiş bağlantı elemanlarının ikinci aşama sınıflandırması için SVDD



algoritması uygulanmıştır. Böylece, bağlantı elemanlarının farklı eğim açılarından kaynaklanan yanlış sınıflandırma önlenmek istenmiştir. Güçlü vd. [15]'te, bağlantı elemanı görüntüleri 6 bölgeye bölünerek etiketlenmiştir. 6 parçaya YOLOv4 algoritması uygulanarak güven değerleri elde edilmiştir. Elde edilen güven değerleri, bulanık mantık yapısına giriş olarak verilerek sonuç elde edilmiştir. Ou vd. [16]'da, bağlantı elemanı görüntülerinden özellikler çıkarılarak destek vektör makinesi ile sınıflandırılmıştır.

**Tablo 2.** Performans sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Referans	Kullanılan Yöntem	Doğruluk Oranı (%)
[12]	Geliştirilmiş YOLOv3 modeli	99,61
[14]	Faster R-CNN ve Destek Vektör Veri Tanımı (SVDD)	89,90
[15]	YOLOv4 ve bulanık mantık tabanlı yöntem	99,25
[16]	Özellik çıkarımı ve destek vektör makinesi (SVM)	94,98
Önerilen yöntem	DCGAN ve Siyam Sinir Ağı	98,23

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, demiryolu bağlantı elemanlarının incelenmesi için siyam ağı modeli önerilmiştir. Önerilen yöntem, bilgisayarlı görme tabanlı sistemde uygulanmaktadır. Eğitim için sağlam ve deforme bağlantı elemanları kullanılmıştır. Sağlam bağlantı elemanı görüntüleri demiryolundan elde edilen görüntülerden kolayca toplanabilirken deforme bağlantı elemanı görüntülerini bulmak oldukça zordur. Bu nedenle bu çalışmada ilk olarak, DCGAN kullanılarak üretilen yapay deforme bağlantı elemanları görüntüleri sayesinde veri kümesi artırılmıştır. Daha sonra, oluşturulan veri kümesi siyam sinir ağını eğitmek için kullanılmıştır.

Deneysel sonuçlar önerilen yöntemin yüksek hassasiyetini ve verimliliğini göstermektedir. Ayrıca, kusur tespit hassasiyeti sayesinde küçük kusur tespitleri için de kullanılabilir. Veri kümesi farklı sınıflarla genişletilirse, birden çok kusur türünün tespitinde kullanılabilir. Bu çalışmanın nihai hedefleri demiryolunun otomatik denetimi, hızlı inceleme ve işgücü maliyetinin azaltılmasıdır. Bağlantı elemanı hata tespit için siyam sinir ağlarının kullanılması ilgili çalışmaları zenginleştirmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, 120E097 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- [1] Z. Peng, C. Wang, Z. Ma, and H. Liu, "A multifeature hierarchical locating algorithm for hexagon nut of railway fasteners," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 3, pp. 693–699, 2020.
- [2] I. Aydın, E. Akin, and M. Karakose, "Defect classification based on deep features for railway tracks in sustainable transportation," *Appl. Soft Comput.*, vol. 111, no. 107706, p. 107706, 2021.
- [3] J. Yang, W. Tao, M. Liu, Y. Zhang, H. Zhang, and H. Zhao, "An efficient direction field-based method for the detection of fasteners on high-speed railways," *Sensors (Basel)*, vol. 11, no. 8, pp. 7364–7381, 2011.
- [4] H. Ma, "A real time detection method of track fasteners missing of railway based on machine vision," *International Journal of Performability Engineering*, 2018.

- [5] R. Geirhos, D. H. J. Janssen, H. H. Schütt, J. Rauber, M. Bethge, and F. A. Wichmann, "Comparing deep neural networks against humans: object recognition when the signal gets weaker," *arXiv [cs.CV]*, 2017.
- [6] M. Ferguson, R. Ak, Y.-T. T. Lee, and K. H. Law, "Detection and segmentation of manufacturing defects with Convolutional Neural Networks and transfer learning," *arXiv [cs.CV]*, 2018.
- [7] J. Shi, Z. Li, T. Zhu, D. Wang, and C. Ni, "Defect detection of industry wood veneer based on NAS and multi-Channel Mask R-CNN," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 16, p. 4398, 2020.
- [8] Y. Yang, X. Zhou, Y. Liu, Z. Hu, and F. Ding, "Wood defect detection based on depth extreme learning machine," *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 10, no. 21, p. 7488, 2020.
- [9] B. Su, H. Chen, P. Chen, G. Bian, K. Liu, and W. Liu, "Deep learning-based solar-cell manufacturing defect detection with complementary attention network," *IEEE Trans. Industr. Inform.*, vol. 17, no. 6, pp. 4084–4095, 2021.
- [10] L. Xu, S. Lv, Y. Deng, and X. Li, "A weakly supervised surface defect detection based on convolutional neural network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 42285–42296, 2020.
- [11] S. Faghieh-Roohi, S. Hajizadeh, A. Nunez, R. Babuska, and B. De Schutter, "Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects," in 2016 *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2016, pp. 2584–2589.
- [12] X. Wei, D. Wei, D. Suo, L. Jia, and Y. Li, "Multi-target defect identification for railway track line based on image processing and improved YOLOv3 model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 61973–61988, 2020.
- [13] H. Cui, J. Li, Q. Hu, and Q. Mao, "Real-time inspection system for ballast railway fasteners based on point cloud deep learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 61604–61614, 2020.
- [14] T. Bai, J. Yang, G. Xu, and D. Yao, "An optimized railway fastener detection method based on modified Faster R-CNN," *Measurement (Lond.)*, vol. 182, no. 109742, p. 109742, 2021.
- [15] E. Güçlü, İ. Aydın, K. Şahbaz, E. Akin, and M. Karaköse, "Demiryolu bağlantı elemanlarında bulunan kusurların YOLOv4 ve bulanık mantık kullanarak tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 249–262, 2021.
- [16] Y. Ou, J. Luo, B. Li, and B. He, "A classification model of railway fasteners based on computer vision," *Neural Computing and Applications*, 2019.
- [17] J. Liu, Y. Teng, X. Ni, and H. Liu, "A fastener inspection method based on defective sample generation and deep convolutional neural network," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 10, pp. 12179–12188, 2021.
- [18] G. Koch, "Siamese neural networks for one-shot image recognition," Toronto.edu. [Online]. Available: <http://www.cs.toronto.edu/~gkoch/files/msc-thesis.pdf>. [Accessed: 31-Oct-2021].
- [19] M. S. Kim, T. Park, and P. Park, "Classification of steel surface defect using Convolutional Neural Network with few images," in 2019 *12th Asian Control Conference (ASCC)*, 2019, pp. 1398–1401.
- [20] S. Wu, Y. Wu, D. Cao, and C. Zheng, "A fast button surface defect detection method based on Siamese network with imbalanced samples," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 78, no. 24, pp. 34627–34648, 2019.
- [21] A. Nagy and L. Czúni, "Detecting object defects with fusing convolutional Siamese neural networks," in Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, *Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 2021.
- [22] A. Aggarwal, M. Mittal, and G. Battineni, "Generative adversarial network: An overview of theory and applications," *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 1, no. 1, p. 100004, 2021.
- [23] X. Dong et al., "Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video," in 2011 *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2011, pp. 1–6.
- [24] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 12, pp. 2341–2353, 2011.
- [25] P. L. Suarez, A. D. Sappa, and B. X. Vintimilla, "Infrared image colorization based on a triplet DCGAN architecture," in 2017 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2017, pp. 18–23.
- [26] I. J. Goodfellow et al., "Generative Adversarial Nets," Neurips.cc. [Online]. Available: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2014/file/5ca3e9b122f61f8f06494c97b1afccf3-Paper.pdf>. [Accessed: 31-Oct-2021].
- [27] A. Radford, L. Metz, and S. Chintala, "Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks," *arXiv [cs.LG]*, 2015.
- [28] J. Bromley et al., "Signature verification using a 'Siamese' time delay neural network," *Intern. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.*, vol. 07, no. 04, pp. 669–688, 1993.
- [29] A. F. Agarap, "Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU)," *arXiv [cs.NE]*, 2018.

[30]D. P. Kingma and J. Ba, “Adam: A method for stochastic optimization,” arXiv [cs.LG], 2014.

### Özgeçmiş



#### **Emre GÜÇLÜ**

1994’te Elazığ’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ’da tamamladı. Necip Fazıl Kısakürek Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra 2019 yılında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2020 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Görüntü işleme ve yapay zekâ alanlarında çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: emreguclu1367@gmail.com



#### **İlhan AYDIN**

1981 yılında Elazığ’da doğdu. Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde 2001 ve 2006 yıllarında aldı. Doktora derecesini 2011 yılında Fırat Üniversitesi, Elazığ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden aldı.

Halen Fırat Üniversitesi’nde Bilgisayar Mühendisliği bölümünde Doçent olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında optimizasyon, gerçek zamanlı sistemler, hata teşhisi ve durum izleme, sinyal ve görüntü işleme ve derin öğrenme bulunmaktadır.

E-Posta: iaydin@firat.edu.tr



#### **Erhan AKIN**

1963 yılında Erzincan’da doğdu. Elektrik mühendisliği alanında lisans ve yüksek lisans derecelerini ve doktora derecelerini sırasıyla 1984, 1987 ve 1994 yıllarında Fırat Üniversitesinden aldı. Halen Fırat Üniversitesi’nde Bilgisayar Mühendisliği Profesörü olarak görev yapmaktadır. Başlıca araştırma alanları güç elektroniği, değişken hızlı AC sürücülerin dijital kontrolü, bulanık kontrol ve yazılımsal hesaplama teknikleridir.

E-Posta: eakin@firat.edu.tr

### **Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Tüm yazarların eşit katkısı olmuştur.



## Türkiye Demiryolu Araçları, Tramvaylar ve Komponentleri Sektörünün Uluslararası Rekabet Gücü Analizi

Arif AKTAŞ<sup>\*1</sup>, Ömür AKBAYIR<sup>2</sup>, Kadir AKSAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelenmesi, Ankara, Türkiye  
<sup>2</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma MYO, Eskişehir, Türkiye

\*arif.aktas2626@gmail.com

(Alınış/Received: 28.05.2021, Kabul/Accepted: 22.01.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Demiryolu endüstrisi birçok ülkeyi hem ekonomik hem de ticari olarak bugünkü haline getirmeye yardımcı olmuş, en önemli altyapı endüstrilerindendir. Günümüzde de birçok ülkenin ekonomisini geliştirmeye artan oranda katkı sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türk demiryolu araçları ve komponentleri sektörünün rekabet gücünü farklı analiz yöntemleri ile analiz etmektir. Bu bağlamda Türk raylı sistemler sektörünün rekabet gücü, Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler -diğer adıyla Balassa Endeksi- (RTA, BI), Nispi Ticaret Avantajı (RCA) ve Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü (RC) göstergeleriyle analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda; Türk raylı sistemler sektörünün Dünya piyasasında belirli bir rekabet gücüne ulaşamadığı ancak son yıllarda pozitif yönlü bir ivme yakaladığı görülmüştür. Bu bağlamda küresel ölçekte yaşanan yoğun rekabet, söz konusu sektöre yönelik yeni politikalar geliştirilmesi ve inovatif ürünlerin geliştirilmesine odaklanılmasıyla mevcut rekabet gücünün yükseltilmesini gerekli kılmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Demiryolu araçları, Uluslararası Rekabet Gücü, RCA, RTA, RC

### International Competitiveness Analysis of Turkish Railway Vehicles, Trams and Components Sector

**Abstract:** The railway industry is one of the most important infrastructure industries, helping many countries to become what they are today, both economically and commercially. Today, it contributes to the development and recovery of the economy of many countries at an increasing level. This study aims to analyze the competitiveness of the Turkish railway vehicles, trams, and components sector with different analysis methods. In this context, the competitiveness of the Turkish rail systems sector has been analyzed with the indicators of revealed comparative advantages, also known as the Balassa Index (RCA, BI), Relative Trade Advantage (RTA, BI), and The Revealed Competitive Advantage Index (RC). As a result of the analysis, the Turkish railway vehicles, trams, and components sector has not reached a certain competitive power in the world market but has gained positive momentum in recent years. In this context, the intense competition experienced on a global scale makes it necessary to increase the current competitiveness by focusing on the development of new policies for the sector in question and the development of innovative products.

**Keywords:** Railway vehicles, International Competitiveness, RCA, RTA, RC

#### 1. Giriş

2000’li yıllarla birlikte raylı sistemler güvenli ulaşım, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet üstünlüğü gibi konularda diğer ulaşım sistemlerine göre daha avantajlı olması nedeniyle tüm dünyada yeniden popülerlik kazanmıştır. Son yıllarda “hız” kavramının demiryolu araçlarına entegrasyonu, demiryolunu ulaşım ve lojistikte tercih edilen modlardan biri haline getirmiştir [1]. Türkiye’de demiryolculuk; Osmanlı Devleti’nin son dönemlerine doğru başlamış; siyasi ekonomik ve askeri sebeplerden dolayı önemli bir yere sahip olmuştur. Türkiye Cumhuriyeti’nin kurulmasıyla birlikte demiryollarının önemi daha da artarak, ülke bir uçtan

Atıf için/Cite as: A. Aktaş, Ö. Akbayır, K. Aksay, “Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün uluslararası rekabet gücü analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 60-74, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.944301

diğer uca demiryolu ağlarıyla örülmeye başlanmıştır. 1940'lı yıllara gelindiğinde ülkemizde demiryolları tüm Dünya genelinde olduğu gibi önemsiz bir ulaşım modu olarak görülmüştür. Dünyadaki eğilimlere benzer şekilde, devletin yatırım politikalarında değişikliğe gidilerek, 1950'li yıllardan bu yana neredeyse hiç gerçekleşmeyen demiryolu yatırımlarına daha fazla önem verilerek demiryollarının itibarı yükselmiştir. [2].

Son yıllardaki gelişmelere bağlı olarak hafif raylı sistemler, banliyö ve yüksek hızlı trenler performans artışı açısından en dinamik sektörel alt segmentler arasına girmiştir. Banliyö oldukça yaygındır ve metropolitan alanlardaki yolcu taşımacılığına odaklanmaktadır. Uygulaması, özellikle önceki demiryolu altyapısı mevcutsa nispeten basittir. Bununla birlikte, yüksek hızlı trenler hala çoğu gelişme seviyesi yüksek olan birkaç ülke ile sınırlıdır. Bunun temel nedeni, bu teknolojiyle bağlantılı yüksek uygulama maliyetidir. Güney Amerika, Orta Amerika, Afrika ve Avustralya / Pasifik gibi pek çok bölgede yüksek hızlı hizmetler hala mevcut değildir ve yalnızca Kuzey Amerika'da ve Rusya'da sınırlı bir seviyede uygulanmaktadır. Çin, bu açıdan önemli bir istisnadır, çünkü dünyanın en büyük hızlı tren raylı sistem ağını kısa sürede geliştirmeyi başarmıştır.

Diğer yandan yüksek yakıt fiyatları, trafik tıkanıklığı ve sera gazı emisyonları gibi zorluklarla karşı karşıya kalan toplu taşıma araçları, özel otomobil seyahatiyle karşılaştırıldığında hala avantajlı durumdadır [3]. Artan demiryolu ve otobüs seferleri ile yüksek hızlı demiryolu hatları, ülkelerin demiryoluna ilgisini yeniden canlandırmıştır. Demiryolu projeleri için fonlar daha hızlı artmaktadır. Daha güçlü ulaşım sistemlerine olan ilgiyle birlikte, bu araçların üretiminin artmasıyla gelişen istihdam oranları da devletler için sektöre yatırımı cazip kılmaktadır. Bu ilginin neticesinde demiryolu araçları toplam demiryolu pazarının yaklaşık üçte birini oluşturmuştur, kentsel hafif raylı sistemler ve metrolar dünyanın birçok bölgesinde genişlemekte ve şehirlerarası yüksek hızlı tren hatlarına yatırımlar artmaktadır [4]. Sektörün önemli ülkeleri, demiryolu araç imalatında toplamda en az yarım milyon kişiye istihdam sağlamakta ve tedarik zincirinde çok daha fazla istihdam yaratmaktadır. Hatların, tesislerin ve diğer altyapıların inşası; Ar-Ge ve mühendislik; iletişim ve sinyal ekipmanlarının üretimi gibi alanlar büyük istihdamlar yaratmakta, ayrıca demiryolu ve transit sistemlerinin çalıştırılmasında istihdam, dünya genelinde milyonlarca kişiye ulaşmaktadır. Almanya, İspanya, Japonya, Çin, Güney Kore, ABD ve Kanada demiryolu sektörünün önde gelen ülkeleri arasında yer almaktadır. Üretim değeri açısından bakıldığında demiryolu araçları piyasası, demiryolu sektörü için hemen hemen her pazar bölümüyle eşleşen, en geniş ve yaygın demiryolu alt sektörüdür. Sinyalizasyon ve elektrifikasyon alt sektörü ise demiryolu araçları alt sektörünü takip etmektedir.

Bu çalışma ihracat ve ithalata dayalı rekabet gücü analizi üzerinedir. Rekabet gücü analizleriyle ilgili alan yazına bakıldığında Türkiye demiryolu araçları sektörüne yönelik yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut çalışmalar, çoğunlukla sektörün hali hazırdaki görünüşünü ortaya çıkarmak amacıyla bazı kurum ve kuruluşlar tarafından hazırlanan çalışma grubu raporlarıdır. Bu çalışmalarda daha çok sektöre ait üretim, tüketim, ihracat ve ithalat ile ilgili bilgiler verilerek, sektörün mevcut durumuna yönelik öneriler geliştirilmiştir [5-7]. Birçok sektörde yapılan çalışmalar rekabet gücü analizi demiryolu araçları sektörüne ilk kez uygulanacaktır. Bu bağlamda çalışmanın amacı, Türkiye'nin demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörüne yönelik uluslararası rekabet gücünü belirlemeye çalışmaktır.

Uluslararası rekabet gücünü ölçmede en yaygın biçimde kullanılan bir yöntem olan Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler metodu çalışmada kullanılmıştır. Hesaplamalar için Balassa'nın [8] ortaya koyduğu "karşılaştırmalı üstünlükler endeksi" (RCA) ve "ithalat verileriyle açıklanmış karşılaştırmalı üstünlükler endeksi" (RCA) ile Vollrath'ın [9] "nispi ticaret avantajı endeksi" (RTA) ve "açıklanmış rekabet üstünlüğü endeksi" (RC)'den yararlanılmıştır. 2010-2020 periyoduna göre hesaplanan değerler birbirleriyle karşılaştırılıp ayrıntılı incelemeler ortaya

konmuştur. Bu çalışmanın diğer önemli bir özelliği; Vollrath ve Balassa tarafından geliştirilen endeksleri harmanlayarak Türkiye “Demiryolu Araçları, Tramvaylar ve Komponentleri” sektörünün daha ayrıntılı bir analizle dört haneli alt sektörlerin de hesaplamalara katılması, 10 yıllık süreçteki değişimin ayrıntılı bir şekilde incelenmesidir.

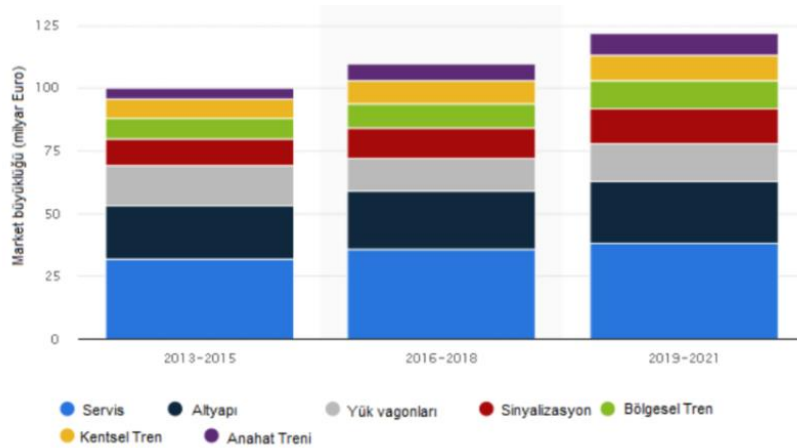
Çalışma beş bölümden meydana gelmektedir. İlk bölüm giriş bölümü olup ardından Dünya ve Türkiye’deki demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörü hakkında genel bilgiler aktarılmıştır. Daha sonra, kullanılan metot ortaya konmuştur. Çalışmadaki metot ve veri seti hakkındaki detaylı bilgilerin ardından, son bölümde endeksler hesaplanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmanın sonunda önerilere ve genel sonuçlara yer verilmiştir.

## 2. Demiryolu Araçları, Tramvaylar ve Komponentleri Sektörü

1829 yılının Ekim ayında İngiliz Stephenson’un “ROCKET” isimli lokomotifi üretmesiyle başlayan demiryolu sektörü, zamanla ticari hatlarının inşa edilmesi ve işletilmesiyle, 1940’lara kadar dünyadaki en önemli ulaştırma modu olmuştur. 1940’ların ardından otomotiv sektörünün gelişmesiyle, global çapta karayolu taşımacılığı gelişmeye başlamış, zamanla demiryollarının ulaşım modları arasındaki üstünlüğü son bulmuştur [5].

Hafif raylı sistemler, banliyö ve yüksek hızlı trenler performans artışı açısından en dinamik alt segmentler arasındadır. Banliyö oldukça yaygındır ve metropolitan alanlardaki yolcu taşımacılığına odaklanmaktadır. Uygulaması, özellikle önceki demiryolu altyapısı mevcutsa nispeten basittir. Bununla birlikte, yüksek hızlı trenler hala çoğu gelişme seviyesi yüksek olan birkaç ülke ile sınırlıdır. Bunun temel nedeni, bu teknolojiyle bağlantılı yüksek uygulama maliyetidir. Güney Amerika, Orta Amerika, Afrika ve Avustralya / Pasifik gibi pek çok bölgede yüksek hızlı hizmetler hala mevcut değildir ve yalnızca Kuzey Amerika’da ve BDT’de sınırlı bir seviyede uygulanmaktadır. Çin, bu açıdan önemli bir istisnadır, çünkü dünyanın en büyük hızlı tren raylı sistem ağını kısa sürede geliştirmeyi başarmıştır.

Şekil 1’de belirtildiği gibi demiryolu pazarında 2013 yılından bu yana en yüksek büyüme anahat raylı sistem araçlarında ortaya çıkmıştır. Benzer bir büyüme oranının 2019-2021 için de süreceği tahmin edilerek yine aynı dönemde yıllık demiryolu piyasasının yaklaşık 122 milyar € düzeyine ulaşacağı tahmin edilmektedir [6].



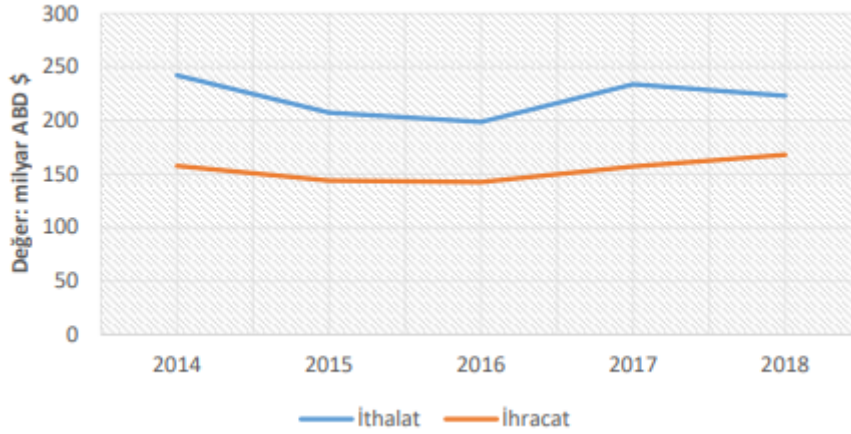
Şekil 1. Küresel demiryolu pazarının, 2013-2015'ten 2019-2021'e hizmet alanlarına göre dağılımı [6]

Demiryollarıyla yolcu taşımacılığında (yolcu-km) Avrupa’da, 2010 yılına göre 2030 yılında % 50, 2050 yılında ise % 100 oranında artış olacağı tahmin edilmektedir. Demiryoluyla yük

taşımacılığının (ton-km) 2030 yılında karayolu yük taşımacılığı seviyesine ulaşacağı, 2050 yılında ise karayolu yük taşımacılığını yaklaşık % 50 oranında geçeceği ön görülmektedir [7].

Ülkemizde demiryolu sektörünün gelişimi Osmanlı'nın son dönemlerine denk gelen 18. yy.'da başlamış; siyasi, ekonomik ve askeri sebeplerden ötürü önemli bir yere haiz olmuştur. Türkiye Cumhuriyeti'nin kurulmasının ardından demiryollarına bahşedilen önem çok daha artmış, ülkemizin pek çok noktasında demiryolu hatları inşa edilmeye başlamıştır. 1940'lı yıllara gelindiğindeyse kimi gerekçelerle, -dünya genelinde olduğu gibi- ülkemizde de demiryolu yatırımları yavaşlamıştır.

Son yarım asırdır Dünyada yaşanan eğilimlere paralel olarak, Türkiye'nin demiryolu politikalarında bir değişiklik yaşanmış olup, 1950'li yıllardan itibaren neredeyse durma aşamasına gelen demiryolu yatırımlarına önem verilmeye başlanmıştır [8]. Hızlı tren, yüksek hızlı tren, kent içi raylı ulaşım ve metro sayılarında hızlı bir artış yaşanmıştır. Bu gibi gelişmelere bağlı olarak demiryolu araları ve komponentleri alanında Türkiye'nin ihracat ve ithalat rakamlarında pozitif bir ivme göze çarpmaktadır. Diğer taraftan 2017 yılında metro, hafif raylı sistem ve tramvay üretimi yapacak olan kamu kurum ve kuruluşları, belediyeler ve il özel idarelerine, üretimde en az %51 yerli ürün kullanılması şartı getirilmesi de Yerli malı kullanım oranını yüzde 51'e çıkaran genelgesi ile %51 yerlilik oranı yerli firmalara büyük fırsatlar sunmuş ulusal sektöre canlılık getirmiştir [11]. Aşağıda Türkiye'nin 2014-2018 yılları arasında ithalat ve ihracatının ulaştığı rakamlar görülmektedir.



Şekil 2. 2014-2018 Türkiye ithalat ve ihracat tutarı değerleri değişimi eğrisi (milyar \$) [10]

Günümüze kadar yaşanan gelişmelerin yanı sıra Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisinde yer alan aşağıdaki türde büyük projelerin hayata geçirilmesi sektörü önemli ölçüde etkileyecektir. Bunlar [12];

- i. Halihazırdaki demiryolu ağının 800 km'lik bölümünün çift hat haline getirilmesi, 10.000 km yeni yüksek hızlı demiryolu hattı inşa edilmesi,
- ii. 5.000 km yeni konvansiyonel demiryolu hattının faaliyete geçirilmesi,
- iii. 8.000 km hattın elektrifikasyonunun tamamlanması,
- iv. Tüm demiryolu hatlarının sinyalli hale getirilmesi amacıyla 8.000 km'lik hattın sinyalizasyonunun bitirilmesi,
- v. Standartların artırılması amacıyla her yıl en az 500 km demiryolu hattının yenilenmesi, fabrika, OSB, liman gibi bölgelerle demiryolu bağlantılarının hazır edilmesi amacıyla 40 iltisak hattının inşa edilip faaliyete geçirilmesi,
- vi. Mevcut durumdaki çeken ve çekilen araç parkının yenilenmesi için 180 YHT Seti, 300 dizel ve elektrikli lokomotif, 120 elektrikli set (EMU), 24 dizel set (DMU), 8.000 yük ve yolcu vagonu temin edilmesidir.

Günümüzde şehir içi toplu taşımacılıkta kullanılan raylı ulaşım sistemleri; tramvaylar, hafif raylı sistemler, banliyö trenler, metrolar, manyetik raylı tren sistemleri (MAGLEV) ve üst yollu elektrikli bir toplu taşımacılık sistemi olan monoraydan meydana gelmektedir. Bunlardan ilk dört sistem ülkemizin farklı şehirlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Hafif raylı sistemler, temelde klasik tramvayın daha modern ve evrim geçirmiş hali olarak tanımlanabilir. Hafif raylı taşımacılık sisteminde, tek araba şeklinde veya kısa dizi olarak işletilebilen yükseltilmiş yollarda veya yer seviyesinde yollarda, diğer ulaşım modlarından ayrı bir şekilde kendine ait özel bir yolu olan, şehir içi elektrikli toplu ulaşım sistemidir. Genellikle nüfus artışlarının sınırlı kaldığı yapılaşmış çevre bölgelerde sık ve etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bir sürücü tarafından sinyalizasyon sistemine sahip olarak kullanılan, her 600-1000 m arası mesafede özel istasyonlarda yolcu indirip bindiren, ortalama hızları 60-80 km/saat ile kendine ait özel hatlarda işletilen raylı toplu ulaşım sistemleridir. Hafif raylı sistemlerin saatlik yolcu kapasiteleri yaklaşık 10.000- 20.000 kişi arasında değişiklik göstermektedir [13].

### 3. Metot

Bu çalışmada Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün uluslararası rekabet gücünü ampirik olarak analiz etmek amaçlanmıştır. Rekabet gücünün ölçülmesine yönelik birçok yaklaşım bulunmakta ve bunlar içinde en sık kullanılan ve bu alanda önde gelen yöntemlerin başında “Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler” yöntemi bulunmaktadır. Bu kapsamda Balassa ve Vollrath tarafından ortaya koyulan endeksler benimsenmiştir. Bunun sebebi, Ricardo’ya ait [14] “Karşılaştırmalı Üstünlükler Teorisi”ne ve “Heckscher-Ohlin Teorisi” gereğince [15,16] -uygulamada- mukayeseli üstünlüklerin belirlenmesi oldukça zordur. Bu durumun nedeninin ticaret öncesi nispi fiyatların bilinmemesi olduğu söylenebilir. Balassa ticaret öncesi fiyatlara ulaşamadığı durumlarda, ticaret sonrası ortaya çıkacak verilerin gözlemlenmesiyle de karşılaştırmalı üstünlüğün ‘açıklanmasının’ mümkün olabileceğini savunmuştur [8].

Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler yönteminde ülkelerin belirlenen ürünlerin görelî ihracat performansları değerlendirilmektedir. Liesner Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler yöntemini ileri süren ilk ekonomisttir [17] ancak yöntemi daha da geliştiren ise ekonomist Balassa’dır. Uygulamaya bakıldığında da daha çok Balassa’nın, “Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler Endeksi” ya da “Balassa Endeksi” şeklinde bilinmekte olan endeks kullanılmaktadır. Balassa endeksi (RCA, BI) yalnızca ihracat değerlerini dikkate aldığı, ithalat değerlerini ihmal ettiğinden dolayı eleştiren Vollrath bu açığı kapatmak amacıyla yeni bir dizi endeks ortaya koymuştur [9].

Çalışmada, Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün dünya karşısındaki rekabet gücünü analiz etmek amacıyla Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler Endeksi (Balassa Endeksi) (RCA, BI), Vollrath tarafından geliştirilmiş iki endeks olan Nispi Ticaret Avantajı Endeksi (RTA) ve Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi (RC) kullanılmıştır. Üç endekse uygulanan veriler yorumlanarak, her bir endeks sonucu birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Balassa Endeksi’nin (RCA) formülü ve ayrıca formüldeki değişkenler aşağıda belirtilmiştir.

$$RCA = (X_{ij}/X_{it})/(X_{wj}/X_{wt})$$

$X_{ij}$ : i ülkesi tarafından gerçekleştirilen j malı ihracatını,

$X_{it}$ : i ülkesi tarafından gerçekleştirilen toplam ihracatı,

$X_{wj}$ : Dünya ülkeleri tarafından gerçekleştirilen j malı ihracatını,

$X_{wt}$ : Dünya ülkeleri tarafından gerçekleştirilen toplam ihracatı göstermektedir.



Sonucun 1'den küçük değerde olması, ülkedeki ilgili üründe karşılaştırmalı üstünlük açısından dezavantajlı durumda olduğunu, 1'den büyük değerde olması ise ülkedeki o ürünün karşılaştırmalı üstünlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan endeksin ithalat verilerini kapsayan revize edilmiş haliye şu şekildedir:

$$RCA = \ln(X_{ij} / X_{it}) / (M_{ij} / M_{it}) \times 100$$

X<sub>ij</sub>: i ülkesi tarafından gerçekleştirilen j malı ihracatını,

X<sub>it</sub>: i ülkesi tarafından gerçekleştirilen toplam ihracatı,

M<sub>ij</sub>: i ülkesi tarafından gerçekleştirilen j malı ithalatını,

M<sub>it</sub>: i ülkesi tarafından gerçekleştirilen toplam ithalatını göstermektedir.

RCA'lara göre sektörün rekabet gücünün analizi yapılırken:

RCA > 50 ise ilgili sektörde rekabet gücünün fazla,

RCA < -50 ise ilgili sektörde rekabet gücünün az,

-50 < RCA < 50 ise ilgili sektörde rekabet gücünün sınırda olduğu belirtilmektedir [18].

Ardından Vollrath, Nispi İthalat ve Nispi İhracat endeksleri vasıtasıyla Nispi Ticaret Avantajı (RTA) endeksini geliştirerek, bunu Nispi İhracat Avantajı Endeksi R<sub>XA</sub> = [(X<sub>ij</sub> / (X<sub>it</sub> - X<sub>ij</sub>)) / ((X<sub>wj</sub> - X<sub>ij</sub>) / (X<sub>wt</sub> - X<sub>it</sub>))] formülüyle hesaplamaktadır. Formülde bulunan değerler Balassa endeksinde kullanılan değerlerdir.

Nispi İthalat Avantajı Endeksi R<sub>MA</sub> = [(M<sub>ij</sub> / (M<sub>it</sub> - M<sub>ij</sub>)) / ((M<sub>wj</sub> - M<sub>ij</sub>) / (M<sub>wt</sub> - M<sub>it</sub>))] formülü vasıtasıyla hesaplanmaktadır. Formülde;

M<sub>ij</sub>: i ülkesi tarafından gerçekleştirilen j malı ithalatını,

M<sub>it</sub>: i ülkesi tarafından gerçekleştirilen toplam ithalatı,

M<sub>wj</sub>: Dünya ülkeleri tarafından gerçekleştirilen j malı ithalatını,

M<sub>wt</sub>: Dünya ülkeleri tarafından gerçekleştirilen toplam ithalatı göstermektedir.

Böylece, Nispi Ticaret Avantajı Endeksi RTA = R<sub>XA</sub> - R<sub>MA</sub> formülüyle bulunmaktadır.

RTA > 0 çıkması durumunda ülke üründe (sektörde) rekabet gücüne sahip olup,

RTA < 0 çıkması durumunda ise ülke üründe (sektörde) rekabet gücüne sahip değildir [19]

Çalışmada değerlendirilen son endeks ise Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi (RC) aşağıdaki formül vasıtasıyla bulunmaktadır.

$$RC = \ln R_{XA} - \ln R_{MA}$$

Buna göre bulunan endeks, RC > 0 durumunda söz konusu üründe karşılaştırmalı avantaj,

RC < 0 bulunması durumunda söz konusu üründe karşılaştırmalı dezavantaj olduğu ortaya konmaktadır [18].

Çalışma, 2010-2020 yıllarını kapsamaktadır. Dış ticaret verileri Uluslararası Ticaret Merkezi Veri Tabanı (Trade Map)'ndan elde edilmiştir. Uluslararası Harmonize Sistem Ürün Sınıflandırmasındaki (Harmonized System Commodity Classification Codes) raylı sistem sektörüne ait olan ürün kodu 86 olup, adı; Demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri olarak tanımlanmaktadır.

**Tablo 1.** Sektöre ait GTİP kodları

86	Demiryolu araçları, tramvaylar ve Komponentleri
8601	Elektrikli lokomotifler (elektrik enerjisini dışarıdan alanlar veya elektrik akümülatörlü olanlar)
8602	Diğer lokomotifler; lokomotif tenderler
8603	Kendinden hareketli demiryolu veya tramvay vagonları
8604	Demiryolu hat bakım ve servis taşıtları (atölye-vinçli vagonlar, balast sıkıştırma vagonları, hat döşeyiciler vb)
8605	Kendinden hareketli olmayan demiryolu veya tramvay yolcu vagonları; bagaj furgonları, diğer demiryolu ve tramvay vagonları
8606	Kendinden hareketli olmayan yük taşımaya mahsus demiryolu veya tramvay vagonları
8607	Demiryolu-tramvay için sabit malzeme; mekanik işaret, emniyet, trafik kontrol-kumanda cihazları; bunların aksam-parçaları
8608	Demiryolu taşıtlarının veya tramvayların aksam ve parçaları
8609	Bir veya daha fazla taşıma şekline göre özel olarak yapılmış ve donatılmış konteynerler

#### 4. Bulgular

Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün rekabet gücüne yönelik bulunan endeks değerlerine Tablo 2’de yer verilmiştir. Açıklanmış karşılaştırmalı üstünlükler endeks değerinin 1’den küçük olması ilgili sektörde mukayeseli dezavantaja sahip olduğunu, 1 veya 1’den büyük olması ise ilgili sektörde mukayeseli üstünlüğe sahip olduğunu göstermektedir. 2010-2020 döneminde demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörümüz için karşılaştırmalı üstünlük değerine sahip olmadığını görebiliriz. Ancak 2016’dan bu yana endeks değerinin giderek artıyor olması sektörün karşılaştırmalı üstünlüğünün yükseleceğine işaretler. 2013 yılında endeks değeri yapılan ihracatlarla en yüksek değerine ulaşmıştır.

Endeksin ithalat verilerini de içeren revize edilmiş halini incelediğimizde ise sektörümüzün 2010-2020 arasında hiç rekabet gücü yüksek olmamış. Fakat 2019 yılında indeks -50 ile +50 arasında -11,72 değerini alarak sektörümüzün rekabet gücünün sınırda olduğunu görebiliriz. 2019 dışındaki bütün yıllarda sektörün rekabet gücü düşüktür. Ayrıca 2016-2019 periyodunda endeksin sürekli artması olumlu bir gelişme olmakla beraber önümüzdeki yıllarda sektörün rekabet gücünün daha da yükselmesi beklenmektedir.

Nispi Ticaret Avantajı endeksi incelendiğinde yine demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörü 2010-2020 periyodunda rekabet gücüne sahip değildir. İncelenen dönem içerisinde Nispi Ticaret Avantajı 2019 yılında -0,19’la en yüksek değere ulaşmıştır. Son yıllarda endeks değeri sifira yaklaşmış ve rekabet gücünde bir artış olduğu göze çarpmaktadır.

Son olarak Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi incelendiğinde ise raylı sistemler sektöründeki mallarda karşılaştırmalı dezavantaj söz konusudur. Söz konusu dönemde 2013 yılında yapılan ihracatla artışa geçen rekabet üstünlüğü endeksi tekrar düşmeye başlamış ve son yıllarda bir artış trendine girmiştir.

Fakat 2020 yılında pandeminin ihracat ve ithalata olan negatif etkisiyle endeks değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Önümüzdeki yıllarda pandemi etkisinin azalmasıyla endeks değerlerinde tekrar yükseliş trendine girmesi beklenmektedir.

**Tablo 2.** 86-Demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri genel analizi

Yıllar	Açıklanmış Karşılaştırılmış Üstünlükler (RCA)	İthalat verileriyle Açıklanmış Karşılaştırılmış Üstünlükler (RCA)	Nispi Ticaret Avantajı (RTA)	Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi (RC)
2010	0,07	-295,43	-1,62	-3,24
2011	0,36	-128,91	-1,43	-1,61
2012	0,35	-102,55	-0,88	-1,27
2013	0,57	-65,26	-0,81	-0,89
2014	0,42	-96,74	-1,01	-1,24
2015	0,28	-98,30	-0,72	-1,27
2016	0,17	-177,48	-1,09	-1,99
2017	0,26	-119,16	-0,84	-1,46
2018	0,22	-56,52	-0,32	-0,89
2019	0,47	-11,72	-0,19	-0,35
2020	0,43	-85,40	-0,91	-1,13

Tablo 3’de Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün, Balassa Endeksi (RCA)’ne göre hesaplanmış karşılaştırmalı üstünlük endeks değerlerine yer verilmektedir. Yapılan hesaplama sonuçları değerlendirildiğinde açıklanmış karşılaştırmalı üstünlüğü yüksek düzeyde çıkan alt sektörler, 2013-2014 yıllarında;

- 8602-Diğer lokomotifler; lokomotif tenderler,
- 2011-2014 yılları arasında,
- 8603-Kendinden hareketli demiryolu veya tramvay vagonları,

2013 ve 2015 yıllarında;

- 8605-Kendinden hareketli olmayan demiryolu veya tramvay yolcu vagonları; bagaj furgonları, diğer demiryolu ve tramvay vagonları,

2017-2018-2019 yıllarında ise,

- 8608-Demiryolu-tramvay için sabit malzeme; mekanik işaret, emniyet, trafik kontrol-kumanda cihazları; bunların aksam-parçalarıdır.

**Tablo 3.** Açıklanmış karşılaştırılmış üstünlükler (RCA)

GTIP Kodu	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2010-20 Ort
8601	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,00	0,01
8602	0,01	0,00	0,36	1,02	1,33	0,00	0,03	0,00	0,00	0,02	0,69	0,31
8603	0,01	2,51	1,87	2,10	1,65	0,92	0,26	0,79	0,35	0,62	0,13	1,02
8604	0,07	0,00	0,00	0,37	0,82	0,19	0,00	0,00	0,49	0,18	0,22	0,21
8605	0,06	0,05	0,00	3,63	0,00	1,77	0,01	0,00	0,00	0,02	0,30	0,53
8606	0,01	0,09	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,68	0,08
8607	0,11	0,09	0,10	0,15	0,21	0,21	0,29	0,33	0,41	0,71	0,63	0,30
8608	0,23	0,62	0,23	0,59	0,45	0,84	0,92	1,28	1,20	1,20	0,29	0,72
8609	0,08	0,08	0,09	0,10	0,07	0,09	0,06	0,05	0,06	0,16	0,23	0,10

Tablo 4’de Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün Balassa Endeksi (BI, RCA) ithalat verilerine göre hesaplanmış karşılaştırmalı üstünlük endeks değerleri

yer almaktadır. Hesaplama sonuçlarına göre açıklanmış karşılaştırmalı üstünlüğü yüksek düzeyde çıkan alt sektörler;

2012-2014 yıllarında,

- 8602-Diğer lokomotifler; lokomotif tenderler,

2014 ve 2018 yıllarında,

- 8604- Demiryolu hat bakım ve servis taşıtları (atölye-vinçli vagonlar, balast sıkıştırma vagonları, hat döşeyiciler vb),

2010-2011-2013-2015-2016 yıllarında,

- 8605-Kendinden hareketli olmayan demiryolu veya tramvay yolcu vagonları;bagaj furgonları, diğer demiryolu ve tramvay vagonları,

2019 yılında,

- 8601-Elektrikli lokomotifler (elektrik enerjisini dışarıdan alanlar veya elektrik akümülatörlü olanlar) ve
- 8606-Kendinden hareketli olmayan yük taşımaya mahsus demiryolu veya tramvay vagonlarıdır.

2020 yılında ise,

- 8602-Diğer lokomotifler; lokomotif tenderler,
- 8604-Demiryolu hat bakım ve servis taşıtları (atölye-vinçli vagonlar, balast sıkıştırma vagonları, hat döşeyiciler vb),
- 8606-Kendinden hareketli olmayan yük taşımaya mahsus demiryolu veya tramvay vagonları,
- 8609-Bir veya daha fazla taşıma şekline göre özel olarak yapılmış ve donatılmış konteynerlerdir.

**Tablo 4.** İthalat verileriyle açıklanmış karşılaştırılmış üstünlükler (RCA)

GTIP Kodu	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2010-20 Ort.
8601	Değer yok	-371,64	-335,44	-705,62	-547,55	-614,70	-213,96	-157,68	-54,75	216,59	Değer yok	-309,42
8602	-277,65	Değer yok	171,56	205,67	10,09	Değer yok	-237,42	Değer yok	Değer yok	-383,17	193,32	-45,37
8603	-647,78	-122,58	-87,52	-56,67	-97,65	-90,61	-277,46	-168,28	-122,92	-53,42	-358,14	-189,37
8604	-163,09	-745,18	-826,12	-198,60	83,50	-166,62	Değer yok	-457,52	52,42	-200,60	59,03	-256,28
8605	85,62	88,45	Değer yok	659,21	Değer yok	709,18	82,97	-293,06	-46,64	-426,65	-366,48	54,73
8606	-291,72	-102,26	-126,77	-333,80	-485,24	-183,47	-178,87	-14,45	-58,56	556,65	426,14	-72,03
8607	-170,57	-190,56	-167,51	-132,87	-98,82	-95,58	-101,91	-44,31	-42,75	22,50	12,20	-91,84
8608	-278,63	-54,67	-90,50	-171,82	-178,37	-89,93	-31,43	29,08	16,87	23,26	-26,39	-77,50
8609	11,06	51,81	41,21	56,65	-56,24	78,22	-20,28	-63,75	-46,47	9,78	76,63	12,60

RTA endeksine göre ortaya çıkan sonuçlara göre, Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün dünya karşısında nispi ticaret avantajına sahip olduğu alt sektörler, Tablo 5’de görüldüğü gibi 2019 yılında,

- 8601- Elektrikli lokomotifler (elektrik enerjisini dışarıdan alanlar veya elektrik akümülatörlü olanlar)
- 8606-Kendinden hareketli olmayan yük taşımaya mahsus demiryolu veya tramvay vagonları,
- 8607-Demiryolu taşıtlarının veya tramvayların aksam ve parçaları,
- 8608-Demiryolu-tramvay için sabit malzeme; mekanik işaret, emniyet, trafik kontrol-kumanda cihazları; bunların aksam-parçalarıdır.

2010-2015 yılları arasında,

- 8605-Kendinden hareketli olmayan demiryolu veya tramvay yolcu vagonları; bagaj furgonları, diğer demiryolu ve tramvay vagonları alt sektörü nispi ticaret avantajına sahiptir.

2017-2019 yılları arasında

- 8608-Demiryolu-tramvay için sabit malzeme; mekanik işaret, emniyet, trafik kontrol-kumanda cihazları; bunların aksam-parçaları alt sektörü,

2020 yılında,

- 8602-Diğer lokomotifler; lokomotif tenderler,
- 8604-Demiryolu hat bakım ve servis taşıtları (atölye-vinçli vagonlar, balast sıkıştırma vagonları, hat döşeyiciler vb),
- 8606-Kendinden hareketli olmayan yük taşımaya mahsus demiryolu veya tramvay vagonları,
- 8607-Demiryolu taşıtlarının veya tramvayların aksam ve parçaları nispi ticaret avantajına sahip olarak dikkat çekmektedir.

**Tablo 5.** Nispi ticaret avantajı (RTA)

GTIP Kodu	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2010-20 Ort.
8601	-0,02	-0,02	-0,03	-7,54	-5,63	-3,17	-0,11	-0,09	-0,02	0,02	0,00	-1,51
8602	-0,18	-0,28	0,28	0,89	-0,22	-2,03	-0,35	-0,17	-0,08	-0,95	0,58	-0,23
8603	-8,01	-9,65	-2,83	-1,90	-3,18	-1,35	-4,19	-3,34	-0,93	-0,46	-3,70	-3,59
8604	-0,26	-3,06	-5,59	-2,35	0,54	-0,81	-2,14	-0,24	0,21	-1,03	0,10	-1,33
8605	0,04	0,03	0,00	3,71	0,00	1,78	0,00	-0,12	0,00	-1,23	-18,78	-1,32
8606	-0,14	-0,18	-0,05	-0,15	-0,95	-0,11	-0,16	-0,02	-0,02	0,05	0,66	-0,10
8607	-0,50	-0,52	-0,43	-0,42	-0,35	-0,31	-0,44	-0,15	-0,19	0,15	0,08	-0,28
8608	-3,70	-0,55	-0,36	-2,93	-2,38	-1,25	-0,18	0,44	0,17	0,12	-1,39	-1,09
8609	-0,18	-0,12	-0,10	-0,07	-0,26	-0,03	-0,08	-0,24	-0,23	-0,16	-0,06	-0,14

Tablo 6'da Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün dünya karşısındaki açıklanmış rekabet üstünlüğü (RC) endeks değerleri verilmiştir.

**Tablo 6.** Açıklanmış rekabet üstünlüğü endeksi (RC)

GTIP Kodu	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2010-20 Ort.
8601	Değer yok	-3,48	-3,17	-6,80	-5,38	-6,14	-2,21	-1,47	-0,49	2,55	Değer yok	-2,95
8602	-2,76	Değer yok	1,46	2,06	-0,16	Değer yok	-2,69	Değer yok	Değer yok	-3,69	1,91	-0,55
8603	-6,70	-1,57	-0,92	-0,64	-1,07	-0,91	-2,83	-1,65	-1,30	-0,56	-3,54	-1,97
8604	-1,60	-7,36	-8,22	-2,00	1,10	-1,65	Değer yok	-4,56	0,57	-1,93	0,61	-2,51
8605	0,87	1,02	Değer yok	6,63	Değer yok	6,86	0,16	-3,28	-1,23	-4,32	-4,15	0,28
8606	-3,11	-1,14	-1,48	-3,73	-5,60	-2,80	-2,61	-0,65	-1,15	4,92	3,53	-1,26
8607	-1,74	-1,89	-1,66	-1,32	-0,96	-0,91	-0,91	-0,37	-0,39	0,24	0,14	-0,89
8608	-2,86	-0,63	-0,94	-1,78	-1,84	-0,91	-0,18	0,42	0,15	0,11	-1,76	-0,93
8609	-1,17	-0,91	-0,75	-0,51	-1,50	-0,32	-0,87	-1,77	-1,57	-0,72	-0,23	-0,94

2020 yılı itibariyle Türkiye'nin dünya karşısında açıklanmış rekabet üstünlüğüne sahip olduğu alt sektörler;

- 8602-Diğer lokomotifler; lokomotif tenderler,
- 8604-Demiryolu hat bakım ve servis taşıtları (atölye-vinçli vagonlar, balast sıkıştırma vagonları, hat döşeyiciler vb),
- 8606-Kendinden hareketli olmayan yük taşımaya mahsus demiryolu veya tramvay vagonları, 8607-Demiryolu taşıtlarının veya tramvayların aksam ve parçaları,
- 8607- Demiryolu taşıtlarının veya tramvayların aksam ve parçaları,

2010-2016 yılları itibariyle,

- 8605-Kendinden hareketli olmayan demiryolu veya tramvay yolcu vagonları; bagaj furgonları, diğer demiryolu ve tramvay vagonları alt sektörünün açıklanmış rekabet üstünlüğünün oldukça yüksek olduğu görülmektedir ve en yüksek değere 2015 yılında ulaşılmıştır.

Çalışmada dört farklı yöntem kullanılmış olup bunlar; Balassa'nın Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler Endeksi (Balassa Endeksi) (RCA, BI), ithalat verileri kullanılarak elde edilen Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler Endeksi (RCA), Vollrath'ın Nispi Ticaret Avantajı Endeksi (RTA) ve yine Vollrath'ın Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi (RC)'dir. Ayrıca tablo 7'de Nispi Ticaret Avantajı, Balassa ve Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü endeks sonuçlarının karşılaştırılması özet halinde sunulmuştur. Ortaya çıkan her dört endeks değerleri de birbirleriyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Değerlendirme sonuçlarına göre elde edilen bulgular şöyledir:

Balassa Endeksi'ne (RCA, BI) göre rekabet gücü yüksek olan dört haneli alt sektör,

- 8603-Kendinden hareketli demiryolu veya tramvay vagonlarıdır.

İthalat verileriyle hesaplanan Balassa Endeksine göre rekabet gücü yüksek, Nispi Ticaret Avantajı (RTA)'na sahip ve Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi (RC)'ne sahip alt sektör,

- 8605-Kendinden hareketli olmayan demiryolu veya tramvay yolcu vagonları; bagaj furgonları, diğer demiryolu ve tramvay vagonlarıdır.

Rekabet gücü en düşük olan dört haneli alt sektör,

- 8601-Elektrikli lokomotifler; elektrik enerjisini dışarıdan alanlar veya elektrik akümülatörlü olanlardır.

Rekabet gücü sınırdan olan dört haneli alt sektör ise,

- 8609- Bir veya daha fazla taşıma şekline göre özel olarak yapılmış ve donatılmış konteynerlerdir.

**Tablo 7.** Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörü rekabet gücünün dört endeks (RCA, RCA İthalat, RTA, RC) değerlerine göre karşılaştırılması

GTIP Kodu	Balassa Endeksi (RCA) 2010/2020 Ortalama	Açıklanmış Karşılaştırılmış Üstünlükler (RCA) ithalat verileri ile 2010/2020 Ortalama	Nispi Ticaret Avantajı Endeksi (RTA) 2010/2020 Ortalama	Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi (RC) 2010/2020 Ortalama				
8601	0,01	Değil	-278,47	Düşük	-1,51	Dezavantaj	-2,95	Dezavantaj
8602	0,31	Değil	-45,37	Düşük	-0,23	Dezavantaj	-0,55	Dezavantaj
8603	1,02	Sahip	-189,37	Düşük	-3,59	Dezavantaj	-1,97	Dezavantaj
8604	0,21	Değil	-256,28	Düşük	-1,33	Dezavantaj	-2,51	Dezavantaj
8605	0,53	Değil	54,73	Yüksek	-1,32	Dezavantaj	0,28	Avantaj
8606	0,08	Değil	-72,03	Düşük	-0,10	Dezavantaj	-1,26	Dezavantaj
8607	0,30	Değil	-91,84	Düşük	-0,28	Dezavantaj	-0,89	Dezavantaj
8608	0,72	Değil	-77,50	Düşük	-1,09	Dezavantaj	-0,93	Dezavantaj
8609	0,10	Değil	12,60	Sınırdan	-0,14	Dezavantaj	-0,94	Dezavantaj

## 5. Sonuç

Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörü rekabet gücünün Dünya ortalamalarına göre incelendiği bu çalışmada, araştırma yöntemi olarak açıklanmış karşılaştırmalı üstünlükler yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu sektörünün rekabet gücü, dört haneli olarak toplam dokuz alt sektör özelinde; “Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler Endeksi”, “İthalat Verileriyle Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler Endeksi,” “Açıklanmış Rekabet Üstünlüğü Endeksi” ve “Nispi Ticaret Avantajı Endeksi” olmak üzere dört farklı hesaplama yöntemi vasıtasıyla analiz edilmiştir. Bu dört farklı hesaplama yöntemi ayrı ayrı incelendiğinde ise elde edilen sonuçlar genellikle birbirleri ile uyumlu çıkmıştır.

Türkiye’de rekabet gücü sektörler yüksek arasında otomotiv, demir-çelik gibi sektörler yer almaktadır[20,22]. Maalesef demiryolu araçları sektörü henüz rekabetçi bir sektör değildir. Özellikle 11. Kalkınma Planında raylı sistem araçlarının öncelikli sektörler arasında kabul edilmesi sektörün rekabetçilik konusunda ilerleyeceğini göstermektedir.

Çalışmanın sonuçlarına göre, Türkiye demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörü içerisinde özellikle “8601- Elektrikli Lokomotifler...” ile “8609 - Bir veya daha fazla taşıma şekline göre özel olarak yapılmış ve donatılmış konteynerler” alt sektörlerinin rekabet gücünün zayıf olduğu tespit edilmiştir. Bunun ana nedeni, demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektöründe yeterli ana ve yan sanayinin oluşmamış olmasıdır. Diğer taraftan sanayi kurumları, teknoparklar ve üniversiteler arasında demiryolu araçlarına yönelik iş birliklerinin zayıf olması ve ilgili tarafların yeterli fonları bulmada güçlük yaşamaları sebebiyle Ar&Ge çalışmalarının yeterli düzeyde olmaması diğer bir neden olarak söylenebilir. Yine elektrikli lokomotifler sadece TÜRASAŞ tarafından devlet eliyle üretildiği için ve özel sektör üretici firmaları bu alanda yer almaması nedeniyle bir rekabet ortamı oluşmamaktadır.

Özel konteynerlerin üretimi özelinde ise bu türde üretimleri gerçekleştiren firmaların yeterli sayıda olmaması söylenebilir. Bunda da konteyner limancılığının Türkiye’de çok fazla gelişmemiş olması kök neden olarak gösterilebilir.

Türkiye'deki raylı sistem araçları üreticileri sadece iç pazarı değil yurtdışı pazarlarını da hedeflemelidir. Son zamanlarda özellikle raylı sistem imalat sektörüne önemli teşvikler verilmektedir. Teşviklerin sürekliliği sağlanıp yurtdışı pazarlara giriş kapsamında da firmalara destekler verilmelidir. Diğer taraftan 11. Kalkınma Planı Raylı Sistem Araçlarında Yerli Üretim Çalışma Grubu Raporu'na göre [7] sürdürülebilir bir raylı sistem araçları (Demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri) sektörü için ülkemiz ihracatının yıllık 300 milyon TL'nin üzerinde olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için mevzuatta ve ilgili bakanlığın yapılanmasında birtakım değişikliklere gidilebilir. Yapılabilecekler arasında Savunma Sanayi Başkanlığı'nda olduğu gibi raylı teknoloji ile ilgili sektöre yönelik bir "Yerleştirme Başkanlığı" kurulmalı ve bu başkanlık vasıtasıyla belediyeler dahil tüm kamu ihalelerinde yerleştirme programı (SİP) uygulanmalı ve denetlenmelidir.

8605-Kendinden hareketli olmayan demiryolu veya tramvay yolcu vagonları; bagaj furgonları, diğer demiryolu ve tramvay vagonları alt sektörünün diğer alt sektörlerle kıyaslandığında yüksek rekabet gücüne sahip olduğu göze çarpmaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden biri vagon üretiminde özel sektörün rekabetçi ve kaliteli üretim seviyesine ulaşmış ihracat yapabilmesidir. Diğer önemli bir neden ise yurtdışından alınan vagonlara tip onay verilmeyerek eğer vagon Türkiye'de üretiliyorsa Türkiye'den alınmasının sağlanmasıdır [22]. Diğer alt sektörlerde de buna benzer önlem ve kararlarla rekabetçiliğimiz artırılabilir.

Akıllı Bölgesel Yenilik Stratejilerinde belirlenen öncelikli sektörler arasında raylı sistem sektörü bulunan bölgelerde ana ve yan sanayinin bir arada bulunduğu raylı sistem ihtisas sanayi bölgelerinin kurulması, kümelenmelerin desteklenmesi ve bu bölgelere özel teşviklerin sağlanması sektörün rekabet gücünün artmasına katkı sağlayacaktır. Sivas'ta kurulan Demirağ Organize Sanayi Bölgesi iltisak hatları ve sağlanan teşviklerle örnek teşkil etmektedir. Eskişehir'de raylı sistemler öncelikli sektör olarak belirlenmiş olup [23] benzer bir yapı burada da faaliyete geçirilmelidir.

Kamu alımları milli sanayimizin kalkınması için çok önemlidir. Son 4 yılın ortalama kamu alımı yıllık 188 milyar TL'dir. Kamu alımlarında her yıl % 100 yerli ürün ve hizmet alımı yapılırsa her yıl 188 milyar TL, 11. Kalkınma planı çerçevesinde % 80 yerli ürün ve hizmet alımı yapılırsa her yıl 152 milyar TL ülkemizde kalacak, işsizlik ve cari açık önlenecek, sanayimiz gelişecek ve ihracatımız artacaktır. 4734 Sayılı Kamu İhale Kanunu'nun yerli isteklilerle ilgili %15 avantaj düzenlemesi idareler tarafından farklı şekillerde kullanılmamalı ve mutlaka zorunlu hale getirilmelidir. Bazı Belediyeler Yurt dışı kredi sağladığında alımlarda yerli katkı şartı uygulamıyor. Kurulacak Yerleştirme Başkanlığı bir otorite olarak bu alımlarda da en az % 60 yerli katkı şartı getirmeli ve denetlemelidir. TL ile ihaleye çıkıldığında eskalasyon (kur farkı, enflasyon, vb) hesabı yapılmadığından yerli üreticilerimiz sorun yaşıyor. Proje süresinde oluşan ve öngörülmeleyen bu farkların yerli üreticilerimizin zarar etmemesi için sözleşmeye yansıtılması gerekiyor. En önemli konulardan olan yurt dışında iş yapan müteahhitlerimiz her yıl yaklaşık 1 milyar Dolarlık iş almaktadır. Yerli ürünlerimizin müteahhitlerimiz tarafından tercih edilmesiyle hem yerli üretim, hem de ihracatımız artacaktır. Bu konuda kurulacak olan Yerleştirme Başkanlığı teşvik ederek müteahhitlerimizle koordinasyon sağlayabilir. Bu gibi önlemlerle Türk demiryolu araçları, tramvaylar ve komponentleri sektörünün uluslararası arenada daha rekabetçi olması sağlanabilir.

Araştırmacılara yönelik olarak, ilgili sektöre yönelik yapılmış olan bu çalışmanın, farklı endekslere göre zayıf olunan alanlarla ilgili sektörel yapının çeşitli parametrelere göre geliştirilmesine yönelik bir çalışmanın yapılabileceği önerilebilir. Yine özel donatımlı konteyner üretiminin yeterli olmaması noktasına taşıma modları ve konteyner limanlarının mevcut durumu ve sayısı arasında etkileşim farklı bir çalışmada ele alınabilir.



## Kaynakça

- [1] R. Li, C. Zheng, H. Wang, D. Zhao, B. Ran, and X. Xue, "Intersection traffic signal optimisation considering the impact of upstream curbside bus stops," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 8, pp. 880–888, 2020, doi: 10.1049/iet-its.2019.0660
- [2] Y. Dalgıç, Y.B. Ulutaş, S. Karasungur, "TR41 bölgesi raylı sistemler sektörü raporu; Dünyü, Bugünü ve Geleceği," BEBKA, 2016
- [3] M. Kılıç, T. Yalılı Kılıç, T. Dönmez, S. Adalı. "Karayolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakkale örneği," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* vol.11, no 3 pp. 943-955, 2021, doi: 10.17714/gumusfenbil.848016
- [4] S. Şahin, "Malatya'da kent içi ulaşım ve toplu taşıma sistemlerinin karşılaştırmalı incelenmesi: Trambüs ve hafif raylı sistem örneği," Yüksek Lisans tezi, İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2020
- [5] TÜDEMSAS, "Sivas demiryolu makine ve ekipmanları sektörü kümelene stratejisi ve eylem planı raporu," 2013.
- [6] İ. Pektaş, "Raylı ulaşım sistemleri sektör analizi," ARUS Kümelene, 2018
- [7] T.C. Kalkınma Bakanlığı, "Raylı sistem araçlarında yerli üretim çalışma grubu raporu," 2018
- [8] B. Balassa, "Trade liberalization and 'revealed' comparative advantage," *Manchester School* vol. 33, no. 2, pp. 99 —123, 1965
- [9] T. L. Vollrath, "A theoretical evaluation of alternative trade intensity measures of revealed comparative advantage," *Weltwirtschaftliches Archiv*, vol.127, pp. 165-279, 1991
- [10] B.C. Başer, O.A. Mutlu, A. Yılmaz. "Anadolu raylı ulaşım sistemleri kümelene ihracatının artırılması projesi ihtiyaç analizi raporu," ARUS Kümelene, 2018
- [11] İ. Pektaş, "Raylı sistemlerde en az % 51 yerli katkı şartı tüm sektörler için örnek olacak." *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 7, pp. 48-49, 2018
- [12] A. Uğur. "Investigation of the world railway sector development prospects and turkey's status," *Alphanumeric Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 369-398, 2019, doi: 10.17093/ alphanumeric.582290
- [13] İ. Şenlik, "Kent içi raylı ulaşım sistemleri," *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, no. 408, pp. 37-39 Eylül, 2016
- [14] D. Ricardo, *Principles of political economy and taxation*, G. Bell and Sons, 1891
- [15] E. Heckscher, "Utrikeshandelns verkan på inkomstfördelningen. några teoretiska grundlinjer," *Ekonomisk tidskrift*, vol 21, pp.1–32, 1919
- [16] B. Ohlin, *Interregional and international trade*, Harvard University Press, 1933
- [17] H. H. Liesner, "The European common market and British industry", *Economic Journal*, vol. 68 no.270, pp. 302-316, 1958
- [18] B. Erkan, "Ülkelerin ihracat performanslarının belirlenmesinde açıklanmış karşılaştırmalı üstünlüklerinin kullanılması: yükselen ekonomiler örneği," Yayınlanmamış Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi SBE, Manisa, 2009
- [19] K. Gürpınar, M. Barca, "Türk mobilya sektörünün uluslararası rekabet gücü düzeyi ve nedenleri," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, vol.2, no.2, pp. 41- 43, 2007
- [20] M. Ozan BAŞKOL, "Türk Otomotiv Sektörünün Uluslararası Rekabet Gücü", *PARADOKS Ekonomi, Sosyoloji ve Politika Dergisi*, vol: 7, no. 2, pp. 63-78, 2011
- [21] H. Çeştepe A.Tunçel, "Türkiye Demir Çelik Sektörünün Uluslararası Rekabet Gücü Analizi", *International Congress on Social Sciences II (INCSOS 2018 Quds) Volume 13/15, Spring 2018, p. 113-129*
- [22] *Demiryolu Araçları Tescil ve Sicil Yönetmeliği*, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 16.07.2015.
- [23] BEBKA, Bursa Eskişehir Bilecik Bölge Planı 2014-2023, 2015

**Özgeçmişler****Arif AKTAŞ**

Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2019 yılından bu yana Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelenmesi'nde (ARUS) proje yöneticisi olarak çalışmaktadır.

e-posta: arif.aktas@ostim.org.tr

**Ömür AKBAYIR**

Lise eğitimini Demiryolu Meslek Lisesinde, lisans ve yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nde, doktora eğitimini Gazi Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Onbeş yıl TCDD'nin çeşitli işyerlerinde, çeşitli görevler üstlenmiş olup, 2015 yılından bu yana Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır.

e-posta: omurakbayir@eskisehir.edu.tr

**Kadir AKSAY**

Lisans Eğitimini Gazi Üniversitesi İşletme Bölümü'nde, yüksek lisans eğitimini Anadolu Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı Yönetim ve Organizasyon Bilim Dalı'nda ve doktora eğitimini Selçuk Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı'nda tamamlamıştır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi Ulaştırma Bilimleri Enstitüsü ve Ulaştırma Meslek Yüksek Okulu'nda Doç. Dr. olarak çalışmalarına devam etmektedir.

e-posta: kadiraksay@eskisehir.edu.tr

**Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Arif AKTAŞ: Kaynaklar, Görselleştirme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Ömür AKBAYIR: Kavramsallaştırma, Metodoloji. Kadir AKSAY: Doğrulama, İnceleme.



## Dizel Lokomotif Ağır Hizmet Motorunda Kullanılan Egzoz Supap Bagası Hasarları

Yalçın ÖZDEMİR<sup>1</sup>, S. Fehmi DİLTEMİZ<sup>2</sup>, Gökhan KANDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>3</sup> TÜRASAŞ Genel Müdürlüğü, ArGe Dairesi Başk., Çeken Araçlar Müd., Eskişehir, Türkiye

\* yalcinozdemir@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 28.12.2021, Kabul/Accepted: 25.01.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** En genel tanımıyla бага (supap yuvası), içten yanmalı motorlarda silindir başlığında bulunan, supap oturma yüzeyiyle temas ederek sızdırmazlık sağlayan önemli bir motor bileşenidir. Hem egzoz hem de emme supaplarının işlevini doğru bir şekilde yapabilmesi için bagaların da kusursuz bir şekilde çalışması gerekir. Supap ve baganın temas yüzeylerinde meydana gelecek hasar çalışma performansını etkilemektedir. Ağır yük dizel motorlar yüksek güç temini gerektiren araçlarda kullanılan yüksek hacimli motorlardır. Bu araştırma kapsamında бага ele alınmış ve ağır yük dizel motor egzoz supap bagalarına odaklanılmıştır. Egzoz subap bagaları hakkında bilgi verilmiş, örnek bir dizel lokomotif ağır hizmet motoru egzoz subap bagalarında meydana gelen hasarlar değerlendirilmiştir. Numuneler üzerinden alınan kesitler ve hasarlı yüzeylerden elde edilen görüntüler incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hasar, Dizel Motor, Supap.

### Exhaust Valve Seat Insert Damages of Diesel Locomotive Heavy Duty Engine

**Abstract:** In general definition, the valve seat insert is an important engine component in the cylinder head of internal combustion engines, which provides sealing by contacting the valve seat surface. In order for both the exhaust and intake valves to function properly, valve seat inserts also need to work perfectly. Failures that effects the performance of the engine on the surface of valve and valve seat. Heavy-duty diesel engines are high-volume engines used in vehicles that require high power supply. The scope of this research is valve seats and researchers focused on the heavy-duty diesel engine valve seats. Information about the exhaust valve seats was given, and the damages on the exhaust valve seats of a sample diesel locomotive heavy-duty engine were evaluated. Images and sections were taken from the samples and explanations were given.

**Keywords:** Failure, Diesel Engine, Valve.

## 1. Giriş

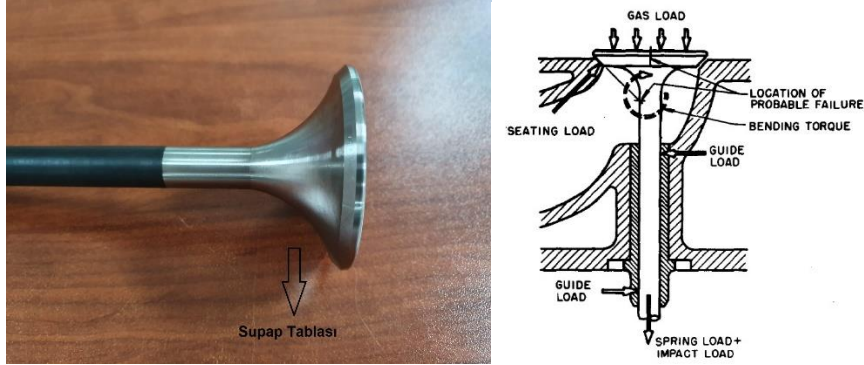
Baga (supap yuvası) içten yanmalı motorlarda silindir başlığında bulunan, supap oturma yüzeyiyle temas ederek sızdırmazlık sağlayan aynı zamanda supabının sıcaklığını dengeleyen motor parçalarından biridir. Supabın ısısının, silindir başlığına ve oradan da soğutma çevrimine aktarılmasında rol alır [1]. Supap yuvası, motorun kritik bir bileşenidir, çünkü tasarıma uygun olmayan geometride imal edilirse veya hatalı monte edilirse, motor sıkıştırma oranını ve dolayısıyla motor verimliliğini, performansını (motor gücü ve motor torku) olumsuz yönde etkileyecek olan supap kaçakları meydana gelecektir. Ayrıca egzoz emisyon değerleri kötüleşecek ve motor ömrü de azalacaktır [2].

İçten yanmalı motor zamanlarında (emme, sıkıştırma, yanma, egzoz) supabın silindir içindeki gaz hareketlerini kontrol etmesi için bagayla uyumlu çalışması gerekmektedir. Supap ve бага ikilisinin; sıkıştırma anında içerdeki gazları tamamen hapsedmesi, emme ve egzoz zamanlarında

Atıf için/Cite as: Y. Özdemir, S.F. Diltemiz, G. Kandemir, "Dizel lokomotif ağır hizmet motorunda kullanılan egzoz supap bagası hasarları," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 75-83, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1050061

akışı engellememesi gerekmektedir. Aksi durumda, yanma odasında meydana gelen sızma sıkıştırma basıncının düşüşüne ve motor verimliliğinde düşüşe neden olmaktadır. Yüksek devirlerde çalışılmaya devam edilmesinin sonucunda бага ve supaplarda yanma görülür [3].

Şekil 1(a)'da supap tablası ve Şekil 1(b)'de [4] hasarlı supap yuvasından kaynaklanan supap yükleri gösterilmektedir.



Şekil 1. a) Supap tablası b) Hasarlı supap yuvasından kaynaklanan supap yükleri [4]

Şekil 1 incelendiğinde; supap oturma yüzeyine gelen yükler, supap üzerinde tabla kısmına yakın bölgede oluşan eğme ve buna bağlı zorlanmalar, supap kılavuzu ile supap arasındaki klerans, açısal fraklılıklar vb. bağlı gerilmeler, silindir içerisindeki yanma ve buna bağlı genişleme sonucu oluşan basma yükleri ve termal zorlanmalar, supap yayından gelen mekanik basma yükleri şematik olarak gösterilmiştir.

Literatürde bagalar genellikle supaplarla birlikte araştırılmıştır. Baganın aşınma mekanizmaları, aşınmaya yol açan çalışma şartları ve parametreler, supap-baga için kullanılan malzemelerin aşınmaya karşı direnci üzerine çalışmalar yapılmıştır. Wang vd. (1996) çalışma koşullarının bagaya olan etkilerini incelemiştir. Çevrim (cycle), yük ve sıcaklık parametrelerinin aşınmaya olan etkisini araştırmıştır. Çalışma koşullarını oluşturabilmek için bir düzenek kullanılmıştır. Supap ve bagadaki aşınmanın adhesiv aşınma, abrasif aşınma ve kesme geriniminin kompleks bir bileşiminden oluştuğu sonucuna varmıştır [5]. Bir yıl sonra Zhao vd. (1997) Si – Cr alaşımı supap karşısında dört farklı malzemelerden üretilmiş sekiz baganın performansını, test düzeneği üzerinde araştırmıştır [6]. Yang vd. (2000) supap sıcaklığının motor çalışma koşullarına göre nasıl değiştiğini araştırmıştır. Supap sıcaklık dağılımında ateşleme avansının, hava yakıt karışımının, motor devrinin önemli rol oynadığını belirtmiştir. Çalışma benzinli motor üzerinden yapılmış, fakat bu modelin dizel motorlarda da uygulanabileceğini ifade etmiştir [7]. Lewis ve Dwyer-Joyce (2001) supap ve бага aşınma sorununa deneysel yaklaşım sergilemiş ve çalışma koşullarını oluşturmak için iki test düzeneği kurmuştur. İlkinde hidrolik yorulma tertibatıyla, supap ve bagaya çalışma koşullarında gelen yükleri uygulamış ve sürtünmeli kayma mekanizmasını araştırmıştır. İkincisinde 1440 rpm kapasiteli elektrik motoru kam miline tahrik vermektedir. Bu düzenekle supap kapanma hızının бага üstündeki etkisini de oluşturulmak istenen çalışma koşulları parametrelerine ekleyebilmiştir. Supap бага çalışmalarında farklı malzemelerin ve çalışma koşullarının değerlendirilmesinde bu düzeneğin faydalı olacağını belirtmiştir [8]. Ando vd. (2005) CNG ve LPG yakıtların supap ve bagalardaki aşınmaya olan etkilerini incelemiştir. Benzin veya dizel yakıtlar için kullanılan parçaların, gaz yakıtlar kullanıldığında daha fazla aşındığını belirtmiştir. Oksit filmin gaz yakıtlarda sınırlı olmasının adhesiv aşınmayı arttırdığı sonucuna varmıştır [9]. Shojaefard vd. (2005) sonlu elemanlar analiziyle egzoz supabı, бага, supap klavuzu ve supap yayının geçici rejim ısı analizini modellemiştir. Analizleri kararlı durum şartlarına ulaşana kadar sürdürmüştür. Çalışmada maksimum termal gerilimin baganın supapla temasta bulunan yüzeyinde olduğunu belirtmiştir [10]. Chun vd. (2007) egzoz supap ve bagasındaki aşınmayı çevrim sayısına (mileage) göre araştırmıştır. Bu çalışmada kullandığı

test düzeneğinde; çevrim sayısı, sıcaklık, yükler, RPM, supap kapanma hızı gibi parametreler oluşturulmak istenen çalışma koşullarına göre ayarlanabilmektedir. Çevrim sayısı arttıkça supap ve bagadaki maksimum yüzey pürüzlülüklerinin ( $R_{max}$ ) lineer olarak arttığı sonucunu grafik üzerinden görselleştirmiştir. Bununla beraber RPM ve supap kapanma hızının çevrim sayısına göre maksimum yüzey pürüzlülüğüne çok daha fazla etkisi olduğunu belirtmiştir [11]. Hong vd. (2012) farklı yakıtların egzoz supap bagalarındaki aşınmaya etkisini incelemiştir. LPG kullanılan ticari araçlarda бага maksimum yüzey pürüzlülüğünün ( $D_{max}$ ), benzin kullanılan yakıtta göre daha yüksek olduğunu belirtmiştir [12]. Cavalieri vd. (2014) supabın kapandığı anda supap ve bagada oluşan gerilimi üç boyutlu sonlu elemanlar analiziyle araştırmıştır. Sonuçları karşılaştırmak için supap gövdesine gerinim ölçer (strain gage) bulunan bir düzenek kullanmıştır. Supap ve бага arasındaki hizalamanın önemini vurgulamıştır. Sayısal analiz ve deney sonuçlarının örtüşmesiyle, sunduğu modelin yeni supap бага tasarımlarında yorulma kriterlerinde kullanılabileceğini belirtmiştir [13].

Bu çalışmada TLM16V185 dizel motorunda kullanılan egzoz supap bagalarında gözlemlenen hasar ele alınmıştır. Hasarlı numunelerden kesitler alınarak incelenmiş, hasar mekanizmaları araştırılmıştır. Hasar ile ilgili çözüm önerileri sunulmuştur.

## 2. Egzoz Supap Bagaları Üzerinde Oluşan Hasarlar

Lokomotiflerde kullanılan TLM16V185 dizel motorlar, çalışma koşulları gereği yüksek güç ve tork üreten, yüksek hacimli motorlardır. Bu çalışmada ele alınan DE24000 dizel elektrikli lokomotif; 1971 yılından günümüze değin üretimi süren, 2400 beygir güç üreten, 650-1500 devir/dakika aralığında çalışan, 16 silindirli dizel motora sahiptir [14].

Egzoz supap bagaları, silindir başlığındaki yuvasının geometrisine göre işlenir. Montaj ve söküm kolaylığı sağlaması amacıyla, iç çap bölgesinde faturalı set (tırnak) içeren modelleri de bulunmaktadır. Şekil 2'de DE24000 model lokomotif TLM16V185 dizel motoruna ait, faturalı set de içeren kullanılmamış bir egzoz supap bagasının genel görünümü verilmiştir.



Şekil 2. Egzoz supap bagası

Genel olarak supap bagalarında oluşan hasarlar incelendiğinde, başlıca hasarlanma nedenlerinin aşağıdaki nedenlerden kaynaklandığı belirlenmiştir [1], [15].

- Malzeme kaynaklı hasarlar,
- Hatalı tasarım,
- Hatalı montaj,
- Düşük yüzey kaliteli talaşlı imalat uygulanması
- Baga teknik resminde toleransların uygun verilmemesi veya teknik resme uygun imalat yapılmaması
- Korozyon

- Aşınma

### 3. Model Dizel Motorlarda Egzoz Supap Bagalarının İncelenmesi

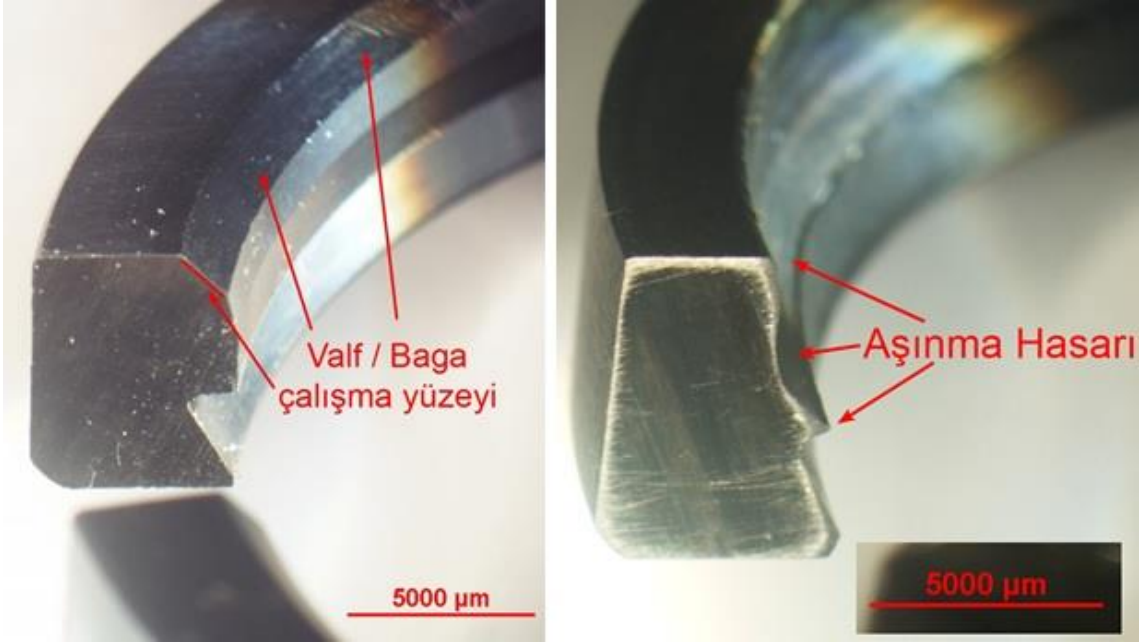
İnceleme amacıyla, 12.000 saat bakım zamanını doldurarak revizyona alınmış bir adet DE 24000 lokomotifte kullanılan 4 zamanlı ağır hizmet TLM16V185 dizel motorundan egzoz supap bagası sökülmüştür. Supap oturma yüzeyi olarak belirtilen kısım, yüksek sıcaklık ve basınçta supap darbelerine maruz kaldığı için, hasar genellikle bu kısımda oluşmaktadır. Bagada malzeme olarak H13 sıcak iş takım çeliği olarak da isimlendirilen, X40CrMoV5-1 alaşımı kullanılmaktadır. H 13 sıcak iş takım çeliği; yüksek ve düşük çalışma sıcaklıklarında iyi aşınma dayanımına sahip, termal yorulma dayanımı, yüksek sıcaklık mukavemeti ve tokluk değeri yüksek bir alaşımdır. Ayrıca bu çeliğin üniform sertleşebilme kabiliyeti de oldukça iyidir [16]. Buna rağmen, lokomotifin zorlu çalışma koşullarında, бага temas yüzeylerinde hasar oluşumunun meydana geldiği gözlenmiştir.

#### 3.1. Görsel inceleme

Sökülen bagalar ilk olarak görsel değerlendirmeden geçirilmiştir. Bu incelemede, bagaların supap ile karşılıklı çalışan temas yüzeylerinde büyük ölçüde malzeme kaybı (missing material) gerçekleştiği gözlenmiştir. Ayrıca tüm бага yüzeylerinin, çalışma koşullarına bağlı olarak yoğun bir kurum tabakası ile kaplı olduğu görülmüştür. Yanma ürünlerinden oluşan bu katmanın, malzeme kaybı ve aşınma hızını yavaşlattığı bilinmektedir [17]. Şekil 3’de merkez kısımda daha parlak yüzey halinde görülen malzeme kaybı hasarlı bagaların genel görünümü, Şekil 4(a)’da kullanılmamış ve Şekil 4(b)’de hasarlı bagaların radyal kesit görünümü verilmiştir.



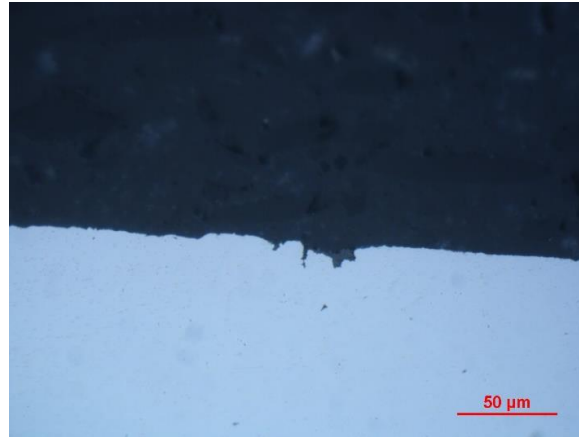
Şekil 3. Hasarlı baganın genel görünümü



Şekil 4. a) Kullanılmamış бага radyal kesiti\_6x, b) kullanılmış бага radyal kesiti\_6x

### 3.2. Metalografik inceleme

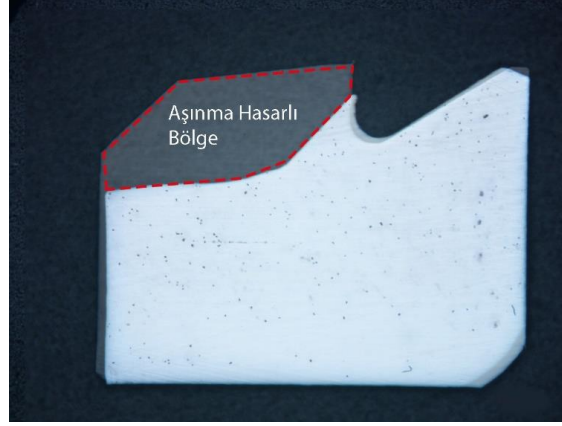
Hasarlı ve kullanılmamış örnek bagalar üzerinden radyal kesit alınıp metalografik olarak hazırlanmış ve optik mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan incelemede, her iki baganın da mikroyapısının homojen, ASTM Nr. G10 boyutunda ince taneli yapıda olduğu gözlenmiştir. Hasarlı bagada aşınma sonucu oluşan yüzeylerde kılcal çatlak bulunmadığı, ancak çukurcuklanma (pitting), oksidasyon hasarı ve plastik deformasyon kusurlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Hasarlı baganın aşınma yüzeyini de içeren radyal kesit Şekil 5'te görülmektedir.



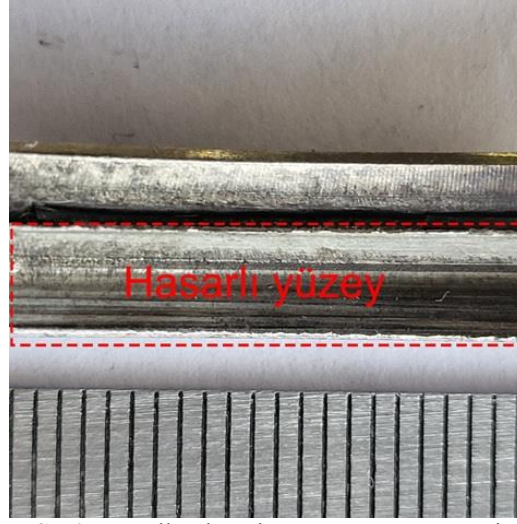
Şekil 5. Kullanılmış бага aşınma yüzeyi\_500x

Kullanılmamış ve malzeme kaybı hasarı bulunan iki baganın radyal kesitlerinin karşılaştırılması vb. teknikler kullanılarak yapılan ölçümler neticesinde, hasarın etkin olduğu malzeme kaybının supap eksenine paralel doğrultuda 3,5 mm (milimetre) derinliğe kadar ulaştığı ve yaklaşık aşınma hacminin de 400 mm<sup>3</sup> civarında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca supap ile бага arasındaki supap eksenini ile 45 derece açılı temas alanının бага geometrisinin değişmesi sonucunda yaklaşık %40 küçülerek 275 mm<sup>2</sup> den 168 mm<sup>2</sup> değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Supap ile бага arasındaki yüzey alanı küçüldükçe, bu yüzeyin maruz kaldığı basınç da artmaktadır. Ayrıca bozulan бага geometrisi, sızdırmazlık özelliğini kaybederek silindir içerisinde basınç kayıplarına neden

olmaktadır. Şekil 6’da kullanılmış bagadaki aşınma hasarlı bölge, şekil 7’de ise ezilme, çizilme türü hasarlar içeren aşınma yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 6. Kullanım sonucundaki bagada meydana gelen malzeme kaybı\_15x



Şekil 7. Kullanılmış baganın aşınma yüzeyi

### 3.3. Mikrosertlik ölçümü

Hazırlanmış olan radyal kesit üzerinden, mikrosertlik ölçüm cihazı ile HV300 tekniği ile (300 gr. yük, elmas piramit uç) ölçümler yapılarak bölgesel olarak бага sertliğinin yapısı incelenmiştir. Yapılan bu inceleme neticesinde, mikroyapı analizi ile elde edilen sonuçlar ile uyumlu bir şekilde malzeme kaybının yaşandığı aşınma bölgesi de dahil olmak üzere бага genelinde sertliğin homojen dağılım gösterdiği, çalışma koşullarına veya aşınmaya bağlı olarak sertlikte değişim / dönüşüm meydana gelmediği belirlenmiştir. Kullanılmamış ve kullanılmış bagalara ait sertlik ölçüm sonuçları Rockwell C birimine dönüştürülerek Tablo 1’de verilmiştir.

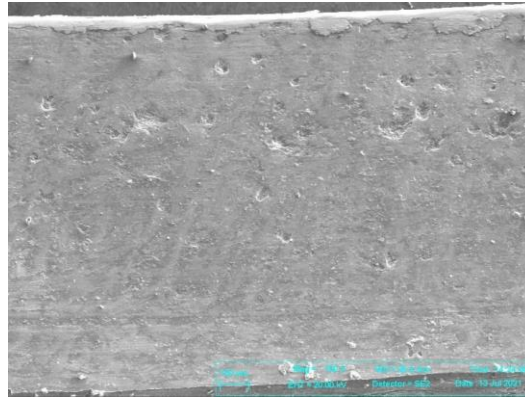
**Tablo 1.** Kullanılmış ve kullanılmamış bagalara ait sertlik değerleri

	Minimum Sertlik, HRC	Maksimum Sertlik, HRC	Ortalama Sertlik, HRC	Standart Sapma
Kullanılmamış Baga	46,5	49	48,2	1,44
Kullanılmış Baga	49,2	49,6	49,3	0,30

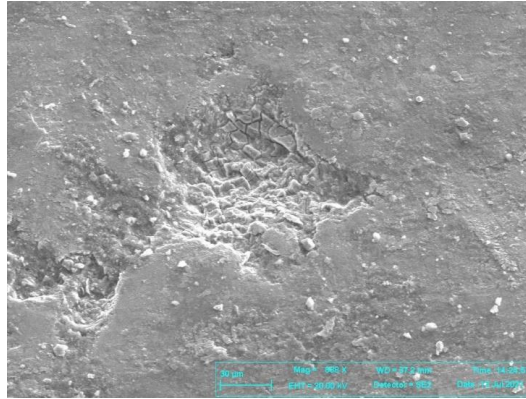


### 3.4. Hasarlı yüzey taramalı elektron mikroskop incelemesi

Son olarak aşınma yüzeyleri direkt olarak stereo mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda; malzeme kaybının yaşandığı aşınma yüzeylerinde ezilme şeklinde plastik deformasyon, ısı ve ortam gazlarının ve sürtünme etkisiyle meydana gelmiş oksidasyon, ortam gazları kaynaklı kurumlanma şeklinde karbon birikimi, kesme ve basma yüklerinin kombinasyonu ile oluşmuş бага kenarlarında çapaklanma, korozif ortam ve basma yük kaynaklı çukurcuklanma (pitting), бага ve supap temas yüzeylerinin göreceli hareketiyle çeşitli derinliklerde meydana gelmiş çizilme türü hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir. Hasarlı yüzeylere ait görüntüler Şekil 8 ve 9'da görülmektedir. Literatür de incelendiğinde; bagalarda tespit edilen hasar mekanizmalarının mevcut bulgularla uyumlu olduğu gözlenmiştir [5, 9, 10, 18].



Şekil 8. Çukurcuk ve бага metali sıvanması (üst kenar) hasarları içeren бага aşınma yüzeyleri\_150x



Şekil 9. Çukurcuk ve oksidasyon hasarlı бага aşınma yüzeyi\_900x

## 4. Sonuç

Bu çalışmada, içten yanmalı dizel motorda kullanılan egzoz supap bagaları ve hasarlanma mekanizmaları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, revizyon ömrünü tamamlamış örnek bir DE 24000 lokomotif dizel motorunda kullanılan egzoz supap bagaları sökülerek üzerlerindeki hasarları değerlendirilmiştir.

Yapılan değerlendirme neticesinde, бага çalışma yüzeylerinde büyük miktarda malzeme kaybı hasarı bulunduğu, ancak malzeme mikro yapısının büyük ölçüde değişim/dönüşüm geçirmediği tespit edilmiştir. Parçanın çalışma koşulları ve mevcut yüzeyler bir arada ele alındığında; bagaların, ısı ve yanma gazları etkisiyle oksidasyon, darbeli aşınma (impact wear), abrasiv aşınma

(abrasive wear) ve kaynaşmalı aşınma (adhesive wear) mekanizmalarının bir arada etkin olmasıyla hasarlandığı sonucuna varılmıştır.

Bu bilgiler ışığında, mevcut çalışma koşullarında бага imalinde kullanılan malzemenin uygun olduğu, ancak malzeme kaybı hasarının önüne geçilmesi veya hasarın şiddetinin azaltılması için бага geometrisinin değiştirilmesi ve malzeme sertlik değerinin uygun ısı ile artırılması önerilmiştir.

Baga aşınma hasarının önüne geçilmesi veya minimize edilmesi yoluyla, motor verimi arttırılacak, buna bağlı olarak egzoz emisyonu ve yakıt sarfiyatı azaltılarak çevreye olumsuz etkisinin indirgenmesi ve daha ekonomik çalışma koşulları sağlanacaktır.

### Teşekkür

Bu çalışmada desteklerinden ötürü TÜRASAS Ar-Ge Dairesi Başkanlığı'na, Ar-Ge Dairesi Başkanı İbrahim Erşahin'e, Eskişehir Çeken Araçlar Müdürü Tuba N. Eroğlu'na, Alaattin Barıtcı'ya teşekkürlerimizi bildiririz.

### Kaynakça

- [1] "Article Zings - Blog: Reasons for Valve Seat Failure in Engines". [Online]. Available: [https://article-zings.page4.me/\\_blog/2019/06/11/12-Reasons-for-Valve-Seat-Failure-in-Engines/](https://article-zings.page4.me/_blog/2019/06/11/12-Reasons-for-Valve-Seat-Failure-in-Engines/). [Accessed Dec. 27, 2021].
- [2] Wikipedia, "Valve seat - Wikipedia". [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Valve\\_seat](https://en.wikipedia.org/wiki/Valve_seat) [Accessed Dec. 27, 2021].
- [3] F. Küçükşahin, *Dizel motorları & gemi dizel makinelerinin yapıları ve çalışma ilkeleri*. Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000.
- [4] W.S. Giles, "Fundamentals of valve design and material selection," *SAE Technical Paper* 660471, Feb. 1966. <https://doi.org/10.4271/660471>.
- [5] Y. S. Wang, S. Narasimhan, J. M. Larson, J. E. Larson, and G. C. Barber, "The effect of operating conditions on heavy duty engine valve seat wear," *Wear*, vol. 201, no. 1–2, pp. 15–25, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0043-1648(96)06945-1.
- [6] R. Zhao, G. C. Barber, Y. S. Wang, and J. E. Larson, "Wear mechanism analysis of engine exhaust valve seats with a laboratory simulator," *Tribol. Trans.*, vol. 40, no. 2, pp. 209–218, Jan. 1997, doi: 10.1080/10402009708983647.
- [7] L. C. Yang, A. Hamada, and K. Ohtsubo, "Engine Valve Temperature Simulation System," *SAE Tech. Pap.*, Mar. 2000, doi: 10.4271/2000-01-0564.
- [8] R. Lewis and R. S. Dwyer-Joyce, "An experimental approach to solving combustion engine valve and seat wear problems," *Tribol. Ser.*, vol. 39, pp. 629–640, 2001, doi: 10.1016/S0167-8922(01)80145-0.
- [9] K. Ando, A. Manabe, and A. Yasuda, "Hardfaced valve and P/M valve seat system for CNG and LPG fuel engines," *SAE Tech. Pap.*, 2005, doi: 10.4271/2005-01-0718.
- [10] M. H. Shojaefard, A. R. Noorpoor, D. A. Bozchaloe, and M. Ghaffarpour, "Transient Thermal Analysis of Engine Exhaust Valve," *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 48, no. 7, pp. 627–644, Feb. 2007, doi: 10.1080/10407780590959943.
- [11] K. J. Chun, J. H. Kim, and J. S. Hong, "A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers," *Wear*, vol. 263, no. 7–12, pp. 1147–1157, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.WEAR.2007.02.006.
- [12] J. S. Hong, Y. S. Kim, and K. J. Chun, "Study on exhaust valve and seat insert wear depending on fuel type," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 2, pp. 253–260, Feb. 2012, doi: 10.1007/S12541-012-0031-5.
- [13] F. J. Cavalieri, C. Luengo, J. Risso, F. Zenklusen, and A. Cardona, "Numerical and experimental stress analysis of an internal-combustion engine valve during the closing event," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 228, no. 5, pp. 479–489, Ap. 2014, doi: 10.1177/0954407013498862.
- [14] Wikipedia, "TCDD DE24000 - Wikipedia". [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/TCDD\\_DE24000](https://en.wikipedia.org/wiki/TCDD_DE24000) [Accessed: Dec. 31, 2021].
- [15] Y. S. Wang, S. K. Schaefer, C. Bennett and G. C. Barber, "Wear Mechanisms of Valve Seat and Insert

- in Heavy Duty Diesel Engine,” *SAE Technical Paper Series* 952476, pp. 686–691, Oct. 1995, <https://doi.org/10.4271/952476>.
- [16] Otai steel, "H13 Tool Steel | 1.2344 | X40CrMoV5-1 | SKD61 Hot Work Steel". [Online]. Available: <http://www.astmsteel.com/product/h13-tool-steel-x40crmov5-1-skd61-hot-work-steel/>[Accessed: 13-12-2021]
- [17] J. Zhao, S. Zhang, Z. Dou, Y. Sun, J. Wan and L. Du, "Influence of Sulfur and Additives on Wear of Exhaust Valve Seat of Cylinder Head", *Complexity*, vol. 2021, 14 p., July 2021, <https://doi.org/10.1155/2021/4762184>.
- [18] C. Ji, Q. Guo, J. Li, Y. Guo, Z. Yang, W. Yang, D. Xu, and B. Yang, "Microstructure and properties of CrN coating via multi-arc ion plating on the valve seat material surface," *J. Alloys Compd.*, vol. 891, p. 161966, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2021.161966.

### Özgeçmiş



#### Yalçın ÖZDEMİR

1986 tarihinde Eskişehirde doğmuştur. Lisans ve yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde tamamlamıştır. Doktora eğitimini Jan Perner Ulaştırma fakültesinde tamamlamıştır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesinde Makine Mühendisliğinde çalışmaktadır.

E-Posta: yalcinozdemir@eskisehir.edu.tr



#### Fehmi DİLTEMİZ

1973 yılında Malatya’da doğmuştur. 1994 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 1999-2020 yılları arasında Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığında Malzeme Laboratuvarında çalışmış, 2011 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümünde Termal Bariyer Kaplamalar konusunda doktora çalışmasını tamamlamıştır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Görevlisi olarak çalışmalarını yürütmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

E-Posta: fdiltemiz@ogu.edu.tr



#### Gökhan KANDEMİR

1989 Eskişehir’de doğmuştur. Lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2019 yılında TÜLOMSAŞ Ürün Ar-Ge Dairesi’nde makine mühendisi olarak göreve başlamıştır. TÜRASAŞ Ar-Ge Dairesi’nde makine mühendisi olarak görevine devam etmektedir.

E-Posta: kand.gokhan@gmail.com

### Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Tüm yazarların eşit oranda katkısı olmuştur.



## Varlık Yönetiminde Ray ve Tekerlek Etkileşimi Öncül Değerlendirmesi

Pelin BOYACIOĞLU 

*Imperial College London, Civil and Environmental Engineering Department, SW7 2AZ,  
London, United Kingdom*

*p.boyacioglu@imperial.ac.uk*

*(Alınış/Received: 17.11.2021, Kabul/Accepted: 25.01.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2022)*

**Öz:** Demiryollarında varlık yönetimi daha güvenilir ve az maliyetli hizmet sunulabilmek amacıyla alt sistemlerde yer alan tüm bileşen ve malzemelerin ömür maliyetlerini incelemektedir. Böylelikle, varlıkların tasarım ve yapım süreçlerinden başlayarak işletme, bakım ve tasfiye aşamaları en etkili şekilde planlanması ve sürdürülmesiyle ilgilenmektedir.

Varlık yönetimi altında ray ve tekerlek etkileşimi detaylı simülasyon ve modelleme yöntemleri kullanılarak uygun profil ve malzeme seçimi ve bakım sürelerinin incelenmesi ile ömür maliyetlerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu tür çalışmalar ilave zaman ve maliyet gerektireceği için öncelikle ray-tekerlek arayüzünde meydana gelen temas noktası parametrelerinin incelenip hasar ve aşınma durumlarına olan yakınlıklarının öncül değerlendirilmede ele alınmalıdır.

Bu çalışmada Avrupa'daki bir Altyapı Yöneticisi'ne ait ray ve tekerlek profillerinin tasarım (yeni) ve işletme altındaki (aşınmış) durumları incelenip ray-tekerlek temas analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk adımda işletme altında aşınmış profillerde yaşanan değişimler gösterilirken sonraki adımlarda temas analizi parametreleri yeni durumdaki değerlerle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan öncül temas analizleri sırasıyla yuvarlanma yarıçapı farklılıkları, eşdeğer koniklik, temas noktası ve ilgili parametreleri kapsamıştır. Hem profil analizi hem de yuvarlanma yarıçapı farklılıkları, ray-tekerlek etkileşiminde ani buden temasının gerçekleşebileceğini ve bu durumun aşınma ve hasara yakınlığı arttırabileceğini göstermiştir. Yeni profil durumunun işletmede seçilen 130 ve 653 m yarıçaplı kurplardaki durumlara oranla daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun yeni profillerde aşınma ve hasar oluşumlarını hızlandırabileceği fakat, işletme altında profillerde yaşanan değişimlerle daha konformal temas oluşabileceği ve böylelikle varlıkların ömürlerinin artabileceği söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** Varlık Yönetimi, Ray-Tekerlek Teması, Raylı Araçları Dinamiği, Ray-Tekerlek Aşınma ve Hasarları.

### Preliminary Analysis of Wheel-Rail Interaction in the Asset Management

**Abstract:** Asset management in railways examines the lifecycle costs of components and materials in all the subsystems in order to provide reliable and cost-efficient services. Therefore, it is interested in effective planning and management of the assets starting from the design and construction stages to the operation, maintenance and disposal stages.

Examination of rail and wheel interaction under asset management is conducted using detailed simulations and modelling to select a suitable profile and material and analyse maintenance intervals aiming to reduce its lifecycle costs. However, this type of investigations may require additional time and costs. Therefore, preliminary analysis should be carried out to analyse the parameters generated at the wheel-rail interface and their susceptibility to wear and cracking.

In this study, the rail and wheel profiles under the design (new) and operation (worn) conditions were examined and wheel-rail contact analysis was conducted which are used by an Infrastructure Manager in Europe. In the first step, the changes in the worn profiles during the operations were presented and the contact parameters were compared with the new condition in the subsequent steps. The preliminary contact

Atıf için/Cite as: P. Boyacıoğlu, "Varlık yönetiminde ray ve tekerlek etkileşimi öncül değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 84-96, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1024862

analysis covered the rolling radius difference, equivalent conicity, contact position and related parameters. Both the analysis of profiles and rolling radius differences showed the sudden flange contact generation and the wear and cracking susceptibility at the wheel-rail interaction. In comparison to operation which are shown by the use of profiles under 130 m and 653 m radii curves, the new profiles seemed to be more vulnerable. This may fasten the generation of wear and cracking in the early stages, but, the changes in the worn profiles during the operation may produce more conformal contacts which may in turn potentially help to increase the assets life.

**Keywords:** Asset Management, Rail-Wheel Contact, Rolling Vehicle Dynamics, Rail-Wheel Wear and Cracking.

## 1. Giriş

Demiryollarında varlık yönetimi daha güvenilir ve az maliyetli hizmet sunulabilmek amacıyla alt sistemlerdeki; hat işleri, istasyon, sinyalizasyon, telekomünikasyon ve tren dizileri vs.'de yer alan tüm bileşen ve malzemelerin ömür maliyetlerini incelemektedir. Böylelikle, varlıkların fiziksel olarak değerlendirilmesinin yanında tasarım ve yapım süreçlerinden başlayarak işletme, bakım ve tasfiye aşamalarının da en etkili şekilde planlanması ve sürdürülmesiyle ilgilenmektedir.

Ray ve tekerlek etkileşiminin varlık yönetimi altında incelenmesi; uygun profil ve malzeme seçimi, bakım sürelerinin optimizasyonu gibi çeşitli detaylı analizlerle ömür maliyetlerinin azaltılmasını amaçlamaktadır. Ray-tekerlek arayüzünde meydana gelen temas yüzeyi, tren hareketinde önemli bir yere sahip olup, ağır yüklere maruz kalmaktadır. Ağır yükler ve geçiş sayılarının artmasıyla beraber ray ve tekerlek malzemelerinde yorulmalar, daha sonrasında aşınma ve çeşitli hasarlar görülmektedir. Bu sebeple tasarımdan itibaren ray-tekerlek etkileşimi optimum şekilde planlanmalı, işletme ve bakım aşamalarında karşılaşılabilecek durumlar önceden tahmin edilip yönetilmelidir. Etkin planlama, tahmin ve yönetim, güvenliğin artırılmasına, yaşanabilecek aksaklıkların (gecikmeler vb.) ve gider maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olacaktır. Fakat, bu çalışmaların detaylı simülasyon ve analizlerle yapılabileceği ve ilave zaman ve maliyet gerektireceği de unutulmamalıdır. Bu sebeple, öncül değerlendirme yöntemleri olan profil ve temas noktası analizleri yapılmalı ve hasar ve aşınma durumlarına olan yatkınlık gösterildikten sonra detaylı çalışma gereksinimine karar verilmelidir.

Literatürde detaylı tren araç dinamiği simülasyonları kullanılarak ray-tekerlek etkileşimi ve hasar ve aşınma tahminleri ile ilgili yapılan çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Örneğin, ray ve tekerlek üst ve alt yüzeylerindeki hasar oluşumlarına etki eden ana faktörler dikkate alınarak farklı modeller üretilmiştir [1]. Bir diğer çalışmada ise hasar büyümesi tahmin modelleri kullanılarak gerçek ray ve tekerlekte yaşanan durumlar karşılaştırılmıştır [2]. Aşınmalarla ilgili olarak da çeşitli modeller yer almakta olup en önemlilerinden birisi olan Archard modeli kullanılarak aşınmalara bağlı tekerlek profilindeki gerçekleşebilecek değişimler tahmin edilmiş ve saha ölçümleriyle karşılaştırılmıştır [3]. Ray aşınmaları ve özellikle de ekartman köşesinde sıklıkla meydana gelen durumlarla ilgili olarak da optimum ray profili oluşturulmaya çalışılmaktadır [4].

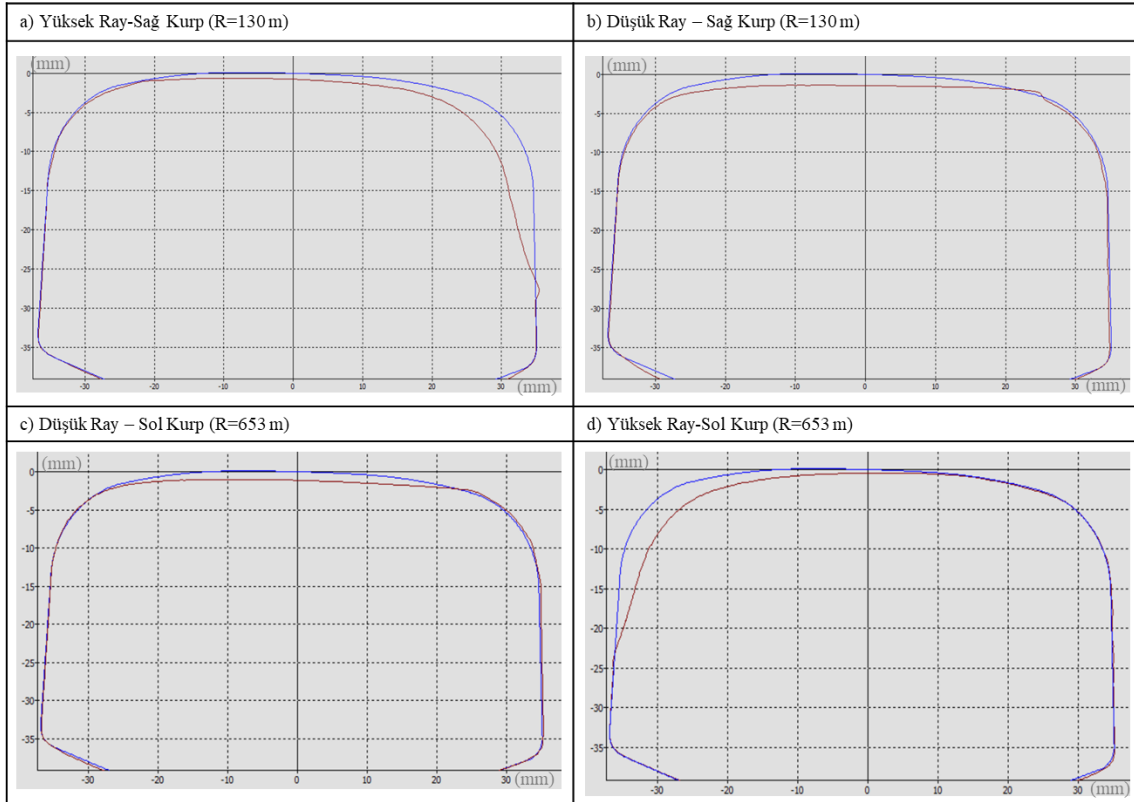
Bu çalışmada Avrupa'daki bir Altyapı Yöneticisi'ne ait ray ve tekerlek profilleri tasarım (yeni) ve işletme altındaki (aşınmış) durumları incelendikten sonra ray ve tekerlek temas noktası analizleri gösterilmiştir. Öncül değerlendirmede sırasıyla yuvarlanma yarıçapı farklılıkları, eşdeğer koniklik, temas noktası ve ilgili parametreler hesaplanmıştır. Yeni ve aşınmış durumdaki bulunan sonuçların hasar ve aşınmaya olan etkisi değerlendirilmiştir.

## 2. Tasarım ve İşletme durumlarındaki Ray ve Tekerlek Profilleri Analizi

Avrupa Altyapı Yöneticisi, CEN 54E1 çelik malzemesi ve 1:40 eğikliğinde ray profili ile mevcuttaki elektrikli tren setlerine uygun olarak tasarlanmış tekerlek profili kullanılmaktadır.

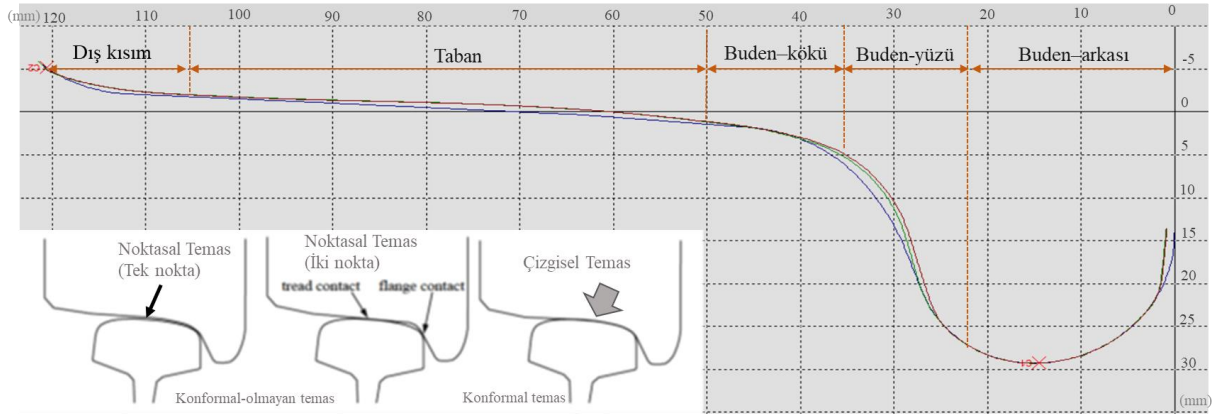
Ray döşenmesi ve tekerlek tornalaması zamanlamalarındaki farklılıklar ve aşınma oranlarında görülen değişiklikler sebebiyle gerçek durumda çok farklı ray ve tekerlek profilleri mevcuttur. Örneğin, eş zamanlarda döşenmiş aliyman ve kurp bölgelerinde yer alan iki ray, farklı aşınmalara ve profil şekillerine sahip olabilirler. İlgili çalışmalar kurp bölgelerinde oluşan temas yüzeylerinin daha fazla yüklere maruz kalmasıyla, özellikle de yatay doğrultudaki kuvvetlerde artış sebebiyle aşınma oranlarının aliyman hatlara göre daha fazla olduğunu göstermiştir [5-7]. Gerçekte yaşanan bu farklılıkları gözlemlenmek amacıyla analizde farklı seviyelerde aşınmış ray ve tekerlek profilleri seçilmiştir.

Şekil 1’de yeni CEN 54E1 profili ile saha ölçümlerinden alınan aşınmış ray profilleri yer almaktadır. Demiryollarında kurplu hatlarda dever tek raya uygulanmaktadır, kotun daha fazla olduğu tarafa yüksek/dış ray olarak tanımlanırken, kotun aynı kaldığı tarafa düşük/iç ray denilmektedir. Sağ kurpta yüksek/dış ray Şekil 1.a’da yer alırken, düşük/iç ray Şekil 1.b’de yer almaktadır, sol kurpta ise bu durumun tam tersi geçerli olup düşük ray Şekil 1.c’de verilirken yüksek ray Şekil 1.d’de görülmektedir. Kurp bölgelerinde tren dinamik performansında sapma açısındaki artış sebebiyle tekerlekler çoğunlukla yüksek rayın (Şekil 1.a ve Şekil 1.d) ekartman köşesine temas ettikleri için bu alanda daha fazla aşınmalara neden olmaktadır. Şekil 1.b ve Şekil 1.c’de verilen düşük raylarda taç bölgesinde oluşan temas yüzeyleri bu alandaki aşınmaları meydana getirmişlerdir. Çalışmada ray döşeme tarihleri verilmemesine karşın, yukarıda da belirtildiği üzere aşınma oranı ve kurp yarıçapı arasındaki ters orantı bu durumda da gözükmemekte olup, 130 m yarıçaplı kurptaki (Şekil 1.a) yüksek ray, 653 m yarıçaplı kurptaki (Şekil 1.d) ray ile karşılaştırıldığında yanal aşınmaların özellikle daha geniş alana yayıldığı ve miktarının daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 1. 130 ve 653 m yarıçaplı kurplarda ray aşınma durumları (mavi: yeni ve kırmızı: aşınmış /saha ölçüm profilleri)

Şekil 2’de yeni tekerlek profili ile tornalama öncesi yapılan ölçüm profilleri verilmektedir. Yeni profil (mavi) ile oluşan değişimlere bakıldığında (kırmızı ve yeşil) profillerdeki aşınmaların çoğunlukla tekerleklerin buden yüzü ve taban kısımlarında olduğu görülmektedir. Bu durum ilave verilen çizimlerden de görüleceği üzere tekerlek ve ray temasının daha çok karp bölgelerinde iki noktada gerçekleştiği olasılığını göstermektedir. İkili (konformal olmayan) temasta, yüzey alanlarının daha küçük olmasıyla hem gerilmeler, hem de aşınma oranları daha fazla olabilmektedir. Buden kökünde oluşan konformal temas durumunda ise yüzey alanının daha geniş olması hem gerilmelerin hem de aşınma oranlarının azalmasına neden olmaktadır. Buden arkasında ve dış kısımda oluşan aşınmalar makas bölgelerinde kontray ve tavşanayağında temasların oluştuğunu işaret etmektedir.



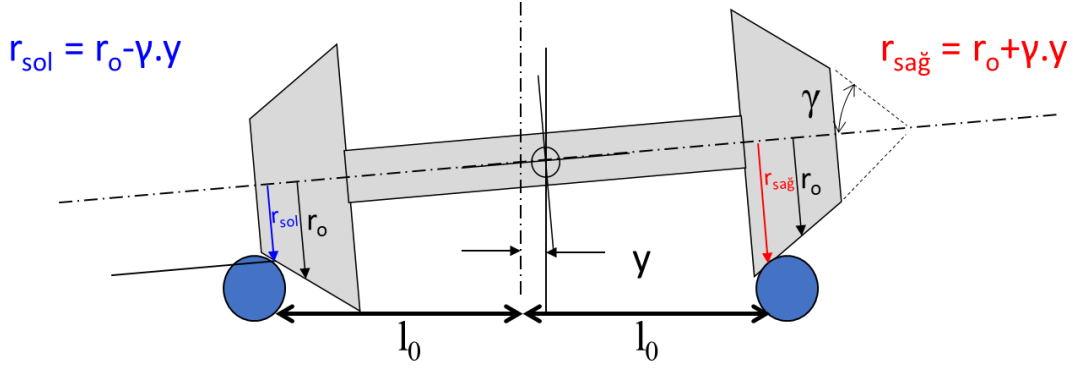
Şekil 2. Tasarım-yeni (mavi) ve aşınmış (kırmızı ve yeşil) tekerlek profillerindeki değişim

### 3. Metot - Öncül Değerlendirmede Ray-Tekerlek Temas Analizleri

Tasarım ve işletmedeki ray-tekerlek temas koşullarındaki değişimleri ve bunların aşınmaya yaptığı etkileri gösterebilmek amacıyla EN 15302:2008 [8] standartında verilen eşdeğer koniklik ve Hertzian teorisi [9] temas formülleri yardımıyla öncül analizler gerçekleştirilmiştir.

Ray ve tekerlek profilleri ile ray açıklığı, ray eğimi, aks yükü, tekerlek çapı, iç açıklık bilgileri kullanılarak farklı yatay yer değiştirme durumlarında temas analizleri yapılmıştır. Yuvarlanma yarıçapı farklılıkları, eşdeğer koniklik, temas noktaları, yüzey alanları ve diğer ilgili parametreler hesaplanmıştır. Ray-tekerlek temas uygunluğunun anlaşılmasına yardımcı olacak bu hesaplamalar aşınma ve hasar koşullarına yakınlık ile ilgili de işaretler verebilmektedir.

Tren araç dinamiğinde en önemli etkenlerden birisi de içteki tekerlek ve dıştaki tekerleğin farklı mesafelerde yol kat edebilmesi için tasarlanan yuvarlanma yarıçapı farklılığıdır. Ray (daireesel) ve tekerlek (konik) profilleri şekillerine bağlı olarak temas noktaları üzerinde farklı yuvarlanma yarıçapları oluşmaktadır. Şekil 3’de görüleceği üzere,  $y$  yatay yerdeğiştirmesi altında sol ( $r_{sol}$ ) ve sağ ( $r_{sağ}$ ) yuvarlanma yarıçapları meydana gelmektedir. Burada  $r_0$  nominal tekerlek yarıçapı iken,  $l_0$  ray temas noktaları arasındaki uzaklığın yarısı ve  $\gamma$  koniklidir. Sol ve sağ yuvarlanma yarıçaplarındaki  $\gamma$  eğimin küçük olması sebebiyle birimi ihmal edilebilirken  $\Delta r$  yuvarlanma yarıçapı farklılığı sol ve sağ yuvarlanma yarıçapları arasındaki farktır. Kurplu hatlarda uygulanan deverin de etkisiyle yuvarlanma yarıçapı farklılığı aliymanlı hatlara göre daha büyüktür.



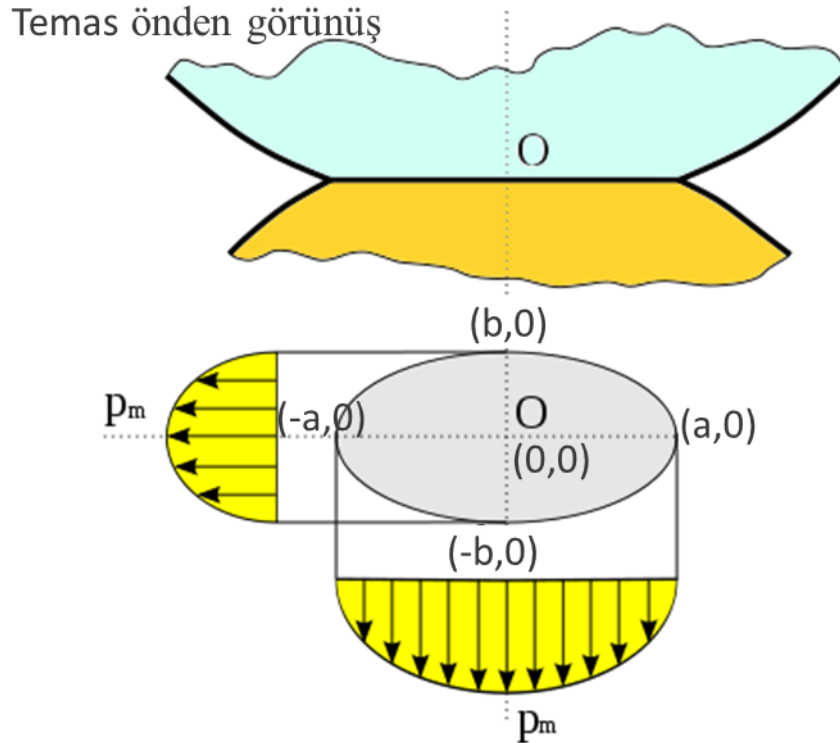
Şekil 3. Sol ve sağ tekerlekteki yuvarlanma yarıçapları

Koniklik aşağıdaki verilen formül yardımıyla bulunur.

$$\gamma = \frac{r_{sol} - r_{sağ}}{2y} = \frac{\Delta r}{2y} \quad (1)$$

Eşdeğer koniklik  $\gamma_e$ , belirli bir yanal yer değiştirme altında belirlenip,  $\Delta r(y)$  doğrusal bir fonksiyon olarak ele alınmaktadır.

Ray ve tekerlek etkileşimindeki yükler ise aralarında oluşan temas yüzeylerine etki etmektedir. Literatür’de yaygın olarak kullanılan Hertzian teorisinde düşey yükler altında ellipsoit biçiminde temas yüzeyinin oluştuğu varsayımıyla ve Şekil 4’de verilen  $a$  boylamsal,  $b$  yanal genişlik ile  $P_m$  maksimum basınç/gerilim değerleri hesaplanabilmektedir. [10].



Şekil 4: Hertzian teorisi’nde ray-tekerlek temas yüzeyi

Hertzian teorisi’ndeki diğer varsayımlar ve ilgili parametrelerin daha detaylı denklemleri çeşitli kaynaklarda verilmektedir [10]. Çalışmada temas boyutları  $(a, b)$  aşağıda verilen denklemler (2-



3) kullanılarak hesaplanmıştır [11]. Formüllerdeki m ve n katsayıları tablolar kullanılarak bulunurken, A ve B sırasıyla boylamsal ve yanal eğrilik, N düşey yük ve E elastisite modülüdür.

$$a = m \sqrt[3]{\left(\frac{3N(1-\theta^2)}{E(A+B)}\right)} \quad (2)$$

$$b = n \sqrt[3]{\left(\frac{3N(1-\theta^2)}{E(A+B)}\right)} \quad (3)$$

Temas alanı (A) ise elips olması sebebiyle 4. Denklem yardımı ile bulunurken ve maksimum basınç  $P_m$  5. Denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A = \pi ab \quad (4)$$

$$P_m = \frac{3N}{2\pi ab} \quad (5)$$

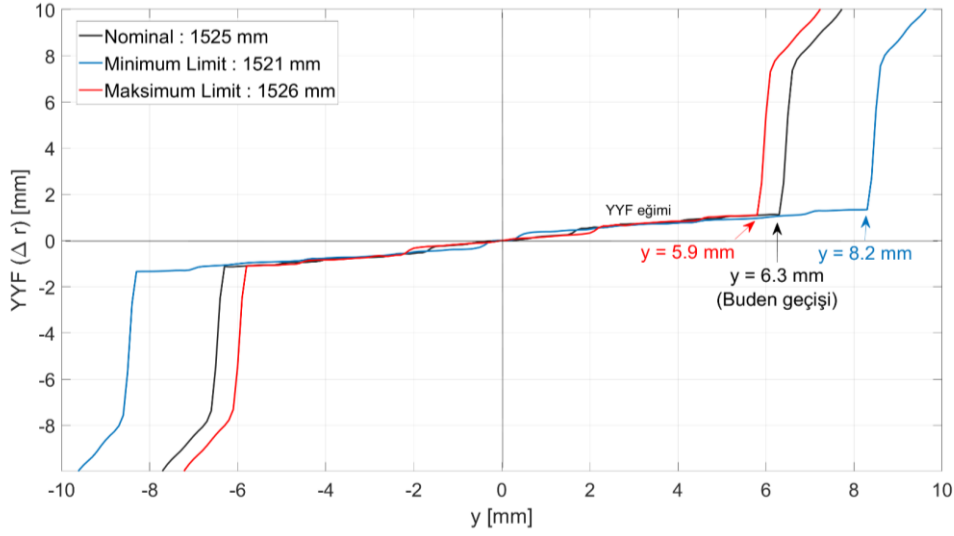
#### 4. Bulgular

Çalışmada, öncül ray-tekerlek temas analizi yuvarlanma yarıçapı farklılıkları, eşdeğer koniklik, temas noktaları ve ilgili diğer parametrelerce hesaplanmış ve sırasıyla verilmiştir.

##### 4.1. Yuvarlanma yarıçapı farklılıkları

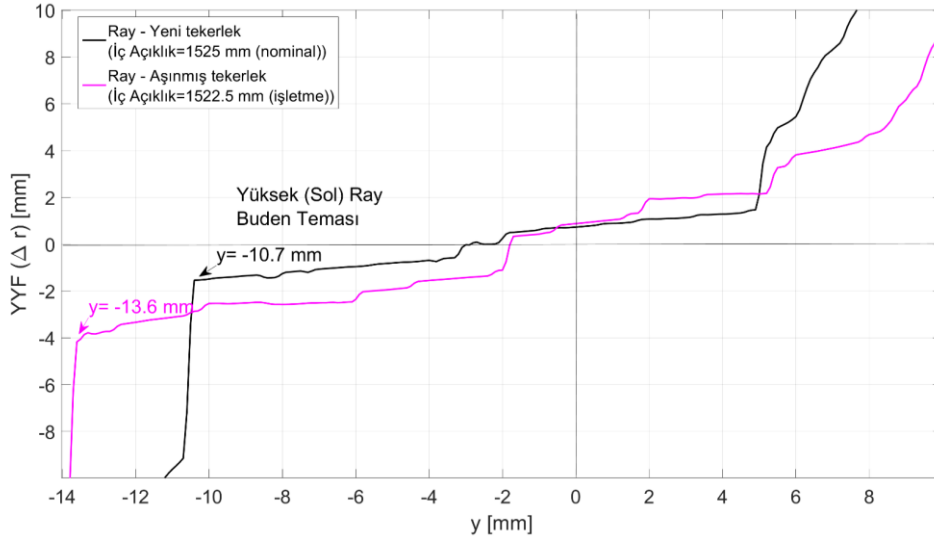
Sağ ve sol tekerleklerin belirli yanal yer değiştirmeler altında oluşan yuvarlanma yarıçapı farklılıkları (YYF), meydana gelen eşdeğer koniklik hakkında ipuçları verebilmektedir. Genel anlamda, YYF doğrusunun eğimindeki artış konikliği de arttırmaktadır. Daha yüksek eğim değeri, önceki bölümde de bahsedilen daha konformal temasın göstergesi iken, daha düşük YYF doğru eğimi konformal olmayan temasa yatkınlığı meydana getirmektedir. YYF'deki ani artışlar da temas noktalarının hangi yanal yer değiştirmeler altında tekerlek tabanı temasından buden temasına geçtiği hakkında bilgi vermektedir.

Şekil 5'de yeni durumdaki CEN 54E1 (1:40) ray ile tekerlek profillerinin -10 mm ile +10 mm arasındaki yanal yer değiştirmeler altında oluşan YYF değerleri verilmektedir. Farklı tekerlek iç açıklıkları etkilerini sunabilmek amacıyla 1525 mm nominal değer ile işletmede izin verilen 1521 mm minimum ve 1526 maksimum limit değerleri altında meydana gelen YYF'ler de gösterilmektedir. YYF doğruları 0 noktasından itibaren incelendiğinde eğimlerin kısmen daha düşük olduğu ve bu sebeple ani artışların meydana geldiği gözükmektedir. Bu durum,  $y = \pm 6.30$  mm'den daha düşük yanal yer değiştirmeler altında tek taban temas koşullarının oluşabileceğini göstermektedir. Bu noktadaki (ani atlama) buden geçişi olarak değerlendirilmekte ve hem taban hem de buden bölgesinde iki noktalı temasın oluştuğunu işaret etmektedir. Daha büyük yanal yer değiştirmelerde geçiş tamamlanır ve buden yüzeyinde tek noktada temas yüzeyi oluşur. Tekerlek iç açıklığı nominal (1525 mm) değerden, minimum (1521 mm) limite düştüğünde, buden yüzeyindeki temas geçişi daha büyük bir yanal yer değiştirmede ( $y = \pm 8.2$  mm) gerçekleşirken, maksimum (1526 mm) limit değerinde daha küçük değerlerde ( $y = \pm 5.9$  mm) meydana gelir. Hem sol hem de sağ tarafta benzer tekerlek ray profilleri kullanıldığında,  $y = 0$  mm'ye göre simetrik YYF doğruları elde edilmektedir. Bu durum,  $y = +6.3$  mm'de sol yönlü kurpta yüksek ray (sağ taraf) üzerinde oluşan buden temasını gösterirken,  $y = -6.3$  mm'de sağ yönlü kurpta yüksek rayda (sol taraf) meydana gelen buden temasını göstermektedir.

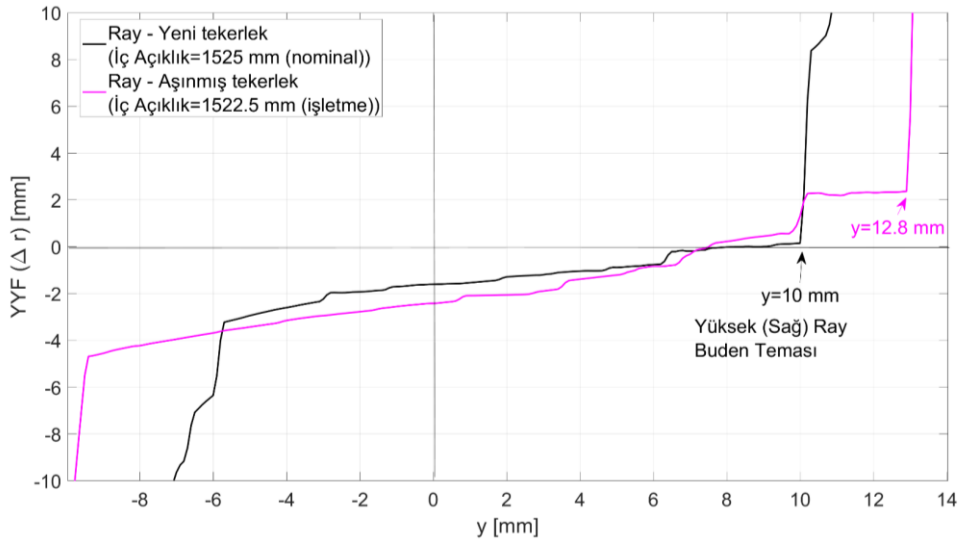


Şekil 5. Yeni durumdaki CEN 54E1 (1:40) ray ile tekerlek profillerinin YYF değerlerinin farklı açıklıklar altında karşılaştırılması

İşletme durumundaki ray-tekerlek etkileşimi değişimlerini gösterebilmek amacıyla Şekil 6 ve Şekil 7 hazırlanmıştır. Sırasıyla 130 m yarıçaplı sağ kurp ve 653 m yarıçaplı sol kurptaki raylardan alınan ölçüm profilleri ile yeni ve işletme altındaki aşınmış tekerlek profilleri arasında oluşan YYF'ler Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmektedir. Depo bakımlarındaki tekerlek iç açıklığı verilerinin incelenmesi sonucunda en yaygın 1522.5 mm olduğu ve yukarıda verilen limit değerlerin içerisinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 6. Yeni ve aşınmış tekerlek profilleri ile 130 m yarıçaplı sağ yönlü kurp bölgesindeki ray profili altında oluşan YYF değerleri



**Şekil 7.** Yeni ve aşınmış tekerlek profilleri ile 653 m yarıçaplı sol yönlü kurp bölgesindeki ray profili altında oluşan YYF değerleri

Raylarda ve tekerleklerde yaşanan aşınmalar ekartman açıklığının artmasına ve temas noktalarının tasarım durumuna göre ötelenmesine sebep olmuştur. Böylelikle, yeni durumda  $y = \pm 6.30$  mm'de meydana gelen buden yüzeyi başlangıç temas noktası aşınmış tekerlek altında sol tarafta yer alan yüksek rayda ( $R=130$  m sağ kurp)  $y = -13,6$  mm noktasına ilerlerken, sağ tarafta yer alan yüksek rayda ( $R=653$  m sol kurp)  $y = +12,8$  mm yanal yer değiştirme noktasında oluşmuştur.

İşletme altında YYF doğrularındaki eğimin yeni tasarım durumuna oranla daha fazla olduğu gözlemlenirken tekerlek tabanından buden yüzeyine hızlı geçişi temsil eden ani artışın işletme durumunda da oluşabileceği söylenebilir. Bu durum, tasarım profillerinde meydana gelebilecek hızlı hasar ve aşınmaların işletme altında yavaşlamasına ve varlıkların ömür sürelerinin artmasına sebep olabilmektedir.

#### 4.2. Eşdeğer koniklik

Tasarım ve işletme altındaki aşınmış ray ve tekerlek profilleri altında oluşan eşdeğer koniklik ilgili EN 15302:2008 [8] standartında verilen formüller kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 1'de karşılaştırılmıştır. Yukarıda YYF grafiklerinden beklenildiği üzere, yeni durumdaki eşdeğer koniklik, aşınmış durumdaki değerlere oranla fazlasıyla düşük kalmaktadır. Aşınmadaki büyümeyle beraber eşdeğer koniklik 653 m yarıçaplı kurpta 0.27 olurken 130 m yarıçaplı kurpta 0.29 seviyesine çıktığı hesaplanmıştır.

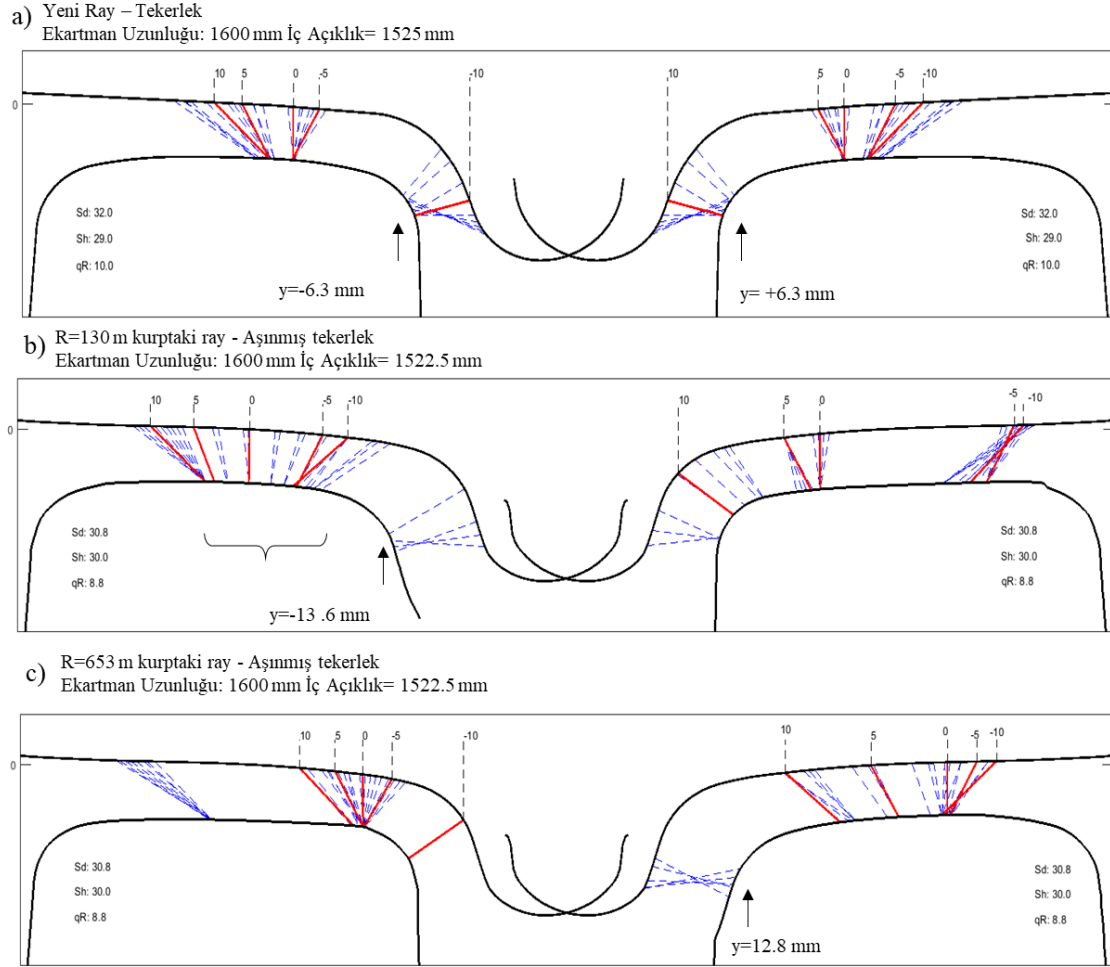
**Tablo 1.** Yeni ve aşınmış ray ve tekerlek profilleri altında oluşan eşdeğer koniklik değerleri

Yeni ray - tekerlek	Aşınmış ray ve tekerlek	
	R=130 m kurptaki ray	R=653 m kurptaki ray
0.12	0.29	0.27

#### 4.3. Temas noktaları

Farklı yanal yer değiştirmeler altında olası temas konumlarını göstermek amacıyla, yeni ve aşınmış ray-tekerlek profilleri kullanılarak Şekil 8'de verilen temas noktası grafikleri hazırlanmıştır.

Yukarıda verilen YYF grafiklerinden beklenildiği üzere, yeni tekerlek profili altında rayların ekartman köşesinde temas noktasının bulunmaması ve daha çok etkileşimin tepe noktası ile yanak bölgelerinde oluşması, konformal olmayan iki noktalı temasa yatkınlığı göstermektedir. Şekil 8.c’de verilen 653 m yarıçaplı kurp bölgesinde aşınmanın daha az olması sebebiyle yüksek (sağ) ray üzerinde de açıkça görülebilir. Fakat, Şekil 8.b’de verilen 130 m yarıçaplı kurp üzerinde ray tepe bölgesinde oluşan temas noktalarının daha geniş bir alana etki ettiği görülmektedir. Tekerlek buden temasının hangi yanal yerdeğiştirmeye de meydana geldiği de Şekil 8’de verilmektedir. Örneğin, 653 m yarıçaplı sol kurpta 12.8 mm yanal yerdeğiştirmede oluşurken, 130 m yarıçaplı sağ kurp üzerinde -13.6 mm’de meydana gelmektedir.



Şekil 8. Yeni ve aşınmış durumunda ray ve tekerlek (olası) temas noktaları  
(Sh: buden yüksekliği, Sd: buden kalınlığı ve qR: buden açısı)

#### 4.4. Temas parametreleri

Temas noktaları parametreleri yukarıda Şekil 4’de verilen Hertzian teorisi ilgili formüller [11] kullanılarak hesaplanmıştır. Temas yüzey alanı (A), boyuna genişlik (a), yanal genişlik (b), eliptikliği (a/b) ve maksimum temas basıncı/gerilimi ( $P_m$ ) değerleri farklı yanal yer değiştirmeler altında Tablo 2’de verilmektedir. Tasarım ve işletme durumundaki profiller altında tekerlek taban ve buden noktalarında oluşabilecek farklılıkları göstermek amacıyla iki farklı yanal yerdeğiştirme değeri ele alınmıştır.

Yeni ray-tekerlek profilleri durumunda,  $y= 6.3$  mm buden başlangıç temas noktası dikkate alınarak,  $y= 2.5$  mm ve  $y= 7.5$  mm'de temas değerleri verilmiştir. Değerler incelendiğinde,  $y= 2.5$  mm'de tekerlek taban ve ray mantarı üzerinde oluşabilecek temas noktasının  $y= 7.5$  mm'de tekerlek budeni-ray yanak bölgesi temasına göre daha küçük yüzey alanına sahip olduğu ve bu sebeple de daha fazla gerilme meydana geldiği gözükmektedir.

Benzer şekilde, işletme altında aşınmış profiller kullanılarak buden temas noktası başlangıç değerleri dikkate alındığında  $y= \pm 5$  mm ve  $y= \pm 15$  mm yanal yerdeğıştimeler altında temas parametreleri hesaplanmıştır. Tasarım'daki yeni profillerden farklı olarak tekerlek budeni ray yanağında daha küçük temas yüzeyi oluşturduğu ve böylelikle daha yüksek gerilmelerin oluştuğu görülmektedir. Örneğin, 653 m yarıçaplı kurpta oluşan yüksek basınç değeri ( $P_m=4576.2$  N/mm<sup>2</sup>) aşınmayı daha da arttıracığı anlaşılmaktadır. Bu durum işletmede aşınmış olan profiller altında tasarım profiline oranla daha konformal olmayan temas noktaları oluşturabileceğini göstermektedir. Fakat ilerleyen zamanla aşınmaların artmasıyla (örneğin, 130 m yarıçaplı kurp) ray-tekerlek etkileşiminin daha uygun duruma geçebileceği ve maksimum basınçta ( $P_m=3220.5$  N/mm<sup>2</sup>) azalmaya sebep olabileceği düşünülebilir. Bu durumun aşınma limit durumlarının (çok) öncesinde gerçekleştiği, limit değerlerine yaklaşıldığı takdirde gerekli bakım çalışmalarının yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

Tablo 2'de verilen değerler tek temas noktası prensibine dayanmaktadır. Daha hassas temas noktaları analizi hesaplayabilmek için detaylı dinamik tren modelleri oluşturulduktan sonra hat üzerinde simülasyonlarının yapılması gereklidir.

**Tablo 2.** Yeni ve aşınmış durumda ray ve tekerlek profilleri altında oluşan temas parametreleri değerleri

Temas Parametreleri	Yeni ray - tekerlek		Aşınmış ray ve tekerlek			
			R=130 m kurptaki ray		R=653 m kurptaki ray	
y (mm)	2.5	-5.0	-15.0	7.5	5.0	15.0
a (mm)	7.18	8.14	8.5	6.61	7.31	9.45
b (mm)	2.42	1.36	1.15	3.42	1.61	0.62
(a/b)	2.97	5.99	7.39	1.93	4.54	15.24
A (mm <sup>2</sup> )	54.59	34.78	30.71	71.02	36.97	18.41
$P_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	3771.2	2848.8	3220.5	2898.6	2292.4	4576.2

## 5. Yorumlar

Demiryollarında varlık yönetimi, tüm alt sistemlerdeki varlıkların ömür maliyetlerinin optimizasyonu ile ilgilenmektedir. Bu sebeple, tasarımdan başlayarak işletme, bakım ve tasfiye aşamalarına kadar uzanan süreçte varlıkların ömürleri efektif olarak planlanmalı ve gerekli bakım çalışmaları sürdürülmelidir.

Varlık yönetimi altında ray-tekerlek etkileşimi detaylı simülasyon ve modelleme yöntemleri kullanılarak uygun profil ve malzeme seçimi ve bakım sürelerinin optimizasyonu yapılmaktadır. Fakat, bu tür çalışmalar ilave zaman ve maliyet gerektireceği için öncelikle öncül analizlerle ray-tekerlek etkileşimindeki hasar ve aşınma durumlarına olan yatkınlığın gösterilmesi daha iyi olacaktır.

Bu çalışmada, öncül ray-tekerlek etkileşimi analizi Avrupa Altyapı Yöneticisi'ne ait tasarım (yeni) ve işletme (aşınmış) altındaki profilleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Raylarda CEN 54E1 (1:40) profili ile elektrikli tren dizilerine ait özel tekerlek profili kullanılmıştır. Bakım ve

yenileme için gerekli olan profillerdeki aşınma ölçümlerinden farklı değerlere sahip ray ve tekerlek profilleri seçilerek temas analizleri hesaplanmıştır.

İlk adımda, işletme altındaki ray ve tekerlek profillerindeki değişimi gözlemlemek amacıyla tasarım (yeni) profil ile karşılaştırılmıştır. Tren dinamik kurp performansı etkisiyle, yüksek raylarda ekartman köşesi ve yanak bölgelerinde daha fazla aşınmanın meydana geldiği düşük raylarda ise ray mantarı üzerinde daha az oranda aşınmanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ray yenileme tarihi bilinmemesine karşın literatür araştırmasından da beklenildiği üzere küçük yarıçaplı kurp bölgelerinde daha fazla aşınma olduğu tespit edilmiştir.

İkinci adımda hesaplanan YYF, tren dinamik hareketi, eşdeğer koniklik ve olası oluşabilecek temas noktaları hakkında işaretler vermektedir. Tasarım durumunda YYF doğrusunun eğimindeki düşüklük ve eşdeğer konikliğin de işletme altındaki duruma oranla daha küçük olduğu hesaplanmıştır. Düşük YYF doğrusu eğimindeki ani sıçrama, buden temas başlangıç noktası olarak değerlendirilmekte olup,  $y = \pm 6.30$  mm yanak yer değiştirmede gerçekleşmiştir. İşletme altındaki durumda YYF doğrusu eğiminin ve eşdeğer konikliğin yükseldikleri ve verilen 130 m yarıçaplı kurp bölgesinden alınan ölçümlerde en yüksek 0.29 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

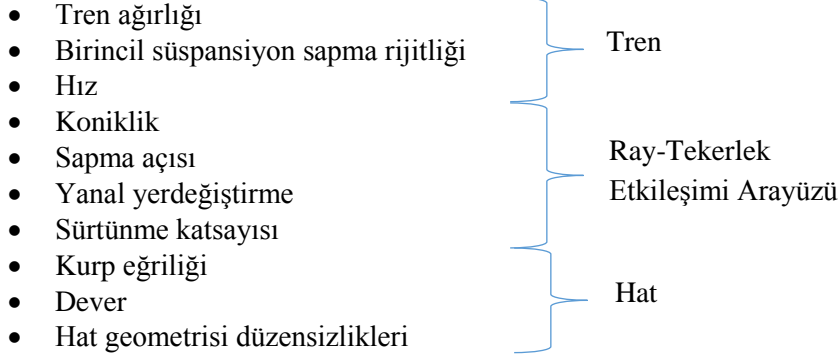
Farklı yanak yer değiştirmeler altında oluşturulan temas noktaları grafiklerinde, YYF doğruları eğimlerinden de beklenildiği üzere yeni ve 653 m yarıçaplı kurp durumlarında temasların ray mantarı ve yanak bölgelerinde daha küçük alanlarda kümelenildiği fakat, daha küçük yarıçaplı 130 m'lik (yüksek aşınma) kurp altında temas noktalarının daha geniş alana yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, tasarım ve az aşınmış koşullardaki ray ve tekerlek etkileşiminin konformal olmayan ikili temasa daha yatkın olduğunu işaret etmiştir.

Dördüncü adımda Hertz teorisi yardımıyla hesaplanan temas parametrelerinde temas yüzey alanı (A), boyuna genişlik (a), yanak genişlik (b), eliptikliği (a/b) ve maksimum temas basıncı / gerilimi  $P_m$  değerleri hesaplanmıştır. Tekerlek taban ve buden temasındaki farklılıkları gösterebilmek amacıyla iki yanak yer değiştirme altında değerler gösterilmiştir. Yeni durumda tekerlek buden temasının daha geniş bir alana etki ettiği ve böylelikle maksimum basıncın da daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tekerlek ve ray ömür başlangıcında profillerin istenen konformal seviyede olmaması sonucunda maksimum basıncın 653 m yarıçaplı kurpta en yüksek  $P_m = 4576.2$  seviyeye çıktığı tespit edilmiştir. Fakat, aşınmaların artmasıyla ray ve tekerlek etkileşimi daha uygun koşullara geçtiği,  $R=130$  m yarıçaplı kurpta oluşan maksimum basınç değerindeki azalmadan da görülmektedir. Ama yine de, bu durumun aşınma limit durumlarının (çok) öncesinde gerçekleştiği, limit değerlerine yaklaşıldığı takdirde gerekli bakım çalışmalarının yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, tasarımdaki tekerlek ve ray profil seçiminin daha az YYF doğru eğimine ve eşdeğer konikliğe sahip olduğu ve bu durumun daha yüksek temas basıncına yol açabileceği gözlemlenmiştir. Bu durumun aşınma ve hasar başlama oluşumlarının daha erken olabilmesine sebep verebilmektedir. İşletme durumunda aşınmalardaki artış sayesinde ray-tekerlek etkileşimi optimizasyonun sağlanabileceği ve temas basıncı değerlerinin düşmesiyle aşınma ve hasar durumlarına olan yatkınlıkta azalma görülebileceği düşünülebilir. Bu durumun varlıkların ömürlerinin uzamasına yardımcı olacağı da söylenebilir.

Öncül analizde aşınma ve hasar durumlarına olan yatkınlık ray-tekerlek etkileşimi uygunluğu ve işletmede tasarıma oranla nasıl farklılıklar meydana gelebileceği hakkında bilgiler verirken varlıkların ömür maliyetlerinin hesaplanabilmesi için çeşitli simülasyon ve modelleme yöntemleri kullanılarak detaylı temas analizleri yapılması gerekmektedir. Şekil 9'da detaylı temas analizlerinde ele alınan tren, ray-tekerlek etkileşimi, hat kaynaklı etkenler verilmektedir [12].

Buradan da anlaşılacağı üzere tasarım aşamasından başlayarak tren dinamik araç modelleri oluşturulmalı ve planlanan hat güzergahında simülasyon işlemleri gerçekleştirilmesi temas noktalarının ve ilgili parametrelerinin daha hassas hesaplanmasına yardımcı olacaktır. Ray ve tekerlek ömür maliyetlerini optimize edebilmek amacıyla farklı profil tipleri ve malzemeler kullanılarak parametre değerleri karşılaştırılabilirken aşınma ve yorulmaya bağlı kusur tahmin modelleri kullanılarak da yapılan daha detaylı çalışmalar, bakım sürelerinin planlanmasına yardımcı olabilmektedir.



Şekil 9. Detaylı temas analizinde ele alınan tren, ray-tekerlek etkileşimi ve hat kaynaklı etkenler [12]

Halihazırda işletme altındaki hatlarda da yukarıda verilen faktörlerin ray ve tekerlek temasına etkisi incelenebilir. Farklı hız ve yağlama (sürtünme katsayısı) altında temas noktaları analizlerinin yanında, tren stabilitesi ve derayman yatkinliği de bulunması gereklidir. Düşük eşdeğer koniklik değerinin bu den temasına daha yatkın olduğu belirtilmesine karşın farklı hızlar altında trenin stabilitesine etkisi de mutlaka incelenmelidir.

### Kaynakça

- [1] A. Ekberg, A. Bengt, E. Kabo, "Wheel/rail rolling contact fatigue—Probe, predict, prevent." *Wear*, vol. 314.1-2, 2014, 2-12.
- [2] B. Dirks, R. Enblom, A. Ekberg, M. Berg, "The development of a crack propagation model for railway wheels and rails." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol 38.12, 2015, 1478-1491.
- [3] T. Jendel, "Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements." *Wear*, vol 253.1-2, 2002, 89-99.
- [4] W. Schoech, R. Heyder, R. Dollevoet. "Specific railhead profiles to control rolling contact fatigue, - design and maintenance, the European approach." *8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009)*. CM2009, 2009.
- [5] U. Olofsson, Y. Zhu, A. Saeed, R. Lewis, S. Lewis, "Tribology of the wheel–rail contact—aspects of wear, particle emission and adhesion," *Vehicle System Dynamics*, vol. 51, no. 7:1091-1120, 2013.
- [6] M. Asplund, M. F. Stephen, W. Schoech. "A Nordic heavy haul experience and best practices," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 231, no. 7:794-804, 2017.
- [7] B. Dirks, R. Enblom, "Prediction model for wheel profile wear and rolling contact fatigue," *Wear*, vol. 271, no. 1-2: 210-217, 2010.
- [8] Railway applications. Method for determining the equivalent conicity, BS EN 15302, 1st ed. Brussels: CEN; 2008
- [9] H. Hertz, "On the contact of rigid elastic solids and on hardness," In: Schott, J.A. (Ed.), *Miscellaneous papers by H. Hertz*. MacMillan, London, pp. 164–183
- [10] S. Iwnicki, *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006

[11]I. Sebesan, Z. Yahia, "Determination of wheel-rail contact characteristics by creating a special program for calculation." *Mathematical Modelling in Civil Engineering* vol. 10.3: 48-59, 2014.

[12]I. Y. Shevtsov, PhD Thesis 'Wheel/rail interface optimisation', Delft University of Technology, 2008.

### Özgeçmiş



#### **Pelin BOYACIOĞLU**

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat ve Harita Mühendisliği bölümlerinden mezun olduktan sonra yüksek lisansını Boğaziçi Üniversitesi'nde ulaştırma ve trafik mühendisliği alanlarında tamamlamıştır. Doktora eğitimini İngiltere'de Huddersfield Üniversitesi, Demiryolu Araştırmaları Enstitüsü'nde tamamlamış ve daha sonrasında hat ve tren bakım optimizasyonları konularında çeşitli akademik ve endüstriyel danışmanlık projelerinde yer almıştır. Halen, Imperial College London Üniversitesi'nde araştırmacı ve demiryolu varlık yönetimi uzmanı olarak çalışmaktadır.

E-Posta: p.boyacioglu@imperial.ac.uk

### **Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.





## Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN<sup>1</sup>, Bekir AKTAŞ<sup>2</sup>, Hakan ÖZTÜRK<sup>3</sup>, İrfan Ş. ÖZTÜRK<sup>3</sup>, M. Burhan NAVDAR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

\*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 26.11.2021, Kabul/Accepted: 03.01.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Bu çalışma kapsamında, yerli karbon fiber takviyeli poliüretan plakalar ile donatlandırılmış beton traverslerin merkez negatif eğilme performansı, öngerilmeli B70 tipi traverslerle karşılaştırmalı yürütülen deneyler ile araştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda, yeni tip traverslerin yorulma esaslı dizayn yükünün, B70 tipi öngerilmeli traverslerin 2 katına ulaşan oranda daha yüksek sonuçlandığı görülmüştür. Ayrıca yeni tip traverslerde herhangi bir öngerilme kuvveti veya etriye kullanılmamasına rağmen, B70 tipi öngerilmeli traverslerin kırılma yükünün üzerindeki yük değerlerinde dahi, meydana gelen çatlak genişliklerinin halen 0,05 mm'nin altında kaldığı görülmüştür. Bu avantajlar, raylı sistemlerde ekartman açıklıklarının korunarak deray ve kazaların önlenmesi ve travers servis ömrünün artırılması adına oldukça önemlidir.

**Anahtar kelimeler:** Karbon fiber takviyeli poliüretan, CFRP, beton travers, LCR tipi travers, YKY çevrimi

### Comparative Investigation of Carbon-Fiber Laminate Reinforced Sleepers with B70-Type Prestressed Concrete Sleepers

**Abstract:** In this study, the center negative bending performance of concrete sleepers reinforced with domestic carbon fiber reinforced polyurethane laminates is investigated by comparative experiments with prestressed B70 type concrete sleepers. According to the test results, the fatigue-based design load of the new type of sleepers is two times higher than the B70 type prestressed sleepers. In addition, although no prestressing force or stirrups are used in the new type of sleepers, the crack widths that occur are still below 0.05 mm, even at the load values above the breaking load of the B70 type prestressed sleepers. These advantages are significant to prevent derailment and accidents by protecting rail gauge openings and increasing the service life of the sleeper.

**Keywords:** Carbon fiber reinforced polyurethane, CFRP, concrete sleeper, LCR type sleeper, LUR cycle

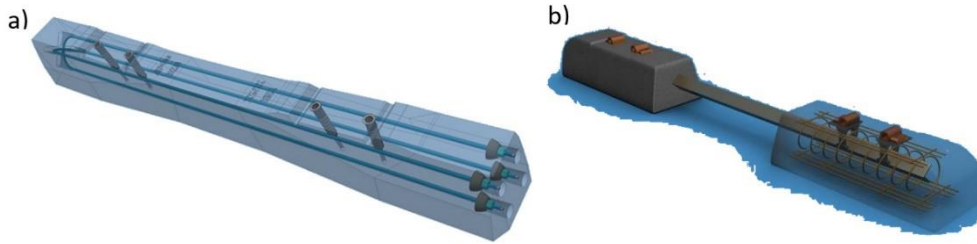
### 1.Giriş

Günümüzde şehirler ve ülkeler arası yük ve yolcu taşımacılığında en yaygın tercih edilen raylı ulaşım sistemi balastlı demiryollarıdır. Balastlı demiryollarında geçmişte ahşap ve çelik traversler yaygın olarak kullanılmış olsa da, günümüzde en çok tercih edilen travers tipi betonarme traverslerdir (yaygın tabiriyle beton traversler) [1]. Beton traversler, genel anlamda, geometrik şekillerine ve donatılarının durumuna göre iki kategoriye ayrılmaktadır. Geometrik olarak, Şekil 1.a'da görüldüğü üzere tek parça halinde üretilen traversler için “yekpare” beton travers (mono-block concrete sleeper) tabiri, Şekil 1.b'de görüldüğü üzere iki eş parça halindeki betonarme kütlelerin çelik profillerle bağlandığı tip için ise “ikiz-blok” beton travers (twin-block concrete sleeper, traverse bibloc) tabiri kullanılmaktadır. Beton traversler donatı bakımından ise öngerilmeli ve öngerilmesiz olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Öngerilmeli beton traversler (prestressed concrete sleepers), donatıların tamamı veya bir kısmına öngerilme kuvveti uygulanarak üretilmektedir. Öngerilmesiz beton traversler (non-prestressed concrete sleepers,

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. Ş. Öztürk, M. B. Navdar “Karbon-fiber plaka donatılı traverslerin, B70-tipi öngerilmeli beton traverslerle karşılaştırmalı incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 97-110, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1028740

reinforced concrete sleepers) ise, Şekil 1.b'de görüldüğü üzere, boyuna ve enine (etriye) istikamette ve bazı modellerde spiral halinde öngerilmemiş donatılar kullanılarak üretilmektedir. Günümüzde beton traverslerin tamamına yakınında hammaddesi çelik olan donatılar kullanılmakta olup, öngerilmeli tiplerde özel HTS tipi (High Tensile Strength) yüksek çekme dayanımına sahip öngerilme çubukları veya halatları kullanılmaktadır. Şekil 2'de söz konusu HTS tipi çelik öngerilme çubukları ve öngerilme işlemi için ihtiyaç duyulan ankraj plaka ve somunlarından örnekler sunulmaktadır. Tüm bu tipler içerisinde ise Ülkemizde ve dünyada en yaygın kullanılan tip, öngerilmeli yekpare beton traverslerdir [2, 3]. Öngerilmeli beton traverslerin birçok avantajı söz konusudur. Bu avantajlardan en ön planda olanı; ilk çatlak oluşma yükünün öngerilmemiş rakiplerine göre çok daha yüksek olması ve belirli bir yük değerine ve tekrarına kadar oluşan çatlakları kapatma yeteneğidir [4, 5]. Bu tip traversler ayrıca öngerilme kuvveti sayesinde daha düşük hammadde [2, 4] ve daha az donatı [6, 7] kullanımı sağlamaktadır. Ancak literatürde, söz konusu öngerilmeli betonarme traverslerin birçok dezavantajları da yer almaktadır. Bunlardan bazıları; zayıf zemin şartlarında (sönümlenme performansının düşüklüğü nedeniyle) kullanılamaması [4, 7], balast gerilimlerinde artışa neden olması [4], ahşap, çelik ve kompozit traverslere göre daha ağır olduğu için makineli bakım gerektirmesi [5, 6], enine istikamette donatı içermemesi nedeniyle boyuna çatlaklara açık olması [4, 8], düşük esnekliği nedeniyle elastik bağlantı ekipmanına ihtiyaç duyulması [9], elektriksel iletkenlik riski taşıdığından özel yalıtım malzemelerine ihtiyaç duyulması [5], yüksek dayanımlı beton kullanım zorunluluğu nedeniyle düktilitede düşüşe neden olması [10], düşük sönümlenme performansı ve rezonans zafiyeti [3, 4, 11-13], çelik donatıların korozyon riski taşıması [2, 13, 14], yüksek karbondioksit emisyonuna neden olması [7, 15], düşük yorulma dayanımına sahip olması [4, 13, 14, 16, 17] ve çeşitli iklimsel etkiler altında öngerilme kapasitesinin düşmesi [13, 18-22] olarak sayılabilir. Ayrıca Ülkemiz için söz konusu olan bir diğer dezavantaj, öngerilmeli beton travers üretiminde kullanılan HTS tipi çelik çubukların hammaddesinin çoğunlukla ithal edilmesidir. Bu avantaj ve dezavantaj döngüsü içerisinde, tasarımı esas alan yapı mühendisleri öngerilmeli traverslerin gereğinden fazla yüksek kapasite ile üretilmesine dikkat çekmek isterken, sahada görevli bakım mühendisleri ise öngerilmeli betonarme traverslerin dizayn ömrünün erken aşamasında deforme olmalarından yakınmaktadır [3, 23-27]. Ancak raylı ulaşım sistemlerinin geçmişten çok daha yüksek hızlar, dingil yükleri ve işletim sıklığı ile karşı karşıya olduğu ve klasik beton traverslerin birçoğunun planlanan 40-50 yıllık dizayn ömrüne ulaşmadan değiştirilmek zorunda kaldığı istatistiksel bir gerçektir [1, 28, 29]. Buna ilaveten, doğru bir şekilde dizayn edilmemiş traversler, hem kendilerinin hem de diğer tüm demiryolu bileşenlerinin erken deforme olmasına neden olmaktadır [28]. Bu durum ise, tüm dünyada demiryolu bakım işlemlerinin maliyetini artırmaktadır [11, 28]. Sonuç olarak literatürdeki birçok çalışmada, demiryolu traverslerinin dizayn metodlarında önemli değişimler yapılması istenmektedir [1, 9, 30-35]. Bu yüzden günümüze kadar dünyada birçok ülkede yüzlerce çeşit beton travers modeli geliştirilmiş ve halen geliştirilmeye devam etmektedir. Bu çalışmada konu edilen yeni tip traverslerde ise, dünyada mevcut beton traverslerde kullanılan çelik donatılar yerine, yerli lamine karbon fiber takviyeli poliüretan plakalar (L-CFRPU), uygun ebatlarda kesilerek ve kumlama yapılarak, beton donatısı olarak kullanılmıştır. Literatürde belirtildiği üzere, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ürünler; klor, sülfat, korozyon, nem, alkali ve asit dâhil, zararlı çevresel etkilere karşı çok yüksek dayanıklılığa sahiptir [36]. Ayrıca CFRP ürünlerin elastisite modülü, çelik donatılarla benzer ve diğer fiber takviyeli polimer ürünlerin en az 2 katıdır [37]. Bu özellikler, yüksek tekrarlı dinamik yüklerin ve zararlı çevresel etkilerin söz konusu olduğu ve iki ray arasındaki mesafe olan ekartman açıklığının büyük önem arz ettiği raylı ulaşım sistemleri için büyük fayda sağlamaktadır. Önceki çalışmalarımızda bu yeni tip traverslerin standartlarda istenilen; kademeli artan yükleme-kaldırma-yeniden yükleme (YKY) esaslı ray mesnedinde pozitif moment tayini deneyleri yapılmış, bu zorunlu testlerin akabinde, yüksek hız ve şiddete sahip tekrarlı darbe testleri ve sönümlenme performansı ile rezonans direncinin incelendiği modal analizler de uygulanmıştır [1, 3, 38, 39, 40]. Test ve analiz sonuçlarına göre, yeni tip traversler Paris-Londra yüksek hızlı demiryolu hattında da kullanılmış olan öngerilmemiş Vagneux U3 tipi modern betonarme traverslere göre %180 daha yüksek kalıcı çatlak başlangıç yükü kapasitesine

ve %128 daha yüksek kırılma yükü kapasitesine erişmiştir. Ülkemizde ve dünyada yüksek hızlı demiryolu hatları dâhil yaygın bir şekilde kullanılan öngerilmeli B70 tipi betonarme traverslere göre ise; %29 daha yüksek kalıcı çatlak başlangıç yükü kapasitesine, %5 daha yüksek kırılma yükü kapasitesine ve %58 daha yüksek sönümlenme performansına erişmiştir. Şekil 3'te yeni tip traverslerin üretimi esnasında alınan görseller sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, yeni tip L-CFRPU donatılı traverslerin belirtilen performans faydalarının yanı sıra, öngerilmemiş ve etriyesiz üretim yöntemi sayesinde, büyük bir üretim kolaylığı ve ekonomisi de mevcuttur. Oysaki; öngerilmeli beton travers üretiminde (Şekil 1.a ve 2) erken yüksek beton dayanımı gerektiği gibi, donatı montaj, ankrajlama, öngerilme uygulama, enjeksiyon-izolasyon gibi birçok iş kalemi gerekmektedir. Öngerilmemiş beton traverslerde ise (Şekil 1.b) birçok etriye, spiral donatı ve ara bağlantı çubuğu üretimi ve montajı, önemli miktarda hammadde, enerji ve zaman kaybı söz konusudur.



Şekil 1. Yekpare beton travers [41] ve ikiz-blok beton traverslerin [42] donatı ve ankraj planları



Şekil 2. B70 tipi standart öngerilmeli betonarme demiryolu traverslerinin üretimi esnasında kullanılan ithal hammaddeli öngerme çelikleri ile ankraj işleminde kullanılan plaka ve somunlar



Şekil 3. Yeni geliştirilen 30-VRTC-SND (sol) ve 30-SND tipi (sağ) L-CFRPU donatılı betonarme demiryolu traverslerinin üretimleri esnasında alınan örnek görseller

Belirtilen avantaj ve dezavantajlar haricinde, modern demiryolları için düşük bakım ihtiyacı bir diğer önemli konudur. Çünkü modern demiryolu işletmeciliğinde, tren seferleri çok sık aralıklarla yapılmakta olup, Şekil 4'te örneği verildiği üzere, bakım ve tamirat işlemleri için ayrılacak süreler, geceleri birkaç saatle kısıtlıdır. Bu yüzden dünya genelinde fiili servis ömrü daha uzun

ve diğer demiryolu bileşenlerini de koruyan sönümlenme performansı ve rezonans direnci yüksek travers modelleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 4. Modern demiryollarında bakım işlemlerinin geceleri yapıma ihtiyacına dair bir örnek [43]

Son olarak, mevcut önerilmeli beton traverslerde kullanılan HTS tipi önerilme çubuklarının hammaddesi hâlihazırda ülkemizde çoğunlukla ithal edilmekte olup, 1 adet traversdeki maliyeti yaklaşık 135 TL'dir. Yeni geliştirilen L-CFRPU donatılı traverslerin üretiminde de kullanılan karbon fiber malzemeler, dünyada yalnızca 9-10 ülkede üretilebilmekte olup, bunlardan biri Türkiye'dir. Günümüzde 1 adet travers için söz konusu L-CFRPU plaka temini maliyeti, mevcut önerilmeli beton traverslerde kullanılan çelik donatı maliyetinden %23'e varan oranda daha düşüktür (2021 yılı için 105 TL/travers). Bu maliyet avantajı, yeni tip traverslerin önerilmesiz ve etriyesiz kolay üretim şekliyle daha da artmaktadır. Yeni tip traverslerin, servis ömründe sağlayacağı artış ve demiryolu bakım ve işletimi esnasında sağlanacak tasarruflar ile mali avantaj kat kat artmaktadır. Günümüzde dünya genelinde en az 3 milyar travers kullanılmakta olup, bunların ise her yıl en az 150 milyon adedi erken deformasyonlar nedeniyle değiştirilmek zorunda kalmaktadır [15]. Dolayısıyla yeni tip traverslerin yüksek ticarileşme potansiyeli bulunmakta olup, hitap ettiği pazarın market hacmi oldukça büyüktür. Bu durum yerli madenlerin katma değerlerinin artırılması bağlamında da önem taşımaktadır.

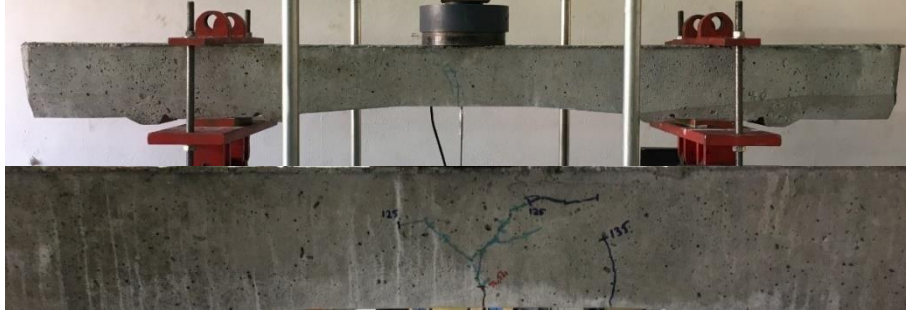
## 2. Metot

Yeni geliştirilen L-CFRPU donatılı beton demiryolu traversleri, bugüne kadar yazarlar tarafından gerçekleştirilen çeşitli çalışmalara [1, 3, 38, 39, 40] konu olmuş ve yeni tip traverslerin ray mesnedinde YKY tipi pozitif moment tayini testleri, darbe testleri ve modal analizleri yapılarak dayanım ve sönümlenme karakteristikleri mevcut travers tipleri ile karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Ancak bu yeni tip traverslerin merkez (orta) noktasında, YKY tipi testler esnasında sergileyeceği performans, herhangi bir çalışmada incelenmemiştir. Çalışma kapsamında bu konu, TS EN 13230-2:2016 [44] standardında geçen, travers merkezinde negatif eğilme momenti tayini deneyleri ile araştırılmıştır. Testler esnasında mesnet açıklığı (1,50 mt) ve yükleme hızı (yük kontrollü, 120 kN/dk) standartta belirtildiği şekilde uygulanmıştır. Diğer detaylar standartta verilmektedir. Standart test metodunda bu çalışma için yapılan ilave ile her YKY adımı için, traverslerin artık (plastik) düşey yer değiştirme değerleri doğrusal değişken fark transformatörü (LVDT) ile kayda alınarak test grafikleri sunulmuştur. Test numunesi olarak L-CFRPU donatılı traversler 3 farklı donatı varyasyonu ile kullanılmış, ayrıca karşılaştırma numunesi olarak eşdeğer beton dayanımı ve kesit ölçülerine sahip, dünyada ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan B70 tipi önerilmeli beton traversler kullanılmıştır. 22-SND tipinde 4 adet 22 mm'lik L-CFRPU plaka kumlanarak yatay vaziyette, 30-SND tipinde 4 adet 30 mm'lik L-CFRPU plaka kumlanarak yatay vaziyette, 30-VRTC-SND tipinde 4 adet 30 mm'lik L-CFRPU plaka kumlanarak dikey vaziyette kullanılmıştır. B70 tipi ve yeni tip traverslerin üretim aşamaları ve kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri, önceki çalışmalarda [1, 3, 38, 39, 40] sunulmuştur. Test sonuçları, B70 tipi traversler için; TS EN 13230-2:2016 [44] normuna göre UIC (Dünya Demiryolu Birliği) üyesi ülkelerce istenen şu kriterlerle karşılaştırılmıştır: a) Travers merkezinde yorulma esaslı dizayn yükünün ( $F_{c,0,n}$ ) en az 35 kN olması. b) Travers merkezinde ilk çatlak başlangıç yükünün ( $F_{c,r,n}$ ),  $F_{c,0,n}$  (kN) değerinden yüksek olması. c) Travers servis ömrü içerisinde yalnızca birkaç defa görülmesine izin verilen istisnai darbe yükünün ( $F_{c,0,05}$ ) en az 65 kN olması. d) Travers servis

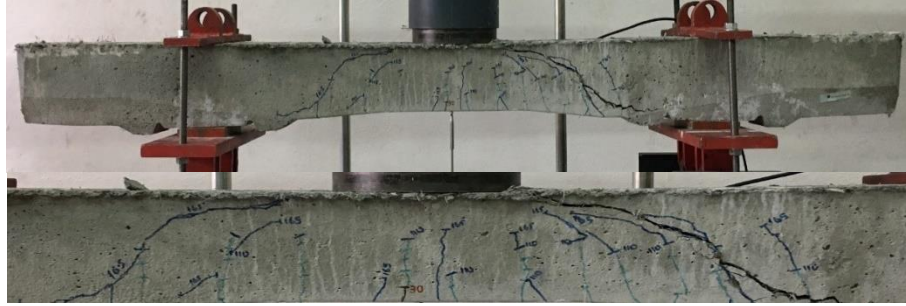
ömrü boyunca 1 defa görülmesine izin verilen kırılma yükünün ( $F_{c_{b_n}}$ ) en az 90 kN olması. Belirtilen bu limitler öngerilmeli traversler için geçerli olup, öngerilmemiş traverslerin orta noktalarında Şekil 1.b'deki gibi çelik profiller kullanıldığı için TS EN 13230-3:2016 [45] standardında travers merkezi ile ilgili bu tarz bir deney ve kriter verilmesi söz konusu olmamıştır.

### 3. Bulgular

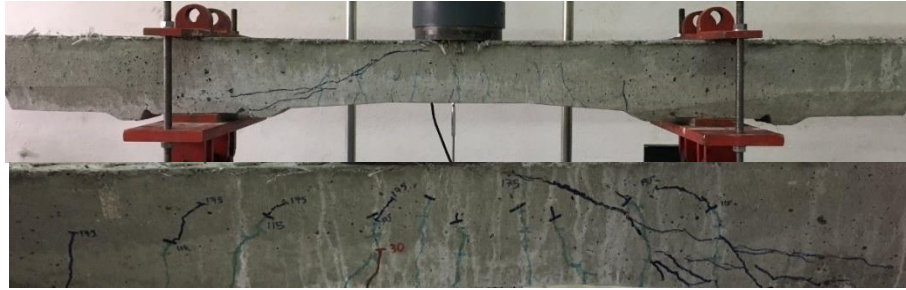
Çalışma kapsamında, üretimi yapılan travers numunelerine uygulanan, travers merkezinde YKY tipi yüklemelerle negatif eğilme momenti tayini deneyleri sonucunda traverslerin çatlak durumlarını gösterir örnek fotoğraflar Şekil 5-8'de, her numune tipi için örnek test grafikleri ise Şekil 9-12'de sunulmuştur. Şekil 5-8'de travers numuneleri üzerine çatlak işaretlemeleri yapılırken,  $F_{c_{0,05}}$  yükü altında belirlenen ve yük kaldırıldığında geri kapanarak 0,05 genişliğinde kalan çatlaklar açık mavi kalemle, bu yük seviyesinin üzerinde ise lacivert kalemle işaretleme yapılmıştır. B70 tipi traversler için; TS EN 13230-2:2016 [44] normuna göre, UIC üyesi ülkelerde şartnamelerde istenen yük tanımları ise toplu olarak Tablo 1'de sunulmuştur.



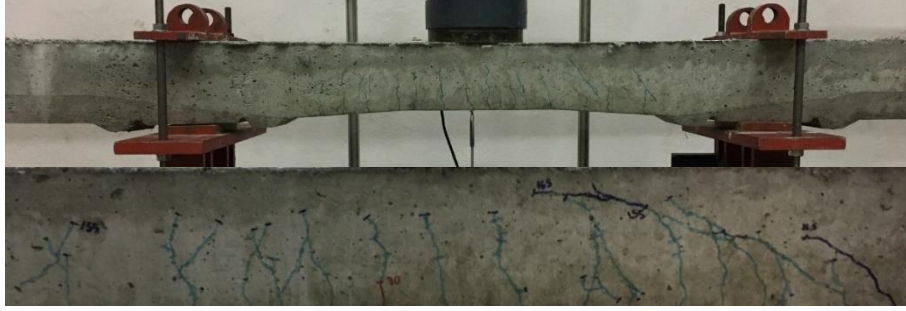
Şekil 5. B70 tipi öngerilmeli beton traversin 135 kN'luk son yükleme adımı ardından çatlak durumu



Şekil 6. 22-SND tipi beton traversin 165 kN'luk son yükleme adımı ardından çatlak durumu

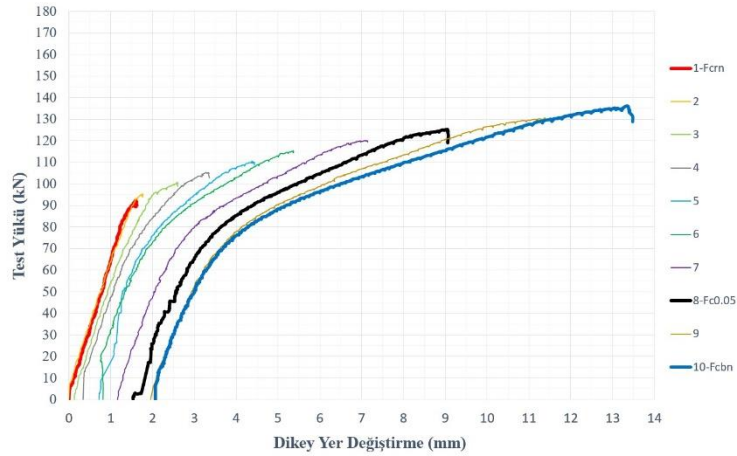


Şekil 7. 30-SND tipi beton traversin 175 kN'luk son yükleme adımı ardından çatlak durumu

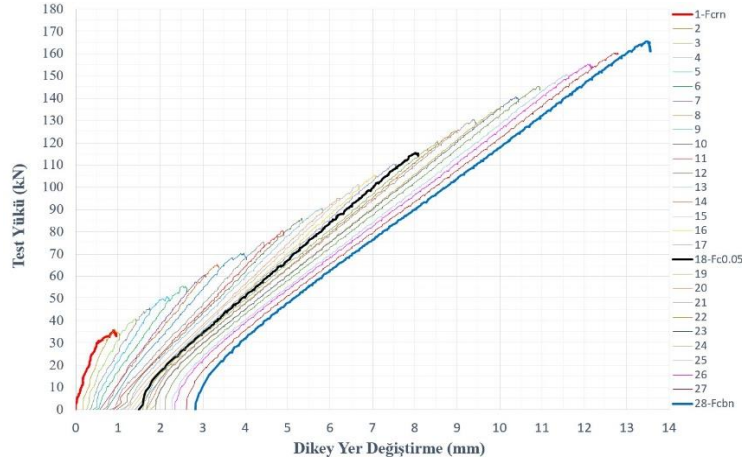


Şekil 8. 30-VRTC-SND tipi beton traversin 170 kN'luk son yükleme adımı ardından çatlak durumu

Tablo 1'de geçen  $F_{c_{rn}}$  (kN) değeri için UIC / TCDD şartnamelerinde istenen limit değeri, önerilmeli traversler içindir. Standartlarda önerilmemiş traverslerin ilk çatlak başlangıcı ile ilgili olarak, gerek ray mesnedinde, gerekse travers merkezinde herhangi bir limit belirtilmesine gerek görülmemiştir [45, 46]. Şekil 9-12'de ilk çatlak başlangıcı gözlemlenen YKY yük adımı kırmızı, ilk kalıcı çatlak başlangıcı gözlemlenen adım siyah ve zirve yükü gözlemlenen adım ise mavi dolgulu çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 9-12'de grafiklerin sağ tarafındaki YKY adım listesinde, 5 kN'luk kademeler halinde artırılan YKY adımlarının sıra numaraları verilmiş olup, ayrıca UIC/TCDD şartnamelerinde istenilen limitlerin belirlendiği adımlarda, bu limitlere ait simgeler eklenmiştir. Örnek olarak Şekil 9'da ilk elastik çatlak belirlenen 1. YKY adımı  $F_{c_{rn}}$  simgesiyle, 0,05 mm kalıcı çatlak belirlenen YKY adımı  $F_{c_{0,05}}$  simgesiyle, zirve yük belirlenen 10. YKY adımı  $F_{c_{bn}}$  simgesiyle, diğer YKY adımlarından ayırıştırılmıştır.  $F_{c_{0,05}}$  yükünün standarttaki tanımlamasında istisnai darbe yükü ifadesi kullanılsa da, mevcut standartlarda bu değer YKY testleriyle tahkik edilmektedir. Teste tabi tutulan tüm travers tiplerinin belirlenen dizayn yüklerinin karşılaştırması Şekil 13-15'te verilmiştir.



Şekil 9. B70 tipi beton travers numunelerinin örnek test yükü (kN), dikey yer değiştirme (mm) eğrisi



Şekil 10. 22-SND tipi beton travers numunelerinin örnek test yükü (kN), dikey yer değiştirme (mm) eğrisi

Sonuç olarak yapılan tüm bu test ve analizler sonucunda aşağıda belirtilen tespitler yapılmıştır:

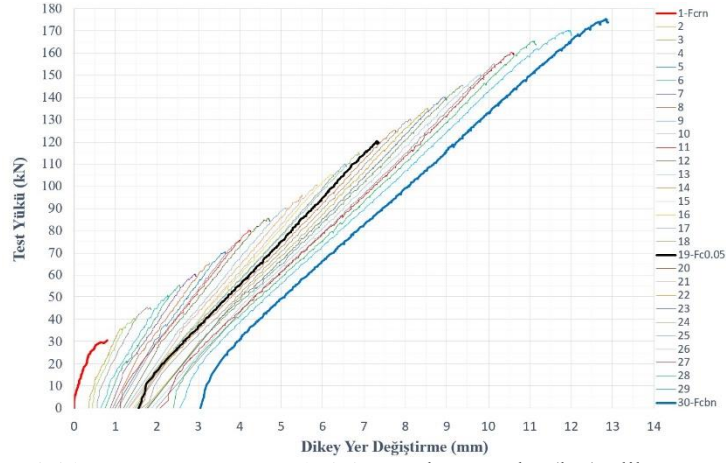
1. Teste tabi tutulan tüm L-CFRPU donatılı travers varyasyonlarının, UIC/TCDD şartnamelerinde istenen dayanım esaslı kriterlerin tamamını sağladığı görülmüştür.
2. Yapılan testler esnasında tüm travers tiplerinde ilk çatlakların kesit ortasındaki dikey eğilme çatlakları ile ortaya çıktığı gözlenmiştir. Artan yük seviyelerinde karşılaştırma numunesi olarak kullanılan ve nervürlü HTS tipi çelik çubuk donatılar içeren önerilmeli B70 tipi traverslerdeki çatlakların az sayıda (2-3 adet) ancak yüksek genişlikte meydana geldiği görülmüştür. Kumlamalı L-CFRPU donatılar içeren LCR tipi traverslerde ise çatlak sayısının fazla (>10) fakat genişliklerinin çok az olduğu görülmüştür. LCR tipi traverslerde bu yüzden mesnetlere yakın lokasyonlarda meydana gelen çatlaklar, artan yük seviyelerinde, yük uygulama noktasına doğru uzayarak, eğik çekme çatlakları ve nihayetinde kesme çatlakları meydana gelmiştir. Sonuç olarak karşılaştırma numunelerinde 0,05 mm üzerindeki kalıcı çatlak tespitine ve kırılma noktasına eğilme çatlakları ile ulaşılırken, LCR tipi traverslerde eğik çekme çatlakları ve kesme çatlakları ile ulaşılmıştır.
3. TS EN 13230-2/3 doğrultusunda yapılan bu 3 noktalı, travers merkezinde negatif moment tayini testlerinde mesnet aralığı 150 santimetre, travers faydalı yüksekliği orta noktada 12,5 santimetredir. Dolayısıyla, kesme açıklığı/derinlik oranı (shear span/effective depth ratio) 6 seviyesinde olduğundan kemerleme (arch action) katkısı ihmal edilebilecek düzeydedir. TS EN 13230-2/3 doğrultusunda yapılan ray mesnedinde pozitif moment tayini deneylerinde ise bu oran (mesnet aralığı 60 santimetre ve travers faydalı yüksekliği 16,4 santimetre ile) 1,8 seviyelerinde olduğundan bu testlerde kemerleme etkisinin katkısı yüksektir. Sonuç olarak daha önceki çalışmalarda ray mesnedinde yapılan testlerde elde edilen üstün dayanım özelliklerinin, kemerleme etkisinden bağımsız olduğu, yeni LCR tipi traverslerin önerilmesiz ve etriyesiz üretim yöntemine rağmen üstün dayanım sergilediği gözlenmiştir.
4. 0.05 mm genişliğe sahip ilk kalıcı çatlak tespiti yükü ( $F_{c0.05}$ ) değerleri karşılaştırıldığında, Şekil 13'te özetlendiği üzere, B70 tipi standart önerilmeli traversler ile 22-SND ile 30-SND kod numaralı yeni tip traverslerin, UIC kriteri olan 65 kN sınırının çok üzerinde (yaklaşık 120 kN) değer verdikleri görülmüştür. 30-VRTC-SND tipi traverslerin ise bu bağlamda yaklaşık %29 daha yüksek kapasiteye erişerek 155 kN kapasiteye ulaştığı görülmüştür.
5. Zirve kırılma yükü ( $F_{c,b,n}$ ) değerleri karşılaştırıldığında, Şekil 14'te özetlendiği üzere, B70 tipi standart önerilmeli traverslerin UIC kriteri olan 90 kN sınırının üzerinde ve yaklaşık 135 kN değer verdiği görülmüştür. Yeni tip traverslerin tümü, bu değerlerin de üzerinde sonuç vermiş, 22-SND tipi varyasyon ortalama 165 kN, 30-VRTC-SND tipi varyasyon 170 kN ve 30-SND tipi varyasyon ise 175 kN yüke kadar mukavemet göstermiştir.

6. Yapılan testler esnasında, B70 tipi öngerilmeli traverslerin ilk çatlak başlangıç yükü olan 90 kN değerinin, her YKY adımı ardından düştüğü gözlenmiştir. Bu traversler için Şekil 9'da örneği sunulan test grafiğinde de görüleceği üzere, YKY basamaklarına ait (betonda çatlamalara işaret eden) eğrilerin eğimlerinin değiştiği büküm noktaları, her YKY adımında daha da erken bir yük seviyesine düşmektedir. Fiziki gözlemler ve grafik analizleriyle tespit edildiği üzere, bu değer nihai olarak 50 kN mertebesine kadar düşmektedir. Bu tespit TS EN 13230-2-6 [44, 46] standartlarında yorulma esaslı dizayn yükünün neden ilk çatlak başlangıç yükü olan  $F_{c_m}$  değeri değil de bundan daha düşük bir değer olarak Tablo 1'de de verilen; en az 35 kN'luk  $F_{c_{o,n}}$  değerinin esas alınmasını izah etmektedir. Dolayısıyla teste tabi tutulan B70 tipi traversler için yorulma esaslı dizayn yükü ( $F_{c_{o,n}}$ ) 50 kN olarak belirlenmiştir.
7. TS EN 13230-3-6 [45, 46] standartlarında belirtilen kriterler ve UIC üyesi Demiryolu Kuruluşlarınca hazırlanan Teknik Şartnameler baz alındığında; Tablo 1'de ve Şekil 15'te özetlendiği üzere, yeni tip traverslerin yorulma esaslı dizayn yükü 0,05 mm'lik kalıcı çatlak başlangıcı yüküne ( $F_{c_{0,05}}$ ) tekabül eden 120-155 kN düzeylerinde olduğu gözlenmiştir. Traverslerin servis dizayn yükleri belirlenirken elde edilen bu değerler, sıradan tek kademeli statik eğilme testleriyle değil, her bir numune için birkaç saat süren 5 kN'luk basamaklar halinde artan yükleme-kaldırma-tekrar yükleme çevrimli (YKY) özel testler ile belirlenmiştir. Test grafikleri incelendiğinde yeni tip traverslerin 30 basamağa ulaşan YKY çevrimine tabi tutulduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kesin sonuçlara TS EN 13230-2-3 [44, 45] doğrultusunda yapılacak yorulma testleri ile ulaşılabilecektir.
8. Şekil 9-12 incelendiğinde, yeni tip traverslerde herhangi bir öngerilme kuvveti veya etriye/spiral donatı kullanılmamasına rağmen, meydana gelen kalıcı deformasyon düzeyleri incelendiğinde, öngerilmeli B70 tipi traverslerle benzer plastik deformasyonlar söz konusu olduğu görülmektedir. Giriş bölümünde belirtildiği üzere, traverslerin tekrarlı yükler etkisinde plastik deformasyon düzeylerinin kısıtlanması, raylı sistemlerde ekartman açıklıklarının korunması ve travers servis ömrünün artırılması adına oldukça önemlidir. Bu bağlamda, özellikle 30-VRTC-SND tipi travers modeli büyük avantaja sahip olup, 25 adımlık YKY yükleme basamağı ardından ve B70 tipi öngerilmeli traverslerin kırılma yükünün üzerindeki 155 kN'luk yük değerine kadar, traversteki meydana gelen çatlak genişlikleri halen 0,05 mm'nin altında kalmıştır. Şekil 8'den de görülebileceği üzere bu performansını, zirve yüküne ulaşmasına rağmen büyük oranda sürdürmüştür.

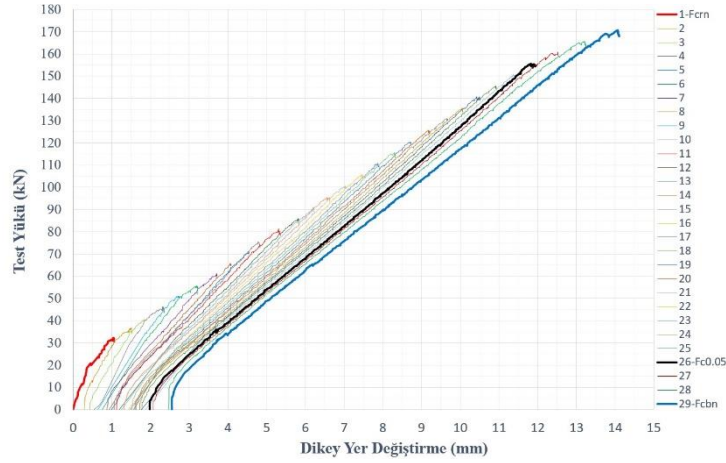
**Tablo 1.** Travers merkezlerinde YKY tipi test sonuçlarının ve şartname limitlerinin karşılaştırması

Numune Tanımı	$F_{c_{r,n}}$ (kN)	$F_{c_{0,05}}$ (kN)	$F_{c_{b,n}}$ (kN)	$F_{c_{o,n}}$
B70 Standart	90	125	135 (Baz)	50
22-SND	35	115	165	115
30-SND	30	120	175	120
30-VRTC-SND	30	155	170	155
UIC / TCDD Şartname Limiti	> 35	> 65	> 90	35





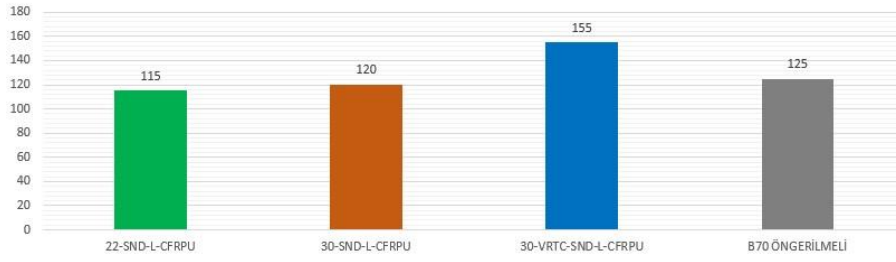
Şekil 11. 30-SND tipi beton travers numunelerinin örnek test yükü (kN), dikey yer değiştirme (mm) eğrisi



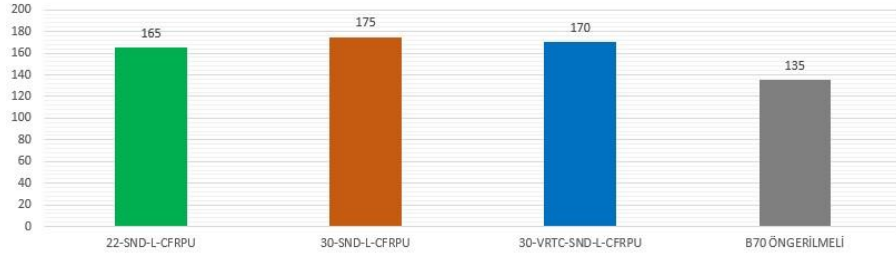
Şekil 12. 30-VRTC-SND tipi traverslerin örnek test yükü (kN), dikey yer değiştirme (mm) eğrisi

#### 4. Sonuç

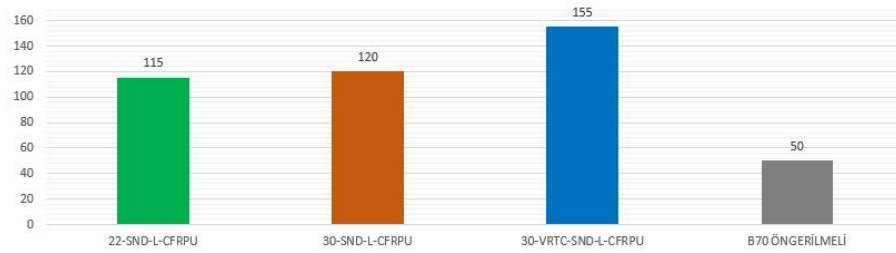
Günümüzde tüm dünyada balastlı demiryolu hatlarında en yaygın olarak kullanılan öngerilmeli beton traverslerin birçok avantajı söz konusu olmasına rağmen, günümüzün işletim koşulları altında bu traverslerin birçoğu planlanan 40-50 yıllık dizayn ömrüne ulaşmadan değiştirilmek zorunda kalmaktadır. Bu durum, tüm dünyada demiryolu bakım işlemlerinin maliyetini artırmaktadır. Ayrıca modern demiryolu işletmeciliğinde, tren seferleri çok sık aralıklarla yapıldığından, bakım ve tamirat işlemleri için ayrılacak süreler, geceleri birkaç saatle kısıtlıdır. Bunların dışında, Ülkemiz için söz konusu olan bir diğer unsur, öngerilmeli beton travers üretiminde kullanılan HTS tipi çelik öngerilme çubuklarının çoğunlukla ithal edilmesidir. Bu çalışmada, dünyada mevcut beton traverslerde kullanılan çelik donatılar yerine, yerli lamine karbon fiber takviyeli poliüretan plakalar (L-CFRPU) inovatif bir şekilde, uygun ebatlarda kesilerek ve kuşlama yapılarak, beton donatısı olarak kullanılmıştır.



Şekil 13. Teste tabi tutulan traverslerin 0.05 mm'lik kalıcı çatlak başlangıcı yükü (Fc<sub>0,05</sub>) karşılaştırması



Şekil 14. Teste tabi tutulan traverslerin zirve kırılma yükü (Fc<sub>b,n</sub>) karşılaştırması



Şekil 15. Teste tabi tutulan traverslerin yorulma esaslı servis dizayn yükü (Fc<sub>o,n</sub>) karşılaştırması

Bu yeni tip traversler, geçtiğimiz yıllarda çeşitli testlere tabi tutulmuş ve yapılan test ve analiz sonuçlarına göre, yeni tip traverslerin dünyada mevcut diğer travers tiplerine göre %180'e varan oranda daha yüksek kalıcı çatlak başlangıç yükü kapasitesine ve %128'e varan oranda daha yüksek kırılma yükü kapasitesine eriştiği ve %58 daha yüksek sönümleme performansı sergilediği görülmüştür. Yeni tip traversler, bu avantajlarının yanı sıra, öngerilmemiş ve etriyesiz pratik üretim yöntemi sayesinde, büyük bir üretim kolaylığı ve ekonomisi de vadedmektedir. Kullanılan karbon fiber malzemeler, dünyada yalnızca 9-10 ülkede üretilebilmekte olup, bunlardan biri Türkiye'dir ve yeni tip traverslerde kullanılacak karbon-fiber donatıların maliyeti, mevcut öngerilmeli travers donatılarına göre %23'e varan oranda daha düşük maliyetlidir. Bu maliyet avantajı, yeni tip traverslerin öngerilmemiş ve etriyesiz kolay üretim şekliyle daha da artmaktadır. Yeni tip traverslerin, fiili servis ömründe sağlayacağı artış ve demiryolu bakım ve işletim işlemlerinde sağlanacak tasarruflar ile mali avantajı kat kat artmaktadır. Günümüzde dünya genelinde en az 3 milyar travers kullanılmakta olup, bunların ise her yıl en az 150 milyon adedi erken deformasyonlar nedeniyle değiştirilmek zorunda kalmaktadır. Dolayısıyla yeni tip traverslerin yüksek ticarileşme potansiyeli bulunmaktadır ve hitap ettiği pazarın market hacmi oldukça büyüktür.

Çalışma kapsamında yeni tip traverslerin bugüne değin incelenmemiş bir özelliği, öngerilmeli B70 tipi traverslerle karşılaştırmalı yürütülen deneyler ile araştırılmıştır. Yeni tip traverslere uygulanan travers merkezinde negatif moment tayini testleri akabinde, teste tabi tutulan tüm varyasyonların, UIC/TCDD şartnamelerinde beton traverslerden istenen kriterlerin tamamını sağladığı görülmüştür. Ayrıca yeni tip traverslerin 0.05 mm genişliğe sahip ilk kalıcı çatlak tespiti yükü bakımından %29'a varan oranda daha yüksek kapasiteye erişilebildiği, bu başarımın kırılma

yükü kapasitesi açısından da sağlandığı görülmüştür. Yorulma esaslı dizayn yükü bakımından ise, B70 tipi önerilmeli traverslerin 2 katına ulaşan oranda daha yüksek sonuçlar alınmıştır. Uygulanan ağır şartlara sahip yükleme-kaldırma-yeniden yükleme esaslı testlerle belirlenen bu yüksek potansiyelin, dinamik ve yorulma testleriyle de teyit edilmesi gerekmektedir. Yapılan testler sonucunda ulaşılan bir diğer önemli avantaj, yeni tip traverslerde herhangi bir önerilme kuvveti veya etriye/spiral donatı kullanılmamasına rağmen, meydana gelen kalıcı deformasyon düzeylerinin, önerilmeli B70 tipi traverslerle benzer başarı sağladığı, hatta B70 tipi önerilmeli traverslerin kırılma yükünün üzerindeki yük değerlerinde dahi, yeni tip traverslerde meydana gelen çatlak genişliklerinin halen 0,05 mm'nin altında kaldığı görülmüştür. Bu avantaj raylı sistemlerde ekartman açıklıklarının korunarak deray ve kazaların önlenmesi ve travers servis ömrünün artırılması adına oldukça önemlidir.

### Teşekkür

Bu çalışma, Tübitak Ardeb Dairesi Başkanlığı'nın 120M403/2020 sayılı projesi kapsamında desteklenmektedir. Ayrıca katkılarından dolayı TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürü Sn. Ali KARABEY'e ve dowAksa® firması yetkilisi Sn. Ilgaz DOĞAN'a teşekkürlerimizi bildiririz.

### Kaynakça

- [1] F. Çeçen, B. Aktaş, “Yeni nesil demiryolu traversleri ve yerli frp donatı kullanımının deneysel araştırması,” *Demiryolu Mühendisliği*, Ocak 2021, Sayı: 13, Sayfa: 53-64. doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>
- [2] J. Taherinezhad, M. Sofi, P. A. Mendis, T. A. Ngo, “Review of behaviour of prestressed concrete sleepers,” *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2013, vol: 13(1), pp: 1-16
- [3] F. Çeçen, B. Aktaş, “Modal and harmonic response analysis of new cfrp laminate reinforced concrete railway sleepers,” *Engineering Failure Analysis*, Vol: 127, no 105471, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>
- [4] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [5] S. Li, “Railway sleeper modelling with deterministic and non-deterministic support conditions,” Division of Highway and Railway Engineering Department of Transport Science, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012
- [6] Z. Öztürk, V. Arlı, *Demiryolu mühendisliği*. ISBN 978-605-60958, 2009
- [7] M. S. Çelik, Z. Öztürk, “Demiryolu traverslerinin çok yönlü incelenmesi ve örnek hat üzerinde kullanılan farklı tipteki traverslerin irdelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İstanbul, 2015
- [8] J. C. Bastos, “Analysis of the performance and failure of railroad concrete crossties with various track support conditions,” Master thesis, Graduate College of the University of Illinois, Urbana, 2016
- [9] F. Çeçen, “Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforced concrete railway sleepers,” Master Thesis, Gazi Osman Paşa University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 156 pages, Tokat. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22723.430492019>
- [10] P. Mendis, “Design of high-strength concrete members, state-of-the-art,” *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2003, vol. 5 (1), pp. 1–15
- [11] A. Remennikov, S. Kaewunruen, “Investigation of vibration characteristics of prestressed concrete sleepers in free-free and in-situ conditions,” 2005. [Online]. Available (25.11.2021): <http://ro.uow.edu.au/engpapers/284>
- [12] H. P. J. Taylor, “The railway sleeper: 50 years of pretensioned, prestressed concrete,” 1993. [Online]. Available (15.09.2021): [https://www.researchgate.net/publication/288948138\\_The\\_prestressed\\_concrete\\_railway\\_sleepers\\_-\\_50\\_years\\_of\\_pretensioned\\_prestressed\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/288948138_The_prestressed_concrete_railway_sleepers_-_50_years_of_pretensioned_prestressed_concrete)
- [13] USA ACI-ASCE Committee 423, ACI 423.5R-99: State-of-the-art report on partially prestressed concrete, 2017. [Online]. Available (15.09.2021): [https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=423599&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US\\_Units](https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=423599&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_Units)
- [14] A. Jokūbaitis, J. Valivonis, G. Marčiukaitis, “Analysis of strain state and cracking of concrete sleepers.” *Journal Of Civil Engineering And Management*, Vol. 22(4), pp. 564–572, 2016

- [15] W. Ferdous, A. Manalo, G. V. Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. M. Remennikov, "Composite railway sleepers – recent developments, challenges and future prospects," *Composite Structures*, 2015, Vol: 134 (2015), pp. 158–168, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>
- [16] J. Sýkorová, J. Bártová, P. Štemberk, "Prestressed concrete sleeper under extreme loading conditions," *18th International Conference Engineering Mechanics*, Svratka, Czech Republic, May 14 – 17, 2012.
- [17] R. You, D. Li, C. Ngamkhanong, S. Kaewunruen, "Fatigue life assessment method for prestressed concrete sleepers," *Frontiers in Built Environment*, 2017, Volume 3, Article 68
- [18] N. Ö. Bezzin, "Öngerilmeli beton traverslerde gözlenen zamana bağlı kısılmalarının değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, 2018, Vol: 9, pp. 17-27
- [19] N. Ö. Bezzin, "An insight into design of prefabricated and prestressed concrete monoblock railway ties for service loads," *Challenge Journal Of Structural Mechanics*, 2018, Vol: 4, pp. 126–136
- [20] S. Kaewunruen, "Experimental and numerical studies for evaluating dynamic behaviour of prestressed concrete sleepers subject to severe impact loading," Doctor of philosophy thesis, Univeristy of Wollongong, New South Wales, Australia, 2007
- [21] H. E. Wolf, "Flexural Behavior Of Prestressed Concrete Monoblock Crossties," (Master of Science Thesis, Graduate College of the University of Illinois, Civil Engineering, Urbana, 2015
- [22] A. M. Guðmundsson, "Prestress losses in railway sleeper production with long bed systems," Master of Science Thesis, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2014.
- [23] A. M. Remennikov, M. H. Murray, S. Kaewunruen, "Conversion of AS1085.14 for prestressed concrete sleepers to limit states design format," *Proceeding of AusRAIL PLUS*, Australia, 2007.
- [24] J. Leong, M. H. Murray, "Probabilistic analysis of train–track vertical impact forces," *Proceedings of the ICE – Transport*, 2008, Vol: 161 (1), pp. 15–21.
- [25] J. Nairn, N. Stevens, "Rational design method for prestressed concrete sleepers," in *Conference on Railway Engineering*, Wellington, Australia, 2010, pp. 174–190
- [26] B. J. Van Dyk, M. S. Dersch, J. R. Edwards, "Technical report," *RailTEC, UIUC International Concrete Crosstie and Fastening System Survey*, USA, 2012
- [27] H. Thun, H. Utsi, L. Elfgren, "Load carrying capacity of cracked concrete railway sleepers," *Structural Concrete*, 2008, Vol: 9 (3), pp. 153–161
- [28] W. Ferdous, A. Manalo, "Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies –review of current practice," *Engineering Failure Analysis*, 2014, Vol. 44, pp. 17–35
- [29] S. Kaewunruen, D. Li, Y. Chen, Z. Xiang, "Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber," *MDPI Materials*, 2018, vol. 11 (7), ID 1169
- [30] R. You, S. Kaewunruen, "Evaluation of remaining fatigue life of concrete sleeper based on field loading conditions," *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 105, pp. 70-86
- [31] S. Kaewunruen, A. M. Remennikov, "Impact capacity of railway prestressed concrete sleepers," *Engineering Failure Analysis*, 2009. vol. 16 (5), pp. 1520-1532
- [32] S. Mohammadzadeh, E. Vahabi, "Time-dependent reliability analysis of B70 pre-stressed concrete sleeper subject to deterioration," *Engineering Failure Analysis*, 2011, vol. 18(1), pp. 421-432
- [33] S. Li, "Railway sleeper modelling with deterministic and non-deterministic support conditions," Master Degree Project, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012
- [34] M. H. Murray, J. Bian, "Ultimate limit states design of concrete railway sleepers," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, August 2012, Issue TR3, Pages 215–223
- [35] A. M. Remennikov, M. H. Murray, S. Kaewunruen, "Dynamic design guidelines for prestressed concrete sleepers," 2008. [Online]. Available (25.11.2021): <https://ro.uow.edu.au/engpapers/492/>
- [36] R. Fico, "Limit states design of concrete structures reinforced with frp bars," PH. D. Thesis, University Of Naples Federico II, Materials And Structures Engineering, 2008
- [37] K. Brózda, J. Selejdak, P. Koteš, "Analysis of the crack width of beams reinforced with FRP bars," *Technical Transactions/Mechanics*, 2018, Vol. 11, pp. 163-168
- [38] F. Çeçen, B. Aktaş, "Lamine cfrp donatılı traverslerin deneysel ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, 2021, vol: 14, pp: 26-38. doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.869946>
- [39] F. Çeçen, B. Aktaş, "Incremental LUR Tests of New LCR Concrete Railway Sleepers," *Engineering Failure Analysis*, 2021, vol: 130, ID: 105793, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105793>
- [40] B. Aktaş, F. Çeçen, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, "Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis," *Engineering Failure Analysis*, 2022, vol. 131, ID: 105821, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105821>
- [41] Sleeper technology, [Online]. Available (25.11.2021): <https://www.p-tec.org/en/sleeper-technology/>

- [42] ITB-Tradetech, [Online]. Available (25.11.2021): <https://www.railway-technology.com/contractors/rail/itb-tradetech/>
- [43] Leeds Live, [Online]. Available (25.11.2021): <https://www.leeds-live.co.uk/news/leeds-news/gallery/leeds-train-station-platform-zero-17493047>
- [44] *Demiryolu uygulamaları - Demiryolu - Beton traversler ve mesnetler- Bölüm 2: Öngerilmeli yekpare traversler*, TS EN 13230-2:2016, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016
- [45] *Demiryolu uygulamaları - Yol - Beton traversler ve mesnetler - Bölüm 3: Donatılı ikiz traversler*, TS EN 13230-3:2016, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016
- [46] *Demiryolu uygulamaları - Hat - Beton traversler ve taşıyıcılar - Bölüm 6: Tasarım*, TS EN 13230-6:2020, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2020

### Özgeçmiş



#### **Ferhat ÇEÇEN**

TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası'nda Üretim Grup Müdürlüğü görevini yürütmekte olan yazar, Erciyes Üniversitesi'nde Ulaştırma alanında doktora eğitimine devam etmektedir. Yerli ileri fonksiyonel malzemelerle milli demiryolu traversleri geliştirilmesi amaçlı ar-ge çalışmaları devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr



#### **Bekir AKTAŞ**

Doktora Eğitimini Süleyman Demirel Üniversitesinde tamamlayan yazar, Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Ulaştırma alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr



#### **Hakan ÖZTÜRK**

Doktora Eğitimini Sakarya Üniversitesinde tamamlayan yazar, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Yapı alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan makaleleri bulunmaktadır.

E-Posta: hakanozturk@sakarya.edu.tr



#### **İrfan Ş. ÖZTÜRK**

Doktora Eğitimine Sakarya Üniversitesinde devam etmekte olan yazar, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dalında öğretim elemanı olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: sehrullahozturk@sakarya.edu.tr



**M. Burhan NAVDAR**

1993 yılında Rize’de doğmuştur. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini Sakarya Üniversitesinde tamamlayan yazar, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında öğretim elemanı olarak görev yapmaktadır.  
E-Posta: navdar@sakarya.edu.tr

**Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.  
Yazarların katkıları: Tüm yazarların eşit katkısı olmuştur.



## Minimum Yayılan Ağaç (MYA) Problemi: Denizli İli Hafif Raylı Sistem Proje Önerisi için Minimum Mesafeli Hat Belirleme

Müge AKAY<sup>1</sup>, Ayşegül TUŞ<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sayısal Yöntemler Bölümü, Denizli, Türkiye

<sup>2</sup> Pamukkale Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Denizli, Türkiye

\*atus@pau.edu.tr

(Alınış/Received: 04.10.2021, Kabul/Accepted: 06.12.2021, Yayımlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Şehir içi ulaşımda hat (güzergâh) belirleme süreci, önemli bir konudur ve bu süreç doğru bir şekilde planlanırsa yapılan yatırım veya kurulan yeni sistem, trafikte iyileşme sağlayacaktır. Bu çalışmanın amacı, şehir içi ulaşımda rahatlık, kolaylık ve zaman tasarrufu sağlamak için Denizli Belediyesi tarafından karayolu ulaşım sistemine alternatif olarak önerilen hafif raylı sistem projesi kapsamında minimum mesafeli bir hat belirlemektir. Bu nedenle hat belirleme, graf yani ağ yapısındaki sistemlerin tasarlanmasında kullanılabilen bir Minimum Yayılan Ağaç (MYA) problemi olarak ele alınmıştır. Problemin çözümünde Prim, Kruskal algoritmaları ve matris yöntemi kullanılmıştır. Her üç yöntem ile optimal sonuç elde edilmiştir. Minimum MYA mesafesi 29,09 km'dir. Ancak söz konusu yöntemler için süreçler; işlem kolaylığı, iterasyon sayısı, karmaşıklıkların minimuma indirilmesi açısından değerlendirildiğinde, daha avantajlı olan matris yönteminin gerçek hayat MYA problemlerinde kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Minimum Yayılan Ağaç, Prim Algoritması, Kruskal Algoritması, Matris Yöntemi, Raylı Sistem

### Minimum Spanning Tree (MST) Problem: Minimum Distance Line Determination for Denizli Light Rail System Project Proposal

**Abstract:** The route determination process is an important issue in urban transportation and if it is planned correctly, the investment or the new system will provide improvement in traffic. The aim of this study is to determine the line with a minimum distance within the scope of the light rail system project proposed by Denizli Municipality as an alternative to the highway transportation system in order to provide comfort, convenience and time saving in Denizli city transportation. So the line determination has been considered as the Minimum Spanning Tree (MST) problem that can be used in the design of systems in graph ie network structure. Prim, Kruskal algorithms and matrix method have been used to solve the problem. Optimal results have been obtained with all three methods. Minimum MST distance is 29,09 km. However, when the processes for these methods are evaluated in terms of ease of operation, number of iterations, and minimization of complexity, it has been concluded that the matrix method, which is more advantageous, would be more appropriate to use in real life MST problems.

**Keywords:** Minimum Spanning Tree, Prim Algorithm, Kruskal Algorithm, Matrix Method, Rail System

#### 1. Giriş

Ülkemizin en önemli sorunlarından biri ulaşımdır. Nüfus artışı, ekonomik büyüme, kentleşme ve sanayileşme ile birlikte her geçen gün daha çok aracın trafiğe çıkması, ulaşım sorununa neden olmaktadır. Özellikle sabah ve akşam iş giriş-çıkış saatlerinde, ulaşımın ana arterlerine yoğun bir talep olmakta ve insanlar, özel araç (otomobil), servis araçları, minibüs, dolmuş ve belediye otobüslerinde oldukça fazla zaman kaybetmektedir. Zaman zaman bu yollar üzerinde trafiği rahatlatmak üzere yapılan seviyeli kavşaklar, ciddi bir şebeke analizi yapılmadan inşa edildiği için geçici bir çözüm olmaktadır. Bu nedenle modern uygulamaları ve teknolojik gelişmeleri göz

Atıf için/Cite as: M. Akay, A. Tuş, "Minimum Yayılan Ağaç (MYA) problemi: Denizli ili hafif raylı sistem proje önerisi için minimum mesafeli hat belirleme," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 111-124, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1004307

önünde bulundurarak verimli ve toplumsal faydayı sağlayan ulaşım sistemleri geliştirilmelidir. Böylece daha hızlı, konforlu, güvenli ve ekonomik ulaşım hizmeti sağlanabilir. Raylı ulaşım sistemi, bu şartları sağlayan karayolu taşımacılığına alternatif modern bir toplu taşımacılık sistemidir. Arazi kullanımı, çevre sağlığı, enerji verimliliği, kaza riski, personel istihdamı, taşıma kapasitesi bakımından daha avantajlı olan bu sistem, ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da işletme giderleri hesaba katıldığında uzun vadede daha ekonomiktir. Bu sistem sayesinde lastik tekerlekli araçlara olan talebin düşmesi, şehir içi trafik probleminin çözümüne olumlu katkıda bulunur [1, 2, 3]. Hafif raylı sistemler, elektrikle çalışan bir demiryolu sistemidir [4]. Metronun yüksek kapasitesini ve teknolojisini kapsamakla beraber tramvayın da yüzeyde gidebilme özelliğine sahiptir [5]. Bu sistemin amacı, hızlı ve güvenli bir şekilde varılmak istenen noktaya ulaşımı sağlayacak bir ulaşım altyapısını kurmak ve yolculuk taleplerini karşılayacak durakları birbirine bağlamaktır.

Raylı sistem için planlanan projelerde, özellikle hat belirlerken çeşitli kriterlerin değerlendirilerek dikkate alınması, ulaşımın iyileşmesi açısından önemlidir. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde Gerçek vd. [6]; finansal (işletme ve bakım maliyetleri, ağ yapım maliyetleri, raylı araç satın alma maliyetleri), ekonomik (karayolu taşıtı işletme ve satın alma maliyetleri, trafik kazası maliyetleri, toplam yolculuk süresi, çevresel maliyet), sistem planlama (kapasite, erişilebilirlik, entegrasyon, alternatif ağ sisteminin ana plana uygunluğu), politika (raylı ulaşım ağının esnekliği, kamulaştırma zorluğu, yapım süresi, mevcut ağ kapasitesinin etkin kullanımı), Ludin vd. [7]; işyerine maksimum rota, minimum rahatsızlık, maksimum hareketlilik, stratejik konumu bağlama, maksimum ağ, asgari arazi edinimi, yapılandırılabilirlik, maksimum etkinlik, Alkubaisi [8], erişilebilirlik (seyahat süresi, arazi kullanımı), emniyet (siyah nokta sayısı, kavşak sayısı, hizalama), çevre (gürültü-titreşim, estetik görünüm), ekonomik (yol uzunluğu, inşaa maliyeti), nüfus gezileri (nüfus yoğunluğu, kabul, gezi sayısı), güvenlik, Kalamaras vd. [9], Hamurcu ve Eren [10, 11, 12]; ekonomik (inşaa maliyeti, kamulaştırma), çevresel etki (arazi yapısı, hassas bölgeler), sosyal etki (istihdam ve eğitim alanlarına erişim, estetik ve görsel etki, nüfus yoğunluğu, alışveriş ve yerleşim alanlarına erişim, kamu hareketliliği, erişilebilirlik), mühendislik (geliştirme ve iyileştirme yeteneği, toplam seyahat zamanı, ulaşım entegrasyon, talepleri karşılama düzeyi), Sarımehmet vd. [13]; yolcu memnuniyeti (hizmet süresi, hizmet sıklığı, kapasite, durak sayısı, direkt gidiş, fiyat), sosyallik (iş ve eğitim bağlantısını sağlaması, alışveriş-yerleşim yerlerine erişimin sağlaması), çevre (trafik, gürültü kirliliği), Banai [14], Brunner vd. [15]; iş merkezleri, düşük gelirli nüfusa hizmet veren yerler, nüfusun yoğun olduğu yerler, işletme ve sermaye maliyeti, toplu taşıma odaklı gelişme potansiyeli, mevcut yolları paylaşma imkanı, trafik problemlerinin olduğu bölgelere hizmet verme, hassas ortamlardan ve tehlikeli bölgelerden kaçınma, çekici yerler, Watanabe vd. [16]; eğitim, kontrol noktası, konut yoğunluğu ve yollara olan mesafe kriterlerini dikkate almıştır.

Bu çalışmada, şehir içi ulaşımı iyileştirmeye yönelik Denizli ilinde yapılması planlanan hafif raylı sistem için minimum mesafeli bir hat belirlenmesi amaçlanmıştır. Hafif raylı sistemde hat belirleme problemini çözmek için öncelikle bir grafa, grafi oluşturmak için ise duraklara ihtiyaç vardır. Bunun için Denizli Belediyesi'nin ulaşımı kolaylaştırmak amacıyla başlattığı "Hafif Raylı Sistem Projesi" dikkate alınmıştır. Denizli Belediyesi, karayolu ulaşım sistemine alternatif olarak önerdiği hafif raylı sistem projesi kapsamında yöneticiler, yolcular ve çevresel faktörleri dikkate alarak Denizli Ulaşım Ana Planı'ndaki koşullar çerçevesinde şehir içi hat alternatiflerini belirlemiştir. Bu çalışmada, Servergazi Devlet Hastanesi-Pamukkale Üniversitesi Kalp Merkezi ana hattı esas alınıp bu hattı içine alan bölgedeki 21 merkezi yer, durak olarak varsayılmıştır. Graf oluşturulduktan sonra hafif raylı sistem için minimum mesafeli hat belirleme problemi, Minimum Yayılan Ağı (MYA) olarak ele alınmıştır.

MYA problemi; ulaşım, lojistik, iletişim ağları tasarımı, su, doğalgaz, elektrik, telefon, internet hatlarının yerleştirilmesi, görüntü işleme, taksonomi, küme analizi, devre tasarımı, kablosuz telekomünikasyon ağ tasarımı, dağıtım sistemleri, sosyo-coğrafi alanların bölgeselleştirilmesi,



alanların homojen, bitişik bölgelere gruplanması, yerleştirilmesi dahil olmak üzere birçok alanda uygulanmıştır [17-18]. Örneğin, yayın probleminde, aynı mesajların iletişim ağı içindeki tüm bilgisayarlara iletilmesi gerekir. Bu tür bir iletişim ağı, MYA problemi olarak modellenilebilir [19]. MYA problemi için çok sayıda algoritma geliştirilmiştir. İlk algoritma, Boruvka (1926) tarafından geliştirilmiştir. Boruvka, çalışmasında Moravia şehri için etkili bir elektrik dağıtım ağı tasarlamayı amaçlamıştır. Prim algoritması, ilk olarak Jarnik (1930) tarafından icat edilmiş, daha sonra Prim (1957) tarafından yeniden formüle edilmiştir. Kruskal algoritması, Kruskal (1956) tarafından geliştirilmiştir. Boruvka (1926) ve Kruskal (1956) gibi iyi bilinen klasik algoritmalar, MYA'yı hesaplamak için ayrık küme birleştirme algoritmalarıdır. Prim (1957) bunu ikili yığın, d-yığın ve f-yığın ile gerçekleştirmiştir. Dijkstra (1959), Sollin (1961), Yao (1975), Cheriton ve Tarjan (1976), Fredman (1987) MYA problemi için farklı algoritmalar önermiştir. Pierce (1975), MYA problemi ile ilgili tüm klasik algoritmaları analiz etmiştir. Haymond, Jarvis ve Shier (1984), MYA algoritmaları için çeşitli hesaplama yöntemleri geliştirmiştir. Fredman ve Tarjan (1985), Prim, Kruskal ve Boruvka algoritmalarından esinlenerek Fibonacci yığınlarını kullanmış ve düğümler arasında daha az iterasyon sayısı veren bir algoritma sunmuştur. Matsui (1994), MYA problemi için doğrusal bir zaman algoritması oluşturmuştur. Yapılan çalışma daha önce Cheriton ve Tarjan (1976)'ın çalışmasına yapısal anlamda benzese de Matsui (1994)'nin algoritması, faaliyetleri yeniden düzeltme zorunluluğu olmadığı için kullanımı daha kolay olup Prim algoritmasına göre daha düşük yayılmayla sonuçlanmıştır. Bader (2006), düzensiz yapıli graflarda kolayca uygulanabilen MYA algoritmasını, Osipov (2009) ise Filter-Kruskal algoritmasını önermiştir [20]. Donkoh [21], Batı Afrika gaz boru hattı projesi için optimum bir boru hattı bağlantısı elde etmek için Prim algoritmasını ve Steiner ağaç algoritmalarını faktör derecelendirme yöntemiyle uygulamış, elde ettiği sonuç ile orijinal ağırlıktan yaklaşık %10,3 azalma sağlamıştır. Arogunde [22], Nijerya'daki eyaletlerden Odeda yerel yönetiminde yerel bir erişim ağını modellemek için Prim algoritmasını kullanmıştır. Çevik vd. [23], MYA problemini kullanarak İç Anadolu Bölgesi'nde bir kargo firmasının dağıtım güzergahını belirlemiştir. Gitonga [24], Kenya'daki Chuka Üniversitesi'nde bir yerel alan ağı tasarlayarak, MYA problemi için Prim algoritmasını uygulamış ve fiber optik ağa sahip düğümler tarafından temsil edilen çeşitli üniversite binaları ara bağlantısının toplam maliyetini en aza indirmeyi başarmıştır. Biswas vd. [20], MYA problemi için döngü algılama tabanlı bir algoritma önermiştir. Bu algoritmanın en büyük avantajı, ağırlıklı grafin kenarlarını sıralama ihtiyacını ortadan kaldırmasıdır. Akpan vd. [25], MYA probleminde Kruskal algoritmasını kullanarak bir yer altı kablo tesisatı için kablo kanallarının üç besleme ucundan ihtiyaç duyulan bir inşaat sahasındaki dört konuma gönderilmesindeki ulaştırma sorununa odaklanmıştır. Marpaung, F. [26], MYA problemlerini çözmek için Prim ve Boruvka algoritmalarını karşılaştırmış ve Prim algoritmasının daha verimli olduğunu göstermiştir. Rachmawati ve Pakpahan [27], MYA probleminin çözümünde Kruskal ve Boruvka algoritmalarını kullanarak karşılaştırmalı bir analiz yapmıştır. Yapılan testler sonucunda Kruskal algoritmasının MYA'yı bulmada Boruvka'dan daha etkili olduğu görülmüştür. Jahan vd. [28], MYA'yı belirlemek için Prim algoritmasından esinlenerek yeni bir yaklaşım olan matris yöntemini önermiştir. Ayrıca derece kısıtlı MYA, olasılıksal MYA, kuadratik MYA, minimum Steiner ağaç problemi, kapasiteli MYA, genelleştirilmiş MYA ve bulanık MYA, MYA'nın uzantıları olan NP-zor problemlerdir ve bu problemleri çözmeyi amaçlayan polinom zamanlı algoritmik yaklaşımlar yoktur [18-19].

Hat belirleme problemi için graf teorisi uygulamalarından MYA kullanılarak yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Çevik vd. [23], bir kargo firmasının İç Anadolu bölgesindeki iller ve bu illerin ilçeleri arasındaki dağıtım hattını MYA ile belirlemiştir. Shahin ve Jaferi [29], Tahran'dan İran'ın il merkezlerine araba aküsü tedarik problemi için bir graf geliştirmiş, sezgisel Prim algoritması kullanarak bu grafin MYA'sını elde etmiştir. Problem, metasezgisel genetik algoritma ile de çözülmüş ve sonuç, Prim algoritması ile karşılaştırılarak büyük problemler için genetik algoritmanın kullanılabileceği gösterilmiştir. Karayollarındaki yük vagonlarının yoğunluğunu azaltmak için karayolu trafiği ve kazaları, yakıt tüketimi ve müşteri teslim süresinin azaltılabileceği bir senaryo önerilmiştir. Zhou vd. [30], bireysel ilgi ve ihtiyaçlara dayalı en uygun

turizm rotasını elde etmek için MYA'yı kullanmıştır. Hem MYA problemi hem de MYA probleminin çözümünde kullanılan algoritmaların gerçek hayatta uygulanabilirliğini göstermesi bakımından yapılan çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışma, matris yönteminin ilk kez Türkçe literatüre kazandırılması açısından da önem taşımaktadır. Ayrıca bu problemin çözümü ile elde edilen MYA yapısı, hafif raylı sistem projesi için minimum mesafeli bir hat belirleme konusunda Denizli Belediyesi'ne bir öneri niteliğindedir. Önerilen hattın gerçek hayatta başarı ile uygulanabildiği takdirde Denizli şehir içi ulaşım problemini büyük oranda çözeceği düşünülmektedir.

Çalışma şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde MYA problemi ve bu problemin çözümünde kullanılan Kruskal, Prim algoritmaları ve matris yöntemi açıklanmıştır. Uygulama bölümünde Denizli ilinde yapılması önerilen bir hafif raylı sistem için MYA olarak ele alınan hat belirleme problemi, ikinci bölümde açıklanan yöntemler ile çözülmüş ve karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar yorumlanmış ve önerilerde bulunulmuştur.

## 2. Metot

MYA, klasik graf teorisinde iyi bilinen şebeke optimizasyon problemlerinden biridir [19]. Graf teorisi, bir toplulukta bulunan nesnel arasındaki ilişkileri modeller. Graf, düğümler ve bu düğümleri birbirine bağlayan kenarlardan oluşan bir tür ağ yapısıdır [31]. Bir graf, her bir kenarı bir sayı (mesafe, maliyet, zaman, miktar gibi) ile ilişkilendirilmişse ağırlıklı, her bir kenarın belirli bir yönü varsa yönlü, belirli bir yönü yoksa da yönsüz bir graftır. Bir graf üzerinde işlem yaparken genelde işlem kolaylığı sağlamak ve güçlü bir temsili veri elde etmek için ağaç yapısına çevrilmektedir. Ağaç yapısı, sahip olduğu düğümler arasındaki kenarlar ile herhangi bir döngü oluşturmayan, yönsüz ve ağırlıklı bir graftır [32]. Diğer bir ifade ile herhangi bir grafın "yayılan ağaç" yapısındaki gösteriminde, çizilen ağaç hiçbir döngü olmaksızın bütün düğümleri kapsamaktadır. Bir graftan birden fazla yayılan ağaç yapısı çıkabilir. Bu ağaç yapılarından, kenar ağırlıklarının toplamı en düşük olan ağaç ise MYA olarak adlandırılmaktadır. Yani bir graf için MYA, diğer her bir kapsayan ağacın ağırlığından daha az veya bu ağırlığa eşit olan bir kapsayan ağaçtır [28]. Bir grafın bütün düğümlerini kapsayan MYA yapısı, graftaki  $n$  adet düğüme sahipse MYA yapısında  $n-1$  kadar da kenar var demektir [32].

MYA, ağacın ağırlığının kenarlarının ağırlıklarının toplamına karşılık geldiği, ağırlıklı, yönsüz ve bağlantılı bir grafın tüm düğümlerini kapsayan minimum ağırlıkta bir ağaç elde etme problemi ile ilgilenir [20]. MYA probleminin çözümü için bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi çok sayıda algoritma vardır. Bu algoritmalar en uygun sonuca ulaşmak için her adımda uygulanacak belirli bir stratejiyi izler ve her adımda, bir sonraki adımları düşünmeden sadece bulunduğu durumdaki en iyi seçeneğe yönelir [33]. Bu çalışmada sadece uygulamada kullanılacak olan Prim, Kruskal algoritmaları ve matris yöntemi açıklanmıştır.

### 2.1. Prim algoritması

Prim algoritması, matematikçi bilim adamı Vojtěch Jarník (1930) tarafından ortaya atılmış, daha sonra Robert C. Prim (1957) ve Edsger W. Dijkstra (1959) tarafından tekrar keşfedilmiştir. Prim algoritmasında aşağıdaki adımlar izlenir [34-35]:

Adım 1: Graftan rastgele bir düğüm seçilerek ağaç oluşturmaya başlanır. Yani MYA başlangıçta sadece seçilen düğümü içerir.

Adım 2: Bu düğümü henüz ağaçta olmayan düğümlere bağlayan kenarlardan minimum ağırlıktaki kenar bulunur ve ağaca eklenir.

Adım 3: Graftaki tüm düğümler ağaçta oluncaya kadar 2. adım tekrarlanır. Bu işlemler yapılırken döngü oluşmamasına dikkat edilmelidir. Tüm düğümler birbirine bağlandığında ağaçtaki kenar sayısı, düğüm sayısının 1 eksiği yani  $n-1$  kadardır ve algoritma sonlandırılır.

## 2.2. Kruskal algoritması

Kruskal algoritması, Joseph Kruskal (1956) tarafından önerilmiştir. Prim algoritmasından tek farkı bir sonraki kenarı nasıl seçtiğidir. Bu algoritmanın adımları aşağıdaki gibidir [33]:

Adım 1: Graftaki bütün kenarlar ağırlıklarına göre küçükten büyüğe doğru sıralanarak S kenarlar kümesi oluşturulur.

Adım 2: Bu kümeden henüz ağaçta olmayan minimum ağırlıklı kenar seçilir. Bu kenarın ağaca katılması, bir döngü oluşmasına sebep olmuyorsa ağaca dahil edilir. Seçilen kenar, bir düğüm oluşmasına sebep olmuyorsa ağaca dahil edilir ve S'den çıkarılır.

Adım 3: Ağaçtaki kenar sayısı, düğüm sayısının 1 eksiği (n-1)'e ulaşana kadar 2. adım tekrarlanır. En son kalan tek ağaç, grafin MYA yapısını temsil eder. S boş küme ve n adet toplam düğüm sayısına karşılık, oluşturulmakta olan MYA yapısına n-1 sayıda kenar eklenmiş ise işlem sonlandırılır.

Prim ve Kruskal algoritmaları ile aynı MYA bulunur. İki algoritma arasındaki fark, Prim algoritmasında eklenecek kenarın ağaca bağlı olması gerekirken Kruskal algoritmasında kenarların aralarında bağlantı olup olmadığına bakılmaksızın yayılan ağaca eklenmesidir [36].

## 2.3. Matris yöntemi

Matris yöntemi, Jahan vd. (2020) tarafından Prim algoritmasından esinlenerek geliştirilmiştir. Yöntemin adımları aşağıdaki gibidir [28]:

Adım 1: Öncelikle düğümler arasındaki kenar ağırlıklarını (mesafeleri) gösteren bir ağırlık (uzaklık) matrisi (D) oluşturulur. n düğümlü bir ağda bağlantısız küme (DC) = {1, ..., k, s, j, ..., n} olarak tanımlanır. Tablo 1'de gösterilen  $D = [d_{ij}]$  ağırlık matrisinde  $d_{ij}$ , i ve j düğümleri arasındaki kenar ağırlığını temsil eder.

**Tablo 1.** Ağırlık matrisi (D)

	1	2	3	...	n
1	-	$d_{12}$	$d_{13}$	...	$d_{1n}$
2	$d_{21}$	-	$d_{23}$	...	$d_{2n}$
3	$d_{31}$	$d_{32}$	-	...	$d_{3n}$
...	...	...	...	...	...
n	$d_{n1}$	$d_{n2}$	$d_{n3}$	...	-

Adım 2: Başlangıç için rastgele seçilen düğüm 1, bağlantılı küme (C)'nin elemanı, ağdaki diğer tüm düğümler ise bağlantısız küme (DC)'nin elemanları olarak düşünülür. 1. iterasyonda, Tablo 2'de görüldüğü gibi ilk satıra düğüm 1 eklenir.

**Tablo 2.** 1. iterasyon  $C = \{1\}$

	1	2	3	...	k	...	n
1	-	$d_{12}$	$d_{13}$	...	$d_{1k}$	...	$d_{1n}$

Adım 3: Düğüm 1'e bağlantısı olan diğer tüm düğümler arasından minimum ağırlık belirlenir. 2. iterasyonda,  $d_{1k}$ 'nin minimum ağırlık olduğu varsayılarak ikinci satıra düğüm k eklenir ve Tablo 3 oluşturulur. Bu durumda k, C'nin elemanı olup DC'den çıkarılır. Tablo 3'te döngüden kaçınmak için  $d_{k1}$  ağırlığı göz ardı edilir ve (-) konulur.

**Tablo 3.** 2. iterasyon  $C = \{1, k\}$ 

	1	2	3	...	k	...	n
1	-	$d_{12}$	$d_{13}$	...	$d_{1k}^*$	...	$d_{1n}$
k	-	$d_{k2}$	$d_{k3}$	...	-	...	$d_{kn}$

Adım 4: Bu işlem, grafın tüm düğümleri  $C'$ 'de olana kadar tekrarlanır. Bir ağda  $n$  adet düğüm varsa, süreci tamamlamak için  $n - 1$  iterasyona ihtiyaç vardır. Genel olarak, herhangi bir iterasyonda,  $C'$ 'deki  $s$  düğümünden en kısa  $d_{sj}$  mesafesine sahip bağlı kümeye girmek için  $j$  seçilirse ve  $i$ ,  $C'$ 'de herhangi bir düğüm ise, sonraki iterasyonda Tablo 4'te gösterildiği gibi  $d_{sj}$  dışında tüm  $d_{ij}$  ve  $d_{ji}$  mesafeleri için (-) konulur. Böylece, her iterasyonda grafın tüm düğümleri  $C'$ 'de olana kadar bir düğüm dahil edilir.

**Tablo 4.** n-1. iterasyon  $C = \{1, k, \dots, s, j\}$ 

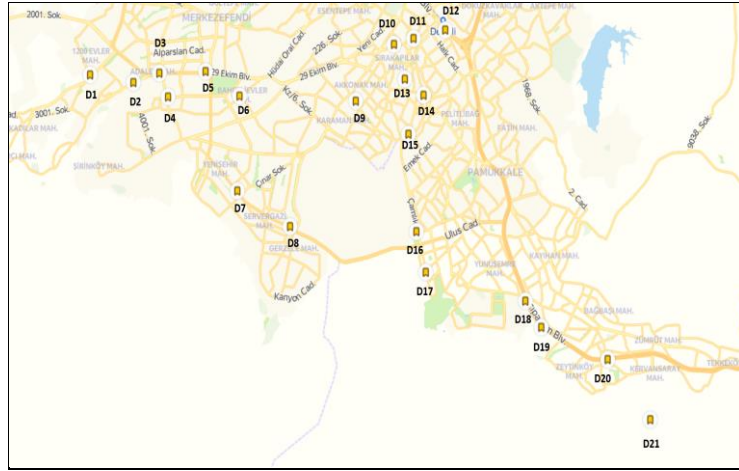
	1	2	3	...	k	...	s	...	j	...	n
1	-	$d_{12}$	$d_{13}$	...	$d_{1k}^*$	...	$d_{1s}$	...	-	...	$d_{1n}$
k	-	$d_{k2}$	$d_{k3}$	...	-	...	-	...	-	...	$d_{kn}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
s	-	$d_{s2}$	$d_{s3}$	...	-	...	-	...	$d_{sj}^*$	...	$d_{sn}$
j	-	$d_{j2}$	$d_{j3}$	...	-	...	-	...	-	...	$d_{jn}$

### 3. Uygulama

Bu çalışmada Denizli'de şehir içi ulaşımda diğer taşıma sistemleri ile entegre olacak şekilde yapılması planlanan hafif raylı sistem projesi için minimum mesafeli bir hat belirleme problemi, MYA olarak ele alınmıştır. Öncelikle hafif raylı sistem için bir graf oluşturulmuştur. Graf oluşturmada Denizli Belediyesi'nin daha önce "Hafif Raylı Sistem Projesi" için hazırladığı fakat uygulamaya geçirmedeği çalışmalar ve şehir haritası dikkate alınmıştır. Belediyenin bu proje için belirlediği hatlardan biri, Servergazi Devlet Hastanesi-Pamukkale Üniversitesi Kalp Merkezi'dir. Yapılan literatür araştırması ve uzman görüşleri doğrultusunda Yandex haritalardan bu hattı içine alan bölgedeki mevcut otobüs durakları da dikkate alınarak belirlenen 21 merkezi yer, grafi oluşturan duraklar olarak varsayılmıştır. Yürüyüş mesafesinde olan birbirine çok yakın mesafeli yerler birleştirilerek tek bir durak olarak düşünülmüştür. Durak olarak varsayılan bu yerler; yolculuk talebinin yüksek olduğu, diğer toplu ulaşım sistemleri ile entegrasyonun sağlandığı, nüfusun yoğun olduğu eğitim, hastane gibi önemli özel ve kamu kurumları, alışveriş merkezleri, sanayi ve ticaret alanları olup literatürde hat belirlemede kullanılan kriterleri destekler niteliktedir. Belirlenen durak isimleri ve kısaltmaları, Tablo 5'te verilmiştir. Bu sisteme ilişkin graf, Şekil 1'de gösterilmiştir. Duraklar arası mesafeler, Yandex haritalar yardımı ile belirlenmiştir. Bu aşamada Yandex haritalardan tüm duraklar, haritada bulunarak işaretlenmiş ve her bir durağın diğer tüm duraklar ile arasındaki mesafeler, km birimi cinsinden hesaplanmıştır. Duraklar arası mesafeyi gösteren D uzaklık matrisi, Tablo 6'da verilmiştir. Problemin çözümünde Prim, Kruskal algoritmaları ve matris yöntemi kullanılmıştır.

**Tablo 5.** Hafif raylı sistem için duraklar

Kısaltma	Duraklar	Kısaltma	Duraklar	Kısaltma	Duraklar
D1	1200 Evler	D8	Başak Kavşağı	D15	Lise Caddesi
D2	Servegazi Devlet Hastanesi	D9	Akkonak Parkı	D16	Tiyatro Kavşağı
D3	Aydem	D10	Devlet Hastanesi	D17	Çamlık Caddesi
D4	Bahçelievler	D11	Bayramyeri	D18	PAÜ Merkez Kampüsü
D5	Adalet Sarayı	D12	Otogar	D19	Cerrahi Hastanesi
D6	Denizli Özel Sağlık Hastanesi	D13	Saltak	D20	Bağbaşı Belediye Kavşağı
D7	Teras Park	D14	Delikliçınar Meydanı	D21	Teleferik

**Şekil 1.** Raylı hat sistemine ilişkin graf**Tablo 6.** D uzaklık matrisi

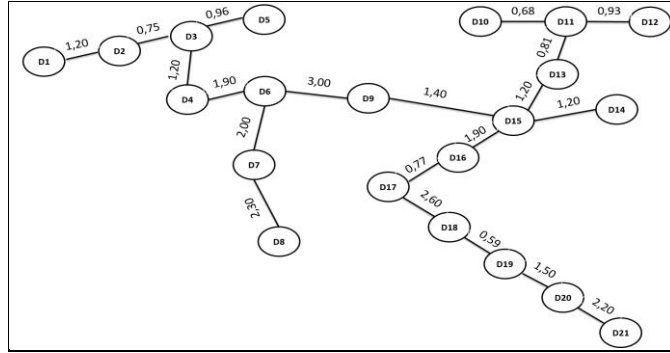
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21
D1	-	1,20	1,80	2,80	2,80	4,60	4,70	7,70	6,50	7,00	7,70	9,20	8,10	8,70	7,90	9,20	10,00	15,00	14,00	15,00	17,00
D2	1,20	-	0,75	1,30	1,50	2,90	3,50	6,10	5,10	5,80	6,50	8,00	6,50	7,50	6,50	8,00	8,50	13,00	12,00	14,00	16,00
D3	1,80	0,75	-	1,20	0,96	2,80	2,90	6,20	4,50	5,20	5,90	7,50	6,40	6,90	6,10	7,40	8,40	13,00	11,00	13,00	15,00
D4	2,80	1,30	1,20	-	1,60	1,90	2,60	4,80	4,70	5,20	5,80	7,40	6,00	7,20	6,00	7,10	7,60	12,00	10,00	12,00	14,00
D5	2,80	1,50	0,96	1,60	-	2,30	2,50	5,40	4,40	5,10	5,60	6,60	5,70	6,80	5,60	6,60	7,40	12,00	11,00	13,00	15,00
D6	4,60	2,90	2,80	1,90	2,30	-	2,00	3,30	3,00	3,70	4,40	6,00	4,30	5,50	4,30	6,00	6,80	12,00	9,90	11,00	14,00
D7	4,70	3,50	2,90	2,60	2,50	2,00	-	2,30	3,40	4,60	5,00	6,50	5,00	5,80	4,30	5,40	4,70	7,40	7,70	9,40	12,00
D8	7,70	6,10	6,20	4,80	5,40	3,30	2,30	-	3,50	4,60	5,30	6,90	5,10	5,80	4,60	3,90	4,40	8,90	8,20	9,10	11,00
D9	6,50	5,10	4,50	4,70	4,40	3,00	3,40	3,50	-	1,50	2,00	3,60	1,60	2,60	1,40	3,10	3,90	8,10	6,20	7,70	11,00
D10	7,00	5,80	5,20	5,20	5,10	3,70	4,60	4,60	1,50	-	0,68	2,20	0,95	2,10	2,10	4,00	4,90	9,10	7,40	8,80	11,00
D11	7,70	6,50	5,90	5,80	5,60	4,40	5,00	5,30	2,00	0,68	-	0,93	0,81	2,10	2,10	4,00	4,90	8,90	6,60	8,10	10,00
D12	9,20	8,00	7,50	7,40	6,60	6,00	6,50	6,90	3,60	2,20	0,93	-	2,40	2,10	3,10	4,80	5,70	7,80	6,00	7,40	9,70
D13	8,10	6,50	6,40	6,00	5,70	4,30	5,00	5,10	1,60	0,95	0,81	2,40	-	1,40	1,20	3,10	4,00	7,70	5,80	7,30	9,60
D14	8,70	7,50	6,90	7,20	6,80	5,50	5,80	5,80	2,60	2,10	2,10	2,10	1,40	-	1,20	3,60	4,50	7,90	5,50	7,00	9,10
D15	7,90	6,50	6,10	6,00	5,60	4,30	4,40	4,60	1,40	2,10	2,10	3,10	1,20	1,20	-	1,90	2,80	6,70	4,80	6,30	8,50
D16	9,20	8,00	7,40	7,10	6,60	6,00	5,40	3,90	3,10	4,00	4,00	4,80	3,10	3,60	1,90	-	0,77	3,30	3,90	5,20	7,60
D17	1,00	8,50	8,40	7,60	7,40	6,80	4,70	4,40	3,90	4,90	4,90	5,70	4,00	4,50	2,80	0,77	-	2,60	3,20	4,70	6,80
D18	1,50	13,00	13,00	12,00	12,00	12,00	7,40	8,90	8,10	9,10	8,90	7,80	7,70	7,90	6,70	3,30	2,60	-	0,59	2,10	4,10
D19	1,40	12,00	11,00	10,00	11,00	9,90	7,70	8,20	6,20	7,40	6,60	6,00	5,80	5,50	4,80	3,90	3,20	0,59	-	1,50	3,80
D20	1,50	14,00	13,00	12,00	13,00	11,00	9,40	9,10	7,70	8,80	8,10	7,40	7,30	7,00	6,30	5,20	4,70	2,10	1,50	-	2,20
D21	1,70	16,00	15,00	14,00	15,00	14,00	12,00	11,00	11,00	11,00	10,00	9,70	9,60	9,10	8,50	7,60	6,80	4,10	3,80	2,20	-

### 3.1. Prim algoritması ile çözüm

Prim algoritması için çözüme rastgele seçilen D1 düğümü ile başlanmıştır. D1 düğümüne en yakın mesafede 1,20 km ile D2 olduğu için D1 düğümü, D2'ye bağlanmıştır. Sonra D1 veya D2 düğümlerinden ulaşılacak en kısa mesafeye bakılmıştır. En kısa mesafe 0,75 km olup D2 düğümü D3 düğümüne bağlanmıştır. D1, D2 ve D3 düğümlerine bakıldığında en kısa mesafenin D3 ve D5 arasındaki 0,96 km olduğu görülmüş ve ağaca D5 eklenmiştir. Çözüme bu şekilde devam edildiğinde 20 iterasyon sonunda tüm düğümler birbirine bağlanmış olup Tablo 7'de görüldüğü gibidir. Bu işlemler yapılırken döngü oluşmamasına dikkat edilmiştir. 20 iterasyon sonunda Şekil 2'deki gibi bir MYA elde edilmiştir. Toplam minimum mesafe 29,09 km'dir.

**Tablo 7.** Prim algoritması hesaplamaları

İterasyon	Kenar	Mesafe	İterasyon	Kenar	Mesafe	İterasyon	Kenar	Mesafe
1	D1-D2	1,20	8	D6-D9	3,00	15	D15-D16	1,90
2	D2-D3	0,75	9	D9-D15	1,40	16	D16-D17	0,77
3	D3-D5	0,96	10	D15-D14	1,20	17	D17-D18	2,60
4	D3-D4	1,20	11	D15-D13	1,20	18	D18-D19	0,59
5	D4-D6	1,90	12	D13-D11	0,81	19	D19-D20	1,50
6	D6-D7	2,00	13	D11-D10	0,68	20	D20-D21	2,20
7	D7-D8	2,30	14	D11-D12	0,93			



**Şekil 2.** Prim algoritması ile elde edilen MYA

### 3.2. Kruskal algoritması ile çözüm

Aynı problem, Kruskal algoritması ile çözülmek istendiğinde öncelikle kenarlar arasındaki mesafeler küçükten büyüğe sıralanarak bir S kenarlar kümesi oluşturulmuştur. Sırasıyla 0,59 km (D18-D19 arası), 0,68 km (D10-D11 arası), 0,75 km (D2-D3 arası), 0,77 km (D16-D17 arası), 0,81 km (D11-D13 arası), 0,93 km (D11-D12 arası) seçilmiştir. 0,93 km'den sonra minimum mesafenin D10 ve D13 düğümleri arasındaki 0,95 km olan kenar olduğu görülmüştür. Fakat bu düğümler, bir döngü yaratacağı için seçilmemiştir. İşlemler, bu şekilde döngü oluşturmadan tüm kenarlar seçilene kadar tekrarlanmış ve Tablo 8'de gösterilmiştir. Kruskal algoritması ile 47. iterasyon sonunda ulaşılan MYA, Prim algoritması ile elde edilen MYA ile aynı olup toplam minimum mesafe 29,09 km'dir.

Tablo 8. Kruskal algoritması hesaplamaları

İterasyon	Kenar	Mesafe	Seçim	İterasyon	Kenar	Mesafe	Seçim
1	D18-D19	0,59	Seçildi	25	D9-D11	2	Seçilmedi
2	D10-D11	0,68	Seçildi	26	D10-D14	2,1	Seçilmedi
3	D2-D3	0,75	Seçildi	27	D11-D14	2,1	Seçilmedi
4	D16-D17	0,77	Seçildi	28	D12-D14	2,1	Seçilmedi
5	D11-D13	0,81	Seçildi	29	D10-D15	2,1	Seçilmedi
6	D11-D12	0,93	Seçildi	30	D11-D15	2,1	Seçilmedi
7	D10-D13	0,95	Seçilmedi	31	D18-D20	2,1	Seçilmedi
8	D3-D5	0,96	Seçildi	32	D10-D12	2,2	Seçilmedi
9	D3-D4	1,2	Seçildi	33	D20-D21	2,2	Seçildi
10	D1-D2	1,2	Seçildi	34	D5-D6	2,3	Seçilmedi
11	D13-D15	1,2	Seçildi	35	D7-D8	2,3	Seçildi
12	D14-D15	1,2	Seçildi	36	D12-D13	2,4	Seçilmedi
13	D2-D4	1,3	Seçilmedi	37	D5-D7	2,5	Seçilmedi
14	D9-D15	1,4	Seçilmedi	38	D9-D14	2,6	Seçilmedi
15	D13-D14	1,4	Seçildi	39	D4-D7	2,6	Seçilmedi
16	D2-D5	1,5	Seçilmedi	40	D17-D18	2,6	Seçildi
17	D9-D10	1,5	Seçilmedi	41	D1-D4	2,8	Seçilmedi
18	D19-D20	1,5	Seçildi	42	D1-D5	2,8	Seçilmedi
19	D4-D5	1,6	Seçilmedi	43	D3-D6	2,8	Seçilmedi
20	D9-D13	1,6	Seçilmedi	44	D15-D17	2,8	Seçilmedi
21	D1-D3	1,8	Seçilmedi	45	D2-D6	2,9	Seçilmedi
22	D4-D6	1,9	Seçildi	46	D3-D7	2,9	Seçilmedi
23	D15-D16	1,9	Seçildi	47	D6-D9	3	Seçildi
24	D6-D7	2	Seçildi				

### 3.3. Matris yöntemi ile çözüm

Matris yöntemi ile çözüm için rastgele seçilen D1 düğümü, ilk satıra eklenerek bir tablo oluşturulmuştur. 1. iterasyonda, D1'e bağlantısı olan diğer tüm düğümler arasından 1,20 km minimum mesafeli D2 seçilmiş ve tablonun ikinci satırına eklenmiştir. 2. iterasyonda D1 ve D2 düğümlerine minimum mesafeli bağlantısı olan 0,75 km ile D3 olup bu düğüm, 3. iterasyonda tablonun üçüncü satırına eklenmiştir. Bu şekilde işlemlere devam edilerek 20 iterasyon sonucunda Tablo 9 elde edilmiştir. Bu yöntem ile yine diğer algoritmalarda olduğu gibi kenarları {(1,2), (2,3), (3,4), (3,5), (4,6), (6,7), (6,9), (7,8), (9,15), (15,13), (15,14), (15,16), (13,11), (11,10), (11,12), (16,17), (17,18), (18,19), (19,20), (20,21)} ve minimum mesafesi 29,09 km olan bir MYA elde edilmiştir.

**Tablo 9.** Kruskal algoritması hesaplamaları

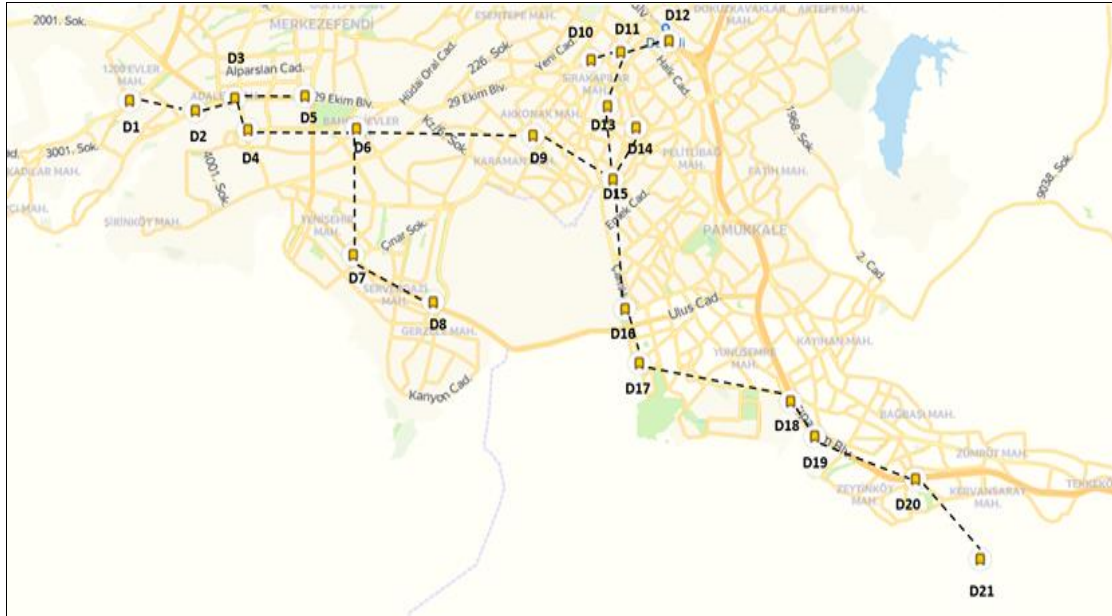
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21
D1	-	1,20*	1,80	2,80	2,80	4,60	4,70	7,70	6,50	7,00	7,70	9,20	8,10	8,70	7,90	9,20	10,00	15,00	14,00	15,00	17,00
D2	-	-	0,75*	1,30	1,50	2,90	3,50	6,10	5,10	5,80	6,50	8,00	6,50	7,50	6,50	8,00	8,50	13,00	12,00	14,00	16,00
D3	-	-	-	1,20*	0,96*	2,80	2,90	6,20	4,50	5,20	5,90	7,50	6,40	6,90	6,10	7,40	8,40	13,00	11,00	13,00	15,00
D5	-	-	-	-	-	2,30	2,50	5,40	4,40	5,10	5,60	6,60	5,70	6,80	5,60	6,60	7,40	12,00	11,00	13,00	15,00
D4	-	-	-	-	-	1,90*	2,60	4,80	4,70	5,20	5,80	7,40	6,00	7,20	6,00	7,10	7,60	12,00	10,00	12,00	14,00
D6	-	-	-	-	-	-	2,00*	3,30	3,00*	3,70	4,40	6,00	4,30	5,50	4,30	6,00	6,80	12,00	9,90	11,00	14,00
D7	-	-	-	-	-	-	-	2,30*	3,40	4,60	5,00	6,50	5,00	5,80	4,30	5,40	4,70	7,40	7,70	9,40	12,00
D8	-	-	-	-	-	-	-	-	3,50	4,60	5,30	6,90	5,10	5,80	4,60	3,90	4,40	8,90	8,20	9,10	11,00
D9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,50	2,00	3,60	1,60	2,60	1,40*	3,10	3,90	8,10	6,20	7,70	11,00
D15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,10	2,10	3,10	1,20*	1,20*	-	1,90*	2,80	6,70	4,80	6,30	8,50
D14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,10	2,10	2,10	1,40	-	-	3,60	4,50	7,90	5,50	7,00	9,10
D13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,95	0,81*	2,40	-	-	-	3,10	4,00	7,70	5,80	7,30	9,60
D11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,68*	-	0,93*	-	-	-	4,00	4,90	8,90	6,60	8,10	10,00
D10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,20	-	-	-	4,00	4,90	9,10	7,40	8,80	11,00
D12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,80	5,70	7,80	6,00	7,40	9,70
D16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,77*	3,30	3,90	5,20	7,60
D17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,60*	3,20	4,70	6,80
D18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59*	2,10	4,10
D19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,50*	3,80
D20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,20*

### 3.4. Karşılaştırmalı Analiz

MYA problemini çözmek için kullanılan Prim ve Kruskal algoritmaları ile matris yöntemi karşılaştırıldığında toplam minimum MYA mesafesi 29,09 km'dir. Şekil 3'te, elde edilen MYA'nın harita görüntüsü verilmiştir. Her üç yöntemde aynı MYA ve optimal sonuç elde



edilmesine rağmen süreçler farklıdır. Yöntemlerin, süreç bazında karşılaştırması Tablo 10'daki gibidir. Tablo 10'da görüldüğü gibi matris yönteminin avantajı, Prim ve Kruskal algoritmalarının aksine her iterasyonda grafla çalışmaya gerek olmamasıdır. Bu yöntemde öncelikle uzaklık matrisi belirlendikten sonra problem, mesafeler kullanılarak çözülür. Bu yöntem için gereken iterasyon sayısı, Prim algoritması ile aynı iken Kruskal algoritmasından daha azdır, fakat işlem kolaylığı düşünüldüğünde Prim algoritmasından daha pratiktir. Prim algoritması, her iterasyonda bir ağaç oluşturarak çalışmaktadır. Ancak Kruskal algoritmasının bazı iterasyonları ağaç olmayan, orman olarak tanımlanan yapıyı oluşturabilir. Ayrıca Prim algoritması ve matris yöntemi ile Kruskal algoritmasının aksine graftaki herhangi bir düğüm seçilerek çözüme başlanabilir. Bu çalışmada 21 düğüm göz önüne alındığında, birçok kısıt eklenmesi gerektiği için oluşturulan model çok karmaşık olacaktır. Prim algoritması ile çözümde daha fazla düğüm olduğu varsayılırsa, çözümün ilerleyen aşamalarında birçok düğüme bakılarak bunlar arasındaki minimum mesafenin bulunması gerektiği için bazı düğümlerin gözden kaçırılacağı düşünülmektedir. Kruskal algoritmasında ise S kenarlar kümesi oluşturulduğu için düğüm sayısı artsa bile minimum mesafenin gözden kaçırılması ihtimali azalmaktadır.



Şekil 3. MYA harita görüntüsü

Tablo 10. Yöntemlerin süreç bazında karşılaştırması

	Prim Algoritması	Kruskal Algoritması	Matris Yöntemi
Her iterasyonda grafla çalışmaya gerek var mı?	Evet	Evet	Hayır
Graftaki herhangi bir düğüm seçilerek çözüme başlanabilir mi?	Evet	Hayır	Evet
İterasyon sayısı	20	47	20
İşlem kolaylığı	Zor	Zor	Kolay

#### 4. Sonuç

Şehir içi ulaşımda, ulaşım sistemlerinin sürücü ve araç odaklı olmaktan ziyade trafikte geçirilen sürenin azaltılmaya çalışılarak şehirde yaşayanların hızlı, konforlu ve güvenli bir şekilde ulaşımına öncelik verilerek planlanması, şehir içi ulaşımda memnuniyetin sağlanması açısından önem arz etmektedir. Son yıllarda Denizli ilinde artan nüfus nedeniyle oluşan trafik yoğunluğunda iyileşme sağlamak için ulaşım yatırımları, yeni ulaşım planlama kararları

çerçevesinde mevcut ulaşım sistemleri ile birlikte çalışan toplu ulaşım odaklı hafif raylı sistemler olarak düşünülmektedir. Bu sebeple bu çalışmada yapılması planlanan hafif raylı sistem için minimum mesafeli bir hat belirleme problemi, MYA olarak ele alınmıştır. Literatüre bakıldığında MYA'yı çözmek için bir dizi algoritma geliştirildiği görülmektedir. Bu çalışmada çözüm analizinde literatürde en yaygın kullanılan Prim ve Kruskal algoritmaları ile Prim algoritması fikrinden esinlenerek yakın zamanda önerilen matris yöntemi dikkate alınmıştır. Söz konusu problem, mevcut ağda çözümlenerek aynı MYA elde edilmiş ve toplam minimum MYA mesafesi 29,09 km olarak hesaplanmıştır. Ancak her üç yöntemde aynı MYA ve optimal sonuç elde edilmesine rağmen süreçler farklıdır. Sonuç olarak matris yönteminin çözümü, Prim ve Kruskal algoritmalarına göre daha kolaydır ve gerçek hayatta bu konu ile ilgili yapılacak çalışmalarda rahatlıkla kullanılabilir. Bundan sonraki MYA ile ilgili çalışmalar için problemde çok fazla kenar sayısı varsa işlem kolaylığı, iterasyon sayısı, karmaşıklıkların minimuma indirilmesi açısından matris yönteminin kullanılması önerilebilir.

Çalışmada belirlenen hafif raylı sistem hattı, belediyenin başlatmış olduğu hafif raylı sistem projesi ile uyumlu olup sadece bir öneri niteliğindedir. Durak sayısı ve durak yerleri değiştirilerek duyarlılık analizleri yapılabilir. Böylece, minimum mesafeli hattaki değişimler izlenerek bunlar arasından optimal olan hat belirlenebilir. Yapılan çalışmada temel amaç, MYA problemi ile minimum mesafeli bir hat belirlemek olup çalışmanın bazı sınırlılıkları vardır. Durak yerlerini belirlemek, hattın etkinliği bakımından önemli olup çok ciddi bir süreç ve konu ile ilgili teknik bilgi gerektiren ayrı bir çalışma konusudur. Bu çalışmada, yapılan literatür araştırması ve uzman görüşleri doğrultusunda grafi oluşturmak için belediyenin planladığı hattı içine alan bölgedeki mevcut otobüs durakları da dikkate alınarak belirlenen 21 merkezi yer, grafi oluşturan duraklar olarak varsayılmıştır. Bu yerler; yolculuk talebinin yüksek olduğu, diğer toplu ulaşım sistemleri ile entegrasyonun sağlandığı, nüfusun yoğun olduğu eğitim, hastane gibi önemli özel ve kamu kurumları, alışveriş merkezleri, sanayi ve ticaret alanlarıdır. Farklı kriterler dikkate alınarak farklı yöntemler ile uzman bilgisi dahilinde durak yerleri yeniden belirlenebilir. Bunun için matematiksel modeller kurulabilir. Ayrıca hat belirleme, sadece hat mesafesine bağlı olmayıp maliyet, süre gibi farklı değişkenler de dikkate alınabilir. İleriki çalışmalarda, konu ile ilgili raylı sistem tasarım uzmanları, belediye yöneticileri ve akademisyenler ile disiplinlerarası daha detaylı bir çalışma/proje yapılabilir.

Denizli iline ait trafik sorunları düşünüldüğünde bölgeye raylı sistem hizmetinin sunulmasının şehir içi trafikte bir iyileşme sağlayacağı muhakkaktır. Fakat bu çok önemli bir iş gücü, çok büyük bir bütçe ve uzun bir süreç gerektirmektedir. Bir raylı sistem hattının hayata geçirilmesi, uzunluğuna ve durak sayısına göre bazen yıllar alabilmektedir. Raylı sistemlerin yatırım maliyetleri; genel olarak hatta, hattaki tünel, viyadük ve yüzey kesimlerinin uzunluklarına, zemin cinsine ve yapılış şekline bağlı olarak değişmektedir. Bunun için öncelikle bölge ile ilgili jeolojik ve jeoteknik etüd yapılmalı, raylı sistemin geçeceği yolun eğimi, virajı, elektrifikasyon sistemi gibi kriterler dikkate alınmalıdır. Kısaca, böyle bir yatırım kararı alınırken ekonomik, sosyal ve çevresel kriterler birlikte değerlendirilmelidir.

### Kaynakça

- [1] A.Y. Gündüz, M. Kaya, C. Aydemir, "Kentiçi ulaşımında karayolu ulaşımına alternatif sistem: Raylı ulaşım sistemi", *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, cilt 2, sayı 1, ss. 134-151, 2011.
- [2] H. G. Önder, F. Ademar, "Türkiye'deki kentiçi raylı toplu taşıma sistemlerinin ulaşım ana planları bağlamında değerlendirilmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sayı 10, ss. 31-45, 2019.
- [3] H. Kutlu, H. Ulvi, F. Akdemir, "Gelişmekte Olan Ülkelerde Raylı Sistem Yatırım Kararlarını Etkileyen Ölçütlerin Belirlenmesi: AB ve Türkiye Özelinde Bir Araştırma", *Demiryolu Mühendisliği*, sayı 9, ss. 61-78, 2019.
- [4] S. T. Altuntaş, Y. Eyigün, "Sürdürülebilir kentiçi ulaşım politikaları raylı sistemler örneği", *Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, cilt 3, sayı 2, ss. 217-233, 2021.

- [5] S. Şahin, “Malatya’da kentiçi ulaşım ve toplu taşıma sistemlerinin karşılaştırmalı incelenmesi: Trambüs ve hafif raylı sistem örneği”, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Malatya, 2020.
- [6] H. Gerçek, B. Karpak, T. Kılınçaslan, “A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transit networks in Istanbul”, *Transportation*, vol. 31, no. 2, pp. 203-228, 2004.
- [7] A. Ludin, S. Latip, “Using multi-criteria analysis to identify suitable light rail transit route”, *Jurnal Alam Bina*, vol. 9, no. 1, pp. 131-142, 2007.
- [8] M. I. T. Alkubaisi, “Predefined evaluating criteria to select the best tramway route”, *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 211-217, 2014.
- [9] G. S. Kalamaras, L. Brino, G. Carrieri, C. Pline, P. Grasso, “Application of multicriteria analysis to select the best highway alignment”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 415-420, 2000.
- [10] M. Hamurcu, T. Eren, “Ankara Büyükşehir Belediyesi’nde çok ölçütlü karar verme yöntemi ile monoray güzergâh seçimi”, *Transist*, sayı 8, ss. 410-419, 2015.
- [11] M. Hamurcu, T. Eren, “Using ANP-TOPSIS methods for route selection of monorail in Ankara”, *In 28th European Conference on Operational Research*, Poznan, Poland, 2016, pp. 3-6.
- [12] M. Hamurcu, T. Eren, “Raylı sistem projeleri kararında AHS-HP ve AAS-HP kombinasyonu”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 3, sayı 3, ss.1-13, 2017.
- [13] B. Sarimehmet, M. Hamurcu, E. Tamer, “Çok kriterli karar verme: Kırıkkale YHT istasyonu-şehir bağlantısının sağlanması”, *Demiryolu Mühendisliği*, sayı 11, ss. 26-40, 2020.
- [14] R. Banai, “Public transportation decision-making: A case analysis of the Memphis light rail corridor and route selection with analytic hierarchy process”, *Journal of Public Transportation*, vol. 9, no. 2, pp. 1-24, 2006.
- [15] I. M. Brunner, K. Kim, E. Yamashita, “Analytic hierarchy process and geographic information systems to identify optimal transit alignments”, *Transportation Research Record*, vol. 2215, no. 1, pp. 59-66, 2011.
- [16] K. Watanabe, K. Gotoh, K. Tachiiri, “Route selection for a new transportation system in hillside urban areas: A case study in Nagasaki, Japan”, *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 132, no. 2, pp. 89-96, 2006.
- [17] R. L. Graham, P. Hell, “On the history of the minimum spanning tree problem”, *Annals of the History of Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 43-57, 1985.
- [18] P.C. Pop, “The generalized minimum spanning tree problem: An overview of formulations, solution procedures and latest advances”, *European Journal of Operational Research*, vol. 283, no. 1, pp.1-15, 2020.
- [19] A. Dey, A. Pal, H. V. Long, “Fuzzy minimum spanning tree with interval type 2 fuzzy arc length: formulation and a new genetic algorithm”, *Soft Computing*, vol. 24, no. 6, pp. 3963-3974, 2020.
- [20] O. P. Biswas, M. Goel, H. Negi, M. Datta, “An efficient greedy minimum spanning tree algorithm based on vertex associative cycle detection method”, *Procedia Computer Science*, vol. 92, pp. 513-519, 2016.
- [21] E. K. Donkoh, S. K. Amponsah, K. F. Darkwah, “Optimal pipeline connection for the West African gas pipeline project”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 67-73, 2011.
- [22] O. T. Arogundade, B. Sobowale, A. T. Akinwale, “Prim algorithm approach to improving local access network in rural areas”, *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 3, no.3, pp. 413-417, 2011.
- [23] Çevik, S. S. Karaca, M. Özkan, “En küçük yayılma modeli ile İç Anadolu Bölgesinde bir kargo firmasının dağıtım güzergâhının belirlenmesi”, *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, cilt 2011, sayı 2, ss. 1-9, 2011.
- [24] C. K. Gitonga, “Prims algorithm and its application in the design of university LAN networks”, *International Journal*, vol. 3, no. 10, pp. 131-136, 2015.
- [25] N. P. Akpan, I. A. Iwok, “A minimum spanning tree approach of solving a transportation problem”, *International Journal of Mathematics and Statistics Invention*, vol. 5, no. 3, pp. 09-18, 2017.
- [26] F. Marpaung, “Comparative of Prim’s and Boruvka’s algorithm to solve minimum spanning tree problems”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1462, IOP Publishing, 2020. doi:10.1088/1742-6596/1462/1/012043
- [27] D. Rachmawati, F. Y. P. Pakpahan, “Comparative analysis of the Kruskal and Boruvka algorithms in solving minimum spanning tree on complete graph”, in *International Conference on Data Science, Artificial Intelligence, and Business Analytics (DATABIA)*, 2020, IEEE, pp. 55-62.

- [28] S. Jahan, T. Hossain, F. A. Simi, “Matrix method for determining minimum spanning tree”, *Journal of Applied Mathematics and Computation*, vol. 4, no. 4, pp. 118-122, 2020.
- [29] A. Shahin, F. Jaferi, “The shortest route for transportation in supply chain by minimum spanning tree”, *International Journal of Logistics Systems and Management*, 22(1), 43-54, 2015.
- [30] X. Zhou, J. Yang, J. J. Wu, Z. G. Shi, K. L., Gao, H. W., Liu (2018), “Interest tourism route plan algorithm based on improved minimum spanning tree”, *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, International Conference on Modeling, Simulation and Optimization (MSO 2018)*, ISBN: 978-1-60595-542-1, 270-273.
- [31] K. A. Tin, “Applications of the shortest spanning tree and path on graph theory”, *IRE Journals*, vol 1, no. 2, pp. 3-6, 2019.
- [32] J. A. Bondy, U. S. R. Murty, *Graph theory with applications*. London: Macmillan Press, 1976.
- [33] J. B. Kruksal, “On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem”, *Proceedings of the American Mathematical Society*, vol. 7, no. 1, pp. 48-50, 1956.
- [34] R. C. Prim, “Shortest connection networks and some generalizations”, *The Bell System Technical Journal*, vol. 36, no. 6, pp. 1389-1401, 1957.
- [35] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs”, *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269-271, 1959.
- [36] G. D. Kurt, “Kablosuz ağlarda en az kesinti ihtimalli işbirlikli yol atama”, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.

### Özgeçmiş



#### Müge AKAY

1994 tarihinde doğmuştur. Lisans Eğitimini Ege Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Pamukkale Üniversitesi'nde sayısal yöntemler alanında yüksek lisans yapmaktadır. İç denetim uzmanı olarak çalışmaktadır.

E-Posta: makay202@posta.pau.edu.tr



#### Ayşegül TUŞ

1980 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Pamukkale Üniversitesi'nde çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları; yöneylem araştırması, karar verme ve bulanık mantıktır.

E-Posta: atus@pau.edu.tr

### Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Müge AKAY: Fikir oluşturma, literatür taraması, metodoloji, görselleştirme, yazma. Ayşegül TUŞ: Taslak hazırlama, kaynak inceleme, doğrulama, kontrol, elde edilen sonuçları değerlendirme.



## Tünel Projelendirilmesinde Kullanılan Yöntemler (Ampirik, Analitik ve Nümerik Yöntemler), Kısıtlamaları, Karşılaştırılması ve Öneriler

Ebu Bekir AYGAR 

*Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti. Ankara, Türkiye*

eaygar@gmail.com

*(Alınış/Received: 30.11.2021, Kabul/Accepted: 06.01.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2022)*

**Öz:** Son dönemlerde altyapı çalışmalarına ağırlık verilmiş olan ülkemizde tünelcilik faaliyetleri çok hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Özellikle Yüksek Hızlı Demiryolu Projelerinde güzergahın kısıtlamalarından dolayı tünel sayısının arttığı daha net görülmüştür. Ülkemizdeki büyük alt yapı projelerinden olan Ankara İstanbul, Bursa Yenişehir, Ankara Konya, Kars Tiflis, Ankara Sivas ve Ankara İzmir arası Yüksek Hızlı Tren Projelerinde kazı çalışmaları devam etmektedir. Bu kesimlerde yer alan tünellerden bir kısmı tamamlanmış olup diğerlerinde kazı çalışmaları devam etmektedir. Söz konusu büyük projelerden edinilen tecrübeler ile bu çalışmada kapsamında tünel projelendirilmesi sırasında takip edilen yöntemler anlatılarak yöntemlerdeki kısıtlamalar, avantajlar ve dezavantajlar değerlendirilecektir.

**Anahtar kelimeler:** Tünel projelendirilmesi, Kaya sınıflandırma sistemleri, Analitik yöntemler, Nümerik yöntemler.

### Methods Used in Tunnel Design (Empirical, Analytical and Numerical Methods), Limitations, Comparison and Suggestions

**Abstract:** Tunneling activities have increased rapidly in our country, which has recently focused on infrastructure works. Especially in High Speed Railway Projects, this situation has been seen more clearly due to the restrictions of the route. Excavations continue in High Speed Railway Projects between Ankara İstanbul, Bursa Yenişehir, Ankara Konya, Kars Tbilisi, Ankara Sivas and Ankara İzmir, which are among the major infrastructure projects in our country. Some of the tunnels in these sections have been completed and excavations are continuing in the others. The experiences gained from these big projects and the methods followed during the tunnel design will be explained within the scope of this study, and the limitations, advantages and disadvantages of the methods will be evaluated.

**Keywords:** Tunnel project, Rock Mass Classification system, Analytical methods, Numerical methods.

## 1. Giriş

Tünelcilik yüzyıllar öncesinden gelişmeye başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. İlk dönemlerde barınma ve korunma amacıyla açılan tüneller sağlam kayalarda açılmıştır. Sonraki dönemlerde ise ulaşım, sulama gibi faaliyetleri için açılmaya başlamıştır. 1900'lü yıllarda artan sanayileşmeye bağlı olarak tünelcilik faaliyetleri hızlanmıştır. Tünel kaya sınıflama sistemleri ise bu çalışmalara bağlı olarak gelişmiştir. Terzaghi [1], Deere [2], Bieniawski [3], [4], [5], Barton vd [6], [7], [8], Rabcewicz [9], [10], [11] Palmstrom [12] Hoek ve Brown [13], [14] tünel kaya sınıflamaları için çok önemli çalışmalar yapmışlardır. Yapılan bu çalışmalar günümüz tünel projelendirme aşamalarında kullanılmaktadır.

Bu çalışmalarda Terzaghi [1] tünel üzerindeki kaya yüküne bağlı olarak çelik iksaları boyutlandırmıştır. Bu çalışma tünelcilik açısından en önemli çalışmalardan birisidir [15]. Deere [2] ise sondajlarda, kaya kütlelerinin süreksizlik özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan karot verimini esas alan kaya kalite göstergesini (RQD) tanımlamıştır. Bieniawski [3], [4], [5], kaya kütle puanı (RMR) sistemini geliştirmiş ve günümüzde hala en çok kullanılan kaya kütlelerinin

Atıf için/Cite as: E. B. Aygar, "Tünel projelendirilmesinde kullanılan yöntemler (ampirik, analitik ve nümerik yöntemler), kısıtlamaları, karşılaştırılması ve öneriler," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 125-133, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1030404

jeomekanik özelliklerine dayalı puanlama sistemi geliştirerek, günümüzde tünel çalışmalarında en çok kullanılan sınıflama sistemi olan, kaya kütlesi sınıflama sistemini (RMR) geliştirmiştir. Bieniawski [3] ilk çalışmasını 1973 yılında yayınlamış ve 1989 yılında [5] RMR sisteminin son haline getirmiştir. Barton vd [6], [7], [8] 1973 yılından 1989 yılına kadar yaptığı çalışmalar ile Q sistemini geliştirmişlerdir. Rabcewiz [9], [10], [11] 1964'lü yıllardan itibaren Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi'nin (NATM) temellerini atmış, sonrasında Rabcewicz ve Golser [15], Müller [16] de NATM'in prensiplerini belirlemişlerdir. İlerleyen dönemlerde ise Palmstrom [12] kaya kütle indeksi (RMI) üzerine çalışmış olup Hoek ve Brown [14] jeolojik dayanım indeksi (GSI) değerini belirleyerek kaya kütle sınıflama sistemlerine önemli katkılarda bulunmuşlardır.

Kaya kütle sistemlerine bağlı olarak analitik çözümlerde 1900'lü yıllardan itibaren gelişmeye başlamıştır. Bu yöntemlerde ortamın izotrop, homojen ve tünelin dairesel olduğu prensipler üzerinden gidilerek tünel çevresinde ve zeminde deformasyon gerilme ilişkileri elde edilmiştir [17], [18], [19], [20], [21].

Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesine bağlı olarak 1980'li yıllardan itibaren de sayısal (nümerik) çözümler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde sonlu elemanlar, sonlu farklar, ayrık elemanlar ve hibrit elemanlar [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28] kullanılarak tünel ile kaya ortamı modellenerek çok daha kesin çözümlere ulaşılmıştır. Günümüz tünel projelendirme aşamalarında bu üç yöntem beraber kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında tünel projelendirme çalışmalarında kullanılan bu yöntemler hakkında bilgiler verilecek ve her bir yöntemin avantaj ve dezavantajları üzerinde durulacaktır. Ayrıca ampirik yöntemlerdeki kısıtlamalar hakkında bilgiler verilecektir.

## 2. Ampirik Yöntemler

Bu bölümde kaya sınıflama sistemi olarak kullanılan ampirik metotların kısıtlamaları üzerinde durulacaktır. Ayrıca her bir metodun destek önerileri ve temel aldığı parametreler açıklanacaktır.

### 2.1. Terzaghi kaya sınıflama sistemi

Terzaghi [1] yapmış olduğu çalışmada tünel kaya sınıflama sistemi olarak 9 ana bölüme ayırmıştır. Burada sağlam kayadan şişen kayaya kadar bölümlendirmiş ve her bir sınıf için destek sistemi önerilerini vermiştir. Burada tünel yükseklik ve çapına bağlı olarak tünel üzerine gelen yükü belirlemiş ve çelik tahkimat tipleri hakkında öneri sunmuştur. Terzaghi [1] kaya sınıflama sistemi, klasik olarak açılan delme ve patlatma yöntemi ile açılan tünellerde çelik iksalar üzerine önerileri vardır. Çelik iksa haricinde günümüzde kullanılan bulon, püskürtme beton, hasır çelik, çelik tel için bir önerisi o dönem içerisinde önerisi yoktur.

### 2.2. Kaya kalite indeksi (RQD)

Deere [2] sondaj karotları kalitesine göre bir sınıflandırma geliştirmiştir. Burada RQD belirlenirken sondaj karotlarından elde edilen 10 cm'den büyük örneklerin toplamının toplam karot uzunluğuna bölünmesi ile yüzde olarak hesaplanır. Denklem 1. de RQD değerinin hesaplanması verilmiştir. Tablo 1. de RQD ve kaya kalitesi ilişkisi verilmiştir.

$$RQD = \frac{10 \text{ cm den büyük örneklerin uzunluklarının toplamı}}{\text{toplam sondaj uzunluğu}} * 100 \quad (1)$$

Belirlenen RQD değerine göre kaya kalitesi 5 ana bölüme bölünmüştür.

**Tablo 1.** RQD ve kaya kalitesi ilişkisi [2]

	RQD (%)	Kaya Kalitesi
1	<25	Çok zayıf
2	25-50	Zayıf
3	50-75	Orta
4	75-90	İyi
5	90-100	Mükemmel

Deere [2] burada sadece kaya kalitesini belirlemek amacıyla sınıflandırma sistemi geliştirmiştir.

### 2.3. RMR kaya sınıflama sistemi

Bineniawski [3], [4], [5], 1973 yılından 1989 yılına kadar geçen sürede RMR sisteminin son haline ulaşmıştır. Burada RMR sistemi 6 ana girdi parametresi vardır. Tablo 2’de sunulan bu girdi parametreleri ayrı ayrı puanlanarak RMR değerine ulaşılmaktadır. RMR değerlerine göre de tünel 5 ana kaya sınıfına ayrılmış (Tablo 3) ve her bir kaya sınıfı içinde 5 destek sistemi önerilmektedir (Tablo 4).

**Tablo 2.** RMR kaya sınıflama sistemi girdi parametreleri [5]

No	Girdi parametresi
1	Tek eksenli basınç direnci (UCS)
2	Kaya kalite göstergesi (RQD)
3	Süreksizlik aralığı
4	Süreksizlik koşulları
5	Yeraltı suyu durumu
6	Süreksizlik yönelimi

**Tablo 3.** RMR kaya sınıflama sistemi [5]

Kaya numarası	sınıfı	RMR Puanı	Kaya Sınıfı
1		81-100	Çok iyi kaya
2		61-80	İyi kaya
3		41-60	Orta kaya
4		21-40	Zayıf kaya
5		0-20	Çok zayıf kaya

**Tablo 4.** Tünel destek sistemi önerisi [5]

Kaya kütle sınıfı	Kazı	Kaya bulonu (20 mm çaplı, enjeksiyonlu)	Püskürtme beton	Çelik iksa
I-Çok iyi kaya RMR:81-100	Tam kesit 3 m ilerleme	Genellikle destek gerekmez sadece yerel bulonlama		
II-İyi kaya RMR:61-80	Tam kesit 1-1,5 m ilerleme. Tünel aynası gerisinde tünel destekleri tamamlanmış olacak.	Tavan kesiminde 2,5 m aralıklı 3 m uzunlukta bulonlar+hasır çelik	Tavanda gerekmesi durumunda 50 mm kalınlıkta püskürtme beton	Yok
III-Orta kaya RMR:41-60	Üst yarı ve alt yarı. 1,5-3,0 m ilerleme. Tüm destekler aynanın 10 m gerisinde tamamlanmış olacak.	1,5-2,0 m aralıklı 4 m uzunluğunda sistematik bulonlar, tavanda hasır çelik	Tavan kesiminde 50-100 mm alt yarı kesimlerinde 30 mm püskürtme beton	Yok

IV-Zayıf kaya RMR:21-40	Üst yarı ve alt yarı. 1,0-1,5 m ilerleme. Tüm destekler aynanın 10 m gerisinde tamamlanmış olacak.	1-1,5 m aralıklı 4- 5 m uzunluğunda sistemik bulonlar ve üst yarı ve alt yarıda hasır çelik	Tavanda 100-150 mm alt yarıda 100 mm püskürtme beton	Gerektiği yerde 1,5 m aralıklı hafif-orta çelik iksalar
V-Çok zayıf kaya RMR<20	Kademeli kazı. 0,5-1,5 m ilerleme. Destekler kazıdan hemen sonra tamamlanacak. Püskürtme beton patlatmadan hemen sonra yapılacak	1-1,5 m aralıklı 5- 6 m uzunluğunda sistemik bulonlar ve hasır çelik. İntert kesiminde bulon uygulanacak	Tavanda 150-200 mm püskürtme beton, 150 mm alt yarıda ve 50 mm aynada	Orta-ağır çelik iksalar, 0,75 m aralıklı, gerekmesi durumunda süren. İntert ile tünel kapatılacak.

Bieniawski [5] RMR kaya sınıflama sisteminde RMR’de destek sistemi önerisi, başlıca; at nalı tünel kesiti ile en büyük 10 m tünel açıklığı ve 25 MPa düşey gerilme koşullarıyla sınırlıdır. Ayrıca, önerilen destek sistemleri incelendiğinde, püskürtme beton kalınlığı, bulon uzunluğu, çelik iksa tip önerilerinde bir aralık tanımlandığı ve kesin bir boyutlandırma vermediği görülmektedir. Ayrıca önerilen destek sistemleri incelendiğinde kesin bir boyutlandırma vermediği görülmektedir. Püskürtme beton kalınlığı, bulon uzunlukları, çelik iksaların tipi belirtilirken bir aralık vermektedir. Kesin bir boyut mevcut değildir. Bununla beraber kaya sınıfları belirlenirken RMR puanı aralığı 20 olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile, RMR değeri 61 de iyi kaya 80 de iyi kayadır ve aynı destek sistemi önerilir. Benzer şekilde RMR değeri 60 ise orta kaya 61 ise iyi kaya olarak sınıflandırılır ve farklı destekler önerilir.

#### 2.4. Q sistemi

Barton vd [6] 200’e yakın tünel ve yeraltı açıklıklarına yapmış oldukları çalışmalarda Q sistemini geliştirmişlerdir. Q değerinin belirlenmesinde 6 adet girdi parametresi kullanılmakta olup Denklem 2. de verilmiştir.

$$Q = \left( \frac{RQD}{Jn} \right) * \left( \frac{Jr}{Ja} \right) * \left( \frac{Jw}{SRF} \right) \quad (2)$$

Burada

RQD=kaya kalite göstergesi

Jn= eklem takım sayısı

Jr=eklem pürüzlülük sayısı

Ja=eklem alterasyon sayısı

Jw=eklem su azaltma faktörü

SRF=gerilim indirgeme faktörüdür.

Belirlenen Q değeri, açılacak olan tünelin çapının veya yüksekliğinin tünel tipine göre belirlen kazı destek oranına bölünmesi ile elde edilen orana göre destek sistemi belirlenir (Tablo 5). Q sisteminde kaya toplam 9 adet sınıfa bölünmüş olup, olağanüstü iyiden olağanüstü zayıfa kadar değişen aralıkta tanımlanır. Bu tanımlamadan sonra da tünel destek sistemleri belirlenmektedir. Destek sistemleri ise Tablo 6. da özetlenmektedir.



**Tablo 5.** Q sistemine göre destek tipleri [6]

	Kazı kategorisi	ESR (Kazı destek oranı)
A	Geçici maden kazıları	3-5
B	Kalıcı maden kazıları, hidroelektrik santralleri için su tünelleri, pilot tüneller, geniş kazılar için açıklıklar	1.6
C	Depo odaları, su arıtma tünelleri, küçük yol ve demiryolu tünelleri, erişim tünelleri	1.3
D	Ana demiryolu ve karayolu tüneller, güç istasyonları, portal bölgeleri, sivil savunma odaları	1.0
E	Yeraltı nükleer santralleri, demiryolu istasyonları, fabrikalar, spor ve kamu tesisleri	0.8

**Tablo 6.** Q sistemine göre destek tipleri [6]

Destek sistemi	Destek detayları
1	Desteksiz
2	Yerel bulonlama
3	Sistemik bulonlama
4	Sistemik bulonlama, ve püskürtme beton 4-10 cm
5	Fiber ile güçlendirilmiş püskürtme beton (5-9 cm) ve bulonlama
6	Fiber ile güçlendirilmiş püskürtme beton (9-12 cm) ve bulonlama
7	Fiber ile güçlendirilmiş püskürtme beton (12-15 cm) ve bulonlama
8	Fiber ile güçlendirilmiş püskürtme beton, >15 cm, çelik iksa ve bulonlama
9	Beton kaplama

### 2.5. Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM)

Rabcewicz [9], [10], [11], Rabcewicz ve Golser [15], [16] tarafında geliştirilen NATM metodu son dönemlerde klasik tünelcilik yönteminin yerini almaya veya klasik tünelcilik NATM şeklinde adlandırılmaya başlanmıştır. NATM yöntemi azımsanamayacak kadar uzun zamandır etkin bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Aksine; son yıllarda, bilindiği gibi çoğu projede maliyet ve uygulanabilirlik koşullarının değerlendirilmesiyle, NATM yönteminin kullanılması yerine TBM veya EPBM kazıları seçilmektedir. NATM'in genel prensibi deformasyonlara izin vererek tünel çevresinde koruyucu bir zon oluşturma prensibine dayanır. NATM sistemi esnek bir dış kemer ilkesine dayanmakta olup kalın kaplamalardan kaçınılmaktadır. Ana destek sistemi olarak bulon, çelik iksa, püskürtme beton kullanılmaktadır. Bu yöntemde tünel A1 den C5'e kadar değişen 10 alt sınıfa bölünmektedir. Tablo 7. de NATM kaya sınıflama sistemi verilmiştir.

**Tablo 7.** NATM kaya sınıflandırma sistemi [29]

Kaya sınıfı	ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrası	
A	A1	Stabil
	A2	Sonradan az sökülen
B	B1	Gevrek
	B2	Çok gevrek
	B3	Daneli
C	C1	Dağ atma
	C2	Baskılı
	C3	Çok baskılı
	C4	Akıcı
	C5	Şişen

NATM de ülkemizde en sık karıştırılan kaya sınıfı C1'dir. C1 kaya sınıfı B3 kaya sınıfında sonra gelmesi sebebi ile, B3 kaya koşullarından daha kötü olan zeminlerde C1 olarak belirtilmektedir. Ancak C1 kaya sınıfı yüksek örtü altında (H=500-600 m) sağlam masif kayalarda dağ atma (rock bursting) şeklinde olmaktadır. Burada birimin tektonizma geçirmemiş olması ve birim içerisinde

gerilmelerin birikerek kazı sonrasında anlık olarak kayanın patlama şeklinde yenilmesi şeklinde gözlenir. Ülkemizin tektonik unsurlar içerisinde aktif fay zonlarında yer alması sebebi ile görülmesi pek olası değildir.

### 3. Analitik ve Nümerik Yöntemler

Analitik çözümler Kirsch [17], Kastner [18], Sulem vd. [19] Hoek ve Brown [15] Hoek [20], [21] gibi araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Analitik yöntemlere göre ortam homojen ve izotrop kabul edilir. Yani yapılan tüm çalışmalar idealize edilmiş bir ortam içerisinde yürütülmektedir. Ancak uygulama aşamasında tünelin geçeceği birim izotrop ve homojen değildir. Bu sebeple analitik çözümlerde kısıtlamalara sahiptir.

Nümerik analiz yöntemleri, 1940 lı yıllardan itibaren geliştirilmeye başlanmıştır. 1960 lı yıllarda Clough [26] tarafından nümerik analiz yöntemi elastik problemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Hrenikoff [27], Newmark [28] ile temelleri ortaya atılmaya başlanmıştır. Mühendislik problemlerine matematiksel eşitlikler ile çözüm arayan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Son dönemlerde bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak uygulama aralığı artmış ve sürekli geliştirilmiştir. Nümerik analiz yöntemleri sonlu elemanlar, sonlu farklar, ayrık elemanlar ve hibrid yöntemler olarak ayrılmaktadır. Nümerik analizler ile mevcut ortam birebir tanımlanabilmekte ve tünelde uygulanacak olan destek sistemleri aynen modele girilebilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak çok karışık olan tünel kazı yöntemleri modellenmektedir. Maden galerilerindeki çoklu tüneller, ulaşım tünellerindeki birleşim yapıları, metro istasyonları gibi komplike yapılar aynen modellenerek çözümler ve elde edilen sonuçlar çok daha doğru sonuçlar vermektedir. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Phase2d programı, sonlu farklar ile çalışan Flac2d ve Flac3d, ayrık elemanlar ile çalışan UDEC programları tünel projelerinde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır.

Bu yaklaşımlar arasında nümerik analizler günümüzde tüm tünel projelerinin vazgeçilmez bir parçası olarak kullanılmaktadır [22], [23], [24], [25]. Nümerik analiz yöntemleri arasında ise sonlu elemanlar göreceli daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tünel projelerinde öncelikle ampirik yöntemler ile tünel destek sistemleri kabaca tanımlanmalı, analitik yöntemler ile bu durum detaylandırılmalı ve nümerik çözümler ile de nihai destek sistemleri belirlenmelidir.

Tünel kazısı sırasında yapılacak olan tünel ölçüm yöntemleri (enstrümantasyon) de uygulama aşamasında projelerin revizyonu için son derece önemlidir. Zira nihai boyutlandırma tünel kazısı boyunca yapılacak enstrümantasyon ölçümleri ile olmaktadır. Bulon boylarının uzunluğunun tahmini, püskürtme beton veya iç kaplama betonu kaplama kalınlığı, çelik iksanın boyutlandırılması doğrudan enstrümantasyon ölçümleri ile alakalıdır. Projelendirme aşamasında hesaplamalar ile kabul edilen plastik zon yarıçapına bağlı olarak bulon boyları tünel kazısı sırasında yapılacak olan ekstansometre ölçümleri ile netleştirilmelidir. Kaplama kalınlığı ve çelik iksa ise, kaplama içine yerleştirilecek olan basınç hücreleri ile gerilmeler belirlenmektedir. Gerilmeler proje değerleri ile karşılaştırılarak kontrolü yapılmalıdır. Ayrıca tünel ilerlemesine bağlı olarak yapılacak olan deformasyon ölçümleri iç kaplamanın hangi aşamada yerleştirileceği hakkında bilgi verecektir. Deformasyon ölçümleri vasıtası ile deformasyon hızı takip edilmeli, üst yarı, alt yarı ve invert kazısı sırasında oluşan deformasyon değişimleri incelenmelidir. Tünel davranışı enstrümantasyon ölçümlerine dayanılarak belirlenmektedir. Ölçülen deformasyon değerleri ile proje değerleri karşılaştırılarak bırakılan deformasyon toleransı kontrol edilmelidir. Enstrümantasyon ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre geri analizler yapılarak tünel projelendirmesi sırasında yapılan kabuller netleştirilmelidir. Böylelikle tünel projeleri tünel kazısı boyunca sürekli olarak güncellenerek en uygun destek sistemi belirlenmelidir.

#### 4. Sonuçlar

Tünel projelendirilmesinde kullanılan yöntemler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır.

Ampirik yöntemler tünel kaya sınıfının tanımlaması açısından son derece önemlidir. Ancak kaya sınıflarına göre önerilen destek sistemlerinin projelerde aynısının alınması düşünülmemelidir. Kaya sınıflama sistemlerinden önerilen destek sistemleri net olmayıp bir aralık içerisinde vermektedir.

Kaya sınıflama sistemleri yeraltında uygulanmış ve başarılı olan destek sistemlerinin özeti şeklindedir. Ancak her bir kaya sınıflama sistemi kendi içerisinde farklı kısıtlamalar vermektedir. Terzaghi [1] sadece çelik iksalar için öneriler yaparken, Bieniawski [5] önerdiği destek sistemlerinin at nalı şeklinde 10 m çaplı tüneller için olduğunu belirtmektedir. Ancak Yüksek Hızlı Tren projelerinde tünel kesiti at nalı şeklinde değildir. Tünel kazı genişliği 12 m ye yakındır. Bu sebeple kaya sınıflama sistemlerinde verilen destek sistemleri sadece bir yol gösterici olarak alınabilir.

Tüm kaya sınıflama sistemlerinde kaya sınıfları her zaman bir aralık içerisinde verilmektedir. Örneğin RMR sisteminde bu aralık 20 birimdir. Yine örneğin zayıf kaya olarak belirlenen 21 ile 40 arasındaki RMR değerinde, her bir değer zayıf kayadır ve aynı destek uygulanır. Bu durum gerçekçi değildir. RMR değeri 21 ise zayıf kaya olarak başka destek sistemleri uygulanması gerekirken yine zayıf kaya olarak belirlenen RMR değeri 40 olması durumunda ise farklı destek sistemi uygulanmalıdır. Ancak RMR sistemi her iki durum içerisinde aynı desteği önermektedir. Kaya sınıflama sistemleri yapılırken pek çok belirsiz nokta vardır. Bu faktörler arazide belirlenirken bile kişiden kişiye göre farklı yorumlanabilir. Bu farklılıkların olması da normaldir.

Tünel gibi homojen olmayan, anizotrop bir zeminde proje yapılırken hiçbir zaman kesin bir sonuca ulaşılmaz. Çünkü kaya ortamı betonarme veya çelikte olduğu gibi homojen değildir. Her bir metrede bile jeoteknik koşulların değişmesi olasıdır. Tünelin statik bir proje gibi düşünülmemesi gerekir. Tünel kazısı sırasında destek sistemlerinin her an değişebilecek olması sebebi ile dinamik bir projedir. Tünel tamamlandığı zaman tünel projesi tamamlanmış olmaktadır.

Tünel kazısı sırasında yapılacak olan jeolojik-jeoteknik ölçümler, tünel ayna jeolojik haritaları, yatay sondajlar ile tünel kaya sınıfları güncellenmektedir. Buna ek olarak tünel kazısı sırasında projeleri geliştirilerek mevcut duruma göre güncellenmelidir.

Tünel projelendirmesinde tip proje olmamalıdır. Her bir tünelin kendine özgü kaya koşulları vardır. Ayrıca tünelin geçeceği güzergâh yüzeyde bulunan yapılar ile coğrafik durum her zaman değişkendir. Bir tünelde başarılı olan bir destek sistemi farklı bir tünelde başarılı olacak diye bir koşul yoktur. Mühendislik olarak destek sistemlerinin analizi her zaman gerekmektedir.

Tünel projelendirmesi yapılırken öncelikte tünel güzergâhı kaya sınıflarına bölünmektedir. Her bir kaya sınıfı da gerekirse çevresel ve örtü yüksekliğine bağlı olarak ta farklı kısımlara ayrılabilir. Örneğin aynı kaya sınıfı içerisinde farklı örtü yükseklikler var ise kaya sınıfı aynı olsa bile farklı destek sistemleri uygulanabilir. Bu durum nümerik analizler ile detaylandırılarak tünel destekleri boyutlandırılmalıdır. Bir anlamda kaya kütle sınıfı ile destek sistemleri sınıfları ayrı olarak değerlendirilmelidir. NATM kaya sınıfı olarak sıkışan bir kaya ortamında C2 kaya sınıfı tanımlanan birimde, farklı isimlerle adlandırılacak olan örneğin C2 özel, C2 Tip1, C2 Tip2 gibi adlandırmalar olabilir. Çünkü kaya sınıflandırma sistemleri her zaman geniş bir aralık içerisinde yer alır ve bu aralıkta aynı destek sistemini kullanmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

Tünel projelendirme aşamasında öncelikle tünelin geçeceği kesimin mühendislik jeolojisi haritası yapılır, sonrasında ise detaylı araştırmalar için sondajlar yapılmaktadır. Bu sondajlardan elde edilen örneklere göre laboratuvar veya sondaj sırasında yerinde (in-situ) deneyler yapılmaktadır. Sondajların karot çapının ortalama 51 mm olduğu düşüldüğünde, 12 m çaplı bir tünelin projelendirilmesinde bu sondajlar dikkate alınmaktadır. Tünel çapından yaklaşık 235 kat küçük olan bir numuneden elde edilen sonuçlar kullanılmaktadır. Sondajların aralığı ise ortalama 250 m'dir. Bu durum ise tünel projelendirmenin aslında ne kadar çok bilinmezlikleri olduğunu göstermektedir.

### Kaynakça

- [1] K.V. Terzaghi, *Rock defects and loads on tunnel supports*. In: Proctor, R.V. and White, T.L., Eds., *Rock Tunneling with Steel Supports*, Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, 1946.
- [2] D.U. Deere, "Technical description of rock cores for engineering purposes," *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1, pp. 16-22, 1964.
- [3] Z.T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses," *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, 335-344. 1973.
- [4] Z.T. Bieniawski, "Rock mass classification in rock engineering," *In Exploration for rock engineering, proc. of the symp.*, (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema. 1976.
- [5] Z.T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley. 1989.
- [6] N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support," *Rock Mech.* 6(4), 189-239. 1974.
- [7] N. R. Barton, F. Løset, R. Lien, J. Lunde, "Application of the Q-system in design decisions," *In Subsurface space*, (ed. M. Bergman) 2, 553-561. New York: Pergamon. 1981.
- [8] N. Barton, "Application of Q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses," *In Workshop on Norwegian Method of Tunnelling* (pp. 66-84). New Delhi, India, 1993
- [9] L.v Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part One," *Water Power*, pp 453-457, 1964.
- [10] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Two," *Water Power*, pp 511-515, 1964.
- [11] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Three," *Water Power*, pp 19-24, 1965.
- [12] A. Palmstrom, "RMi—A system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering," *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 1(2), 69-108. 1996.
- [13] E. Hoek, E.T. Brown, *Underground excavations in rocks* (p. 527). Institution of Mining and Metallurgy. London: Maney Publishing, 1980.
- [14] E. Hoek, E.T. Brown, "The Hoek-Brown failure criterion—A 1988 update," *In 15th Canadian Rock Mechanics Symposium* (pp. 31-38). 1988.
- [15] L.v. Rabcewicz, J. Golser, "Principles of dimensioning the supporting system for the "new austrian tunnelling method," *Water Power*, Marc, 88-93. 1973.
- [16] L. Müller, "Removing misconceptions on the new austrian tunnelling method," *Tunnels & Tunnelling International*; 10(8):29-32. 1978.
- [17] H. Kastner, *Static des tunnels und stollenbaues*. Berlin/Gottingen: Springer 1962.
- [18] E.G. Kirsch, "The theory of elasticity and the need of the strength of materials" (trans.). *J Assoc German Eng*, 1898; 42:797-807, 1898.
- [19] C. C. Torres, C. Fairhurst, "Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion," *Tunn. Undergr. Space Technol.* 15 (2), 18-213. 2000.
- [20] E. Hoek, P.K. Kaiser, W.F. Bowden, *Support of underground excavations in hard rock*. A.A. Balkema, Rotterdam. 1995.
- [21] X.F. Wang, B.S. Jiang, Q. Zhang, M.M. Lu, M. Chen, "Analytical solution of circular tunnel in elastic-viscoplastic rock mass," *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2019, 16(6), e210, 2019.
- [22] A. Sakcali, H. Yavuz, "Estimation of radial deformations around circular tunnels in weak rock masses through numerical modelling," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 123, 104092. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2019.104092>, 2019.
- [23] D.R.J. Owen, E. Hinton, *Finite Elements in Plasticity*. Pineridge Press, Swansea, p 589, 1980.
- [24] M. Cai, "Influence of stress path on tunnel excavation response—numerical tool selection and modeling strategy," *Tunn Undergr Sp Technol* 23(2008):618-628, 2008.

- [25] M.E.F. Duncan, "Numerical modelling of yield zones in weak rocks," In: Hudson JA (ed) Comprehensive rock engineering, vol 2. Pergamon, Oxford, pp 49–75,1993.
- [26] R.W. Clough, "The finite element method in plane stress analysis." In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh, 1960.
- [27] A Hrenikoff, Solution of problems in elasticity by the framework method. *J. Appl. Mech.* 1941; **8**, 169-75.
- [28] NM Newmark. *Numerical Methods of Analysis in Engineering.* In: LE Grinter (ed.). Macmillan, New York, 1949.
- [29] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolları Teknik Şartnamesi*, 2013.

### Özgeçmiş



#### **Ebu Bekir AYGAR**

Ebu Bekir Aygar, 1973 Ankara doğumlu olup, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde 1996 Lisans, 2000 Yüksek Lisans ve 2007 de Doktora eğitimini tamamlamıştır. Fugro Sial Müş. ve Müh. Ltd. şirketinde 2009 yılından itibaren Tünel Tasarım Bölüm Müdürü olarak görev yapmaktadır. Uzmanlık alanı olarak Tünelcilik, NATM, Kaya Mekaniği, Nümerik Analizler olarak sıralanabilir. Yazarın ulusal ve uluslararası olmak üzere yayınları mevcuttur. Yazar Türkiye’de ve yurtdışında farklı yüksek hızlı demiryolu ve karayolu tünel projelerinde proje müdürü olarak çalışmıştır.  
E-Posta: eaygar@gmail.com

#### **Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



## Demiryolu Aracı Disk Balatalarının Tasarımında Yüksek Sıcaklığın Neden Olduğu Fren Zayıflama Probleminin Belirlenmesi İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi Yaklaşımı

Abdülkadir ÜNAL<sup>1\*</sup>, Nihat AKKUŞ<sup>1</sup>, S. Tolga KANDİL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*abdulkadir.unal@turasas.gov.tr

(Alınış/Received: 24.11.2021, Kabul/Accepted: 06.01.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Demiryolu aracı fren sürtünme elemanlarında, uzun süre fren yapılmasına bağlı olarak disk ve balata yüzeyinde sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte fren performansını düşüren ve zayıflama (fading) olarak adlandırılan önemli bir problem ortaya çıkmaktadır. Sürtünme elemanı tasarımcıları, zayıflama problemini öngörebilmek amacıyla tasarım aşamalarında genelde dinamometre gibi deneysel test yöntemleri kullanmaktadırlar. Bu tarz deneysel yöntemler kabul görmüş güvenilir yöntemler olsa da zaman ve maliyet açısından dezavantajlıdır. Bu çalışma, fren sürtünme elemanı tasarımlarında zayıflama problemine karşı deneysel yöntemler yerine bilgisayar destekli sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak termal öngöründe bulunulmasını sağlamayı ve böylece zamandan ve maliyetten tasarruf elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla geleneksel deney yöntemleri yerine sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılarak termal analiz yapılmış ve bu analiz sonuçları gerçek demiryolu testleri ile doğrulanmıştır. Gerçek demiryolu testlerinde diskte oluşan maksimum sıcaklıklar K tipi bir termokupl yardımıyla ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda sonlu elemanlar yöntemi sonucunda elde edilen değerlerin gerçek demiryolu testleri sonucunda elde edilen değerler ile büyük oranda örtüştüğü gözlemlenmiştir. Aracın maksimum hızı olan 140 km/h hızda yapılan frenleme sonucunda deneysel olarak ölçülen maksimum ortalama sıcaklık 384 °C iken simülasyon sonucunda ölçülen maksimum sıcaklık 400 °C'dir. Elde edilen veriler zayıflama problemini tespit etmek için sonlu elemanlar yönteminin fren sürtünme elemanı tasarımında kullanılabileceğini ve böylece zamandan ve maliyetten tasarruf sağlanabileceğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Fren zayıflaması, Disk balata, Termal FEA

### Finite Element Method Approach Against to Brake Fading Problem in Railway Vehicle Brake Friction Element Design

**Abstract:** Temperature increase occurs on the disc and pad surface due to long-term braking. With increasing temperature, an important problem called fading arises, which reduces brake performance. Friction element designers generally use experimental test methods such as dynamometers in the design stages in order to predict the fading problem. Although such experimental methods are accepted and reliable methods, they are disadvantageous in terms of time and cost. This study aims to provide thermal prediction by using computer-aided finite element methods instead of experimental methods against the fading problem in brake friction element designs and thus saving time and cost. For this purpose, thermal analysis was performed by modeling with the finite element method instead of traditional test methods, and these analysis results were confirmed by real railway tests. In real railway tests, the maximum temperatures occurring in the disc were measured with the help of a K-type thermocouple, and the results obtained were compared with the results of the analysis. As a result of the comparison, it has been observed that the values obtained as a result of the finite element method largely overlap with the values obtained as a result of the real railway tests. As a result of braking at 140 km/h, which is the maximum speed of the vehicle, the experimentally measured maximum average temperature is 384 °C, while the maximum temperature measured as a result of the simulation is 400 °C. The obtained data has revealed that the FEA can be used in brake friction element design to detect the attenuation problem, thus saving time and cost.

Atıf için/Cite as: A. Unal, N. Akkus, S. T. Kandil, "Demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 134-144, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1027982

**Keywords:** Fading, Disc pad, Thermal FEA

## 1. Giriş

Mekanik fren sistemi, aracın sahip olduğu kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi prensibiyle çalışır. Sürtünme elemanlarının birbirine sürtünmesi ile oluşan ısı çevreye yayılır [1]. Araç fren sistemi tasarımı aşamasında mekanik özelliklerin yanı sıra sistemin ısı özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir [2]. Frenleme sırasında yüksek sıcaklık, frenin zayıflamasına, erken aşınmaya, yatak arızasına, disk ve balata yüzeyinde termal çatlaklara ve termal olarak uyarılan titreşime neden olabilir [3]. Bu nedenle fren tasarımında temel konu, fren ömrü ve etkinliğinin tahmininde anahtar faktör olan hem ortalama hem de yerel sıcaklıkları ölçmek veya tahmin etmektir [4].

Geleneksel olarak, fren testleri için birçok deneysel yöntem kullanılmaktadır. Gerçek disk frenleri simüle etmek için, sürtünme değerlendirme tarama testi (Friction Assessment and Screening Test), azaltılmış ölçekli dinamometre yöntemi, chase makinesi testleri, pin-on-disk testleri, krauss testleri ve gerçek boyutlu dinamometre yöntemi gibi çeşitli deneysel yöntemler bulunmaktadır [5].

Sürtünme değerlendirme tarama testi (FAST), sürtünme malzemesinin (etkililik, toparlanma, hız hassasiyeti ve aşınma özellikleri) taraması için bir kalite kontrol testi olarak kabul edilir [6]. Chase makinesi, bir hava basıncı sistemi ile tamburun iç çapına karşı yüklenen kare sürtünme malzemesine sahip dönen bir tamburdan oluşur. Chase makinesi ile sürtünme ve aşınma verileri elde edilebilir [7]. Pin on disk yöntemi, önceden belirlenmiş bir dizi koşul altında bir alt numune olarak dönen bir diske karşı pim şeklinde bir numuneyi içerir [8]. Krauss test makineleri tam boyutlu fren mekanizmalarını test etmeyi mümkün kılar. Bir fren mekanizmasındaki yükleme koşulları, bir DC motor kullanılarak simüle edilir [9]. Tam boyutlu dinamometreler, genel olarak demiryolu aracının fren performansını test etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fren dinamometresi, trenin fren karakteristiğini simüle etmek için tasarlanmış, çoğaltılabilen ve deney nesnesini analiz etmeye ve karşılaştırmaya yardımcı olan verileri kaydetme işlevine sahiptir. Fren dinamometresi ayrıca fren sistemini geliştirmek ve test etmek için kullanılır [10].

Bu test yöntemlerinin yanı sıra, simülasyon tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, günümüzde araç üreticileri fiziksel testleri sanal testlerle kısmen veya tamamen değiştirmeyi araştırmaktadır [11]. Fren diski ve balatasının aşınma durumunun değişmesine karşılık gelen fren performansı düşüşü nedeniyle, yüksek güçlü disk frenin sürtünme ve aşınma analizi tüm dünyada bir araştırma noktası haline gelmiştir [12]. Sürtünme çiftlerinin sergileyecekleri davranışları tahmin edebilecek bir simülasyon aracı fren endüstrilerinde anahtar bir role sahip olabilir [13]. Disk frenleri için bir çok simülasyon çalışması yapılmıştır [14].

Narayana vd. [15] fren diski tipi malzemesini termomekanik özelliklere göre belirlemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Nirmala vd. [16] fren diski seçimi için sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanarak bir simülasyon geliştirmiş ve farklı diskleri yapısal ve termal olarak incelemiştir. Belhocine [17] frenleme aşamasında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak otomobil disk freninin termomekanik davranışının bir çalışmasını sunmuştur. Gautam vd. [18] bir diski modelleyerek daha uzun ömür için yapısal olarak incelemiştir. Liu vd. [19] kampanalı fren sistemini sonlu elemanlar yöntemi ile inceleyerek sağ ve sol blok balataların simetrik çalışıp çalışmadığını araştırmıştır. Goo [20] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak disk ve balata arasında temas basıncı ve termo-elastik davranışlar üzerine çalışmıştır. Zhang vd. [21] frenleme sırasındaki aşınmanın değişim eğilimini incelemiş ve fren yükünün ve ilk frenleme hızının aşınma üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla analiz etmiştir. Gabriele vd. [22] bir fren sisteminin sürtünme katsayısını simüle etmek için sonlu elemanlar analizi yaklaşımını kullanmıştır. Gurumoorthy vd. [23] fren balatası aşınmasını simüle etmek, aşınmaya dayalı ömür hesaplaması

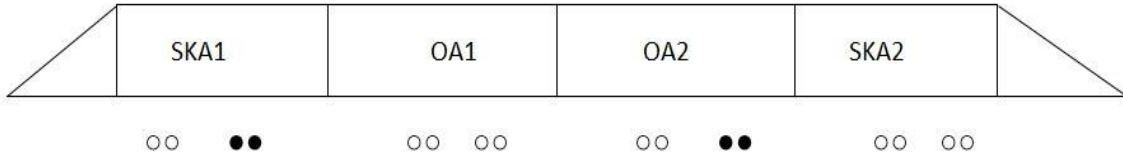
yapmak ve havadaki aşınma parçacıklarını tahmin etmek için hesaplama yöntemleri geliştirmeye odaklanmıştır. Rashid vd. [24] termo-mekanik sonlu elemanlar analizi kullanarak disk üzerindeki aşınma geçmişi incelemiştir. Sonuçlar, aşınma dikkate alındığında, her yeni fren çevrimi için disk üzerindeki farklı sıcaklık dağılımlarının elde edildiğini göstermiştir.

Bu çalışmada pnömatik fren sistemi kullanan bir tren setinin sürtünme elemanlarında meydana gelen termal dağılımlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve analiz sonuçlarını doğrulamak amacıyla gerçek demiryolu testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile gerçek demiryolu testleri sonucunda elde edilen veriler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları ve yol testi sonuçlarının birbirini büyük oranda doğruladığı sonucuna varılmıştır. Balata tasarımında simülasyon yöntemlerinin çoğalması zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlarken daha etkin ve güvenilir tasarımların ortaya çıkmasına neden olacaktır.

## 2. Metot

Bu çalışmada tren setlerinin sürtünme çiftlerinde meydana gelen sıcaklık artışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve analiz sonuçları gerçek yol testleri ile doğrulanmıştır.

Modellemesi yapılan ve testler sırasında kullanılan tren seti 4 adet araçtan meydana gelmektedir. Bu araçlar SKA1, OA1, OA2 ve SKA2 araçlarıdır. SKA1 sürücü kabinli motorlu araç, OA1 çekilen orta araç, OA2 motorlu orta araç, SKA2 sürücü kabinli çekilen araçtır. Tren setine ait konfigürasyon Şekil 1’de gösterilmiştir. Tren setine ait temel sayısal değerler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Tren seti konfigürasyonu (o o tahriksiz boji, ●● tahrikli boji)

Tablo 1. Araç bilgileri (veriler araç üreticisinden sağlanmıştır)

Araç Bilgileri	Değerler
Boji Başına Disk Sayısı	4
Teker Çapı	920 mm
Disk Çapı	660 mm
Disk Malzemesi	Döküm Çelik
Araç Maksimum Hızı	140 km/h
Acil Frende Eşdeğer Yavaşlama İvmesi	1,19 m/s <sup>2</sup>
Dinamik Sürtünme Katsayısı	0,40
Disk başına döner kütleler dâhil fren ağırlığı	8735 kg

### 2.1. Sonlu elemanlar analizi

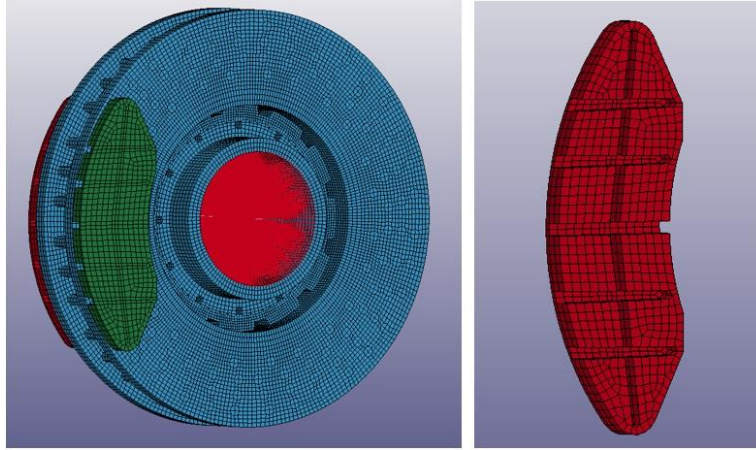
Modellemesi yapılan balatalar UIC 541- 3’e göre üretilen UIC 200 (200 cm<sup>2</sup> yüzey alanlı) tipi kompozit disk balatalardır. Balatalar diskin sağ ve solunda konumlanan balata çiftlerinden meydana gelmektedir. Disk ise 660 mm çapında ve dökme çelikten üretilmiştir.

Disk ve balatanın üç boyutlu modeli SOLIDWORKS 2020.SP2 paket programı kullanılarak çizilmiştir. Sonlu elemanlar analizi için genel amaçlı bir sonlu eleman programı olan Ansys Ls-



Dyna V4.5.18 paket programı kullanılmıştır. Ls-Dyna açık zaman entegrasyonu kullanan doğrusal olmayan dinamik modellerde sıkça kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi yaklaşımında implicit (kapalı) ve explicit (açık) yöntemler vardır. Bu iki yaklaşım arasındaki temel fark hız ve ivmedir. İmplicit algoritma,  $t_i$  zamanında denklemin ilk çözümünün bilgisini varsayar ve  $t_i + 1$  zamanında denklemin çözümünü hesaplar. Explicit, implicit prosedüründen farklı olarak merkezi fark yöntemini kullanır. Bu sonuç olarak, ivme matrisinin bir yaklaşımı için başlangıç noktasının  $t_i$  zamanı olduğu anlamına gelir. Bu çalışmada sistemin anlık durumundan belirli bir zaman sonraki durumu hesaplandığından explicit yöntem kullanılmıştır. Disk ve balatanın mesh yapısı Şekil 2’de verilmektedir.

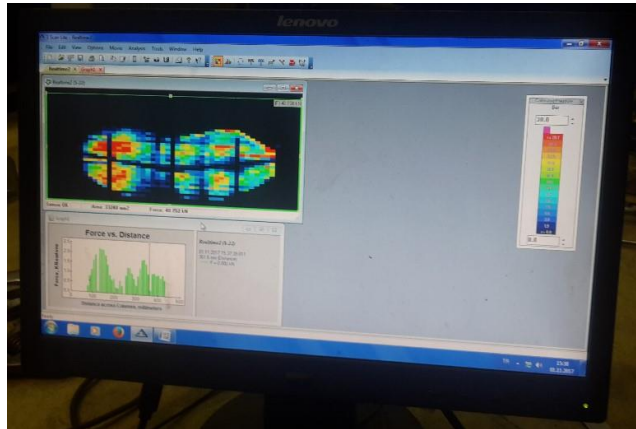


Şekil 2. Fren diski ve balata çiftlerinin mesh yapısı

Disk ve balatanın üç boyutlu modeli Solidworks paket programı kullanılarak çizilmiştir. Sonlu elemanlar analizi için genel amaçlı bir sonlu eleman programı olan Ansys Ls-Dyna V4.5.18 paket programı kullanılmıştır. Ls-Dyna açık zaman entegrasyonu kullanan doğrusal olmayan dinamik modellerde sıkça kullanılmaktadır.

Modellenen disk ve balata 69564 adet elemandan ve 95814 adet düğüm noktasından oluşmaktadır.

Balata üzerine gelen kuvvetler 29920 N olarak balata yüzeylerine tanımlanmıştır. Bu kuvvet haritalandırılmış basınç sensörü kullanılarak deneysel olarak ölçülmüştür. Ölçümü yapabilmek için haritalandırılmış basınç sensörü disk ve balata arasına yerleştirilmekte ve elde edilen değer bir bilgisayar yardımıyla Şekil 3’te verildiği şekilde haritalandırılmış şekilde okunmaktadır.

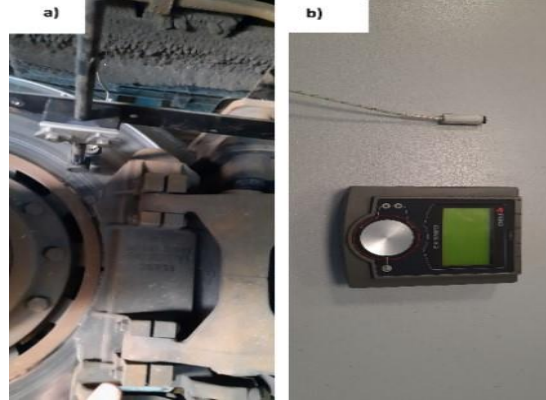


Şekil 3. Haritalandırılmış basınç sensörü yardımıyla disk üzerine gelen kuvvetlerin belirlenmesi

## 2.2. Yol testleri

Yol testleri için TÜRASAŞ tarafından üretilen ve TCDD Taşımacılık AŞ filusunda bulunan 15400 tipi dizel tren setleri kullanılmıştır. Testler Yüksek Hızlı Tren Hattında Mithatpaşa-Köseköy, Köseköy-Mithatpaşa istasyonları arasında yapılmıştır. Yüksek Hızlı Tren Hattının kullanılabilmesi amacıyla TCDD'den izin alınarak yol kiralanmıştır.

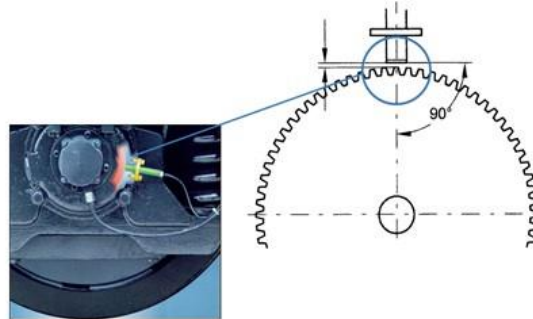
Frenleme neticesinde diskte meydana gelen sıcaklık artışı K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüş ve ölçülen sıcaklıklar TQC marka data logger ile kayıt altına alınmıştır. Diske monte edilen termokupl ve veri kaydedici Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. a) Sıcaklık sensörünün montaj edilmiş hali, b) Test sırasında kullanılan veri kaydedici ve termokupl

Testler 140 km/h hızda makinist ana kontrol kolunun EB (acil fren) konumuna getirilerek yapılmıştır. Ana kontrol kolunun EB konumuna getirilmesiyle birlikte retarder kapanmakta ve sürtünme elemanları sayesinde tren seti durmaktadır.

Aracın hız verileri aks başlarında bulunan hız sensörü vasıtasıyla ölçülmüştür. Hız sensörü Şekil 5'te verilmiştir. Hız sensörü, fiziksel temas olmaksızın bir dönen dişlinin hızını algılamak ve böylece aks hızını tespit etmek için aks kutusuna bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Algılama cihazı ve amplifikatör elektroniği, alüminyum bir muhafaza içinde hava geçirmez şekilde kapatılmıştır. Ünite, verilen geometride dönen bir ferromanyetik dişli çarkın dişlerini ve boşluklarını algılar. Manyetik alan değişiklikleri, algılama cihazı tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülür.



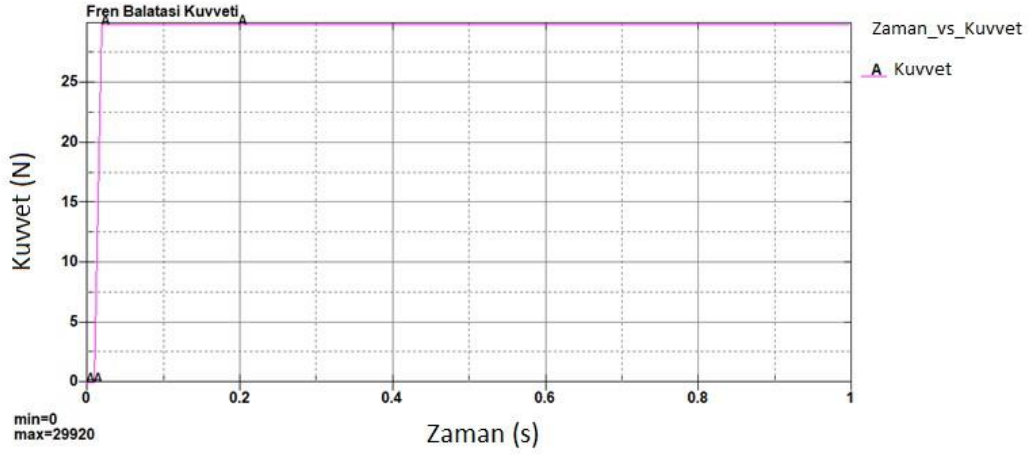
Şekil 5. Hız sensörünün kurulumu

Eğim ve kurp dirençlerinin test sonuçlarını etkilememesi için frenlemeler eğimsiz ve kurpsuz aliyman yollarda yapılmıştır. Her frenleme sonrasında disk ve balatanın soğuması için yeterince beklenilmiştir.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Sonlu elemanlar analizi sonuçları

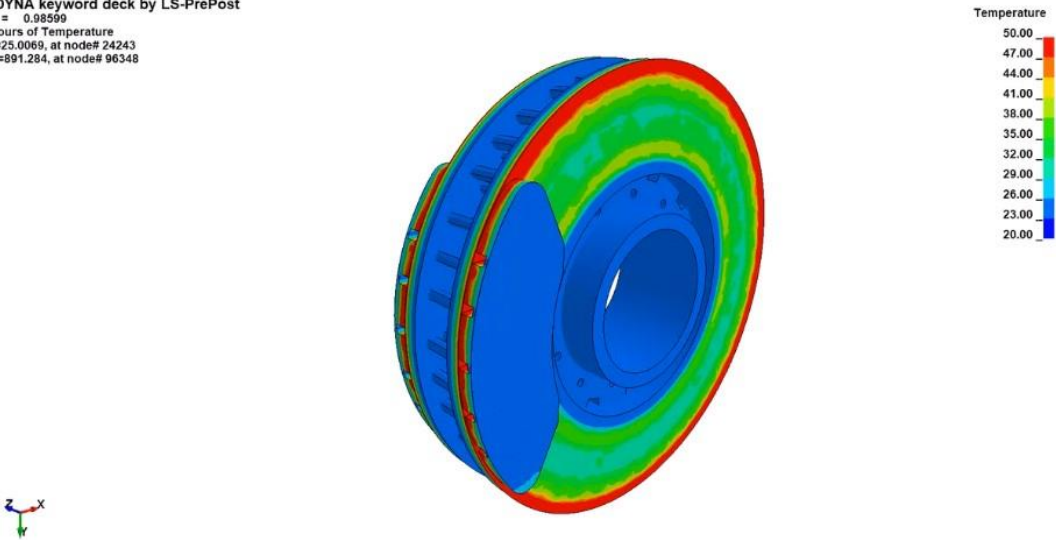
Frenleme yapıldığı andaki araç hızı 140 km/h (38888 mm/s) ve tekerlek yarıçapı 460 mm olduğu için diske 84 rad/s başlangıç hızı uygulanmıştır. Diske uygulanan fren balatası kuvveti Şekil 6'da verilmiştir. Balatanın diske uyguladığı maksimum kuvvet 29920 N'dur.



Şekil 6. Balatadan diske uygulanan frenleme kuvveti

30 km/h hız için yapılan termal analiz sonucunda, sürtünmeden ve dinamik kuvvetten dolayı açığa çıkan enerjinin, disk ve balata üzerindeki sıcaklık dağılımları Şekil 7'de verilmiştir. Farklı hızlarda yapılan frenleme sonucu oluşan maksimum sıcaklık değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de verilen hız aralıkları aracın fren test protokolüne göre seçilmiştir.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time = 0.98599  
Contours of Temperature  
min=25.0069, at node# 24243  
max=891.284, at node# 96348



Şekil 7. Disk ve balata üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı

**Tablo 2.** FEA sonuçları

Frenleme Yapıldığı Andaki Hız (km/h)	Maksimum Sıcaklık (°C)
30	50
80	200
100	250
120	350
140	400

### 3.2. Yol testi sonuçları

Yol testlerinde önce düşük hızlarda daha sonra yüksek hızlarda seri frenler yapılmıştır. Seri frenlemenin yapılmasının nedeni balataların yeni olması nedeniyle balata yüzeyinin alıştırılmasını (bedding) sağlamaktır. Yataklama işlemi yapıldıktan sonra 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h ve 140 km/h hızlarda frenlemeler yapılmış ve maksimum disk sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır. Disk sıcaklıklarının doğruluğunu teyit etmek amacıyla her hızda en az 5 frenleme yapılmıştır.

Yaklaşık 30 km/h hızdan tam durana kadar ölçülen maksimum sıcaklık değerleri Tablo 3'te verilmiştir. 30 km/h hıza en yakın yakalanan hızlar değerlendirmeye alınmıştır.

**Tablo 3.** Yaklaşık 30 km/h hızda ölçülen maksimum sıcaklıklar ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Frenleme Anındaki Hızları (km/h)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Deneysel)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Simülasyon)
30,26	53,2	
30,73	56,9	
30,42	52,6	50
30,16	52,8	
30,24	54,3	
Ortalama	53,96	50

Yaklaşık 80 km/h hızdan tam durana kadar ölçülen sıcaklık değerleri Tablo 4'te verilmiştir. 80 km/h hıza en yakın yakalanan hızlar değerlendirmeye alınmıştır.

**Tablo 4.** Yaklaşık 80 km/h hızda ölçülen maksimum sıcaklıklar ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Frenleme Anındaki Hızlar (km/h)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Deneysel)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Simülasyon)
80,53 km/h	178,4	
79,87 km/h	184	
80,26 km/h	191,5	200
80,72 km/h	192,1	
80,13 km/h	188,9	
Ortalama	186,98	200

Yaklaşık 100 km/h hızdan tam durana kadar ölçülen sıcaklık değerleri Tablo 4'te verilmiştir. 100 km/h hıza en yakın yakalanan hızlar değerlendirmeye alınmıştır.

**Tablo 5.** Yaklaşık 100 km/h hızda ölçülen maksimum sıcaklık değerleri ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Frenleme Anındaki Hızları (km/h)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Deneysel)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Simülasyon)
99,82	239,4	
99	241,3	
99	245	250
101	248,6	
100,29	246	
Ortalama	244,06	250

Yaklaşık 120 km/h hızdan tam durana kadar ölçülen sıcaklık değerleri Tablo 6’da verilmiştir. 120 km/h hıza en yakın yakalanan hızlar değerlendirmeye alınmıştır.

**Tablo 6.** Yaklaşık 120 km/h hızda ölçülen maksimum sıcaklık değerleri ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Frenleme Anındaki Hızları (km/h)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Deneysel)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Simülasyon)
120,45	341,6	
120,03	348,9	
120,48	338,5	350
119,52	346,7	
120,33	345	
Ortalama	344,14	350

Yaklaşık 140 km/h hızdan durana kadar ölçülen sıcaklık değerleri Tablo 7’de verilmiştir. 140 km/h hıza en yakın yakalanan hızlar değerlendirmeye alınmıştır.

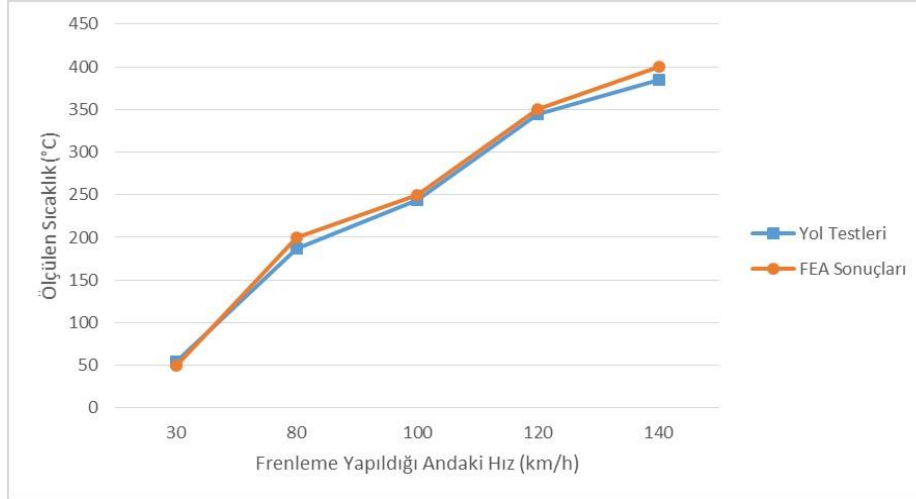
**Tablo 7.** Yaklaşık 140 km/h hızda ölçülen maksimum sıcaklık değerleri ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Frenleme Anındaki Hızları (km/h)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Deneysel)	Disk Yüzey Sıcaklığı (°C) (Simülasyon)
139,99	378,4	
139,85	382,6	
139,98	376,8	400
138,66	390,2	
140,11	396,3	
Ortalama	384,86	400

#### 4. Sonuç

Bu çalışma diskli fren balatalarında her iki temas yüzeyi arasındaki termal dağılımı simüle etmek için bir yaklaşım sunmaktadır. Bu amaçla balata ve diskte oluşan sıcaklık değişimini bilgisayar ile simüle etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir model oluşturulmuş ve modelin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla gerçek demiryolu şartlarında disk sıcaklığı farklı hızlarda yapılan frenleme sonucunda ölçülmüştür. Yol testleri ve model sonuçları Şekil 8’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır.

Şekil 8’de verilen grafikten de görüleceği üzere sonlu elemanlar analizi sonuçları ile yol testi sonuçları birbirini doğrulamaktadır. Bu sonuçlara göre sonlu elemanlar yönteminin fren sürtünme elemanı tasarımında kullanılabileceği ve böylece zamandan ve test maliyetlerinden tasarruf elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak geleneksel test yöntemleri fren sürtünme elemanı tasarımcılarına sıcaklık bilgisinin yanı sıra aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri üzerinde de bilgiler sunmaktadır. Bu yüzden yapılan araştırma aşınma ve sürtünme katsayısı değişimlerini de içerecek şekilde geliştirilmeli ve bu değerler üzerinde kapsamlı bir tahmin sunulmalıdır.



Şekil 8. FEA sonucu elde edilen sıcaklık değerleri ile yol testi sonucu elde edilen sıcaklık değerlerinin karşılaştırması

### Teşekkür

Bu çalışmayı 1007 KAMAG 118G039 numaralı proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz. Bu çalışmada bahsi geçen görüşler sadece yazarlara aittir ve başka hiçbir organizasyon ve kişiyi temsil etmemektedir.

### Kaynakça

- [1] L. Abebe, R. Nallamothe, K. Subrahmanyam, S. Nallanothe, A. Nallamothe, "Thermal Analysis of Disc Brake Made of Different Materials," *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3(6), pp. 5-9, 2016.
- [2] P. Milenkovic, S. Jovanovic, A. Jankovic, M. Milovanovic, N. Vitosevic, M. Djordjevic, M. Raicevic, "The Influence of Brake Pads Thermal Conductivity on Passenger Car Brake System Efficiency," *Thermal Science*, vol. 14, pp. 221-230, 2010, doi: 10.2298/TSCI100505016M
- [3] F. Talati, S. Jalalifar, "Analysis of heat conduction in a disc brake system," *Heat Mass Transfer*, vol. 45, pp. 1047-1059, 2009, doi: 10.1007/s00231-009-0476-y
- [4] T. Piatkowski, H. Polakowski, M. Kastek, P. Baranowski, K. Damaziak, J. Malachowski, L. Mazurkiewicz, "Thermal measurement of brake pad lining surfaces during the braking process," *The international society for optical engineering*, 2012, doi: 10.1117/12.918391
- [5] A. Sinha, G. Ischia, C. Menapace, S. Gialanella, "Experimental characterization protocols for wear-products for wear products from disc brake materials," *Atmosphere*, vol. 11, 2020, doi: 10.3390/atmos11101102
- [6] M. Kchaou, A. Sellami, J. Fajoui, R. Kus, R. Elleuch, F. Jacquemin, "Tribological performance characterization of brake friction materials: What test? What coefficient of friction?," *Journal of Engineering Tribology*, vol. 233, pp. 214-225, 2019, doi: 10.1177/1350650118764167
- [7] P. Blau, "Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives," *OAK ridge national laboratory*, 2001.
- [8] N. Stoica, A. Petrescu, A. Tudor, A. Predescu, "Tribological properties of the disc brake friction couple materials in the range of small and very small speeds," *13th International Conference on Tribology*, 2017, doi:10.1088/1757-899X/174/1/012019
- [9] T. Singh, A. Patnaik, "Friction braking performance of nanofilled hybrid fiber reinforced phenolic composites: Influence of nanoclay and carbon nanotubes," *World Scientific*, vol. 8, no. 3, 2013, doi:10.1142/S1793292013500525
- [10] M. Kim, J. Kim, B. Goo, "Comparative studies of the tread brake dynamometer between dry and wet conditions," *Selected topics in system science and simulation in engineering*, pp. 479-483, 2010.
- [11] A. Vdovin, G. Gael, "Aerodynamic and thermal modelling of disc brakes challenges and limitations," *Energies*, vol. 13 (1), pp. 1-12, 2020, doi: 10.3390/en13010203

- [12] S. Zhang, Q. Hao, Y. Liu, L. Jin, "Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, pp. 1-15, 2019, doi: 10.1155/2019/6250694
- [13] G. Riva, "A methodology to simulate automotive disc brake tribology and emissions," Doctoral Thesis in Machine Design KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2020
- [14] H. Cho, C. D. Cho, "A study of thermal and mechanical behavior for the optimal design of automotive disc brakes," *Automobile Engineering*, vol. 222, pp. 894-915, 2008.
- [15] K. Narayana, G. U. Rao, D. Simhachalam, B. Nagarju, "Finite Element Analysis of Solid and Ventilated Disc Brake," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 3, no. 9, pp. 875-882, 2014.
- [16] D. Nirmala, C. Kiran, "Optimized Design and Static, Dynamic Analysis of Disc Brake Using Finite Element Analysis," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 5, pp. 416-419, 2016.
- [17] A. Belhocine, "Finite element analysis of automotive disk brake and pad in frictional model contact," *International journal of manufacturing, materials, and mechanical engineering (IJMMME)*, vol. 5, pp. 32-62, 2015, doi: 10.4018/ijmmme.2015100103
- [18] S. Gautam, S. Yadav, S. Akhtar, V. Shani, S. Tiwari, D. Yadav, S. Lal, "Finite Element Analysis of Disc Brake Using Ansys Workbench Software," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, pp. 1954-1959, 2015
- [19] N. Liu, Z. Zheng, Y. Wu, X. Kong, H. Ding, "Finite Element Analysis of Drum Brake Assembly," *The Italian Association of Chemical Engineering*, vol. 46, pp. 1057-1062, 2015, doi: 10.3303/CET1546177
- [20] B. Goo, "A study on the contact pressure and thermo-elastic behavior of a brake disc pad by infrared images and finite element analysis," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 9, 2018, doi: 10.3390/app8091639
- [21] S. Zhang, Q. Hao, Y. Liu, L. Jin, F. Ma, Z. Sha, D. Yang, "Simulation Study on Friction and Wear Law of Brake Pad in High-Power Disc Brake," *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, doi: 10.1155/2019/6250694
- [22] G. Riva, F. Varriale, J. Wahlström, "A finite element analysis (FEA) approach to simulate the coefficient of friction of a brake system starting from material friction characterization", *Friction*, vol. 9, 2020, doi: 10.1007/s40544-020-0397-9
- [23] S. Gurumoorthy, S. Grandhi, S. Sridhar, "Brake pad wear prediction using finite element techniques," SAE International, 2021, doi: 10.4271/2021-01-0810
- [24] A. Rashid, N. Strömberg, "Thermomechanical simulation of wear and hot bands in a disc brake by adopting an eulerian approach," *Materials Science*, pp. 1-10, 2013.

## Özgeçmiş



### Abdülkadir ÜNAL

1987 yılında Malatya'da doğdu. Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde tamamladı. Yüksek Lisans eğitimini Marmara Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünde tamamladı. Halen Marmara Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü Doktora Programında tez aşamasında öğrenimine devam etmektedir. Türkiye Raylı Sistem Araçları AŞ'de Yeni Projeler Koordinatörü, Hızlı Tren Proje Koordinatörü ve Ar-Ge Daire Başkan Vekili gibi görevlerde yer almıştır. Halen TÜRASAŞ'ta Boji-Pnömatik Müdürü olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: abdukkadir.unal@turasas.gov.tr



### Nihat AKKUŞ

24 Kasım 1964 yılında doğdu. Lisans eğitimini Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde tamamladı. Yüksek Lisans Eğitimini Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde tamamladı. Doktora eğitimini, Tokyo Büyükşehir Teknoloji Enstitüsünde tamamladı. Université de Bourgogne ve Marmara Üniversitesinde öğretim üyesi olarak görev aldı. Halen Gedik Üniversitesinde Rektör olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: nihat.akkus@marmara.edu.tr

**Seyfettin Tolga KANDİL**

1981 yılında Adana doğdu. 2010 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünü tamamladı. Yüksek lisans eğitimini, İstanbul Teknik Üniversitesi, Otomotiv bölümünde sürdürmektedir. 2014 yılında TÜRASAŞ'a atandı. 2017-2018 yılları arası Hazırlamalar başmühendisliği görevinde bulundu. Eş zamanlı olarak E23000 elektrikli dizilerin F ağır bakım proje koordinatörlüğünü yürüttü. 2019-2021 yıllarında Ar-Ge Dairesinde Boji başmühendisliği görevinde bulundu. 2021 yılında Teknik Hizmetler Dairesine atandı ve Boji-Pnömatik Sistemler Müdürlüğünde görevini sürdürmektedir. E-Posta: tolga.kandil@turasas.gov.tr

**Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Çalışmaya yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.





## Orta Koridor Rotasında Türkiye'nin Liman bağlantılarının Bulanık AHP ve TOPSIS Yöntemleriyle Araştırılması

Ömer SACAR<sup>\*1</sup>, Sezgin ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ergin Ağaç Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Millî Eğitim Bakanlığı, Ulaştırma Hizmetleri, Osmangazi, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup> TCDD Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü Ankara, Türkiye

\*omersacar@hotmail.com

(Alınış/Received: 28.05.2021, Kabul/Accepted: 09.12.2021, Yayımlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Türkiye, jeopolitik konumu ile bölgesel ulaştırma koridorlarının merkezinde yer almaktadır. Çin'den başlayan Orta Asya'yı takiben Kazakistan ve Türkmenistan yoluyla Hazar Denizi'ni aşarak Kafkaslara ve Türkiye'ye gelen orta koridor çok önemli taşıma güzergâhıdır. Çin'in son yıllarda başlattığı Modern İpek Yolu güzergâhlarından birisi olan orta koridor, bilhassa denize sınırı olmayan ülkelerin ilgisini çekmektedir. Türkiye, tarihi İpek Yolu'nun yeniden canlandırılmasına yönelik olarak çeşitli projeler geliştirmektedir. Türkiye'nin büyük hacimli yükleri orta koridora çekmesi için demir yolu ve liman ilişkisinin kurması elzemdir. Bu çalışmada liman seçim problemlerinde paydaşlar için önemli kriterler araştırılmış, limanların teknik ve ticari özellikleri belirlenmiştir. Orta koridor üzerinden Türkiye'ye gelen ve deniz yolu ile devam edecek bir yük taşımaya en ideal liman seçimi Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ve TOPSIS yöntemlerinin entegre edilmesiyle belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Orta Koridor, İpek Yolu, Rota Optimizasyon, Bulanık AHP, TOPSIS

### Investigation of Turkey's port connections on the Middle Corridor Route with Fuzzy AHP and TOPSIS Methods

**Abstract:** Turkey is located at the center of regional transportation corridors with its geopolitical location. The Middle Corridor, which starts from China, passes the Caspian Sea via Kazakhstan and Turkmenistan following Central Asia, and reaches the Caucasus and Turkey, is a very important transportation route. The Middle Corridor, one of the Modern Silk Road routes that China has started in recent years, attracts the attention of countries that do not have sea borders. Turkey develops various projects for the revitalization of the historical Silk Road. It is essential for Turkey to establish a railway and port connection in order to transport large volumes of cargo to the Middle Corridor. In this study, important criteria for stakeholders in port selection problems were investigated and the technical and commercial characteristics of the ports were determined. The most ideal port selection for a cargo transport that comes to Turkey via the middle corridor and will continue by sea is determined by integrating the Fuzzy Analytical Hierarchy Process and TOPSIS methods.

**Keywords:** Middle Corridor, Silk Road, Route Optimization, Fuzzy AHP, TOPSIS.

#### 1. Giriş

Orta koridor, Londra ve Çin arasında olan demir yolu ağına verilen isimdir. Güzergâh üzerindeki ülkelerin kendi demir yolu ağlarını iyileştirerek birbirine entegre edilmesi üzerine kuruludur. Güney koridor, Süveyş Kanalı rotasını, Kuzey koridor ise Rusya üzerinden Avrupa ile Çin'i bağlayan demir yolu hattını ifade etmektedir. Her sene Çin'den Avrupa'ya milyonlarca konteynerin Güney koridor ile gönderilmesi, taşımacılıktaki hacmin büyüklüğünü göstermektedir. Bir yıl içinde Çin'den Avrupa'ya giden 10 milyon konteynerin yüzde 96'sı denizyoluyla, yüzde 4'ü kuzey koridorundan sevk ediliyor. Diğer güzergâhlara alternatif olan orta koridor, kuzey koridoruna oranla daha hızlı, 2 bin km daha kısa, iklim koşulları bakımından da

Atıf için/Cite as: Ö. Sacar, S. Özdemir, "Orta koridor rotasında Türkiye'nin liman bağlantılarının bulanık AHP ve TOPSIS yöntemleriyle araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 145-157, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.944161

daha elverişlidir. Deniz yolu ile gidilen güney koridoruna kıyasla ulaşım süresini üçte bir oranında (15 gün) kısaltmaktadır. Orta koridor sadece doğu batı eksenli ulaşım sunmamakta Türkiye'nin liman bağlantıları ile Asya'daki yük trafiğinin Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Akdeniz bölgesine ulaştırmayı mümkün kılmaktadır. Türkiye'nin son zamanlarda gerçekleştirdiği, Kuzey Marmara Otoyolu, Çanakkale Köprü Projesi, Marmaray, yüksek hızlı tren hatları, limanların genişletilmesi gibi büyük yatırımlar sadece kendisi için değil, uzun vadede orta koridora lojistik alt yapı olarak analiz edilmektedir. Türkiye orta koridorda Yunanistan ile rakip sayılabilmektedir. Çin'in yatırım yaptığı Pire Limanı güney koridorunda güzergâhın bittiği yer olup Port Said'den 580 deniz mili mesafededir. Pire Limanı'na inen yük AB topraklarına doğrudan girmekte ve demir yolu bağlantılarıyla AB içlerine kolaylıkla eriştirilebilmektedir. Türk limanlarının Avrupa Birliği güzergâhında Marmara Denizi öne çıkmaktadır. Marmara Denizinde herhangi bir limana giden ana gemi, yaklaşık 750 deniz mili mesafe kat ederek, akabinde besleme hatlarla Karadeniz limanlarına ya da kara yoluyla Orta ve Doğu Avrupa'ya aktarma yapılabilir. Bu noktada Türkiye sadece Uzakdoğu - Avrupa ana deniz ticaret rotasının değil, Karadeniz - Akdeniz deniz ticaret rotasının da merkezinde yer almaktadır [1].

Türkiye'nin bölgesel ticaret üssü olabilmesi; Akdeniz ve Karadeniz pazarlarında rekabet edebilmesine bağlıdır. Doğu-batı eksenli alınan yüklerin, kuzey-güney istikametli yönlendirilebilmesi, yük türlerinde uzmanlaşmak ve konteyner taşımacılığına yönelik yeni limanların oluşturulması ile mümkün olacaktır. Bu sebeple Türkiye bölgesel ticaret üssü olabilmek ve taşımacılıkta öne çıkabilmek için yeni liman yatırımları yapmaktadır.

Tüm bu hedefler ve yeni yatırımlar doğrultusunda orta koridor ve Türkiye limanlarının bağlantısının araştırılması, en uygun liman seçimi uygulaması literatürde boşluk olarak görülmüş ve çalışmada bu amaca yönelik optimal sonuç veren yöntemler kullanılmıştır. Orta koridor üzerinden Türkiye'ye gelen ve deniz yolu ile devam edecek bir yük taşınması için en uygun liman seçimi amacıyla öncelikle paydaşlar için önemli kriterler araştırılmış, limanların teknik ve ticari özellikleri belirlenmiştir. Sonrasında ise belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması bulanık analitik hiyerarşi süreci yöntemiyle hesaplanmıştır. Limanların seçiminde dikkate alınacak nihai sıralamaya ise TOPSIS yönteminin uygulanmasıyla ulaşılmıştır.

## 2. Limanlar

Limanlar bir ülkenin dünyaya açılan kapısıdır. Limanlar ile ülkeler dünya ticaretinde öne çıkabilmektedir. Dünya tarihinde önemli bir medeniyet yoktur ki, denizler ile bütünleşmiş olmasın. Türkiye'de yüzlerce yıldır denizler ile çevrili, ticaret yollarının kesiştiği bir çevrede yer almaktadır. Türkiye'yi bölgesel anlamda öne çıkartan en önemli unsurlardan birisi denizlere sahip olmasıdır. Buna bağlı olarak deniz yolu taşımacılığına için oldukça elverişli olan Türkiye'nin uluslararası pazarlara ulaşmasında limanlar önemli rol oynamaktadır.

Küreselleşme ile birlikte limanlar sadece bölgesel yüke hizmet veren limanlar olmaktan çıkmış ve bir bölgenin limanı olmaktan çok bölgedeki yük trafiğinin limanı olma yönünde gelişme göstermiştir. Limanlar yapılanmalarını bölgelerindeki aktarma yüklerinden daha fazla pay almak için düzenlemektedir. Türkiye limanları, Doğu Akdeniz ve Karadeniz denizcilik hatlarında stratejik konumda yer almakta ve Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlü uluslararası ulaştırma koridorlarının kesişim noktasında bulunmaktadır. Buldukları avantajlı konum ile aktarma/transit yükleri çekebilecek özelliktedirler.

Türkiye'nin her bir bölgesinde bulunan limanları farklı ulaştırma ağlarına hizmet verebilecek konumda yer almaktadır. Akdeniz ve Ege Bölgesi'ndeki limanlar, kısa sapma mesafeleri ile Akdeniz'den geçen Asya-Avrupa ana denizcilik hattının yüklerini çekebilecek konumda yer almaktadır. Türkiye'nin Orta Doğu ve Asya ülkelerine ana denizcilik hattından gelen yüklerin iletilmesinde aktarma/transit limanı olarak Akdeniz limanları öne çıkmaktadır. Marmara

limanları; Avrupa Birliği tarafından oluşturulan Trans-Avrupa ve Pan-Avrupa ulaştırma koridorlarının Türkiye bağlantısı ve bu koridorların Doğu'ya uzatılması açısından öne çıkmaktadır. Marmara limanları ile Pan-Avrupa 4. koridoru ile Avrupa ülkelerinden Marmara limanlarına gelen yüklerin karayolu, demir yolu veya denizyoluyla Doğu ülkelerine transferi yapılabilecektir. Orta Asya ülkelerinin Avrupa ile ticaretinde en önemli ulaşım alanı olarak Karadeniz'deki limanlar düşünülebilmektedir.

Kuzey-Güney ulaştırma koridoru ile İran ve Hindistan'a kadar ulaşan Avrupa merkezli yükler Türkiye'den geçebilmektedir. Türkiye'deki limanların tercih edilmesinin tek nedeni coğrafi konum değil, liman operasyonlarının verimliliği, hizmet kalitesi, uygun liman ve bölgenin ulaşım altyapısıdır. Limanlar ancak hizmet sunduğu art alana ulaşımında karayolu ve demir yolu bağlantıları oranında öne çıkmaktadır. Türkiye'de bazı limanların demir yolu bağlantısının olmayışı en önemli altyapı eksikliği olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle konteyner trafiğinde % 90 paya sahip olan özel limanların demir yolu bağlantılarının bulunmaması, kombine taşımacılığın maliyet avantajlarından yararlanılamamasına yol açmaktadır. Konteyner taşımacılığı, demir yolu ile deniz yolunun entegre edilmesi ile anlamlı olacaktır. Bu sebeple demir yolu taşımacılığı konteynerin deniz dışındaki ulaşımı için en ideal ulaştırma modlarından birisidir.

Limanların seçiminde yüklerin daha ekonomik, hızlı ve güvenli şekilde aktarılması, liman ücretleri gibi bir takım faktörler öne çıkmaktadır. Bunlar ile beraber limanın ana denizcilik hatlarına yakın olması, kombine taşımacılık için gerekli alt yapıya sahip olması ana güzergâhtan sapma mesafelerinin kısa olması önemli hususlar arasındadır. Limanın altyapı ve üstyapı imkânlarının gelişmiş olması, liman hizmetlerinin müşteri gereksinimleri doğrultusunda şekillenmesi ve katma değerli hizmetler sunulması, operasyonel açıdan verimlilik, liman kalitesini etkileyen faktörler arasındadır. Tüm bu etmenler, firmaları liman seçiminde etkilemektedir.

### 3. Literatür Araştırması

Literatürde Modern İpekyolu ile ilgili birçok çalışma mevcut olmakla beraber bu alanda yapılan çalışmalar özellikle liman yeri seçim problemlerinden oluşmaktadır. Çalışmaların birçoğunda lojistik, gemi ve liman işletme firmaları için önem arz eden kriterler kullanılarak çözüme ulaşılmıştır. Bu kısımda literatürde yapılan çalışmalar ve makale kapsamındaki uygulamanın getirdiği yenilikler açıklanmıştır.

Karataş ve Oral Limanların aktarma yüklerinden aldıkları payı artırabilmeleri amaçlanarak aktarma limanı seçim kriterlerinin tespit edilmiş ve Türkiye limanlarının belirlenen kriterlerdeki etkinliği büyük ölçüde sağladıkları belirtilmiştir [2]. Akbayırlı vd. gelişen hinterlant bağlantıları, liman inovasyonları, liman özelleştirme politikaları ve liman kullanıcılarının değişen özel beklentileri doğrultusunda rekabete açık hinterlandlardaki liman kullanıcılarının liman seçim kriterlerini araştırmak ve bu liman kullanıcılarının seçim kriterlerini ölçen ve 32 kriterden oluşan bir model geliştirmişlerdir [3]. Pekkaya ve Bucak Türkiye-Batı Karadeniz Bölgesi'ndeki alternatif 4 liman yeri arasından liman kuruluş yeri seçimini etkileyen kriterlerin önem derecelerini belirlemek amacıyla PROMETHEE, TOPSIS, ÇKPM, VIKOR yöntemlerini karşılaştırarak liman kuruluş yeri seçimi için PROMETHEE yönteminin uygulanabilirliğini araştırmışlardır [4]. Aydın vd. liman yer seçimi probleminde etki eden ekonomik, çevresel ve sosyo-kültürel unsurları göz önünde bulundurarak Antalya ilinde kruvaziyer liman yer seçimi uygulaması yapmışlardır [5]. Özyağcı ve Oral kara terminali olarak adlandırılan (Dryport) tesislerin temel fonksiyonları incelenerek; çok modlu (multimodal) taşımacılık temelinde en uygun kara terminal yeri seçiminde CBS kullanımı Odessa Bölgesi limanları için örnek bir çalışma olarak verilmiştir [6]. Zeybek, demiryollarının konteyner limanlarının hinterlant bağlantılarındaki önemi incelenmiş, liman hinterlandında demiryolu taşımacılığının gelişmesine yönelik güçlü ve zayıf yönler ile fırsat ve tehditleri tespit etmek amacıyla Mersin Limanı örnek

alınarak bir SWOT analizi yapılmıştır [7]. Zeybek, Çin'den başlayıp Türkiye'den geçerek Avrupa'ya ulaşan Orta Koridor'a odaklanarak kıtalar arası demiryolu konteyner taşımacılığının gelişmesine yönelik fırsat ve tehditleri PESTLE analizi ile ortaya koymak, ayrıca Kuşak ve Yol Girişimi(BRI)'nin kıtalar arası demiryolu konteyner taşımacılığına etkisini incelemektir [8]. Özel konteyner liman yerinin seçiminde maliyet, sürdürülebilirlik, performans ve fiziki koşullar kriterleri altında çok kriterli karar verme çözümlerinden VIKOR yöntemini uygulamıştır [9]. Murphy vd. liman seçim faktörlerine etki eden kriterleri yerel taşımacılar, uluslararası gemi işletmecileri, uluslararası liman işletmecileri ve uluslararası lojistik firmaları gibi çeşitli katılımcıların beklentilerini dikkate alarak ortaya koymuştur [10]. Malchow ve Kanafani ABD'de limanlar arasındaki bağlantıların değerlendirilmesinde coğrafi konum, liman özellikleri ve gemi programları kriterlerini kullanarak her bir yük türü ve taşıyıcı firma için seçim sürecine etkilerini açıklamışlardır [11]. Murphy ve Daley uluslararası nakliyatçılar ve liman işletmecilerinin bakış açılarını analiz etmek amacıyla liman seçim faktörlerinin karşılaştırmalı analizlerini yapmışlardır [12]. Slack, Kuzey Amerika Orta Batı ve Batı Avrupa arasındaki konteyner trafiğine odaklanılarak, ihracatçılar ve nakliye firmaları tarafından dikkate alınan faktörler ışığında nakliyatçıların liman seçimi sürecinde kullandıkları kriterleri araştırmaktadır [13]. Lirn vd. küresel okyanus konteyneri operatörlerini kapsayan 12 kriter kullanarak 20 liman arasında aktarma limanı seçiminde AHP uygulamasını kullanmıştır [14]. Alonso ve Soriano liman seçim kriterlerin belirlenmesinde etkili olan karar verici grupların homojen dağılmadığını savunarak bu kriterlerin etkinliğini arttırmak için hinterland perspektifini ve ayrık seçim modelleme yaklaşımını kullanmışlardır [15]. Lirn vd aktarma limanı seçimi karar verme sürecinde çeşitli kriterlerin önemini belirlemek için bulanık AHP tekniğini kullanmışlardır [16]. Lam, müşterilerin ve lojistik firmalarının beklentilerinden yola çıkarak bağlantı noktası seçimi ile ilgili literatürü özetlemiş, AHP metodolojisi kullanılarak bağlantı noktası seçimi için bir karar destek sistemi önermiştir [17]. Feng vd. 21. Yüzyıl Deniz İpek Yolu boyunca üye ülkeler arasında liman işbirliğinin etkinliklerini tanımlamış ve bunlar arasında oyun teorisine dayalı yol seçim problemine çözüm getirmiştir [18]. Song vd, Bayes ağlarının geçerliliğini ve avantajlarını ayrıntılı olarak kanıtlamak için 21. yüzyıl Deniz İpek Yolu" nun optimum liman yatırımı karar verme problemi ile ilgili bir vaka örneği sunulmuştur [19]. Gao vd, Fuzzy-AHP ve ELECTRE III modeline dayalı çin'deki Quanzhou Limanı'nın kuşak ve yol üzerindeki rekabet edebilirliğinin incelemiştir [20]. Chou, Uluslararası ticaret konteyner taşımacılığı işletme maliyetini düşürmek ve liman aktarma hizmetlerindeki etkinliği artırılması için konteyner liman seçim probleminde bulanık çok kriterli karar verme yöntemi uygulamıştır [21]. Tran, gemi maliyeti, liman tarifesi, iç nakliye maliyeti ve envanter maliyeti dahil olmak üzere toplam maliyeti en aza indirme amaçlı liman seçim probleminde liman seçimi kararında lojistik faktörlerin etkisini analiz etmiştir [22]. Bagocius vd, Ekonomik ihtiyaçları karşılamak için Klaipeda bölgesinde bir derin deniz limanı yer seçimi için entropi ve WASPAS yöntemlerinin bir kombinasyonu kullanmışlardır [23]. Onwuegbuchunam, Nijeryada kıyı limanlarında mevcut olan yolcu gemisi hizmetlerini kullanan Nijeryalı nakliyatçıların liman seçim kriterlerini ampirik olarak araştırmış, vinç verimliliğinin, yani limandaki yük elleçleme hızının, liman tesislerinin seviyesi ve işlevselliğinin, sevkiyat boyutunun, Gemi çağırma sıklığı ve limana olan antrepo mesafesi, petrol dışı deniz taşımacılığı yapan göndericilerin, sevkiyat yapmak için limanları seçerken dikkate aldıkları en önemli faktör olduğu sonucuna varmıştır [24]. Zavadskas vd, Baltık Denizinin Doğu ve Batı Avrupa arasında bir arteriyel ulaşım koridorundaki coğrafik önemine değinerek bu bölgede yapılacak bir liman için yer seçimi probleminin çözümünde Analitik Hiyerarşi (AHP) ve Bulanık Oran Değerlendirme (ARAS-F) yöntemlerini kombine etmiştir [25].

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, birçoğunu liman yeri seçim problemlerinin oluşturduğu görülmektedir. Lojistik faaliyetler temel olarak altyapı ve işletme olarak iki ana kola ayrılmaktadır. Literatürdeki örneklerin birçoğunu altyapı olarak tanımlanan liman inşası için yer seçimine ait çalışmalar oluşturmaktadır. Bu makale kapsamında yapılan çalışma ise kombine bir yük taşınması için en ideal liman seçimi problemi ele alınmıştır. Daha önce kullanılan çok kriterli karar verme problemleri çalışma kapsamındaki uygulamada orta koridor üzerinden Türkiye' ye

gelen ve denizyolu ile devam edecek bir yük taşınması için optimal liman seçimine yeni bir yaklaşım getirmiştir.

#### 4. Kullanılan Metot

Karar verme problemlerinde birden fazla kriter ve alternatif olduğu durumlarda en ideal çözüme ulaşmada çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanmaktadır. Karar vericilerin belirlediği kriter önemleri ve alternatiflerin gerçek değerlerinin bir arada kullanılmasıyla çok kriterli karar verme yöntemleri optimal sonuçlar vermektedir. Bu uygulamada çok kriterli karar verme yöntemlerinden bulanık analitik hiyerarşi süreci ve TOPSIS yöntemi bir arada kullanılmıştır. Liman seçim problemlerinde paydaşlar için önem arz eden kriterler ve limanların teknik ve ticari özellikleri belirlenmiş ve bu iki yöntem bir arada kullanılarak orta koridor üzerinde Türkiye' ye gelen ve deniz yolu ile devam edecek bir yük taşınması için en ideal liman seçimi için bir yöntem önerilmiştir.

Bu kısımda uygulamanın çözümü aşamasında kullanılan bulanık analitik hiyerarşi süreci ve TOPSIS yöntemlerinin notasyonları verilmiştir.

##### 4.1. Bulanık analitik hiyerarşi süreci

Çok kriterli karar verme yöntemlerinin en sık kullanılanlarından bir tanesi analitik hiyerarşi sürecidir. Fakat belirsizliğin arttığı, sayısal değerlerin yeterli kalmadığı durumlarda bulanık mantık devreye girmekte, problemlerin çözümünde bu yöntemlerin kullanılması büyük kolaylık sağlamaktadır. Tüm hizmet sektörlerinde olduğu gibi lojistik sektöründe de karar verme sadece sayısal veriler yeterli olmayıp kalitenin ölçülmesinde kullanılan ve dilsel değerlerle ifade edilen ağırlıklar bulunmaktadır. Böyle durumlarda bulanık analitik hiyerarşi prosesinin kullanılması karar vericilere büyük kolaylık sağlamaktadır. Literatürde birçok bulanık AHS kullanılmasına rağmen bunların arasında hesaplama yöntemi ve puanlandırma kolaylığı sağlayan ve ilk olarak Chang tarafından ortaya çıkarılan genişletilmiş bulanık AHS yöntemidir. Yöntemin temel çalışma adımları aşağıdaki gibidir [26].

1.Adım: Bulanık yapay büyüklük değeri, i. nesneye göre söyle tanımlanır:

$$s_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j * \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (1)$$

$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$  ifadesini elde etmek için m değerleri üzerinde bulanık sayılarda toplama işlemini aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{j=1}^m l_i, \sum_{j=1}^m m_i, \sum_{j=1}^m u_i \right) \quad (2)$$

$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$  ifadesini elde etmek için  $M_{gi}^j$  (j=1,2,3,...,m) üzerinde bulanık toplama işlemi yapılır.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m = \left( \sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (3)$$

Son olarak ise Eşitlik 1'deki denklemin vektörün tersi hesaplanır.

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (4)$$

2.Adım:  $M_1 = (l_1, m_1, u_1) \leq M_2 = (l_2, m_2, u_2)$  ifadesinin olasılık derecesi aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \quad (5)$$

$M_1 = (l_1, m_1, u_1)$  ve  $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$  üçgensel bulanık sayılar olmak üzere;

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & m_2 \geq m_1 \\ 0, & l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

İfadesi elde edilir.

3.Adım: Konveks bir bulanık sayının olasılık derecesinin k konveks sayıdan  $M_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ ) daha büyük olması aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} V(M \geq M_1, M_2, M_3, \dots, M_k) &= V[(M \geq M_1), (M \geq M_2), (M \geq M_k)] \\ &= \min V(M \geq M_i) \quad i = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (6)$$

$k = 1, 2, \dots, n$ ;  $k \neq j$  için  $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$  olarak alınırsa ağırlık vektörü aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (7)$$

Burada  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) n elemandan oluşur.

4.Adım: Eşitlik 6' da verilen ağırlık vektörü normalize edildiğinde;

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (8)$$

Vektörü bulunmuş olur ve bu W ağırlık vektörü bulanık bir sayı değildir.

Bulanık AHS yönteminde kriterlerin ağırlıklandırılmasında kullanılan önem ölçüğü ise aşağıdaki gibidir [26].

**Tablo 1.** Bulanık AHS önem ölçeği

Açıklama	Önem Derecesi	Önem Derecesi Eşleniği
Eşit Önemli	(1,1,1)	(1,1,1)
Daha Önemli	(2/3,1,3/2)	(2/3,1,3/2)
Çok Daha Önemli	(3/2,5,5/2)	(2/5,1/2,2/3)
Çok Fazla Önemli	(5/2,3,7/2)	(2/7,1/3,2/5)
Kesin Önemli	(7/2,4,9/2)	(2/9,1/4,2/7)

#### 4.2. TOPSIS yöntemi

Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında çok kriterli karar verme tekniği olarak geliştirilen TOPSIS yöntemi, çözüm alternatifinin pozitif-ideal çözüme en kısa mesafe ve negatif-ideal çözüme en uzak mesafeyi hesaplayabilme amacına göre oluşturulmuştur. TOPSIS yöntemi ile az sayıda veri kullanılarak anlaşılır bir sonuç elde edilebilmektedir. İdeal çözüme yakınlık karın maksimizasyonu, negatif ideal çözüme uzaklık ise maliyetin minimizasyonu anlamına gelmektedir. Ulaşılmak istenilen hedefin ideal çözüme yakın olması istenilirken aynı zamanda negatif ideal çözümden uzak olması beklenir. TOPSIS yöntemi adımları aşağıdaki şekilde sıralanır [27].

1. Karar matrisinin oluşturulması,
2. Normalize matrisin elde edilmesi,
3. Ağırlıklandırılmış normalize matrisin elde edilmesi,
4. İdeal ve negatif ideal çözüm değerlerinin elde edilmesi,
5. İdeal ve negatif ideal noktalara olan uzaklık değerlerinin elde edilmesi,
6. İdeal çözüme göreli yakınlığın hesaplanması.

#### 5. Uygulama

Uygulama Türkiye'ye orta koridor üzerinden gelen ve diğer ülkelere deniz yolu ile devam edecek bir yük taşıması için en ideal liman seçimi önerisi yapılmıştır. Öncelikle Türkiye'de demiryolu bağlantılı limanlar alternatif olarak belirlenmiş, sektör paydaşlarının taşımalar için önem arz eden kriterleri altında belirlenen limanlar bulanık AHS ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

##### 5.1. Alternatiflerin belirlenmesi

Uygulamada alternatif olarak Türkiye'de demiryolu bağlantılı limanlar alternatif olarak belirlenmiş, limanlara ait özelliklere bu kısımda yer verilmiştir.

Haydarpaşa Limanı: Haydarpaşa Limanı 20.04.1899 tarihinde Anadolu Bağdat Demiryolları Kumpanyasına inşa ettirilmeye başlanmış ve 1924 senesine kadar bu kumpanya tarafından işletilmiştir. Daha sonra TCDD işletmesine devredilmiş olup gerçek anlamda 1967 yılında hizmete girmiştir [28].

İzmir Limanı: Yapımına 1957 yılında başlanmış olup 1964 yılından itibaren 440 sayılı Kanun çerçevesine alınan Denizcilik Bankası TAO İktisadi Devlet Teşekkülü olarak faaliyetine devam etmiştir. Yüksek Planlama Kurulu'nun 16.12.1988 tarih ve 88/121 sayılı Kararı ile İzmir Liman İşletmesi; 1 Ocak 1989 tarihi itibarıyla TCDD'ye devredilmiştir [28].

Bandırma Limanı: Mazisi M.Ö. 8-10. Yıllara kadar uzanan liman ciddi anlamda 1924 yılında inşa edilen Belediye İskelesi ile faaliyete geçmiştir. Bugünkü modern limanın temelleri ilgili çalışmalar etüt ve proje bazında 1952 yılında başlatılmış, inşasına ise 1963 senesinde başlanmıştır. 2004 yılında yapılan ihale sonucunda Çelebi Ortak Girişim Grubuna, 18.05.2010 tarihinde 36 yıl süreyle işletilmek üzere devredilmiştir. Liman, faaliyetlerine Çelebi Bandırma Uluslararası Liman İşletmeciliği A.Ş. adı altında devam etmektedir [29].

Derince Limanı: Liman 1900 yılında verilen bir imtiyazla Anadolu Bağdat Demiryolları Kumpanyası tarafından inşaatına başlanılıp, 1904 yılında işletmeye açılmıştır. 2004 yılında Safi Katı Yakıt Sanayi ve Ticaret A.Ş. 39 yıl süreyle işletilmek üzere devredilmiştir. Liman, faaliyetlerine Safi Derince Uluslararası Liman İşletmeciliği A.Ş. adı altında devam etmektedir [30].

İskenderun Limanı: İsminden de anlaşılacağı üzere mazisi (M.Ö. 333) Büyük İskender'e dayanan bölgede 1909 yılında Anadolu – Bağdat Demiryolları Kumpanyasına verilen Limanın inşa imtiyazı sonralı Kanunla Devlet Demiryolları İdaresi'ne fiilen devredilmiş, 2004 yılında ise Limak Yatırım Enerji Üretim İşletme Hizmetleri ve İnşaat A.Ş.'ne 36 yıl süreyle işletilmek üzere devredilmiştir. Liman, faaliyetlerine Limak İskenderun Uluslararası Liman İşletmeciliği A.Ş. adı altında devam etmektedir [31].

Mersin Limanı: Mısır'da Süveyş Kanalının inşa edilmeye başlanması ile birlikte, Mersin bir liman olarak daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. 1890 yıllarda doğal liman çerçevesinde taşımacılık faaliyetleri hız kazanmış, yeni iskeleler yapma ihtiyacı doğmuştur. 1942 yılında Devlet Demiryolları ve Limanları İşletme Umum Müdürlüğüne devredilmiştir. 2004 yılında PSA Akfen Ortak Girişim Grubuna 36 yıl süreyle işletilmek üzere devredilmiştir. Liman, faaliyetlerine Mersin Uluslararası Liman İşletmeciliği A.Ş. (MIP) adı altında devam etmektedir [32].

Samsun Limanı: M.Ö. 3500 yıllarına dayanan şehrin yapılanması ile birlikte bu tarihten itibaren bugünkü Samsun Limanı tabii liman olarak kullanılmıştır. 1953 yılında TCDD'ye devredilmiştir. 2004 yılında Ceynak Lojistik ve Ticaret A.Ş.'ne 36 yıl süreyle işletilmek üzere devredilmiştir. Liman, faaliyetlerine Samsun Uluslararası Liman İşletmeciliği ( Samsunport) adı altında devam etmektedir [33].

## 5.2. Kriterlerin belirlenmesi

Kriterlerin belirlenmesi sektör paydaşlarının beklentileri ve günlük hayat verileri etkili oluş olup kriterlere ait açıklamaya bu kısımda yer verilmiştir.

Gemi Kabul Kapasitesi: Bir yıl içerisinde liman rıhtıma yanaşabilen gemi sayısı olarak ifade edilir.

Konteyner Elleçleme Kapasitesi: Limana gelen yüklerin bir yıllık periyotta özel elleçleme ekipmanları aracılığıyla gemiden indirilmesi ve yüklenmesinin kapasitesidir.

Konteyner depolama kapasitesi: Limana gelen konteynerlerin lojistik faaliyet işlemleri tamamlanana kadar depolama kapasitesidir.

Yükleme-Boşaltma ücreti: Konteynerlerin limana gelen gemilere yüklenmesi ve boşaltılması faaliyetleri için konteyner başına ödenen ücret olarak tanımlanır.

Ardıye ücreti: Limana indirilen konteynerlerin ücretsiz bekleme süresinden sonra gün başına ödenen ücret olarak tanımlanır.



### 5.3. Kriterlerin Bulanık AHS yöntemiyle ağırlıklandırılması

Bu aşamada sektör paydaşlarınca belirlenen beş adet kriter Eşitlik 1 – 8 yardımıyla ağırlıklandırılmış ve kriterlerin önem ağırlıkları elde edilmiştir.

**Tablo 2.** İkili karşılaştırma matrisinin oluşturulması

Kriter Adı	Gemi Kabul Kapasitesi			Toplam Elleçleme Kapasitesi			Toplam Stoklama kapasitesi			Yükleme-Boşaltma ücreti			Ardiye ücreti		
Gemi Kabul Kapasitesi	1	1	1	1	1/2	1/3	1/2	1/3	1/4	1/2	1/3	1/2	1	1/2	1/3
Toplam Elleçleme Kapasitesi	3	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1/2	1	1	1/2	1/2
Toplam Stoklama kapasitesi	2	3	2	1/3	1/2	1	1	1	1	1/2	1/3	1/2	1	1	1
Yükleme-Boşaltma ücreti	2	3	2	2	1	2	2	3	2	1	1	1	2	1	2
Ardiye ücreti	3	2	2	2	2	2	2	1	2	1/2	1	1/2	1	1	1

Öncelikle tüm kriterlerin birbirleri arasındaki karşılaştırılmasının gösterildiği ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur ve Tablo 2’ de verilmiştir.

**Tablo 3.** Bulanık karşılaştırma değerinin geometrik ortalaması

Kriter Adı	r <sub>i</sub>		
Gemi Kabul Kapasitesi	0,758	0,488	0,425
Toplam Elleçleme Kapasitesi	1,246	1,000	1,084
Toplam Stoklama kapasitesi	0,803	0,871	1,000
Yükleme - Boşaltma ücreti	1,741	1,552	1,741
Ardiye ücreti	1,431	1,320	1,320
Toplam	5,978	5,230	5,570
Tersine Çevrilmiş	0,167	0,191	0,180
Artan Düzende	0,167	0,180	0,191

**Tablo 4.** Bulanık karşılaştırma değerinin geometrik ortalaması

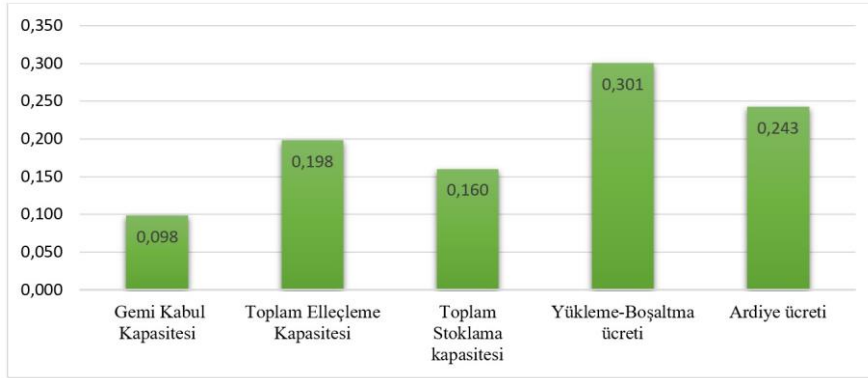
Kriter Adı	W <sub>i</sub>		
Gemi Kabul Kapasitesi	0,127	0,088	0,081
Toplam Elleçleme Kapasitesi	0,208	0,180	0,207
Toplam Stoklama kapasitesi	0,134	0,156	0,191
Yükleme - Boşaltma ücreti	0,291	0,279	0,333
Ardiye ücreti	0,239	0,237	0,252

Sonraki adımda ise bulanık karşılaştırma değerinin geometrik ortalaması ( $w_i$ ) hesaplanmış ve Tablo 4 yardımıyla gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Kriterlerin ortalama ve normalleştirilmiş ağırlığı

Kriter Adı	$M_i$	$N_i$
Gemi Kabul Kapasitesi	0,099	0,098
Toplam Elleçleme Kapasitesi	0,198	0,198
Toplam Stoklama kapasitesi	0,161	0,160
Yükleme - Boşaltma ücreti	0,301	0,301
Ardiye ücreti	0,243	0,243

Kriterlerin ortalama ( $M_i$ ) ve normalleştirilmiş ağırlığı ( $N_i$ ) da hesaplanarak Tablo 5' de gösterilmiştir. Eşitlik 1 – 8 yardımıyla kriterlerin birbirleri arasında değerlendirmelerinin yapılması sonucunda önem ağırlıkları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Kriterlerin önem ağırlıkları

Kriterlerin önem ağırlıklarına bakıldığında, en yüksek değer yüklem-boşaltma ücreti olduğu, bunu ardiye ücretinin ve limanın toplam elleçleme kapasitesinin takip ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Yüklem-boşaltma ve ardiye ücreti kriterlerinin önem ağırlıklarının yüksek olması firmaların maliyet kriterlerinin önemli olduğu, bunu yanı sıra limanın toplam elleçleme kapasitesinin yüksek olmasının da lojistik faaliyetlerin aksamaması adına kapasiteye verilen önemi göstermektedir.

#### 5.4. Alternatiflerin TOPSIS yöntemiyle belirlenmesi

Alternatif olarak belirlenen Türkiye'de demiryolu bağlantısı olan 7 adet liman çok kriterli karar verme yöntemlerin TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Yöntemin kriterler ağırlıkları kısmında bulanık AHS yöntemi kullanılarak elde edilen ve Şekil 1'de verilen ağırlıklar kullanılmıştır.

**Tablo 6.** Karar matrisinin oluşturulması

Kriterler	Gemi Kabul Kapasitesi	Konteyner Elleçleme Kapasitesi	Konteyner depolama kapasitesi	Yükleme-Boşaltma ücreti	Ardiye ücreti
<i>Birim</i>	<i>(gemi/yıl)</i>	<i>(1000 TEU/yıl)</i>	<i>(TEU/yıl)</i>	<i>kont/usd</i>	<i>gün/usd</i>
Haydarpaşa Limanı	1.169	655.000	426.000	70,00	2
İzmir Liman	2.767	1.164.900	1.230.807	70,00	3
Bandırma Limanı	1.800	350.000	1.531.175	100,00	5
Derince Limanı	862	1.000.000	2.500.000	60,00	8
İskenderun Limanı	770	1.000.000	1.000.000	100,00	8
Mersin Limanı	4.200	2.600.000	3.600.000	105,00	5
Samsun Limanı	1.130	250.000	3.650.000	95,00	8

7 adet liman için elde edilen veriler kullanılarak karar matrisi oluşturulmuş ve Tablo 6' da verilmiştir [28 - 33]. Sonrasında işlem kolaylığı için matris normalize edilmiş, bulanık AHS yöntemiyle elde edilen ve Şekil 1' de gösterilen kriter ağırlıkları kullanılarak da ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur. TOPSIS çözüm yönteminin devamı olarak ideal ve negatif ideal çözüm kümeleri oluşturulmuş, bu kümelere ideal ve negatif ideal çözümlere yakınlıklar hesaplanmış ve son kısımda ise limanlar seçimi için elde edilen sıralama elde edilmiş ve Tablo 7' de verilmiştir.

**Tablo 7.** Liman seçimi öncelik sıralaması

Alternatifler	Öncelik değeri	Öncelik sırası
Haydarpaşa Limanı	0,1285	7
İzmir Liman	0,3120	6
Bandırma Limanı	0,3899	5
Derince Limanı	0,5078	2
İskenderun Limanı	0,4718	3
Mersin Limanı	0,8897	1
Samsun Limanı	0,4421	4

## 6. Sonuç ve Öneriler

Türkiye'nin Modern İpek Yolunda orta koridorun merkezinde yer alması, kendisine büyük bir avantaj sağlamaktadır. Demir yolu ile gelecek malların transit şekilde Türkiye'den geçmesi, büyük potansiyelleri beraberinde getirmektedir. Orta koridor üzerinde efektif verim, kombine taşımacılık uygulamaları ile sağlanacaktır [34-35].

Bu çalışmada orta koridor üzerinden Türkiye'ye gelen ve diğer ülkelere deniz yolu ile devam edecek bir yük taşınması için ideal liman seçimi problemine çözüm getirilmiştir. Lojistik sektörü paydaşlarınca önem arz eden kriterler öncelikle bulanık AHS yöntemiyle ağırlıklandırılmış daha sonra demiryolu liman bağlantısı olan yedi adet liman bu kriterlere ait veriler ile TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en ideal limanın diğerlerine göre üstünlük sağlayan bir sonuçla Mersin Limanı'nın olduğu gözlenmiştir. Mersin Limanı'nın özellikle elleçleme, ardiye ve gemi kabul kapasitesindeki üstünlüğü, önem arz eden iki kriter olan elleçleme ve ardiye ücretinde ise diğer limanlara göre yakın seviyede olması öne çıkmasında önemli etken olmuştur.

Çalışma sonucunda Mersin Limanının önemi ortaya çıkmıştır. Akdeniz'in önemli limanlarından biri olan Mersin Limanı, Ortadoğu ülkelerinin transit merkezidir. İç Anadolu, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin ithalat-ihracat kapısıdır. İlerleyen yıllarda Gaziantep-Mersin demir yolu ile önemi daha da artacaktır. Mersin limanı uzun vade de Orta koridor ile gelen yüklerin elleçleme merkezi olmaya yakındır.

### Kaynakça

- [1] Ö. Sacar, "İpek yolu güzergahında yapılan lojistik etkinliklerin günümüz lojistik faaliyetleri ile karşılaştırılması," Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Balıkesir, 2018.
- [2] Ç. Karataş and E. Z. Oral "Aktarma Limanlarının Seçim Kriterleri," 6. *Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu*, pp. 149–156, 2005.
- [3] E. Akbayrılı and E. Kurtuluş, "Container Port Selection in Contestable Hinterlands," *Journal of ETA Maritime Science*, vol. 5, no. 3, pp. 290–299, 2017.
- [4] M. Pekkaya and U. Bucak, "Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Bölgesel Liman Kuruluş Yeri Seçimi: Batı Karadeniz'de Bir Uygulama," *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Derg.*, pp. 5–7, 2018.
- [5] S. Z. Aydın, F. Bikitaş and İ. Balık, "Antalya Kruvaziyer Liman Projesinin Yer Seçim Kriterleri ve Sorumlu Turizm Açısından Değerlendirilmesi," *Arch. Anesthesiol. Crit. Care*, vol. 4, no. 4, pp. 527–534, 2018.
- [6] N. Özyağcı and E. Z. Oral, "Optimum Güzergâh Dikkate Alınarak Liman Kara Terminallerinin Yer seçimi: Örnek bir Çalışma Odessa," 7. *Kıyı Mühendisliği Sempozyumu*, pp. 645–655, 2011.
- [7] H. Zeybek, "Demiryollarının Konteyner Limanı-Hinterlant Bağlantılarındaki Önemi: Mersin Limanı Örneği," *Demiryolu Mühendisliği*, no.14, pp.49–64, 2021.
- [8] H. Zeybek, "Yeni İpek Yolunun Kıtalar Arası Demiryolu Konteyner Taşımacılığına Etkisi: Pestle Analizi," *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol.13, pp. 724–740, 2020.
- [9] A. Özel, "Çok kriterli karar verme yöntemlerinden vikor yöntemi ile konteyner liman yeri seçimi," Yaşar Üniversitesi, 2018.
- [10] V. T. N. Nha, S. Djahel and J. Murphy, "A comparative study of vehicles' routing algorithms for route planning in smart cities," *1st Int. Work. Veh. Traffic Manag. Smart Cities*, 2012.
- [11] M. B. Malchow and A. Kanafani, "A disaggregate analysis of port selection," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 40, pp. 317–337, 2004.
- [12] P. R. Murphy and J. M. Daley, "Analysis Factors Selection of Port," *American Society of Transportation and Logistics*, vol. 34, no. 1, pp. 15–21, 2015.
- [13] B. Slack, "Containerization, inter-port competition, and port selection," *Maritime Policy & Management*, pp. 37–41, 2006.
- [14] T. C. Lirn, H. A. Thanopoulou and A. K. C. Beresford, "Transshipment Port Selection and Decision-making Behaviour: Analysing the Taiwanese Case," *Int. J. Logist. Res. Appl.*, vol.6, no 4, pp.229–244, 2003.
- [15] L. G. Alonso and J. Sanchez-Soriano, "Port selection from a hinterland perspective," *Marit. Econ. Logist.*, vol. 11, no. 3, pp. 260–269, 2009.
- [16] T. C. Lirn, H. A. Thanopoulou, M. J. Beynon and A. K. C. Beresford, "An application of AHP on transshipment port selection: A global perspective," *Marit. Econ. Logist.*, vol.6, no.1, pp.70–91, 2004.
- [17] J. S. L. Lam and J. Dai, "A decision support system for port selection," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 509–524, 2012.
- [18] L. Feng, L. Liu and H. Zhang, "Game Theory-Based Pathway Selection for Fair and Reciprocal Cooperation among Ports along the Maritime Silk Road," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2019.
- [19] C. Song, Z. Xu, Y. Zhang and X. Wang, "Dynamic hesitant fuzzy Bayesian network and its application in the optimal investment port decision making problem of twenty-first century maritime silk road," *Appl. Intell.* 50, 1846–1858, 2020.
- [20] T. Gao, S. Na, X. Dang and Y. Zhang, "Study of the competitiveness of Quanzhou Port on the Belt and Road in China based on a fuzzy-AHP and ELECTRE III model," *Sustain.*, vol. 10, no. 4, 2018.
- [21] C. Chou, "A fuzzy MCDM method for solving marine transshipment container port selection problems," *Appl. Math. Comput.*, vol. 186, no. 1, pp. 435–444, 2007.
- [22] N. K. Tran, "Studying port selection on liner routes: An approach from logistics perspective," *Res.*

- Transp. Econ.*, vol. 32, no. 1, pp. 39–53, 2011.
- [23] V. Bagočius, K. E. Zavadskas and Z. Turskis, “Multi-criteria selection of a deep-water port in Klaipėda,” *Procedia Eng.*, vol. 57, pp. 144–148, 2013.
- [24] D. E. Onwuegbuchunam, “Port selection criteria by shippers in Nigeria: A discrete choice analysis,” *Int. J. Shipp. Transp. Logist.*, vol. 5, no. 4–5, pp. 532–550, 2013.
- [25] E.K. Zavadskas, Z. Turskis and J. Antucheviciene, “Selecting a Contractor by Using a Novel Method for Multiple Attribute Analysis: Weighted Aggregated Sum Product Assessment with Grey Values (WASPAS-G),” *Studies in Informatics and Control*, 24 (2): 141-150, 2015.
- [26] T. Demirel, N. Ç. Demirel, and C. Kahraman, “Fuzzy analytic hierarchy process and its application,” *Springer Optim. Its Appl.*, vol. 16, no. June 2014, pp. 53–83, 2008.
- [27] C. L. Hwang and K. Yoon, “Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications,” *Springer-Verlag*, 1981.
- [28] TCDD, [Online]. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/limanlar>, [Accessed September 1, 2021].
- [29] Port of Bandırma, [Online]. Available: <http://www.portofbandirma.com.tr/kurumsal/hakkimizda>, [Accessed September 1, 2021].
- [30] Safi Port, [Online]. Available: <https://www.safiport.com.tr/tarihce>, [Accessed September 1, 2021].
- [31] Limak Ports, [Online]. Available: <http://www.limakports.com.tr/tr/limakports/tarihce>, [Accessed September 1, 2021].
- [32] Mersin International Port, [Online]. Available: <https://www.mersinport.com.tr/hakkimizda/detay/Hakkimizda/13/1/0>, [Accessed September 1, 2021].
- [33] Samsun Port, [Online]. Available: <https://www.samsunport.com.tr/tr/kurumsal/tanitim-ve-tarihce>, [Accessed September 1, 2021].
- [34] S. Özdemir, Ö. Sacar, E. Özcan, “Dijkstra algoritması kullanılarak ipek yolu koridorları arasında en kısa ulaştırma güzergâhının belirlenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 97-105, 2021.
- [35] S. Özdemir, B. Keskin, T. Eren and E. Özcan, “Türkiye’deki lojistik merkezleri yatırım önceliklerinin değerlendirilmesinde çok kriterli karar modeli önerisi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 12, pp. 83-94, 2020.

## Özgeçmiş



### Ömer SACAR

1986 yılında Bursa’da doğdu. 2009’da İstanbul Üniversitesi Ulaştırma ve Lojistik Fakültesi’nden mezun oldu. 2018’de Balıkesir Üniversitesi İşletme yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2010 senesinden Türkiye’nin ilk lojistik öğretmenlerinden biri olarak MEB’de göreve başlayan SACAR, 2021’den itibaren Bursa Osmangazi Ergin Ağaç MTAL’de göreve devam etmektedir. Lojistik alanında yüzlerce öğrenci ve eğitmeniye yönelik Avrupa projeleri yazmakta ve yönetmektedir.

E-Posta: omersacar@hotmail.com



### Sezgin ÖZDEMİR

1987 yılında Bartın’da doğdu. 2004 yılında Karabük Mustafa Yazıcı Lisesi’nden mezun oldu. 2010 yılında İstanbul Üniversitesi Ulaştırma ve Lojistik, 2016 yılında Hoca Ahmet Yesevi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümlerinde lisans eğitimlerini tamamladı. Yüksek lisans eğitimini Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde almış olup TCDD Taşımacılık A.Ş.’de Yüksek Mühendis olarak çalışmaktadır.

E-Posta: ozdemir\_sezgin@hotmail.com

## Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



## B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının Deneysel İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN\*<sup>1</sup>, Bekir AKTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

\*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 02.09.2021, Kabul/Accepted: 03.01.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Günümüz demiryolu işletmeciliğinde artan hız ve aralıksız işletim koşulları sonucunda, daha düşük bakım gerektiren ve uzun ömürlü çözümler mecburiyet halini almıştır. Bu çalışmada, en önemli demiryolu üstyapı elemanlarından biri olan traversler ele alınmıştır. Klasik B70 tipi önerilmeli betonarme traverslerin faydalı servis ömrünün, sönümleme performansının ve rezonans direncinin artırılması adına, yerli polipropilen elyaf (PP) donatı kullanımının sağlayabileceği potansiyel faydalar araştırılmıştır. Üretilen elyafli ve elyafsız numunelerde TS EN 13230-2’de yeni bir travers dizaynı esnasında istenilen yüklem-kaldırma-tekrar yüklem esaslı kademeli artışı statik eğilme testlerinin yanı sıra, modern modal testler ve yüksek hızlı darbe testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre uzun ve verimli servis ömrü açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Öngerilmeli Travers, B70 Tipi Travers, Polipropilen, Elyaf Takviyeli Beton, Modal Test, Darbe Testi

### Experimental Investigation of the Use of Polypropylene Fiber in B70 Type Railway Sleepers

**Abstract:** As a result of increasing speed and uninterrupted operating conditions in today's railway operations, low maintenance and long-lasting solutions have become a necessity. In this study, sleepers, one of the most important railway superstructure elements, are discussed. To increase the useful service life, damping performance and resonance resistance of conventional B70 type prestressed reinforced concrete sleepers, the potential benefits of using domestic polypropylene fiber (PP) reinforcement were investigated. During the design of a new sleeper in TS EN 13230-2, on the produced fibrous and non-fibrous samples, the desired loading-unloading-reloading based gradual incremental static bending tests, as well as modern modal tests and high-speed impact tests were carried out. According to the test results, positive results were obtained in terms of long and efficient service life.

**Keywords:** Prestressed Sleeper, B70 Type Sleeper, Polypropylene, Fiber Reinforced Concrete, Modal Test, Impact Test

## 1. Giriş

Demiryolu traversleri, raylardan aldığı yük ve titreşimleri, altyapıya sönümleyerek aktarmakta ve yol geometrisini korumakta büyük öneme sahiptir [1]. İyi bir demiryolunda, ray üzerinde pürüzsüz bir yüzey ve taşıt tekerlerinin tam dairesel olması istenmektedir. Bu tarz hatlarda demiryolu taşıtları genellikle düşük şiddetli ve düşük frekanslı yükler oluşturmaktadır [2]. Ancak zamanla kaçınılmaz şekilde tekerlerde ve raylarda anormallikler oluşmakta ve daha yüksek frekanslar ve dolayısıyla daha yüksek yükler meydana gelmektedir [3]. Queensland Teknoloji Üniversitesi (Avustralya) tarafından 2004 yılında, 12 ay süreyle, boş/dolu yaklaşık 6 milyon dingil geçişi kayda alınmıştır. Kayıt sonuçlarına göre %96’lık dilim 50 kN ve altıdır. Ancak çalışma yapılan yıl içerisinde 100.000 adet bu yükü aşan ve 310 kN’a varan darbeler meydana gelmiştir [4]. Her ne kadar her bir ölçüm kaydının, ölçüm yapılan demiryolu hattının işletim şartlarının (farklı ekartman açıklıkları, dingil yükleri, hız limitleri, bakım prosedürleri vb.) fonksiyonu olmasına rağmen, bu ve benzeri birçok saha çalışmasına göre traverslerin servis

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, “ B70 tipi demiryolu traverslerinde polipropilen fiber kullanımının deneysel incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 158-169, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.990316

ömrünü düşüren darbe yükleri azımsanamayacak derecede fazladır. Nitekim, günümüzde yaygın tespit ve kabule göre; demiryolu traversleri, rezonans frekansına ulaşan yük tahrikleri ile sıkça deforme olmaktadır [5]. Hatta bazı kaynaklarda, traverslerde hasar oluşmasının en büyük nedeninin traversin rezonans frekansına erişmesinden kaynaklandığının kesin olarak bilindiği ifade edilir hale gelmiştir [6]. Çelik tekerli demiryolu taşıtlarının tahrik frekanslarından biri veya birkaçı, çelik raylı demiryolu sisteminin doğal frekanslarına yaklaştıkça, hem taşıtı hem de yolu ciddi ölçüde deforme eden rezonanslar meydana gelmektedir [7]. Öyle ki, travers öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 8-9 kata varan oranlarda artmaktadır [8]. Sonuç olarak, yüksek şiddet (magnitude) ve frekans içerikli yükler altında klasik demiryolu traversleri hedeflenen 40-50 yıllık servis ömrüne ulaşmamaktadır. Klasik demiryolu traverslerinin her yıl %2-5'inin hasarlandığı için değiştirilmesi gerektiği ve bu maliyetin demiryolu bakım masraflarının yaklaşık %12'sine tekabül ettiği belirtilmektedir [9]. Günümüzdeki yüksek aks yükleri ve işletme hızları, travers tasarımında statik hesaplamaların değil, çok daha etkili dinamik darbe yüklerinin şiddet ve frekansları ile traverslerin rezonans frekanslarının da göz önünde bulundurulmasını zorunlu hâle getirmiştir [10].

Günümüzde elyaf donatılı betonlar, paspayı bölgesi dâhil beton elemanın 3 boyutlu çekme dayanımının artırılmasında ve ayrıca kesme kapasitesinin, yorulma ve darbe dayanımlarının artırılmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, kullanılan elyaf ürünlere, yabancı literatürde, beton katkısı (admixture) ifadesi yerine, donatı (reinforcement) tabiri kullanılmaktadır (fiber reinforced concrete vb.). Travers üretimi esnasında çeşitli elyaf takviyelerin kullanımı konusu yurt içinde ve yurt dışında birçok araştırmalara konu olmuştur. Bu kapsamda çelik lifler [11, 12, 13, 14], bazalt lifler [15], çeşitli sentetik lifler [16] ve bunların kombinasyonlarının [17] betonarme demiryolu traverslerinde kullanımı konusu araştırılmış ve yukarıda değinilen statik, yorulma ve darbe dayanımı konusunda çeşitli faydaların elde edildiği tespit edilmiştir. Ancak travers üretimi sırasında düşük su/çimento oranına sahip (zero slump vb.), yüksek dozajlı kırma taş içeren ve planet tipi vb. bıçaklı karıştırıcılar kullanılan bir beton üretimi söz konusu olduğundan, kullanılan elyaf takviye karıştırma esnasında koruyucu kaplaması kırılmayacak, bükülmeyecek, topaklanmayacak ve yerleştirme esnasında da betonun kolayca yerleştirilmesini sağlayacak nitelikte olmalıdır. Bir diğer önemli husus, demiryollarında sinyalizasyon emniyeti için kullanılan elyaf takviyelerin elektrik iletmemesi (elektrik yalıtkanlığına sahip olması) gerekmektedir. Ayrıca traversler her türlü kötü hava şartına açık olduğundan ve tüneller gibi yer altı sularına, trenlerden açığa çıkan atıklara vb. birçok kimyasala karşı dirençli, korozyona uğramayacak nitelikte olmalıdır. Çelik liflerin korozyon riskinin yüksek olmasının yanı sıra, demiryolu emniyeti açısından en önemli faktörlerden biri olan elektrik iletkenliğini artırdığı tespit edilmiş [18], bu nedenle sinyalizasyon hatası verme riski de bulunduğu demiryollarında pratik manada kullanımı yaygınlaşmamıştır. Cam elyaf takviyelerin ise CNR DT203/2006 standardında da belirtildiği üzere alkali ve nem maruziyetine dayanıklılığı düşüktür [19]. Bazalt liflerin ise koruyucu kaplamalarının beton karıştırma işlemi esnasında kırılması muhtemeldir. Çevresel dayanıklılığı yüksek IR Glass sınıfının ise maliyeti oldukça yüksektir. Sonuç olarak yukarıda değinilen birçok nedenle çelik/cam/bazalt vs. liflerin demiryolu traverslerinde kullanımı çeşitli mahzurlar içermektedir.

Bu çalışmada, demiryolu traverslerinin geliştirilmesi için; nem, alkali, korozyon direnci yüksek ve elektriksel olarak yalıtkan, yerli polipropilen elyaf donatılar (PP, polyolefin polypropylene macro ve micro chopped-fiber reinforcements) kullanılmıştır. Kullanılan polipropilen ürünün maliyeti 16-24 TL/travers dolaylarında olup, bu tutar travers temin maliyetinin yaklaşık %3-6'sına tekabül etmektedir (2021).

## 2. Metot

Bu çalışma kapsamında B70 tipi öngerilmeli betonarme demiryolu traversleri, PP donatısız standart tipte (B70) ve PP donatılı tipte (B70-PP) olmak üzere 2 grup halinde üretilmiştir. Üretim

esnasında alınan görsel ve kullanılan PP karışım Şekil 1’de sunulmuştur. B70-PP tipi numuneler, TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası’nda daha önce ar-ge ile belirlenen çimento ağırlığının %1,3’ü oranında (her travers için 750 gram) PP kullanılarak üretilmiş olup, optimum dozaj için ayrıca numune üretimine ihtiyaç duyulmamıştır. Eşdeğer üretim temini için çimento, agrega ve su dozajları eşit tutulmuştur. B70 tipi traversler ve kullanılan materyaller hakkında detaylı bilgi önceki çalışmalarda sunulmuştur [1, 10, 20].



Şekil 1. PP donatılı travers üretimi ve kullanılan PP ürünlerin yakından görünüşü

B70 tipi standart öngörülen betonarme demiryolu traverslerinde, yerli polipropilen makro ve mikro elyaf donatılarının (PP) kullanımının sağlayabileceği potansiyel faydaların araştırılması için belirtildiği şekilde numuneler üretilerek klasik TS EN 13230-2 statik eğilme testlerinin yanı sıra, deformasyon ölçümlü eğilme testleri ile rezonans direnci ve sönümleme performansının araştırılması için modern modal testler ve yüksek hızlı darbe testleri yapılmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Beton küp numunelerde basınç dayanımı test sonuçları

Traverslerin üretimi esnasında kullanılan betonlardan numuneler alınarak, traversler ve küp numunelere TS EN 13230-1 doğrultusunda 28 günlük kür uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre beton küp numunelerin ortalama basınç dayanımı elyafsız ve elyaf donatılı betonlarda sırasıyla 72,9 MPa ve 77,3 MPa olarak belirlenmiştir. TS EN 13230-1’de travers üretiminde en az C45/55 dayanımı sınıfında beton kullanılması istenmektedir. Buna göre; elyaf donatılı betonun elyafsız betona göre %6 oranında küçük oranda daha yüksek basınç dayanımına ulaştığı ve her iki tip betonun da standartta istenen dayanıma sahip olduğu görülmüştür.

#### 3.2. Travers numunelerinde uygulanan deformasyon ölçümlü statik yükleme test sonuçları

Travers numunelerinde deformasyon ölçümlü statik testler iki şekilde yürütülmüştür. İlki literatürde yaygın olan direkt yüklemeli (DY), deformasyon ölçümlü statik testlerdir. İkincisi ise yeni bir travers tasarımı aşamasında TS EN 13230-2’de istenen, travers ray mesnedine uygulanan, “artırımlı yükleme-kaldırma-tekrar yükleme (YKY)” testleridir. YKY testleri esnasında Şekil 2’de örneği verildiği üzere çatlak başlangıç yükü ve çatlak genişlik ölçümleri için aseton sprey ve hassas mercekler kullanılmış olup, oldukça kapsamlı olan bu testler tek bir numune için ortalama 150 dakika sürmektedir. YKY testi ve yük limit terimleri özet olarak şöyledir: En fazla 120 kN/dk hızla uygulanacak yükleme işlemine ilk elastik (yük kaldırılınca kapanan) çatlak tespit edilen ( $F_{r1}$ ) veya demiryolu kuruluşunca belirlenen ( $F_{r0}$ ) yük değerine kadar devam edilir. Bu yük seviyesi 10 saniye ile 5 dakika arasında sabit tutulduktan sonra yük kaldırılıp, merceklerle kalıcı (plastik) çatlak kontrolü yapılır. Daha sonra bir önceki adımda kaydedilen zirve yükünün 10 kN fazlasına kadar aynı hızla yükleme yapılır ve belirtilen süre kadar beklenildikten sonra yük kaldırılıp çatlak kontrolü yapılır. Bu şekilde devam edilerek, yük kaldırıldığında, tamamen kapanmayıp 0,05 mm’lik kalınlıkta görülen çatlak tespit edilirse deneyin ikinci kayıt unsuru ( $F_{r0,05}$ ) bulunmuş



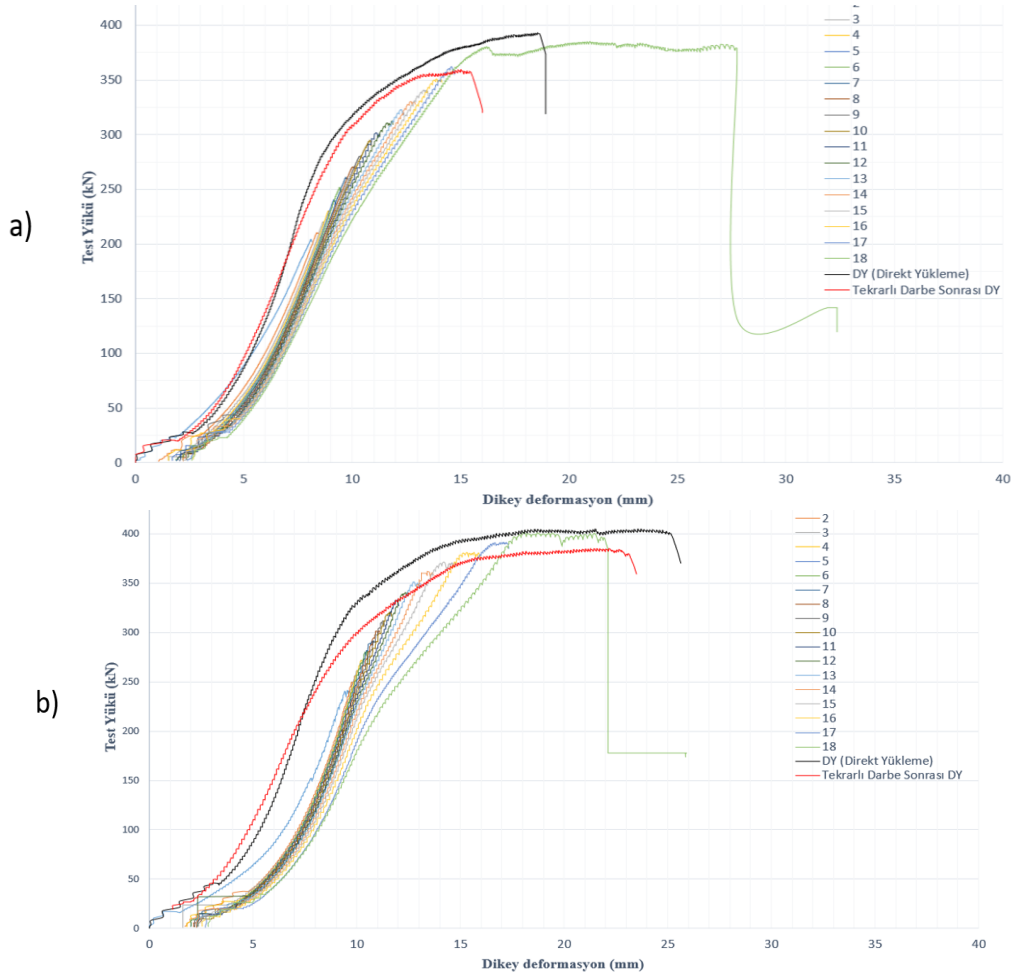
olmaktadır. Son olarak, belirtilen yükleme kaldırma prosedürüne devam edilerek, kesitin daha fazla yük taşıyamadığı, kırılma yükü ( $F_{RB}$ ) kayıt edilir. Kademeli ve direkt yüklemeli testler sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 1’de sunulmuştur. DY tipi klasik test sonucunda tespit edilen kırılma yükü ( $F_{RB-D}$ ) olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Testler esnasında çatlak başlangıç yükü belirlenmesi ve çatlak genişlik ölçümü işlemleri

Tablo 1. YKY ve DY tipi statik test sonuçları ile tekrarlı darbe deneyi sonrası kırılma yükü

Numune Tanımı	$F_{rr}$ (kN)	$F_{r0,05}$ (kN)	$F_{RB}$ (kN)	$F_{RB-D}$ (kN)	$F_{RB-50}$ (kN)
B70	200	270	380 (Baz)	393 (+%3,4)	360 (-%5,3)
B70-PP	240	340	400 (+%5,2)	405 (+%6,6)	385 (+%1,3)



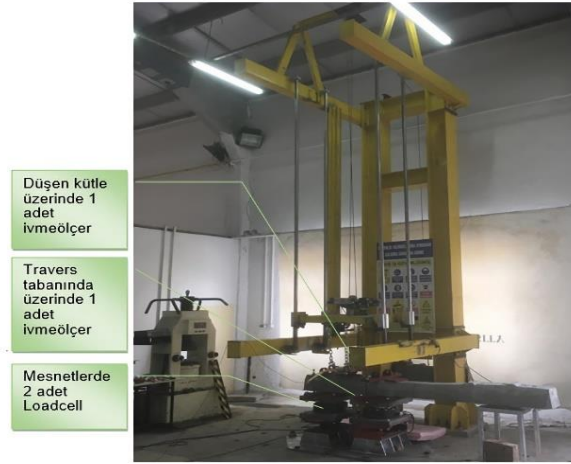
Şekil 3. Travers numunelerinin YKY statik testleri ile tekrarlı darbe testi öncesi ve sonrası DY testlerine ait örnek test yükü (kN)-deformasyon (mm) eğrileri, a. B70 tipi, b. B70-PP tipi numune

Şekil 3’te sunulan YKY ve DY tipi statik test grafikleri incelendiğinde, aşağıda belirtilen tespitler yapılmıştır:

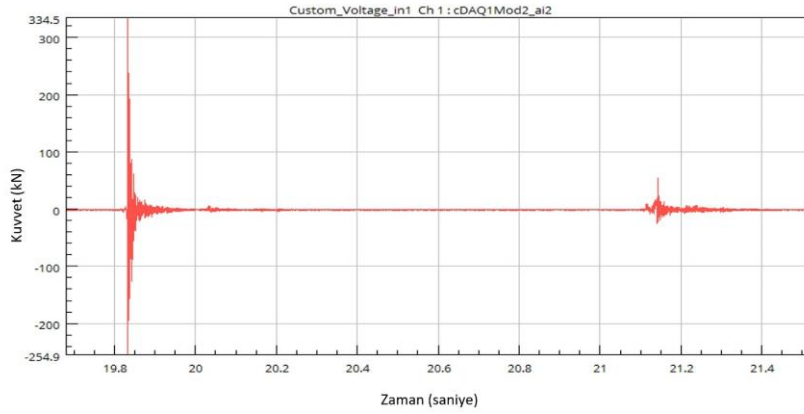
1. Bu çalışma kapsamında literatürde ender görülebilecek bir farklılık olarak, YKY testleri esnasında dikey deformasyon ölçümleri de kayda alınmıştır. Şekil 3 incelendiğinde her yükleme basamağında traverslerin elastisite modüllerinin giderek düştüğü ve yükleme kaldırıldığında plastik bir deformasyonun okunabildiği görülmektedir. Bu metod, halen gözle çatlak kalınlığı ölçümü yapılan EN-13230 testlerine göre daha pratik ve hassastır.
2. YKY testlerinde, son yükleme adımına gelmeden hemen önceki plastik deformasyon düzeyleri incelendiğinde, öngerilme kuvvetinin etkisiyle benzer plastik deformasyonlar (yaklaşık 2,8 mm) söz konusu olduğu görülmektedir.
3. YKY tipi testlerde DY tipi testlere göre, PP donatı kullanılmayan traverslerde %3, PP donatı kullanılan traverslerde ise %1 daha düşük kırılma yükleri elde edilmiştir. Buna göre PP donatı kullanılmayan traverslerin tekrarlı yükleme-kaldırma prosedürü içeren YKY testlerine zaafi az miktarda daha yüksektir. Diğer ifadeyle PP donatı kullanımı ile tekrarlı yükleme-kaldırma prosedürü içeren YKY testleri sonucunda elde edilen kırılma yükü kapasitesi artmaktadır.
4. Yaklaşık 225 kN’luk test yüküne kadar benzer elastisite modülleri söz konusu olduğu, bu yükten sonra PP donatı takviyeli numunelerin aynı yük altında daha fazla deformasyon yaptığı ve YKY testlerinde daha yüksek zirve değerine çıksalar da daha az deformasyon göstererek göçmeye geçtiği görülmektedir.
5. Traverslerde polipropilen (PP) elyaf donatı kullanımı, YKY tipi statik testlerle tespit edildiği üzere; ilk elastik çatlak başlangıcı ( $F_{r1}$ ), ilk kalıcı (plastik) çatlak başlangıcı ( $F_{r0,05}$ ) ve kırılma ( $F_{rB}$ ) yükü değerlerinde sırasıyla, %20, %13 ve %5 düzeylerinde olmak üzere, önemli miktarda artış sağlamıştır.
6. DY tipi statik test sonuçlarına göre; PP elyaf donatı kullanımı, kırılma ( $F_{rB-D}$ ) yükü değerinde %3 düzeyinde düşük bir artış sağlamıştır.
7. PP elyaf donatı kullanımı, DY tipi testlerde %44 düzeylerinde daha fazla deformasyon yapabilmeyi ve dolayısıyla tokluk değerinde büyük bir artışı sağlamıştır. Ancak, beton malzemenin yumuşamaya uğradığı YKY tipi testlerde tam aksi bir davranış meydana gelmiş ve PP içermeyen numuneler yaklaşık %23 daha yüksek deformasyon göstermiştir. Görüldüğü üzere deney metodu, numune davranışını büyük ölçüde etkilemektedir.

### 3.3. Travers numunelerinde uygulanan tekrarlı darbe testi sonuçları

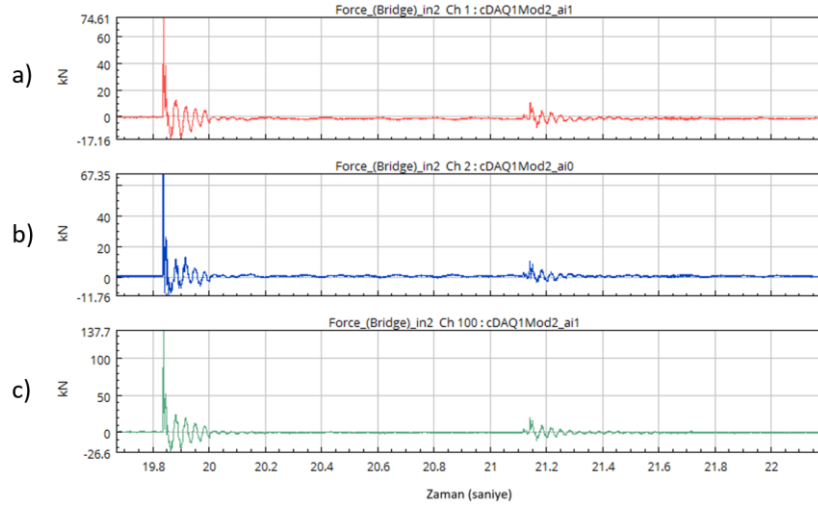
Giriş bölümünde aktarıldığı üzere demiryollarında yüksek değerli darbe yükleri kaçınılmaz olarak meydana gelmektedir ve demiryolu traverslerinin darbe dayanımları en az statik dayanımları kadar önemlidir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında Şekil 4’te fotoğrafı verilen cihazla, demiryolu darbe yüklerini temsil edecek şekilde tekrarlı darbe testleri yürütülmüştür. Deney süresince mesnet aralığı, EN 13230 travers deneylerinde uygulandığı üzere 60 cm olarak ayarlanmıştır. Daha düşük hızla çarpan yüksek kütle etkisinin, yüksek hızla çarpan düşük kütlelere oranla daha az zarar verdiği literatürde belirtilmektedir [14]. Demiryollarındaki yüksek hızlı darbe etkisini meydana getirmek için sabit 3,00 metre yükseklikten (çarpiş hızı 7000 mm/sn = 25,2 km/sa) serbest yük düşüşleri gerçekleştirilmiştir. Düşen kütlenin belirlenmesi için ilk etapta yeterli sayıda travers üzerinde kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Düşen kütlenin 3 metre yükseklikten travers üzerine bağlı üstte metal, altında ray altı plastik selet (elastomer) üzerine düşüşü esnasında, düşüş yapan kütle üzerine monte edilen ivme ölçer yardımıyla alınan ivme kaydı, nCode® analizleriyle Newton’un ikinci hareket kanunu ( $F=m.a$  veya kuvvet (kN) = kütle x ivme) doğrultusunda hesaplamaya tabi tutulmuş ve Şekil 5’te sunulan yaklaşık 330 kN’luk maksimum değere sahip darbe kuvveti elde edilmiştir. Düşen kütle etkisiyle üstte yaklaşık 330 kN kuvvet meydana gelirken, enerji kayıpları ve deformasyonlar ardından mesnetlere yerleştirilen 2 adet loadcell vasıtası ile açığa çıkan yük kaydı alınarak Şekil 6’da sunulmuştur.



Şekil 4. Darbe testlerinde kullanılan çarpma çerçevesi ve ölçüm cihazları



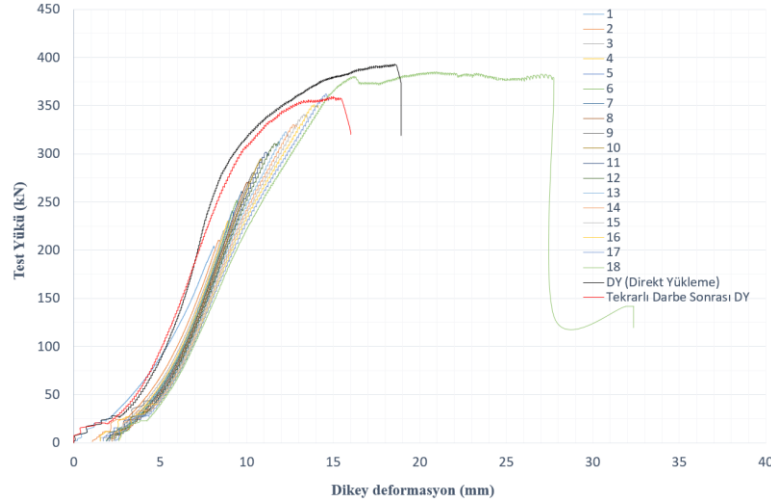
Şekil 5. Düşen kütle etkisiyle meydana gelen kuvvet (F, kN)



Şekil 6. Düşen kütle etkisiyle hareketli (a) ve sabit (b) mesnetler ile toplamda (c) meydana gelen tepki kuvveti (F, kN)

Kalibrasyon işlemiyle belirlenen yeterli şiddet ve hıza sahip darbe yükü, her travers numunesi için 50 defa tekrarlı olarak uygulanmıştır. Bu şekilde, demiryolunda normal işletim şartları altında ortalama 1-2 yıl içerisinde meydana gelmesi beklenen darbe yükleri temsil edilmiştir. Giriş kısmında sunulduğu üzere; demiryolu yüklerinin şiddet (kN) değeri kadar tesir süresi ve frekans

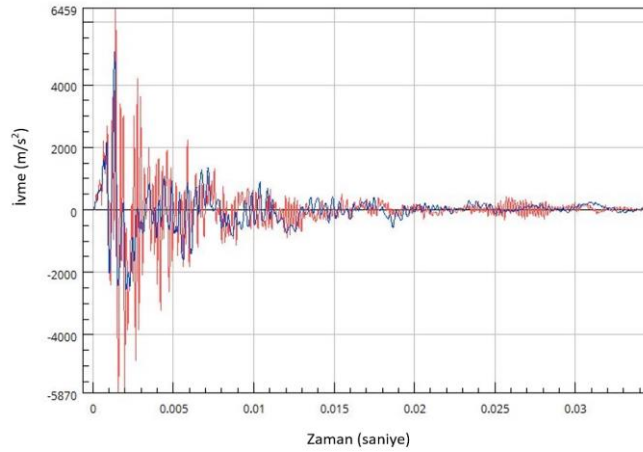
içeriği de büyük önem taşımaktadır. Statik testlerde büyük hasar bırakan 330 kN'lık yük değeri, gerek PP donatılı gerekse PP'siz traverslerde, yükün oldukça kısa süre tesir etmesi ve meydana gelebilecek kılcal çatlakların öngerilme kuvveti etkisiyle hemen kapatılması nedeniyle, travers dış yüzeyinden gözle görülebilir kalıcı bir çatlığa sebebiyet vermemiştir. Tekrarlı darbe yüklemeleri sonrasında numuneler daha önce açıklanan DY tipi yüklemeli statik testlere tabi tutulmuş, ulaşılan zirve yük değerleri Tablo1'de  $F_{RB-50}$  (kN) sütunu altında, deformasyon bazlı grafikleri ise Şekil 3 ve 7'de sunulmuştur.



**Şekil 7.** Standart B70 ve PP donatılı varyasyon için YKY testi son adımı, DY tipi statik test ve tekrarlı darbe yükleri sonrasında uygulanan DY testi sonuçları (test yükü-kN, dikey deformasyon-mm)

Test sonuçlarına göre, PP donatı kullanılmayan klasik B70 tipi traverslerin kırılma yükünde ( $F_{RB-50}$ ), darbe uygulanmayan aynı numunelerin kırılma yüküne oranla ( $F_{RB-D}$ ) %8 miktarında önemli bir düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş PP donatı kullanılan B70-PP tipi traversler için ise %5 miktarındadır. Buna göre PP kullanılan traverslerin darbe zafiyeti daha düşüktür. Ancak her iki travers üretiminde de öngerilmeli üretim tekniğinin kullanılması nedeniyle ve diğer açıdan kullanılan PP donatı özellikleri itibariyle yeterli iyileşme kaydedilmemiştir. Bununla birlikte, uygulanan tekrarlı darbe yükleri ardından PP donatı kullanılmayan klasik B70 tipi traverslerin kırılma yükü ( $F_{RB-50}$ ), TS EN 13230-2 doğrultusunda TCDD tarafından Teknik Şartnamelerde istenilen en az 375 kN'lık kırılma yükü değerini sağlayamamış, 360 kN'da kırılma gerçekleşmiştir. PP donatı kullanılan B70-PP tipi traverslerin kırılma yükü ( $F_{RB-50}$ ) ise istenilen dayanım şartı sağlanarak kırılma 385 kN'da gerçekleşmiştir.

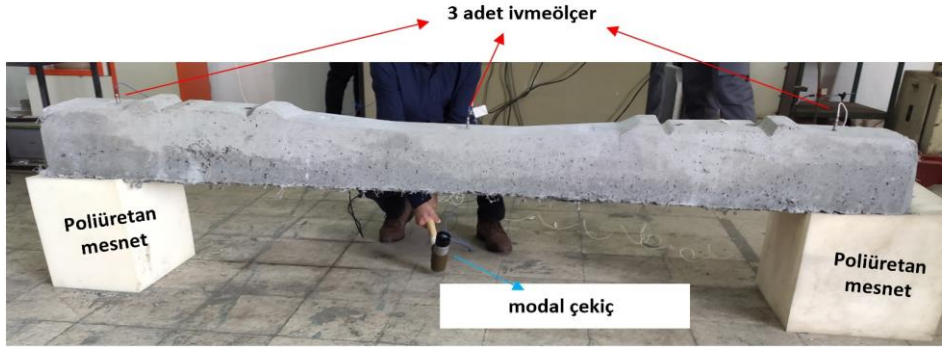
Test müddetince ayrıca tekrarlı darbe yükü deneyi esnasında traverste meydana gelen ve çevreye yayılan titreşim, travers üzerine konumlandırılan ivmeölçerler ile kayda alınmış ve aynı grafikte kıyaslamalı olarak Şekil 8'de sunulmuştur. İvme kayıtları karşılaştırıldığında, aynı darbe yükü tesiri altında klasik B70 traverslerde ulaşılan maksimum ivme değeri  $6459 \text{ m/s}^2$  iken, PP elyaf donatı kullanılan numunelerde %22 daha düşük olarak  $5056 \text{ m/s}^2$  olarak tespit edilmiştir. Zirve ivme değeri için söz konusu olan bu avantaj erken sönümlenme süresi performansı açısından da benzerdir.



Şekil 8. 330 kN'luk darbe yükü altında traverslerde meydana gelen ivme kayıtlarının (m/s<sup>2</sup>) karşılaştırması (Kırmızı: B70-NO-PP, Mavi: B70-PP)

### 3.4. Travers numunelerinde uygulanan modal test sonuçları

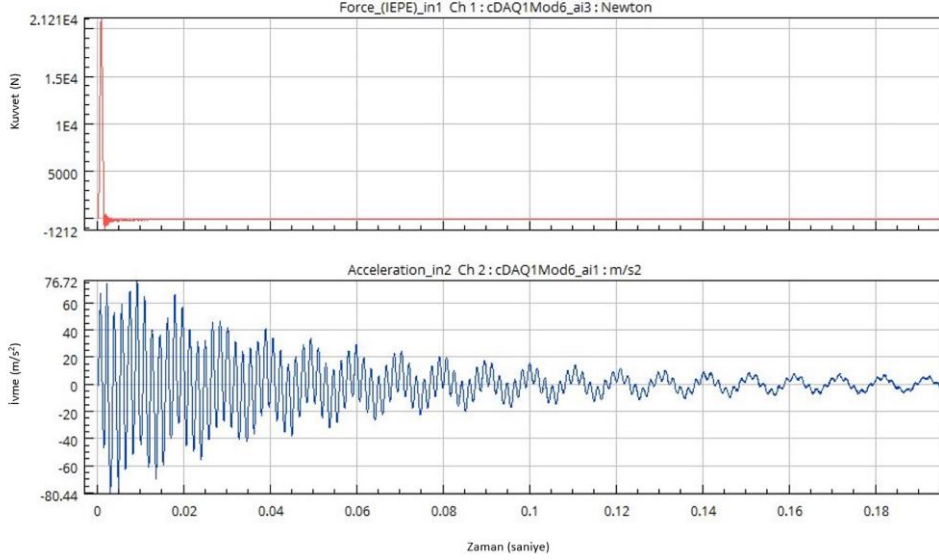
Çalışma kapsamında darbe testlerinin yanı sıra, giriş kısmında sunulan gerekçeler doğrultusunda, modern analiz yöntemleri kullanılarak, traverslerin doğal frekans değerlerinin ve modal sönümlenme oranlarının tespiti yapılmıştır. Traverslerin mesnetlenme biçimine göre doğal frekansları oldukça değişmekte, daha rijit mesnetler altında doğal frekansı kayda değer düzeyde artmaktadır. Çalışma kapsamında hazırlanan deneysel çalışma düzeneği Şekil 9'da verilmiş olup, traversler 400 mm kalınlığında yumuşak poliüretan blok üzerine konarak serbest (free-free modda) salınım yapmasına imkân tanınmıştır. Şekilden görüleceği üzere, traverslerin üst yüzeylerinde iki uç kısma ve orta noktaya ivmeölçerler sabitlenmiştir.



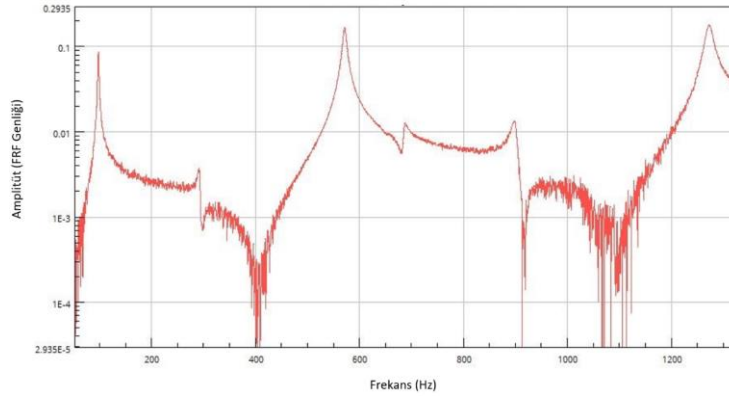
Şekil 9. Modal test düzeneği

Şekil 9'da görülebilen, kuvvet sensörü içeren, ivmeölçerler ile aynı data logger sisteme bağlı modal çekiç ile de travers alt-orta kısmından tek-tok darbeler vurularak traversin serbest salınım yapması sağlanmış ve yaklaşık 10'ar saniye aralıklarla minimum 5 adet çekiç darbesi uygulanmıştır. Darbe uygulanması esnasında modal çekiç üzerinden ölçülen kuvvet ölçümleri ve ivme ölçümleri alınmıştır. B70-NO-PP varyasyonu için tek bir çekiç darbesi esnasında alınan kuvvet ve ivme datası örneği Şekil 10'da sunulmuştur. Bu şekilde her bir darbe ayrı ayrı nCode analiz ağacı ile analiz edilmiş ve Şekil 11'de örneği sunulan Frekans Tepki Fonksiyon (Frequency Response Function, FRF) grafikleri elde edilmiştir. FRF grafikleri ile çeşitli frekanslarda yapının tepkisi analiz edilebilmektedir. Bu grafikte, pik değerleri rezonans olayını göstermektedir. nCode ile yapılan analizler esnasında "overall" metodu kullanılmış, çıktı tipi olarak "power" tercih edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen FRF grafiği tipi, PSD (power spectral density)'dir. Buffer pencere tipi "rectangular" ve boyutu "524288" parametreleriyle daha düzgün eğriler elde edilmesi sağlanmış, bu ayarlamalar tüm analizlerde sabit tutulmuştur. FRF grafikleri üzerinde nCode

yazılımının Experimental Modal Analysis modülü kullanılarak sönümlenme oranı (damping ratio) hesaplamaları yapılmıştır. Eğri oturtma metodu olarak “least-squares” metodu seçilmiş, analiz frekans aralığı ilgi alanını kapsayan 30-1350 Hz olarak belirlenmiştir. Eğri oturtma esnasında frekans analiz aralığı 0.1 ve frekans-amplitude gate değerleri %5 olarak kullanılmıştır. Bu hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 2’de özet halinde sunulmuştur.



Şekil 10. B70-NO-PP varyasyonundan çekici darbesiyle alınan kuvvet (N) ve ivme (m/s<sup>2</sup>) dataları



Şekil 11. B70-NO-PP varyasyonu için elde edilen FRF grafiği örneği

Tablo 2. Üretilen traverslerin ilk dikey rezonans frekansı için modal analiz sonuçları

Numune Tanımı	1. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	2. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	3. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	İlk Rezonans Frekansı Sönümlenme Oranı	Sönümlenme Oranındaki Artış (%)
B70	98,0	571,5	1272,2	0,994	0% (Baz)
B70-PP	100,8	583,9	1288,0	1,088	9%

Tablo 2 incelendiğinde, klasik öngerilmeli B70 tipi traverslerin sönümlenme oranının B70-PP tipi traverslere göre %9 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki varyasyonda da B70 tipi öngerilmeli betonarme traverslere ait kalıplar kullanıldığından, rezonans frekanslarında kayda değer bir değişim oluşmadığı, bu konuda düzenleme yapılması için kalıp boyutlarında değişiklikler yapılmasının mecburi olduğu görülmektedir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, B70 tipi standart öngerilmeli betonarme demiryolu traverslerinde, yerli polipropilen makro ve mikro elyaf donatılarının (PP) kullanımının sağlayabileceği potansiyel faydaların araştırılması için numuneler üretilerek TS EN 13230-2’de geçen ağır şartlara sahip statik testler (YKY) ile deformasyon ölçümlü klasik statik testler (DY) uygulanmış, ayrıca rezonans direnci ve sönümlenme performansının araştırılması için modern modal testler ve yüksek hızlı tekrarlı darbe testleri yapılmıştır. YKY testleri esnasında, literatürde ender görülebilecek bir şekilde, dikey deformasyon ölçümleri de kayda alınmıştır. Bu metodun, halen gözle çatlak kalınlığı ölçümü yapılan EN-13230 testlerine göre daha pratik ve hassas bir alternatif olarak değerlendirilebileceği görülmüştür. Demiryolundaki darbe yüklerini temsil eden, yüksekte serbest kütle düşüşü esaslı çarpışma (impact) testlerinin de; gerek yeni tip traverslerin tasarımında, gerekse mevcut traverslerin kabulü aşamasında kullanılacak, demiryolu yüklerini simülasyona elverişli ve hızlı bir test metodu olduğu görülmüştür. Nitekim dünyanın çeşitli ülkelerinde bu yönde standart test usulleri belirlenmeye başlanmıştır (AS 1085-14:2019 vb.) Yine aynı gerekçelerle titreşim sönümlenme ve rezonans direncini gösteren modern modal testlerin, milli demiryolu travers modellerinin geliştirilmesi için mutlaka esas alınması gereken bir analiz yöntemi olduğu görülmüştür. Nitekim özellikle Çin, Japonya ve Almanya tarafından son yıllarda geliştirilen traverslerde, modal sönümlenme oranları ve rezonans direnci doğrultusunda travers kesitleri klasik mono-blok traverslerden çok farklı hale getirilmiştir.

Çalışma süresince yapılan testler sonucunda, öngerilmeli betonarme traverslerde PP donatı kullanımı ile özellikle YKY tipi statik testlerde; ilk elastik çatlak başlangıcı ( $F_{r1}$ ), ilk kalıcı (plastik) çatlak başlangıcı ( $F_{r0,05}$ ) ve kırılma ( $F_{rB}$ ) yükü değerlerinde sırasıyla, %20, %13 ve %5 düzeylerinde olmak üzere, önemli miktarda artış sağlanmıştır. Tekrarlı darbe testleri esnasında ise yeni traverslerin, daha düşük performans kaybı ile TS EN 13230-2 doğrultusunda TCDD tarafından Teknik Şartnamelerde istenilen kırılma yükü şartını sağlamaya devam ettiği görülmüştür. Test müddetince darbe yükleri altında traverslerde meydana gelen ve çevreye yayılan titreşimler de kayda alınmış ve zirve ivme değerinin PP elyaf donatı kullanılan numunelerde %22 daha düşük olduğu ve daha erken sönümlenme sağladığı görülmüştür. Son olarak uygulanan modal testler esnasında da, B70-PP tipi traverslerin modal sönümlenme oranlarında %9 oranında artış kaydedilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında kullanılan polipropilen elyaf donatılarının, çalışmada ele alınan tüm testler bakımından, demiryolu traverslerinin dayanım ve sönümlenme karakteristiklerinde faydalar sağladığı, getireceği travers temin maliyetinin %3-6’sı dolaylarındaki ek maliyetin ise orta vadede amorti edilebileceği ve traverslerin servis ömürlerinin artırılmasında fayda sağlayabileceği öngörülmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Tübitak Ardeb Dairesi Başkanlığı’nın 120M403/2020 sayılı projesi kapsamında desteklenmektedir. Ayrıca katkılarından dolayı TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürü Sn. Ali KARABEY’e ve Polyfibers® firması yetkilisi Sn. Faraz MALİK’e teşekkürlerimizi bildiririz.

#### Kaynakça

- [1] F. Çeçen, B. Aktaş, “Yeni nesil demiryolu traversleri ve yerli frp donatı kullanımının deneysel araştırması,” *Demiryolu Mühendisliği*, Ocak 2021, Sayı: 13, Sayfa: 53-64. doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>

- [2] R. You, D. Li, C. Ngamkhanong, S. Kaewunruen, "Fatigue life assessment method for prestressed concrete sleepers," *Frontiers in Built Environment*, 2017, Volume 3, Article 68. Erişilebilir (27.08.2021): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2017.00068/full>
- [3] W. Ferdous, A. Manalo, G. V. Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. M. Remennikov, "Composite railway sleepers – recent developments, challenges and future prospects," *Composite Structures*, 2015, vol. 134, pp. 158–168, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>
- [4] A. M. Remennikov, M. H. Murray, S. Kaewunruen, "Dynamic design guidelines for prestressed concrete sleepers," 2008. Erişilebilir (27.08.2021): <https://ro.uow.edu.au/engpapers/492/>
- [5] L. M. Domingo, C. Z. Martín, C. P. Avilés, J. I. R. Herráiz, "Analysis of the influence of cracked sleepers under static loading on ballasted railway tracks," *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*, 2014, Volume 2014, Article ID 363547. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/363547>
- [6] A. Remennikov, S. Kaewunruen, "Investigation of vibration characteristics of prestressed concrete sleepers in free-free and in-situ conditions," 2005. Erişilebilir (27.08.2021): <http://ro.uow.edu.au/engpapers/284>
- [7] Z. Öztürk, T. Öztürk, V. Arlı, "Yüksek hızlı demiryolu köprülerinde rezonans olayı," 2018. Erişilebilir (27.08.2021): [www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1448.pdf](http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1448.pdf)
- [8] V. Arlı, Z. Öztürk, "Balastlı hatta ray-tekerlek titreşimlerinin demiryolu dinamiğine etkisinin belirlenmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2014, Cilt 20, Sayı 3, Sayfalar 100-110. Erişilebilir (27.08.2021): <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20487/218165?publisher=pamukkale%3Fpublisher%3Dpa+mukkale>
- [9] W. Ferdous, A. Manalo. "Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies –review of current practice," *Engineering Failure Analysis*, April 2014, vol. 44, pp. 17-35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.020>
- [10] F. Çeçen, "Karbon – fiber donatıyla öngerilmemiş monoblok demiryolu beton traversi geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ulaştırma ABD, Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Tokat, 2019
- [11] M. Kozak, O. Ünal, "Bazalt agregası ile üretilen beton travers de çelik lifin kullanılabilirliğinin araştırılması," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2014, vol. 18(3), pp. 15-21
- [12] Ahsan P., Stephen J. F., "Fatigue of steel-fibre-reinforced concrete prestressed railway sleepers," *Engineering Structures*, 2017, Vol. 141, pp. 241-250, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.025>
- [13] Doo-Yeol Y., Jin-Young L., Hyun-Oh S., Jun-Mo Y., Young-Soo Y., "Effects of blast furnace slag and steel fiber on the impact resistance of railway prestressed concrete sleepers," *Cement and Concrete Composites*, 2019, Volume 99, Pages 151-164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.015>
- [14] Hyun-Oh S., Doo-Yeol Y., Young-Soo Y., "Enhancing the resistance of prestressed concrete sleepers to multiple impacts using steel fibers," *Construction and Building Materials*, 2018, Volume 166, Pages 356-372, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.095>
- [15] Purtseladze I. B., "Application of basalt fiber in reinforced concrete sleepers," *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, 2020, Vol. 23, No. 2, pp. 382-384, Erişilebilir (27.08.2021): <http://ijpsat.ijsh-t-journals.org/>
- [16] Christophe C., Dayani K. H., Olivia M., Fidelis M., Brendan K., Todd C., "Evaluation of macro-synthetic fibre reinforced concrete as a sustainable alternative for railway sleepers," *Innovation for Sustainable Infrastructure*, 2020, pp 471-476, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8\\_73](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_73)
- [17] Ghasem P., Majid G., "Using steel and polypropylene fibres to improve the performance of concrete sleepers," *ICE Proceedings Structures and Buildings*, 2019. Volume 173, Issue 9, pp. 690-702. doi: <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00154>
- [18] Younghoon B., Sukhoon P., "Effect of steel fiber content on structural and electrical properties of ultra high performance concrete (UHPC) sleepers," *Engineering Structures*, 2020, Volume 222, 111131, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111131>
- [19] Anonim. "Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars (CNR-DT 203/2006)," National Research Council-Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (CNR), Rome, Italy. 2006. Erişilebilir (27.08.2021): <https://www.cnr.it/en/node/2639>



[20]F. Çeçen, B. Aktaş, “Lamine cfrp donatılı traverslerin deneysel ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Temmuz 2021, Sayı: 14, Sayfa: 26-38. doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.869946>

### Özgeçmiş



#### **Ferhat ÇEÇEN**

Yüksek Lisans eğitimini “Karbon – Fiber Donatıyla Öngerilmesiz Monoblok Demiryolu Beton Traversi Geliştirilmesi” teziyle Gaziosmanpaşa Üniversitesinde tamamlamış, halen Erciyes Üniversitesi’nde doktora eğitimine devam etmektedir. CFRP, GFRP ve çeşitli yerli ürünlerle milli demiryolu traverslerinin geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmaları devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr



#### **Bekir AKTAŞ**

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Erciyes Üniversitesi, Doktora Eğitimini ise Süleyman Demirel Üniversitesinde tamamlamış, halen Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Ulaştırma alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

### **Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



## Monoray Sistemi Kent İçi Raylı Sistemlere Alternatif Olabilir mi?

Fatih YILDIZHAN<sup>\*1</sup>, Murat KARACASU<sup>2</sup>, Ömer Faruk RENÇBER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gaziantep Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

<sup>2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir Türkiye

<sup>3</sup> Gaziantep Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bil.Fak., İşletme Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

\*fyildizhan@gantep.edu.tr

(Alınış/Received: 30.11.2021, Kabul/Accepted: 13.01.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2022)

**Öz:** Kent merkezlerinde sürdürülebilir ulaşım sağlayabilmek için toplu taşıma sistemini doğru planlamak gerekmektedir. Toplu taşıma sistemleri gelişen teknolojiye bağlı olarak çeşitliliğini arttırmış ve artan yolculuk talebine bağlı olarak optimum toplu taşıma sisteminin tercihi zorlaşmıştır. Son yıllarda monoray sisteminin raylı sistemlere alternatif olup olamayacağı da tartışma konusu olmuştur. Toplu taşımayla ilgili bir diğer tartışma konusu hangi sistemin optimum olduğunun hangi yöntemle karar verileceğidir. Toplu taşıma sistemlerine ekonomik değerlendirmeye göre karar verilmesi durumunda nitel kriterleri göz önünde bulundurmadığı için toplu taşımanın tüm etkilerini gösteremez ve bu durum toplu taşımadan istenilen düzeyde kullanımını engelleyebilir. Bu yüzden çok kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV), ekonomik değerlendirmede dikkate alınmayan nitel kriterleri de dikkate aldığı için toplu taşıma planlamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat sadece ÇKKV'ye göre sistem seçilmesi ulusal ekonomi ve işletmecisi kurumu açısından finansal problemlere yol açabilir. Bu çalışmada monoray sisteminin raylı sistemlere alternatif olma durumu ÇKKV'den PROMETHEE yöntemi ve monoray fizibilite çalışmaları birlikte ele alınarak incelenmiştir. Alternatifler monoray ve raylı sistemlerden tramvay, hafif raylı sistem ve metro olarak belirlenmiştir. Kriterler dört ana kriter ve 11 alt kriterden oluşturulmuştur. Eskişehir için yapılan monoray fizibilite etüdü çalışmasının sonuçları da ele alınarak ÇKKV-ekonomik değerlendirme ilişkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre birinci sırada monoray sistemi yer almaktadır. Çalışmanın bulguları monoray sisteminin sahip olduğu üstün özellikleri sayesinde raylı sisteme alternatif bir sistem olabileceğini göstermektedir. Monoray PROMETHEE yönteminde en iyi sistem görünmesine rağmen yapılan monoray sistemi ekonomik değerlendirmesinde uygulanabilir sonuçlar alınmamıştır. Ekonomik değerlendirmelerde uygulanabilir sonuçlar veren ve birçok belediye/karar verici kurum tarafından tercih edilen tramvay sistemi ise PROMETHEE yönteminde en son sırada yer almaktadır. Bu bulgular ÇKKV veya ekonomik değerlendirmenin tek başına toplu taşıma sistemi seçimi ve planlanmasında yeterli olmayacağını, ikisinin beraber değerlendirilerek optimum sistemin seçilmesi gerektiğini gösterebilir.

**Anahtar kelimeler:** Monoray, Kent İçi Raylı Sistemler, Ekonomik Değerlendirme, PROMETHEE

### Could Monorail System be an Alternative to Urban Rail Systems?

**Abstract:** In order to provide sustainable transportation in urban centers, it is necessary to design the public transportation system correctly. Public transportation systems have increased their variety depending on the developing technology and the choice of optimum public transportation system has become difficult due to the increasing travel demand. In recent years, it has been a matter of debate whether the monorail system could be an alternative to rail systems. Another debate with public transportation is how to decide which system is optimum. If the public transportation systems are decided according to the economic evaluation, it cannot show all the effects of public transportation and this situation may prevent the use of public transportation at the desired level since it does not take into account the qualitative criteria. Therefore, multi-criteria decision-making methods (MCDM) are widely used in public transportation planning, as they take into account the qualitative criteria that are not taken into account in the economic evaluation. However, choosing a system only according to the MCDM may cause financial problems for the national economy and the operating institution. In this study, the status of the monorail system as an alternative to rail systems has been investigated by taking the PROMETHEE method, one of the MCDM,

Atıf için/Cite as: F. Yıldızhan, M. Karacasu, Ö. F. Rençber, "Monoray Sistemi Kent İçi Raylı Sistemlere Alternatif Olabilir mi?," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 170-181, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1030152

and monorail feasibility studies together. Alternatives were determined as monorail and tram, light rail transit and metro. The criteria were composed of four main criteria and 11 sub-criteria. The results of the monorail feasibility study for Eskişehir were also discussed and the MCDM-feasibility relationship was investigated. The monorail system is in the first rank in the results obtained from the study. The findings of the study show that the monorail system may be an alternative system to the rail system, thanks to its superior features. Although the monorail seems to be the best system in PROMETHEE method, no applicable results were obtained in the economic evaluation of the monorail system. The tram system, which gives feasible results in economic evaluations and is preferred by many municipalities/decision-making institutions, is in the last place in the PROMETHEE method. These findings may show that MCDM or economic evaluation alone could not be sufficient in the selection and planning of the public transportation system and that the optimum system should be selected by evaluating MCDM and economic evaluation together.

**Keywords:** Monorail, Urban Rail Systems, Economic Evaluation, PROMETHEE

## 1. Giriş

Hızlı ve plansız kentleşme ile olumsuz etkisini artıran otomobil kullanımı birçok kentte önemli bir ekonomik, sosyal ve çevresel sorun haline gelmiştir [1,2]. Ulaşım sektörü, toplam enerji tüketiminin %29,6'sından, petrol tüketiminin %50'sinden ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının %27'sinden (Avrupa Birliği) sorumludur [3,4]. Çin'de hava kalitesini etkileyen faktörler (kentleşme, ekonomi ve ulaşım arasında) araştırmacılar tarafından incelenmiş ve en etkili faktörün ulaşım olduğu belirtilmiştir [1]. Kentlerde bu problemlerin temel sebebinin otomobil kullanımı olduğudur. Bu nedenle sürdürülebilirlik temelli kentsel ulaşım planlarında otomobil kullanımının azaltılması mutlaka önceliklendirilmelidir [5]. Yaya ve bisiklet ulaşımı (aktif ulaşım modları) sürdürülebilir kentsel ulaşım planlamasında yer almalıdır [6-8]. Ancak şehirlerde artan mesafeler, zamandan tasarruf etme isteği ve birçok kentte bisiklet altyapısının olmaması bu ulaşım modlarının kullanımını azaltmaktadır [9,10]. Toplu taşıma sistemleri de sürdürülebilir kentsel ulaşım planlarında önemli bir yere sahiptir. Toplu taşıma sistemi kullanımının önündeki engel toplu taşıma sistemlerinin yetersiz olması ve düşük hizmet düzeyine sahip olmasıdır [11]. Bu üç kentsel ulaşım modunun birbirlerine entegre olması, ihtiyaç ve beklentilere uygun şekilde planlanması ve optimum toplu taşıma sisteminin seçilmesi gerekmektedir [11,12].

Artan yolculuk talebi ve gelişen teknoloji toplu taşıma sistemlerinin de çeşitliliğini arttırmış ve hangi sistemin optimum olduğunun belirlenmesi de zorlaşmıştır. Toplu taşıma sistemleri lastik tekerlekli sistemler, raylı sistemler ve özel sistemler olmak üzere üç sınıfa ayrılır [5]. Lastik tekerlekli sistemlere; dolmuş, minibüs, otobüs ve son yıllarda yaygınlaşan metrobüs örnek verilebilir. Metrobüs sahip olduğu ekonomik, güvenilirlik, yüksek işletme hızı gibi özelliklerinden dolayı yüksek yolculuk taleplerinde tercih edilebilir bir sistem olabileceği son yıllarda yapılan çalışmalarla ifade edilmiştir [13,14]. Fakat yapımı için uygulanacak bölgede yeterli alan bulunmalıdır. Raylı sistemlere; tramvay, hafif raylı sistem (HRS), hafif metro ve metro örnek verilebilir. Tramvay, atlı omnibüslerin geliştirilmesi fikriyle oluşturulmuştur [9]. Elektrikli motor kullanımı ile ekonomik ve çevreci bir toplu taşıma seçeneği haline gelmiştir. Tramvay araç sayısına göre, nostaljik, cadde ve hızlı tramvay olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. HRS, 1960'larda tramvayların modernize edilmesiyle geliştirilmiştir ve tramvay ile metro arasında değerlendirilebilecek bir raylı sistemdir [15]. Metro, ilk olarak 1863 yılında Londra'da aç-kapa yöntemi ile kullanılmıştır [16]. Şehir ölçeğinde en fazla insanı ve en hızlı şekilde taşıyabilen en gelişmiş raylı sistemdir. Özel sistemlere örnek olarak teleferik ve monoray örnek verilebilir. Monoray sistemi çoğunlukla yerden yüksekte çelik veya betonarme hat üzerinde ilerleyen lastik tekerlekli bir toplu taşıma sistemidir [17]. Monoray raylı sistemlere göre yüksek eğim çıkabilme, kolay projelendirme gibi avantajlara sahiptir [18-20]. Bu avantajları birçok araştırmacının dikkatini çekmiş ve raylı sistemlere alternatif bir sistem olabileceği belirtilmiştir [21,22]. Bazı araştırmacılar da monorayın görsel amaçlarla kullanılacak bir sistem olduğunu toplu taşımaya uygun olmadığını belirtmiştir [23]. Monorayın (Japonya, Almanya ve Çin hariç) birçok ülkede

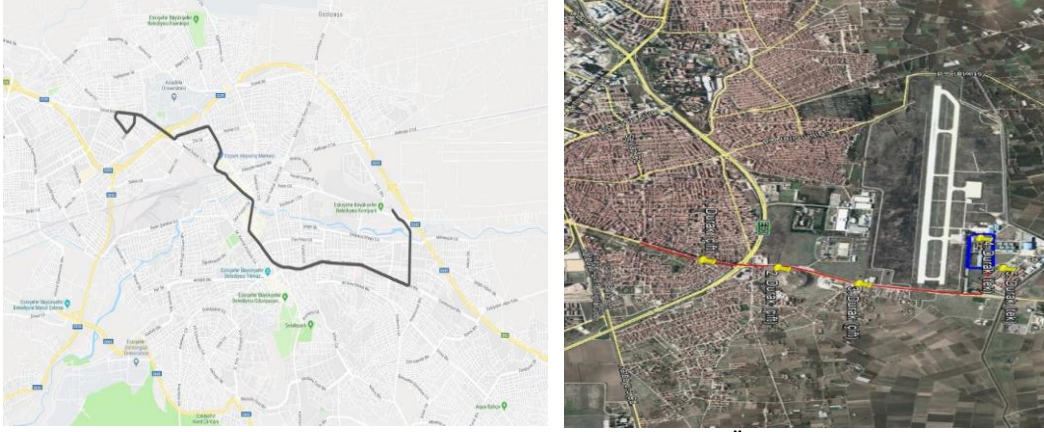
raylı sistemler kadar tercih edilmemesi [17], raylı sistemler alternatif bir sistem olabileceği konusunda tartışmaları devam ettirmektedir.

Güzergâh üzerinde optimum toplu taşıma sisteminin seçilmemesi durumunda bu hatanın telafi edilmesi çok zordur. Çünkü toplu taşıma sistemlerinin başka bir sistemle değiştirilmesi ekonomik, finansal ve sosyal sorunlara neden olabilir [24]. Örneğin yapılan çalışmada, yetersiz hizmet düzeyine sahip olan cadde tramvayı yerine monoray planlanmış, değerlendirme süreci sonunda (27 yıl) ülke ekonomisine 25 milyon dolar, yatırımcı/işletici kurumlara 215 milyon dolar zarar verebileceği belirtilmiştir [17]. Ancak doğru planlanmış toplu taşıma, bir şehre kültürel, sosyal ve ekonomik açıdan önemli katkılar sağlayabilir. Örneğin, raylı toplu taşıma sistemi inşa etmenin otomobil enerji tüketimini %5,5 ve kişi başına otomobil enerji tüketimini %6,6 oranında azaltabileceği belirtilmiştir [3]. Başka bir çalışmada ise metro projesinin değerlendirme süreci sonunda (27 yıl) çevresel kazanım olarak 17 milyon dolar, zaman tasarrufu olarak ise 1,3 milyar dolar katkıda bulunabileceği belirtilmiştir [25]. Toplu taşıma sistemleri değerlendirilirken kar-zarar durumlarını gösteren ekonomik (ulusal ekonomi açısından) ve finansal (yatırımcı/işletme kurum açısından) fizibilite çalışmaları yapılmalıdır [5,19]. Ancak bir sistemin uygulanabilir sonuçlar vermesi gerekli olmakla birlikte, bu fizibilite çalışmaları tek başına yeterli olmayabilir. Öncelikle hangi sistemin seçileceğine doğru karar verilmesi, ardından toplu taşıma sistemleri için fizibilite çalışmaları yapılması daha doğru sonuçlar verebilir. Bu şekilde toplu taşıma planlanması yapılırsa daha verimli sonuçlar alınabilir. Ek olarak, fayda-maliyet (B/C), net bugünkü değer (NPV), iç getiri oranı (IRR) vb. gibi fizibilite çalışmaları sonuçları genellikle bir projenin tüm etkilerini göstermez [26,27]. Bu nedenle çok kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV), fizibilite çalışmalarında dikkate alınmayan nitel kriterleri de dikkate aldığı için toplu taşıma planlamasında yaygın olarak kullanılmaktadır [28]. Literatürde ÇKKV'nin ekonomik ve mali fizibilite çalışmalarıyla birlikte kullanılması gerektiği ve bu konuda daha fazla çalışma yapılması gerektiği belirtilmiştir [27].

Literatürdeki detaylı fizibilite çalışmalarından biri Eskişehir için iki ayrı güzergâh için planlanan monoraydır. Çalışmada düşük hizmet düzeyine sahip cadde tramvayı ve otobüs hattı olmak üzere iki ayrı hat için monoray önerilmiştir [17]. Ancak sonuçlar monorayın hem ülke ekonomisi hem de yatırımcı/işletme kurumları için uygulanabilir sonuçlar vermediğini göstermiştir. Fizibilite çalışmasının yanı sıra, toplu taşıma projelerinde ÇKKV uygulamasının yapılması doğru tercih açısından ve literatürdeki eksikliği gidermesi açısından değerlidir. Buna ek olarak raylı sistemlere göre daha az tercih edilen monorayın raylı sistemlere alternatif olabilirliği de dikkate alınması gereken bir diğer konudur. Bu çalışmada ilk kez ÇKKV, fizibilite çalışması arasındaki ilişki araştırılmıştır. Fizibilite sonuçlarını tamamlamak için ÇKKV'lerden PROMETHEE yöntemi kullanılarak monoray sistemi ve kentsel raylı sistemler karşılaştırılmıştır. Alternatifler monoray, tramvay, HRS ve metro olarak belirlenmiştir. Kriterler maliyetler, hat-araç özellikleri, kullanıcı memnuniyeti ve çevresel etki olarak belirlenmiştir. Böylece PROMETHEE sonuçlarının ve fizibilite çalışmasının tutarlılığı incelenmiştir. Ayrıca fizibilite çalışmalarının yanı sıra PROMETHEE kullanılarak monoray sisteminin raylı sistemlere alternatif olma durumu değerlendirilmiştir.

## 2. Eskişehir Monoray Fizibilite Etüdü

Eskişehir, 888.828 nüfusu ve üç üniversitesiyle yolculuk talebi yüksek bir şehirdir. Eskişehir için yapılan monoray fizibilite çalışmasında iki hat incelenmiştir [17] ve Şekil 1 bu hatları göstermektedir. Bu hatlardan ilki güzergâh üzerinde Anadolu Üniversitesi, hastane, otogarın bulunduğu ve buna bağlı olarak talebin yoğun olduğu SSK-Otogar hattıdır. Bu hatta 1000 mm ray açıklığına sahip ve tek araçtan oluşan cadde tramvayı bulunmaktadır. Kapasite, konfor ve güvenilirlik açısından yetersiz kalmaktadır [5]. İkinci hat olarak Eskişehir Teknik Üniversitesi'nin bulunduğu Gaffar Okkan-ESTÜ hattı incelenmiştir. Şuan otobüsle işletilen bu hat için tramvay yapım çalışmaları başlamış ve bitmek üzeredir Bu iki hattın bilgileri Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Sırasıyla SSK-Otogar ve Gaffar Okkan-ESTÜ hattı güzergâhları [5]

Tablo 1. Hat bilgileri [17]

Hat Bilgileri	SSK-Otogar	Gaffar Okkan-ESTÜ
Hat Uzunluğu (km)	10,5	4
2021 Günlük Yolcu Sayısı	45.471	24.560
2045 Günlük Yolcu Sayısı	54.609	60.575

SSK-Otogar hattı daha uzundur ve ilk yıllarda yolcu sayısı daha yüksektir. Gaffar Okkan-ESTÜ hattın için değerlendirme süreci sonunda (2045 yılı) yolcu sayısının daha fazla olması beklenmektedir. Eskişehir için yapılan monoray fizibilite etüdünde ekonomik fizibilite ve finansal fizibilite etüdüleri hazırlanmıştır. Fizibilite etüdü sonuçları Tablo 2’de verilmektedir. Maliyetler, yapım maliyetleri, araç maliyetleri ve işletme&bakım maliyetlerinden oluşmuştur. Betonarme hat olarak düşünülen monorayın km başına yapım maliyeti 20,16 milyon \$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Fizibilite etüdü sonuçları[17]

Fizibilite Etüdü Sonuçları	SSK-Otogar		Gaffar Okkan-ESTÜ	
	Ekonomik	Mali	Ekonomik	Mali
Net Bugünkü Değer	\$-25.282.615	\$-214.876.105	\$-24.485.247	\$-71.335.743
Fayda/Maliyet Oranı	0,86	0,20	0,69	0,38
İç Verimlilik Oranı	%7,68	-5,24%	%5,93	-0,33%

Araçlar SSK-Otogar güzergâhında dört orta büyüklükte vagon dan oluşan monoray setleriyle hesaplanmış (kapasite 580 yolcu) ve set maliyeti 5 milyon \$ olarak alınmıştır. Araçlar Gaffar Okkan-ESTÜ güzergâhında dört küçük vagon dan oluşan monoray setleriyle hesaplanmış (kapasite 280 yolcu) ve set maliyeti 3 milyon \$ olarak alınmıştır. İşletme&bakım maliyeti km başına SSK-Otogar için 5,7 \$ ve Gaffar Okkan-ESTÜ için 5,3 \$ olarak alınmıştır. Duraklar yakın olduğu için monorayın işletme hızı minimum değer olan 25 km/sa olarak alınmıştır. Projenin ulusal ekonomi açısından faydaları, tramvay/otobüs yatırım maliyetlerinde azalma, tramvay/otobüs işletme maliyetlerinde azalma, çevresel etki maliyetlerinde azalma, yol bakım maliyetlerinde azalma, kaza maliyetlerinde azalma ve yolculuk zamanı kazançlarının ekonomik değerinden oluşmaktadır. Projenin yatırımcı/işletmecisi kurum açısından gelirleri bilet ve reklam gelirleridir [17].

### 3. PROMETHEE Yöntemi

PROMETHEE yönteminin uygulanması şu sırayla yapılmaktadır:

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Adım 2: Tercih fonksiyonlarının belirlenmesi

Adım 3: Alternatif çözümler arasında tercih indeksi oluşturulması

Adım 4: Pozitif ve negatif üstünlüklerin belirlenmesi

Adım 5: Promethee I-( $\Phi^+$ ) ( $\Phi^-$ ) çözümlerinin bulunması

Adım 6: Promethee II-Nihai üstünlüklerin belirlenmesi

Birçok ÇKKV tekniğinde olduğu gibi analiz aşaması karar matrisinin oluşturulması ile başlamaktadır. Bu matriste alternatifler ve kriterler Tablo 3'te olduğu gibi açıkça belirtilmektedir. PROMETHEE yönteminde diğer ÇKKV yöntemlerinden farklı olarak, tercih fonksiyonları belirlenmektedir. Buna göre, aşağıda yer alan tabloda belirtilen bir fonksiyon seçilmekte ve kriterler ile alternatifler bu fonksiyonlara göre değerlendirilmektedir.

**Tablo 3.** PROMETHEE Tercih Fonksiyonları [29]

Tip	Fonksiyon	Parametre	Kullanım Amacı
Birinci Tip (Olağan)	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$	-	Kriterler için herhangi bir tercih söz konusu olmadığı durumda
İkinci Tip (U-Tipi)	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases}$	1	Kriterlerin bir 1 parametre değerinden yüksek olması tercih edildiği durumda
Üçüncü Tip (V Tipi)	$P(x) = \begin{cases} \frac{x}{m}, & x \leq m \\ 1, & x > m \end{cases}$	m	Kriterlerin bir ortalamaya göre değerlendirilip bu değer altındaki değerler de ihmal edilmek istenmiyorsa
Dördüncü Tip (Seviyeli)	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ \frac{1}{2}, & q < x \leq q + p \\ 1, & x > q + p \end{cases}$	q, p	Kriterler için belirli bir değer aralığı belirlenecekse
Beşinci Tip (Linear)	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s \\ \frac{x-s}{r}, & s \leq x \leq s+r \\ 1, & x \geq s+r \end{cases}$	s, r	Kriterlerin içerisinde ortalama üstündeki değerleri tercih etme durumunda
Altıncı Tip (Gaussian)	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1 - e^{-x^2/2\sigma^2}, & x \geq 0 \end{cases}$	$\sigma$	Kriterleri ortalamadan sapmaya göre tercih etmek istediği durumda

Tercih fonksiyonları belirlendikten sonra alternatifler karşılaştırılır. Pozitif ve Negatif üstünlükler değerlendirilir.

Aşağıdaki verilen durumlardan herhangi biri sağlanıyorsa a alternatifi b alternatifine tercih edilir;

$$\Phi^+(a) > \Phi^+(b) \quad \text{ve} \quad \Phi^-(a) < \Phi^-(b)$$

$$\Phi^+(a) > \Phi^+(b) \quad \text{ve} \quad \Phi^-(a) = \Phi^-(b)$$

$$\Phi^+(a) = \Phi^+(b) \quad \text{ve} \quad \Phi^-(a) < \Phi^-(b)$$

Aşağıdaki durumda a alternatifi ile b alternatifi farksızdır;

$$\Phi^+(a) = \Phi^+(b) \quad \text{ve} \quad \Phi^-(a) = \Phi^-(b)$$

Aşağıdaki durumda herhangi biri sağlanıyorsa a alternatifi b alternatifi ile karşılaştırılmaz;

$$\Phi^+(a) > \Phi^+(b) \quad \text{ve} \quad \Phi^-(a) > \Phi^-(b)$$

$$\Phi_+(a) < \Phi_+(b) \quad \text{ve} \quad \Phi_-(a) < \Phi_-(b)$$

Bir sonraki adımda kıyaslamaya esas alınan  $\Phi$  değeri hesaplanır. Hesaplanan net  $\Phi$  öncelik değerlerine göre bütün alternatifler değerlendirilir.

$$\Phi(a) = \Phi_+(a) - \Phi_-(a)$$

Bulunan net öncelik değerine göre;

$\Phi(a) = \Phi(b)$  ise a alternatifi b alternatifinden farksızdır,

$\Phi(a) > \Phi(b)$  ise a alternatifi b alternatifine göre daha üstündür. Karar vericinin bu iki alternatif arasında a alternatifini tercih etmesi beklenmektedir.

Çalışmada kapsamında kriterler ve alternatifler Visual Promethee yazılımı ile Promethee tekniğine göre değerlendirilmiştir. Visual Promethee, Mareschal ve ekibi tarafından 2014 yılında geliştirilen ve Promethee yönteminin uygulanmasına yönelik olan bir yazılımdır. Yöntemin uygulamasında Tablo 3'te belirtilen tercih fonksiyonlarından altıncı tip Gaussian tercih fonksiyonu kullanılmıştır. Bunun nedeni, verilerin ortalama ve standart sapmaya göre değerlendirilmesinin daha uygun olacağını düşünülmesidir. Ayrıca, alternatifler arası yüksek düzey nümerik farklılıkların nihai sıralamayı çok fazla etkilememesi amaçlanmıştır.

### 3.1. Alternatiflerin belirlenmesi

Monoray sistemi ilk alternatif olarak belirlenmiştir. Monoray, betonarme veya çelik tek bir hattın üzerinde asılı (asma tip) veya altında (çatı tipi) hareket eden bir toplu taşıma sistemidir [18,30]. Araçlarının tekerlekleri lastiktir ve çoğunlukla yer üstünde hareket ederler [5]. Monoray sistem örneği Şekil 2'de gösterilmektedir. Japonya, Almanya ve Çin başta olmak üzere birçok ülkede bulunmaktadır. Son yıllarda gelişmekte olan ülkelere de (Malezya gibi) tercih edilmektedir ancak kent içi raylı sistemlere kıyasla daha az örnek bulunmaktadır [17].



Şekil 2. Çin, Chongqing'deki Monoray [31]

Kent içi raylı sistemlerden tramvay, HRS ve metro alternatif olarak belirlenmiştir. Kent içi raylı sistemler; dolmuş, minibüs ve otobüs gibi sistemlere göre güvenlik, dakiklik, yüksek verimlilik ve çevre dostu olma gibi avantajlara sahiptir [32].

### 3.2. Kriterlerin belirlenmesi

Kriterlerin belirlenmesinde literatürdeki çalışmalar dikkate alınmıştır [17,26,33]. Bunlar maliyetler, hat ve araç özellikleri, müşteri memnuniyeti ve çevresel etki olmak üzere dört ana kriter belirlenmiştir. Dört kriter ayrıca birkaç alt kritere ayrılmıştır.

“Maliyet” faktörünün üç alt kriteri şu şekildedir:

- “İnşaat maliyeti”, projenin yapımına ilişkin altyapı, elektrik-mekanik sistemler ve mühendislik hizmetleri gibi maliyetleri ifade eder.
- “Araç maliyeti”, sistemin işletme süresi boyunca ihtiyaç duyduğu birim araç maliyetlerini ifade eder.
- “İşletme ve bakım”, sistemin işletilmesi ve bakımı için gereken maliyetleri ifade eder.

“Hat ve araç karakterizasyonu” faktörünün dört alt kriteri şu şekildedir:

- “Kapasite”, sistemin bir yönde taşıyabileceği maksimum yolcu sayısını ifade eder.
- “Esneklik”, sistemin talep veya rotalardaki değişiklikler gibi değişkenliklere yanıt verebilme esnekliğini ifade eder.
- “İşletme hızı”, araçların çalışması sırasında yavaşlama, hızlanma, bekleme vb. tüm hareketleriyle ortalama hızı ifade eder.
- “Güvenilirlik”, aracın zamanında varış ve ilerleme düzenliliği anlamına gelir.

Müşteri memnuniyeti faktörünün iki alt kriteri şu şekildedir:

- “Güvenlik”, yolculara zarar verebilecek bir kazadan korunma derecesini ifade eder.
- “Konfor”, yolcuların seyahat esnasındaki fiziksel ve duygusal konforunu ifade eder.

Çevresel etki faktörünün iki alt kriteri şu şekildedir:

- “Hava kirliliği”, araçların yolcu-km başına ürettiği CO<sub>2</sub> değerini ifade eder.
- “Gürültü kirliliği”, araçların (dBA) cinsinden gürültü değerini ifade eder.

Monoray ve şehir içi raylı ulaşım sistemlerinin özellikleri Tablo 4'te verilmektedir. Monorayın 4 araç, tramvay 1 araç, HRS 4 araç ve metro 8 araçtan oluştuğu dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Maliyetler Eskişehir, Bursa ve İstanbul fizibilite çalışmalarından alınmıştır [17,24,25,34]. Tramvay için Eskişehir'deki işletme hızı dikkate alınmıştır [5]. Diğer sistemler için çalışmadaki min-maks değerlerinin ortalaması alınarak çalışma hızı hesaplanmıştır [35]. Kapasite hesaplamalarında, monoray için minimum sefer sıklığı 2 dakika, tramvay için 5 dakika, HRS için 3 dakika ve metro için 3 dk olarak alınmıştır. Tramvay kavşak noktalarında taşıyolu ile kesiştiği için bulunduğu güzergâh daha sık sefer sayısına izin vermemektedir [5]. Esneklik, güvenilirlik, güvenlik ve konfor faktörleri literatürdeki derecelendirmelere dayanmaktadır [16,36]. Çevresel etki değerleri literatürdeki çalışmalardan alınmıştır [37,38].

**Tablo 4.** Monoray ve kentsel raylı ulaşım sisteminin özellikleri

Kriterler	Yapım M.	Araç M.	İ.&B. M.	İşletme H.	Kap.	Esnek.	Güvenirlik	Güvenlik	Konfor	Hava K.	Gürültü K.
Alternatifler/ Birim	Milyon \$/km	Milyon \$/Set	\$ Araç-Km/Kapasite	Km/sa	Yolcu/sa/yön	X	X	X	X	g/yolcu-km	dBA
Monoray	20,2	\$5,00	0,010	32,5	17400	1	4	5	4	23,6	75
Tramvay	3,2	\$2,85	0,019	17	3000	3	1	3	3	22	90
HRS	18	\$11,40	0,008	29	20000	1	4	5	4	22	90
Metro	44	\$12,80	0,007	42,5	37400	1	4	5	4	22	90





Şekil 3'te görüldüğü üzere monoray, araç maliyeti ve gürültü; tramvay, yapım maliyeti; metro ve HRS ise emisyon ve kapasite açısından tercih edilebilirdir. Genel olarak değerlendirildiği durumda ise, monorayın diğer alternatiflerden daha çok tercih edilebilir olduğu görülmektedir. Ayrıca şekle göre, monoray ulaşım sisteminin diğerlerine göre üstün yönünün "gürültü" kriteri olduğu da söylenebilir. Araçların tekerleklerinin lastik olması gürültü değerinde avantaj sağlamaktadır. Alternatiflerin üstün ve zayıf yönleri Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Alternatiflere göre kriterlerin değerlendirilmesi

Şekil 4'te görüldüğü üzere kriterlerin eşit önemde alındığı uygulama neticesinde, monorayın gürültü, araç maliyeti, hız, güvenilirlik, emniyet, konfor ve işletme bakım maliyeti açısından üstün; esneklik, yapı maliyeti, emisyon ve kapasite açısından zayıf olduğu görülmüştür. Lastik tekerleklerinden kaynaklı sürtünmenin daha fazla olmasından dolayı enerji tüketimi ve emisyon değeri daha yüksektir. Güzergâha göre yükseltilmiş yapılar inşa ediliği için esnekliği düşüktür. Fakat 4 araçlık orta boy monoray seti yerine 8 araçlık büyük monoray araçlarından oluşan setlerde kapasite yükselebilir. Buna rağmen monoray diğer alternatifler içerisinde en çok tercih edilebilir seçenek olarak dikkat çekmektedir. Bu bulgular monorayın raylı sistemlere alternatif bir sistem olabileceğini göstermektedir. Metronun sahip olduğu üstün hat ve araç karakterizasyonu özelliklerine rağmen yüksek maliyetleri sebebiyle ikinci sırada yer almaktadır. HRS, tramvay ve metro arasında değerlendirilebilecek bir sistemdir. Tramvay ise araç ve yapım maliyeti ile esneklik ve emisyon özelliklerine göre üstün iken diğer kriterlere göre zayıf olarak değerlendirilmektedir. Bu da alternatifin tercih edilebilirliğini negatif yönde etkilemektedir. SSK-Otogar hattındaki tramvayın düşük kapasite, konfor ve güvenilirliğe sahip olmasından kaynaklı problemler bu çalışmanın bulgularının tutarlılığını göstermektedir [5]. Tramvay maliyet konusunda diğer sistemlere göre avantajlı olup ekonomik-mali fizibilite çalışmalarında uygulanabilir sonuçlar vermiş olması belediye/karar verici kuruluşlar için yeterli olabilir. Fakat sadece ekonomik-mali değerlendirmelerle toplu taşıma sisteminin seçilmesi istenilen düzeyde toplu taşıma kullanımı artırıp, otomobil kullanımı azaltmayabilir. Bu bulgular sadece ekonomik-mali fizibilite etüdüne göre toplu taşıma sistemi seçilmesinin yeterli olmadığına kanıt olabilir.

Ayrıca kriterlerin eşit öneme sahip olmadığı durumlarda, tüm sıralamalar değişebilir. Belediye/karar verici kuruluşlar, ilk olarak yolcuların ihtiyaç ve beklentilerine göre kriter ağırlıklarını belirleyerek optimum toplu taşıma sistemlerini nitel kriterlerini de dikkate alarak ÇKKV ile belirlemelidir. İkinci olarak ekonomik-mali fizibilite etüdüleriyle değerlendirme yapılması toplu taşımadan istenilen faydaların sağlanmasını ve buna ek olarak ulusal ekonomi-işletmecisi kurum açısından önemli kazanımlar elde edilmesini sağlayabilir. ÇKKV sonuçlarına göre ilk sırada yer alan toplu taşıma sistemi ekonomik-mali fizibilite etüdülerinde uygulanabilir sonuçlar vermiyorsa, ikinci sıradaki toplu taşıma sistemi için aynı işlemler tekrarlanabilir. ÇKKV'de en yüksek sıralamada olan ve ekonomik-mali fizibilite etüdüde uygulanabilir sonuç

veren toplu taşıma sisteminin seçilmesi en uygun yöntem olabilir. ÇKKV ve ekonomik-mali fizibilite etüdünün bütüncül yaklaşımı bu şekilde yapılabilir.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada monoray sisteminin raylı sistemlere alternatif olma durumu çok kriterli karar verme yöntemleri ve fizibilite çalışmaları birlikte ele alınarak incelenmiştir. ÇKKV'den PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır. Alternatifler monoray ve raylı sistemlerden tramvay, hafif raylı sistem ve metro olarak belirlenmiştir. Kriterler dört ana kriter ve 11 alt kriterden oluşturulmuştur. Eskişehir için tramvayın yeterli hizmet düzeyine sahip olmadığı SSK-Otogar ve tramvay yapımı devam eden Gaffar Okkan-ESTÜ hattı için yapılan monoray fizibilite etüdü çalışmasının sonuçları da ele alınarak ÇKKV-fizibilite ilişkisi incelenmiştir. Monorayın raylı sistemlere alternatif olabilirliği ÇKKV-fizibiliteye göre bütüncül yaklaşımla ele alınmıştır. Yapılan PROMETHEE ve fizibilite değerlendirmelerine göre aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

Çalışmada elde edilen sonuçlara birinci sırada monoray sistemi yer almaktadır. Monoray sisteminin sahip olduğu üstün özellikler raylı sisteme alternatif bir sistem olabileceğini göstermektedir. Monoray uygulamada en iyi sistem görünmesine rağmen yapılan monoray sistemi ekonomik-mali fizibilite etüdünde uygulanabilir sonuçlar alınmamıştır. Ekonomik-mali fizibilite etüdülerinde düşük yapım maliyeti sebebiyle uygulanabilir sonuçlar veren ve birçok belediye tarafından tercih edilen tramvay sistemi ise PROMETHEE yönteminde en son sırada kalmaktadır. Bu bulgular ÇKKV veya fizibilite etütlerinin tek başına toplu taşıma sistemi seçimi ve planlanmasında yeterli olmayacağını, ikisinin beraber değerlendirilerek optimum sistemin seçilmesi gerektiğini gösterebilir. ÇKKV'ye göre nitel kriterlerde ele alınarak toplu taşıma sistemlerin en iyiden en kötüye sıralanması, bu sıralamaya göre ekonomik-mali fizibilite etütlerinin yapılarak uygulanabilir sonuç veren ilk toplu taşıma sisteminin seçilmesi uygun bir çözüm olabilir. Bu yaklaşımla toplu taşımanın istenilen düzeyde kullanımı ve otomobil kullanımının azatılması sağlanabilir. Bu çalışmada kriterler eşit öneme sahip olarak uygulama yapılmıştır. Karar verici kurum/belediyelerin yolcuların ihtiyaç ve beklentilere uygun olarak kriter ağırlıklarını belirlemeleri daha verimli sonuçlar alınmasını sağlayabilir.

Gelecekteki çalışmalarda, farklı ÇKKV yöntemleri, daha geniş bir toplu taşıma sistemi yelpazesi ve farklı şehir ölçekleri düşünülebilir.

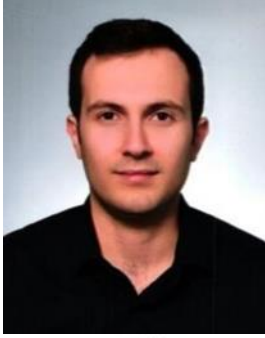
## Kaynakça

- [1] G. Qiu, R. Song, ve S. He, "The aggravation of urban air quality deterioration due to urbanization, transportation and economic development – Panel models with marginal effect analyses across China", *Science of The Total Environment*, c. 651, ss. 1114-1125, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.219.
- [2] J. A. Manzolli, J. P. Trovão, ve C. H. Antunes, "Scenario-Based Multi-criteria decision analysis for rapid transit systems implementation in an urban context", *eTransportation*, c. 7, s. 100101, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.etrans.2020.100101.
- [3] B. Lin ve Z. Du, "Can urban rail transit curb automobile energy consumption?", *Energy Policy*, c. 105, ss. 120-127, June. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.02.038.
- [4] A. S. Bergantino, M. Intini, ve L. Tangari, "Influencing factors for potential bike-sharing users: an empirical analysis during the COVID-19 pandemic", *Research in Transportation Economics*, c. 86, s. 101028, May. 2021, doi: 10.1016/j.retrec.2020.101028.
- [5] F. Yıldızhan, "Monoray sisteminin Eskişehir'de uygulanabilirliğinin araştırılması", Yüksek lisans tezi, İnşaat mühendisliği bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2019.
- [6] İ. H. Acar, "Bütünleşik Ulaşım Politikası ve Avrupa Kentsel Şartı, Ulaşım ve Dolaşım İlkeleri", *TMMOB Ulaştırma Politikaları Kongresi*, Ankara, 2003, ss. 41-59.
- [7] P. Yalnız ve Ş. Bilgiç, "Eskişehir Kent Merkezinde 'Park Et ve Bin' Uygulamasının Sürdürülebilir Ulaştırma Bağlamında Değerlendirilmesi", *7. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, 2007, ss. 461-470.

- [8] S. Gössling, “Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, c. 79, s. 102230, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102230.
- [9] S. Grava, *Urban Transportation Systems. Choices for Communities*. McGraw-Hill, United States 2003.
- [10] H. Liu, W. Y. Szeto, ve J. Long, “Bike network design problem with a path-size logit-based equilibrium constraint: Formulation, global optimization, and matheuristic”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, c. 127, ss. 284-307, July. 2019, doi: 10.1016/j.tre.2019.05.010.
- [11] D. Pojani ve D. Stead, Ed., *The Urban Transport Crisis in Emerging Economies*. Springer International Publishing, 2017.
- [12] R. G. Mugion, M. Toni, H. Raharjo, L. D. Pietro, ve S. P. Sebatu, “Does the service quality of urban public transport enhance sustainable mobility?”, *Journal of Cleaner Production*, c. 174, ss. 1566-1587, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.052.
- [13] J. B. Ingvarson ve O. A. Nielsen, “Effects of new bus and rail rapid transit systems – an international review”, *Transport Reviews*, c. 38, sy 1, ss. 96-116, Jan. 2018, doi: 10.1080/01441647.2017.1301594.
- [14] F. Probeste, J. C. Muñoz, ve A. Gschwender, “Comparing social costs of public transport networks structured around an Open and Closed BRT corridor in medium sized cities”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, c. 138, ss. 187-212, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.tra.2020.06.005.
- [15] M. Rizelioğlu, “Bursa hrs hattının metrobüs sistemi olarak modellenmesi”, Yüksek lisans tezi, İnşaat mühendisliği bölümü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2015.
- [16] V. R. Vuchic, *Urban Transit Systems and Technology*. John Wiley & Sons, 2007.
- [17] F. Yıldızhan ve M. Karacasu, “Monorail System Feasibility Study for Developing Countries: The Case Study of Eskişehir-Turkey”, *Politeknik Dergisi*, (Baskıda), doi: 10.2339/politeknik.814239.
- [18] P. E. Timan, “Why Monorail Systems Provide a Great Solution for Metropolitan Areas”, *Urban Rail Transit*, c. 1, sy 1, ss. 13-25, March. 2015, doi: 10.1007/s40864-015-0001-1.
- [19] E. Memiş, “Monoray sistemleri, Türkiye’deki yatırım süreçleri ve yerel yönetimlerin monoraya yaklaşımı”, Yüksek lisans tezi, İnşaat mühendisliği bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2016.
- [20] T. Kuwabara, M. Hiraishi, K. Goda, S. Okamoto, A. Ito, ve Y. Sugita, “New Solution for Urban Traffic: Small-Type Monorail System”, *Automated People Movers 2005: Moving to Mainstream*, ss. 1-7, April. 2012, doi: 10.1061/40766(174)65.
- [21] M. Hamurcu ve T. Eren, “Monoray ve Türkiye’de Potansiyel Uygulanabilirliği”, *Transist 8. Uluslararası Ulaşım Teknolojileri Sempozyumu ve Fuarı*, İstanbul, 2015.
- [22] E. A. Çalis, “Monoray ulaşım sisteminin özellikleri ve diğer kentiçi ulaşım araçları ile karşılaştırılması”, Yüksek lisans tezi, İnşaat mühendisliği bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2016.
- [23] İ. H. Acar, “Trafik ve Ulaşım Konularında Kanılar ve Gerçekler”, *7. Ulaştırma Kongresi*, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 2007, ss. 23-34.
- [24] M. Rizelioğlu ve T. Arslan, “A comparison of LRT with an imaginary BRT system in performance: Bursa example”, *Case Studies on Transport Policy*, c. 8, sy 1, ss. 135-142, March. 2020, doi: 10.1016/j.cstp.2019.01.007.
- [25] Ö. Atik, “Lastik ve çelik alaşım tekerlekli metro araçlarının taşıma maliyetleri analizi ve karşılaştırılması”, Yüksek lisans tezi, İnşaat mühendisliği bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
- [26] D.-J. Lee, “A multi-criteria approach for prioritizing advanced public transport modes (APTM) considering urban types in Korea”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, c. 111, ss. 148-161, May. 2018, doi: 10.1016/j.tra.2018.02.005.
- [27] D. Browne ve L. Ryan, “Comparative analysis of evaluation techniques for transport policies”, *Environmental Impact Assessment Review*, c. 31, sy 3, ss. 226-233, April. 2011, doi: 10.1016/j.eiar.2010.11.001.
- [28] P. Delle Site ve F. Filippi, “Weighting methods in multi-attribute assessment of transport projects”, *Eur. Transp. Res. Rev.*, c. 1, sy 4, ss. 199-206, Dec. 2009, doi: 10.1007/s12544-009-0018-1.
- [29] H. Bağcı ve Ö. F. Rençber, “Kamu Bankaları ve Halka Açık Özel Bankaların Promethee Yöntemi İle Kârlılıklarının Analizi”, *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 6, sy 1, ss. 39-47 Oca. 2014.

- [30] X. He, “Application and Prospect of Straddle Monorail Transit System in China”, *Urban Rail Transit*, c. 1, sy 1, ss. 26-34, March. 2015, doi: 10.1007/s40864-015-0006-9.
- [31] T. Sekitani, M. Hiraishi, S. Yamasaki, ve T. Tamotsu, “China’s first urban monorail system in Chongqing”, *Hitachi Review*, c. 54, ss. 193-197, Dec. 2005.
- [32] D. Pan, L. Zhao, Q. Luo, C. Zhang, ve Z. Chen, “Study on the performance improvement of urban rail transit system”, *Energy*, c. 161, ss. 1154-1171, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.067.
- [33] G. Akman ve A. Alkan, “İzmit kent içi ulaşımda alternatif toplu taşıma sistemlerinin aksiyomlarla tasarım yöntemi ile değerlendirilmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 22, sy 1, ss. 54-63, 1, Şub. 2016, doi: 10.5505/pajes.2015.55376.
- [34] B. Birol, “Kentiçi raylı sistemler ve metrobüs işletme maliyeti değerlendirilmesi: İstanbul Örneği”, Yüksek lisans tezi, İnşaat mühendisliği bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [35] P. Miller, S. C. Wirasinghe, L. Kattan, ve A. De Barros, “Monorails for sustainable transportation – a review”, *CSCE 2014 General Conference*, Halifax, 2014.
- [36] M. Hamurcu ve T. Eren, Toplu Taşıma Türünün Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Uygulaması. *International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET)*, Bayburt, 2017.
- [37] Japan Monorail Association, “Monorails”, 2019. [Online]. Available: <http://www.nihon-monorail.or.jp/assets/pdf/2019english.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2021].
- [38] D. A. Manoratna, K. Kawata, ve Y. Yoshida, “Environmental impact and travel time savings of a new monorail system in colombo’s commuting traffic”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, c. 51, ss. 122-128, March. 2017, doi: 10.1016/j.trd.2016.12.003.

### Özgeçmiş



#### **Fatih YILDIZHAN**

Lisans eğitimini Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde, yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalında tamamlamıştır. Şuan Gaziantep Üniversitesinde doktora yapmakta ve ulaştırma anabilim dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları kent içi ulaşım sistemleri ve ulaştırma ekonomisidir.

E-Posta: [fyildizhan@gantep.edu.tr](mailto:fyildizhan@gantep.edu.tr)



#### **Murat KARACASU**

Lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde, doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Ulaştırma Anabilim Dalında tamamlamıştır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı başkanı olarak, Prof. Dr. ünvanı ile çalışmaktadır. Araştırma konuları asfalt betonu, atık ve modelleme üzerinedir.

E-Posta: [muratk@ogu.edu.tr](mailto:muratk@ogu.edu.tr)



#### **Ömer Faruk RENÇBER**

Lisans eğitimini Niğde Üniversitesi FEF Matematik bölümünde, yüksek lisans eğitimini Gebze Teknik Üniversitesi SBE İşletme ABD’da ve Doktora eğitimini Aksaray Üniversitesi SBE İşletme ABD’da tamamlamıştır. Şu an aktif olarak Gaziantep Üniversitesi İİBF İşletme Bölümünde öğretim üyesi olarak görevine devam etmektedir. Çalışma alanı, istatistik, veri madenciliği ve çok kriterli karar verme teknikleridir.

E-Posta: [ofrencber@gantep.edu.tr](mailto:ofrencber@gantep.edu.tr)

### **Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.