

**Demiryolu Araçlarında Aktif Süspansiyon Sistemi için Kontrolcü Tasarımı**S. Mert ÖZER *Uçak Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye**smozer@eskisehir.edu.tr**(Alınış/Received: 08.01.2025, Kabul/Accepted: 25.04.2025, Yayınlama/Published: 31.07.2025)*

Öz: Bu çalışmada, demiryolu araçlarında yolcu konforunu artırmak amacıyla aktif süspansiyon sistemi için bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Konvansiyonel pasif süspansiyon sistemleri belirli yol ve hız koşullarında yeterli performans sağlayamamakta ve özellikle yüksek hızlı tren uygulamalarında titreşim bastırma açısından yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle çalışmada, çeyrek araç modeli temel alınarak, lineer kuadratik regülatör yaklaşımıyla bir durum geri beslemeli kontrolcü tasarlanmış ve etkinliği 5 cm'lik yanıl bozulma girdisi altında test edilmiştir. Kontrolsüz sistem marjinal kararlı davranış sergilerken, tasarlanan kontrolcü sayesinde sistem asimptotik kararlılığa ulaşmış ve gövde sapması ile gövde ivmesi önemli ölçüde azaltılarak konfor seviyesinde belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, aktif süspansiyon sistemlerinin demiryolu araçlarında konfor artırımı açısından etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu aracı, Aktif süspansiyon, Geri beslemeli kontrol, LQR

Controller Design for Active Suspension System in Railway Vehicles

Abstract: In this study, a controller is designed for an active suspension system in railway vehicles to improve passenger comfort. Conventional passive suspension systems may not provide adequate performance under varying track and speed conditions, and are particularly insufficient in suppressing vibrations in high-speed train applications. Therefore, a state feedback controller based on the linear quadratic regulator approach is designed using a quarter vehicle model and tested under a 5 cm lateral disturbance input. While the uncontrolled system exhibits marginally stable behavior, the proposed controller ensures asymptotic stability and significantly reduces body displacement and acceleration, leading to a noticeable improvement in ride comfort. The results demonstrate that active suspension systems offer an effective solution for enhancing comfort in railway vehicles.

Keywords: Railway vehicle, Active suspension, Feedback control, LQR

1. Giriş

Demiryolu sistemleri, güvenli, ekonomik ve çevre dostu ulaşım imkânı sunmaları nedeniyle modern toplumların vazgeçilmez altyapı unsurlarından biridir. Özellikle şehirlerarası yük ve yolcu taşımacılığında yüksek taşıma kapasitesi, düşük enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik avantajlarıyla öne çıkar [1]. Aynı zamanda trafik yoğunluğunu azaltarak karayolu sistemlerinin yükünü hafifletir ve karbon salımını düşürerek çevresel etkileri minimize eder. Bu nedenle demiryolu taşımacılığının geliştirilmesi, hem ekonomik kalkınma hem de çevresel sorumluluk açısından büyük önem taşımaktadır.

Demiryolu taşıtlarında süspansiyon sistemleri, yolcu konforunu artırmak ve ray-yol etkileşiminden kaynaklanan titreşimleri azaltmak amacıyla kullanılır [2]. Pasif süspansiyon sistemleri, sabit özelliklere sahip yay ve sönümleyicilerden oluşur ve düşük bakım maliyeti ile basit yapıları sayesinde yaygın olarak kullanılır. Ancak bu sistemler, farklı yol ve hız koşullarına uyum sağlamakta sınırlı kalır. Bu nedenle, aktif süspansiyon sistemleri, sensörler ve kontrol algoritmaları yardımıyla anlık olarak süspansiyon kuvvetini değiştirebilerek daha yüksek konfor

Atıf için/Cite as: S. Mert Özer, "Demiryolu araçlarında aktif süspansiyon sistemi için kontrolcü tasarımı," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 1-9, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1616100

ve güvenlik sağlar. Özellikle yüksek hızlı trenlerde aktif sistemler, yolcu konforunun iyileştirilmesi ve raydan çıkma riskinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Örneğin, [3]'de H_∞ kontrol yöntemiyle tasarlanan aktif ikincil süspansiyon sisteminin, tam ölçekli raylı taşıt modeli üzerinde yanal titreşimleri önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir. Benzer şekilde [4]'de değişken sertlik ve sönümlleme özelliklerine sahip magnetoreolojik elemanlar içeren yarı aktif süspansiyon sistemi geliştirilmiş, hem harmonik hem de rassal uyarımlar altında yolcu konforunu artırdığı ortaya konulmuştur. Aktif kontrol stratejileri arasında lineer kuadratik regülatör (LQR), lineer kuadratik Gaussian (LQG), bulanık mantık ve adaptif yöntemler öne çıkmaktadır. Örneğin, [5]'de çeyrek araç modeline uygulanan LQR tabanlı aktif süspansiyon sistemi, pasif yapıya kıyasla gövde ivmesini azaltarak konforu önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca [6] ve [7] gibi çalışmalar, parametre uyarlamalı proportional-integral-derivative (PID) ve bulanık denetleyicilerle titreşim kontrolünde yüksek performans elde edildiğini göstermektedir. Diğer yandan, [8]'de LQG kontrolü ile hem yolcu konforu hem de hunting kararlılığı hedeflenmiş, bu doğrultuda birincil ve ikincil süspansiyon sistemleri birlikte kontrol edilmiştir. Kontrolcü tasarımı maliyet ve uygulama kolaylığı da önemli faktörlerdir. Bu doğrultuda [9]'da, yalnızca iki aktüatör ve bir çift ivmeölçer içeren düşük maliyetli bir aktif süspansiyon sistemi önerilmiş, rezonant kontrol yöntemiyle LQG ve H_∞ kontrolörlere benzer performans elde edilmiştir. Öte yandan, [10]'da önerilen yanal-düşey birleşik aktif süspansiyon sisteminde yalnızca iki aktüatör kullanılarak her iki yönde titreşim kontrolü sağlanmış, bu konfigürasyonun düşük maliyetli bir alternatif olabileceği vurgulanmıştır. [11]'de ise yüksek hızlı demiryolu araçlarında düşey titreşimler, doğrusal olmayan uyarlamalı kontrol yöntemiyle yarı aktif süspansiyon sistemi kullanılarak etkin şekilde bastırılmıştır.

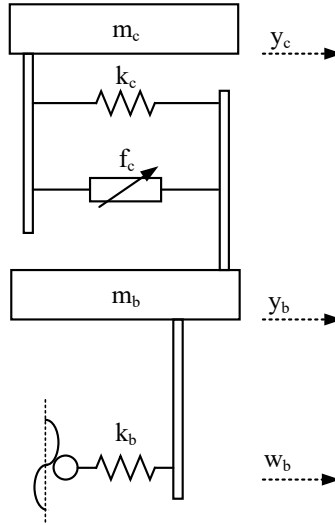
Sonuç olarak, literatürdeki çalışmalar aktif ve yarı aktif süspansiyon sistemlerinin, yolcu konforunu ve taşıt dinamik performansını geliştirme açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çalışmamızda biz de LQR tabanlı bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirerek, çeyrek taşıt modeline uygulanacak aktif süspansiyon sisteminin performansını değerlendirmeyi hedefliyoruz.

Makalenin Metot bölümünde, ilk olarak Bölüm 2.1'de bir çeyrek araç modelinin matematiksel gösterimi elde edilecektir. Bunu takiben, Bölüm 2.2'de literatürde yer alan gerçekçi sistem parametreleri kullanılarak modelin kararlılık ve performans analizi gerçekleştirilecektir. Sistemin dinamik davranışını iyileştirmek amacıyla, Bölüm 2.3'te durum geri beslemeli bir kontrolcü tasarlanacak ve elde edilen kapalı çevrim sistemin kararlılık ve performansı değerlendirilecektir. Elde edilen sonuçlar, kontrolsüz sistemle karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Son olarak, Sonuç bölümünde önerilen yöntemin güçlü ve sınırlı yönleri tartışılacak, çalışmanın temel bulguları özetlenecek ve gelecekte yapılacak araştırmalara yönelik önerilere yer verilecektir.

2. Metot

Sistem dinamiğini doğru bir şekilde analiz etmek ve etkin bir kontrol tasarlamak için güvenilir bir matematiksel model gereklidir. Bu bağlamda, ilk öncelik süspansiyon sistemi olarak ele aldığımız ve Şekil 1.'de gösterilen çeyrek araç modelinin matematiksel modeli Newton yasaları kullanılarak diferansiyel denklemlerle ifade edilmesi gerekmektedir.

2.1. Sistem tanımı



Şekil 1. Sistem modeli

Şekil 1.'de gösterilen çeyrek araç modeli, demiryolu bozukluklarının neden olduğu titreşimleri analiz etmek için kullanılan yaygın ve basit bir araç dinamik titreşim modelidir. Ele aldığımız model gövdeyi ve bojiyi temsil eden iki kütleden oluşmaktadır. Gövde ve bojinin kütleleri, sırasıyla, m_c ve m_b ile ifade edilmiştir. Gövdenin ve bojinin yanal yer değişimleri ise, sırasıyla, y_c ve y_b ile gösterilmiştir. Şekil 1.'de w ile ifade edilen ise tekerlek-ray arayüzündeki yanal yer değişimlerini temsil eden bozucu girdidir. Çeyrek araç modelinde pasif elemanlar olan birincil gerginlik elemanı k_c ile ikincil gerginlik elemanı ise k_b ile ifade edilmektedir. Bu elemanların değerleri [3]'de verildiği gibi kabul edilmiştir ve Tablo 1.'de gösterilmiştir. Son olarak, f_c ise sistemdeki aktif süspansiyon sisteminin uyguladığı kuvveti temsil etmektedir. Belirtmemiz gerekir ki, ele aldığımız sistemde tekerlek, ray düzensizliklerine entegre olduğundan kütesiz kabul edilmiştir. Dolayısıyla modeli basitleştirmek için sistemin dinamik davranışlarına katkısı yok kabul edilecektir.

Tablo 1. Sistem parametrelerini değerleri [3]

Parametre	Değer	Açıklama
m_c	10,300 kg	Gövde kütlesi
m_b	2500 kg	Boji kütlesi
k_c	200 kN/m	İkincil gerginlik
k_b	4,000 kN/m	Birincil gerginlik

Şekil 1.'de verilem sistem

$$m_c \ddot{y}_c = k_c (y_b - y_c) + f_s \quad (1a)$$

$$m_b \ddot{y}_b = k_p (w - y_b) - k_c (y_b - y_c) - f_s \quad (1b)$$

ile ifade edilen basit diferansiyel denklemler ile tanımlanabilir. Durum vektörü

$$x := [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [y_c \ \dot{y}_c \ y_b \ \dot{y}_b]$$

olarak tanımlandığında, (1a)-(1b) ile ifade edilen sistem dinamiği

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2a)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m_c} (k_c(x_3 - x_1) + f_s) \quad (2b)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (2c)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m_b} (k_p(w - x_3) - k_s(x_3 - x_1) - f_s) \quad (2d)$$

durum değişkenleriyle tanımlanabilir. Ayrıca, sistem çıktıları da durum değişkenleri ile

$$y_1 = y_c - y_b = x_1 - x_3 \quad (3a)$$

$$y_2 = \ddot{y}_c = \dot{x}_2 \quad (3b)$$

gibi tanımlanmaktadır. (3a) denklemi ile tanımlanan y_1 çıktısı gövdenin göreceli yer değiştirmesini (sapma); (3b) denklemi ile tanımlanan y_2 çıktısı ise gövdenin ivmesini ifade etmektedir. Dolayısıyla, sistemin çıktıları sürüş konforuyla direkt ilişkilidir. Ayrıca, kontrol girdisini de $u := f_s$ olarak tanımlayalım. Kontrol girdisi ve (2)-(3) denklemlerini durum uzayında ifade etmek gerekirse

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_u u(t) + B_w w(t) \quad (4a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4b)$$

ve

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_c}{m_c} & 0 & \frac{k_c}{m_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_c}{m_b} & 0 & -\frac{k_c+k_p}{m_b} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_c} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_b} \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_p}{m_b} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ -\frac{k_c}{m_c} & 0 & \frac{k_c}{m_c} & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_c} \end{bmatrix}.$$

Sonraki kısımlarda, Şekil 1.'de gösterilen ve (4) ile ifade edilen sistemin nümerik analizini yapmak için Tablo 1.'de verilen parametre değerleri kabul edilmiştir.

2.2. Sistem analizi

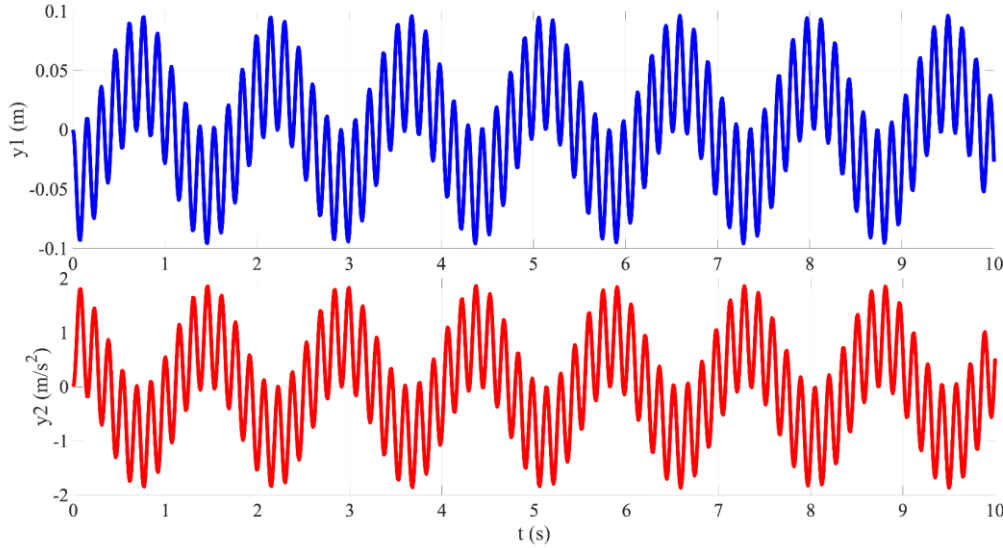
Kararlılık, dinamik bir sistemin tasarımında ve analizinde en temel gereksinimdir. Çünkü, kararsız bir sistem pratikte uygulanamaz. Böyle bir durumda, sistem çıktıları kısa sürede çok büyük değerlere ulaşarak fiziksel sınırları aşar. Ayrıca, kararsız sistemler tehlikeli davranışlar sergileyebilirler (aşırı ısınma, patlama, mekanik hasar gibi). İlaveten, kararsız bir sistem için performans ölçütleri anlamsızdır ve analiz edilemez. Bu sebeplerle, öncelikle sistemin kararlılık analizinin yapılması gereklidir.

Durum uzay gösterimi (4) gibi ifade edilen doğrusal zamanla değişmeyen bir sistemin başlangıç koşullarına verdiği yanıt zamanla sifıra yakınsıyorsa o sistem asimtotik kararlıdır. Burada, sistemin dinamik denklemindeki A matrisin özdeğerleri kararlılığı belirler. Tüm özdeğerlerin reel kısımları negatifse sistem asimtotik kararlı; en az bir özdeğerin reel kısmı pozitifse sistem kararsız; sanal eksen üzerinde tekrarlanmayan özdeğerler varsa sistem marjinal kararlıdır.

Sistemin A matrisinin özdeğerlerini Tablo 1.'de verilen parametre değerleri için hesaplattığımızda, i karmaşık sayıyı ifade etmek üzere, karmaşık eşlenik çiftlerden ikisinin $\lambda_{1,2} = \pm 40,99i$; diğer ikisinin ise $\lambda_{3,4} = \pm 4,29i$ olduğu görülmektedir. Bu sebeple sistemimiz marjinal kararlıdır. Her ne kadar çıktıların zamanla büyümesi beklenmese de sanal eksen üzerindeki özdeğerlerden dolayı sistem çıktıları yüksek salınıma sahip olacaktır ki bu ele aldığımız sistem için istenmeyen bir özelliktir.

Sistemin benzetim sonuçlarını incelemeyi önce, Tablo 1.'deki gibi gerçekçi demiryolu ölçeğinde parametrelere sahip bir çeyrek araç süspansiyon modeli için neyin anlamlı bir yanal bozulma büyüklüğü (örneğin, 1 cm veya daha fazla) oluşturduğunu tartışalım. Böyle bir bozulmaya (ya da sistem tanımında ifade edildiği gibi yer değişimine) şunlar neden olabilir: Rayların yanlış hizalanması, makaslar, düzensiz virajlar veya araç sapmasıyla yan rüzgar bağlantısı. Uluslararası standartlara göre, kremayer yanlış hizalanması tekerlek başına 1 ile 10mm arasında yanal yer değişimine neden olabilir. Daha kötü ve ekstrem durumlarda (örneğin dar virajlarda veya makas değişimlerinde) bu miktar artmaktadır. Bu çalışmada, konfor için bir stress testi benzetimi yapmak için 5cm yanal sapmaya karşılık gelen bozulma girdisini ele alacağız.

Şekil 1.'deki sistemde boji 5cm'lik bir yanal yer değiştirmeye neden olan bir bozulma girdisine maruz kaldığında sistemin çıktı sinyalleri Şekil 2.'deki gibi elde edilmektedir. Görüldüğü üzere sistem marjinal kararlı olduğu için, iki çıktı sinyalinin de genliği zamanla azalmamaktadır. Diğer bir taraftan, sistemin özdeğerleri sanal eksen üzerinde ve sanal kısımları görece büyük olduğundan iki çıktı sinyali de yüksek salınıma sahiptir. Sistem performansını çıktı sinyallerinin root-mean-square (RMS) ve maksimum değerleri ile ifade etmek gerekirse Tablo 2.'de hesaplanan değerlere bakmak gerekir. Bu değerler, uluslararası standartlara göre yolcu konforu açısından kabul edilebilir değerler olmamakla birlikte sistemin güvenli operasyonu için de kabul edilemez.



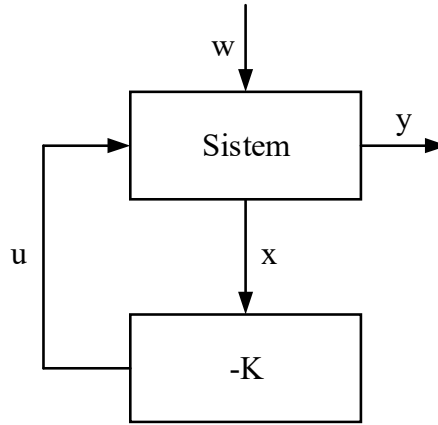
Şekil 2. Kontrolsüz sistemin çıktı sinyalleri

Tablo 2. Benzetim sonuçları

Performans Metriği	Kontrolsüz Sistem	Kontrollü Sistem
RMS gövde sapması	0,0479 m	0,0164 m
Maksimum gövde sapması	0,0962 m	0,0942 m
RMS gövde ivmesi	0,9303 m/s ²	0,2770 m/s ²
Maksimum gövde ivmesi	1,8673 m/s ²	1,3592 m/s ²

2.3. Kontrolcü tasarımı

Bu şartlar altında, sistemi asimtotik kararlı yapmak ve sistemin performansını iyileştirerek çıktı sinyallerini sistemin güvenli operasyonu ve yolcu konforu açısından makul ölçülere getirmek için bir geri beslemeli kontrol mekanizması kullanmak gerekmektedir. Bu amaçla, Şekil 3.'de gösterilen durum geri beslemeli kontrol mekanizması uygulanacaktır. Bu mekanizmada, kontrolcü olarak ifade ettiğimiz sistem elemanı sistemin durum değişkenlerini bir katsayı ile çarparak sisteme girdi olarak f_c kuvvetinin uygulanmasını sağlayacaktır. Daha sonra, kontrol altındaki sistem, kontrol edilmeyen sistemde olduğu gibi öncelikle kararlılık analizine daha sonra ise w olarak ifade edilen bozucu sinyalin çıktı sinyallerine etkisini gözlemelemek için benzetim çalışmasına tabi tutulacaktır.



Şekil 3. Durum geri beslemeli kontrol sistemi

Durum geri beslemeli kontrolcünün uygulayacağı kontrol sinyali

$$u(t) = -Kx(t) \quad (5)$$

olarak verilmiştir. Bu çalışmada, geri beslemeli kontrolcüyü tasarlamak için LQR metodu kullanılmıştır. LQR, lineer sistemler için optimal kontrol tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır [12]. Temel amacı,

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

olarak tanımlanan maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekil 4 ile tanımlanan geri beslemeli kontrol kuramının kazanç matrisi olan K 'yı hesaplamaktır. Maliyet fonksiyonunda, Q pozitif yarı-tanımlı durum ağırlık matrisini, R ise pozitif yarı-tanımlı kontrol ağırlık matrisini göstermektedir. Kontrol kazancı

$$K = R^{-1} B^T P$$

ve P ise

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

olarak verilen Ricatti cebirsel denkleminin çözümüdür. LQR metodunda Q ve R ağırlık matrislerinin seçimi oldukça kritiktir. Q matrisi tipik olarak köşegen formda seçilir ve diyagonal elemanlar ilgili durum değişkenlerinin göreceli önemini yansıtır. Q matrisindeki değerler ne kadar

büyükse, ilgili durum değişkeninin sifıra yakınsaması o kadar hızlı olur [13]. Diğer bir taraftan, R değerinin (sistemimizde tek bir kontrol girdisi olduğundan, R matris değil skaler bir değerdir) büyük seçilmesi kontrol girdisinin küçük kalmasını sağlarken; küçük R değerleri daha agresif bir kontrol yasası elde edilmesine olanak verir. Özellikle, uygulayıcı kapasiteleri sınırlıysa veya enerji tasarrufu önemliyse, R değerleri daha büyük seçilmelidir. Dolayısıyla, Q ve R değerlerinin göreceli büyüklükleri sistem davranışını önemli ölçüde etkiler. Pratikte, Q ve R 'nin optimal değerleri genellikle iteratif bir süreçle belirlenir [14]. Alternatif olarak, takip ve gürültü giderme performanslarını ifade eden performans indekslerinin optimizasyonuna dayanan bir yöntemle de Q ve R 'nin optimal değerleri seçilebilir.

Bu çalışmada, Q ve R 'nin değerleri başlangıç değerleri seçilerek benzetim sonuçlarının performansları değerlendirilmiş ve istenen davranış elde edilene kadar ağırlık ayarlaması yapılmıştır. Sonuç olarak,

$$Q = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^3 \end{bmatrix}$$

ve

$$R = 10^{-3}$$

değerleri uygun bulunmuştur. Bu değerler için Ricatti cebirsel denkleminin çözümü MATLAB'ın *lqr* komutu kullanılarak elde edilmiş ve kontrolcü kazançları

$$K = [249 \quad 10^5 \quad -3450 \quad -370] \quad (6)$$

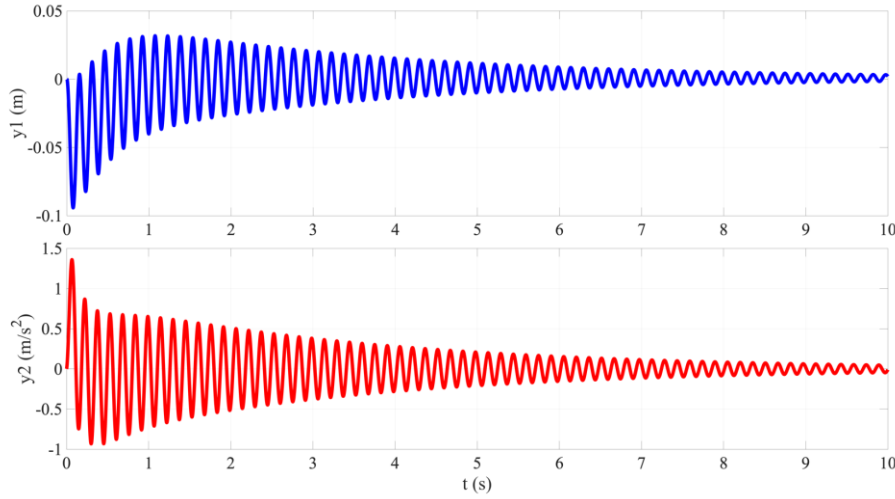
olarak hesaplanmıştır [15]. Daha sonra kararlılık analizi ve performans hesaplaması yapabilmek için durum geri beslemeli kontrol altındaki kapalı döngü sistem (4)-(5) denklemleri kullanılarak

$$\dot{x}(t) = (A - B_u K)x(t) + B_w w(t) \quad (7a)$$

$$y(t) = (C - DK)x(t) \quad (7b)$$

olarak elde edilmiştir.

(7) ile ifade edilen kontrollü sistemin $(A - B_u K)$ matrisinin özdeğerlerini Tablo 1.'de verilen parametre değerleri ve (6)'da verilen kontrolcü kazançları ile hesaplattığımızda, karmaşık eşlenik çiftlerden ikisinin $\lambda_{1,2} = -0,29 \pm 40,99i$; diğer iki reel özdeğerin ise $\lambda_3 = -2,93$ ve $\lambda_4 = -6,33$ olduğu görülmektedir. Hesaplanan özdeğerlere göre, sistemimiz asimtotik kararlıdır. Bu durumda sistemin çıktılarının zamanla küçülmesi beklenmektedir. Şekil 1.'deki sistemde boji 5cm'lik bir yanal yer değiştirmeye neden olan bir bozulma girdisine maruz kaldığında kontrollü sistemin çıktı sinyalleri Şekil 4.'deki gibi elde edilmektedir. Özdeğerlerin dağılımına uygun olarak çıktı sinyallerinin genliklerinin zamanla sönümlendiği görülmektedir.



Şekil 4. Kontrollü sistemin çıktı sinyalleri

Ayrıca, kontrollü sistemin performansını, kontrolsüz sistemde olduğu gibi çıktı sinyallerinin RMS ve maksimum değerleri ile ifade etmek gerekirse Tablo 2.'de hesaplanan değerlere bakmak gerekir. Görüldüğü üzere geri beslemeli kontrol mekanizması, RMS gövde sapması değerinde ve yolcu konforunda öncelikli öneme sahip RMS gövde ivmesi değerinde ciddi ölçüde iyileşme yaratmıştır.

Fakat not etmemiz gerekir ki, Q ve R 'nin değerleri değiştirilerek kararlılık ve performans değerleri daha da iyileştirilebilir yada kontrol girdisinin büyüklüğü (yani aktif süspansiyon sisteminin uyguladığı kuvvet) optimize edilebilir.

3. Sonuç

Bu çalışmada, demiryolu araçlarında yolcu konforunu artırmaya yönelik olarak aktif süspansiyon sistemleri için durum geri beslemeli bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çeyrek araç modeli kullanılarak oluşturulan sistem üzerinde, LQR temelli bir durum geri beslemeli kontrolcü geliştirilmiş ve sistemin 5cm'lik yatay bozulma girdisine verdiği tepkiler analiz edilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları, aktif süspansiyon sisteminin pasif sisteme kıyasla gövde ivmesini ve süspansiyon sapmasını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca kontrol kuvveti sınırlı tutulmasına rağmen performansın anlamlı ölçüde iyileştiği görülmüştür. Elde edilen bulgular, aktif süspansiyon sistemlerinin demiryolu araçlarında konforu artırmak ve titreşimleri azaltmak için etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın sunduğu olumlu sonuçların yanı sıra bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Ele alınan problem, uygulama sırasında sistem ve kontrolcü parametrelerindeki değişimlere karşı duyarlılık gösterdiğinden, [14]'de önerilen H_∞ optimizasyonu gibi gürbüz kontrol yaklaşımlarının değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, sensör kaynaklı ölçüm gürültüleri göz önüne alındığında, bu çalışmada sunulan LQR temelli tasarımın Linear Quadratic Gaussian (LQG) yöntemine genişletilmesi faydalı olabilir.

Gelecek çalışmalarda, bu çalışmada elde edilen teorik bulguların tam ölçekli araç modelleri üzerinde, gerçekçi yol profilleri altında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarla doğrulanması önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, mevcut çalışmada yapılan bazı basitleştirici varsayımların (örneğin kütesiz tekerlek modeli ve uygulayıcıların sınırsız kapasitede kabul edilmesi) gerçekçi sistem modellemesi ve kontrolcü tasarımı açısından yeniden değerlendirilmesi ve daha gerçekçi kabullerle revize edilmesi önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] D. Pamučar, M. Čirović, and S. Čirović, "Railway Vehicle Energy Efficiency as a Key Factor in Creating Sustainable Transport Systems," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5211, Aug. 2021.
- [2] B. Fu, R. L. Giossi, R. Persson, S. Stichel, S. Bruni, and R. Goodall, "Active suspension in railway vehicles: a literature survey," *Railway Engineering Science*, vol. 28, no. 1, pp. 3–35, Mar. 2020, doi: 10.1007/s40534-020-00207-w.
- [3] A. Orvnäs, S. Stichel, and R. Persson, "Active lateral secondary suspension with H_∞ control to improve ride comfort: Simulations on a full-scale model," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 49, no. 9, pp. 1409–1422, Sep. 2011, doi: 10.1080/00423114.2010.527011.
- [4] T. Jin, Z. Liu, S. Sun, Z. Ren, L. Deng, B. Yang, M. D. Christie, and W. Li, "Development and evaluation of a versatile semi-active suspension system for high-speed railway vehicles," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 135, p. 106338, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106338.
- [5] A. Urooj and A.-W. A. Saif, "Modeling of a rail vehicle's active suspension system to reduce vibrations using an LQR," in *Proc. 21st Int. Multi-Conf. on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2024, pp. 457–464, doi: 10.1109/SSD61670.2024.10548734.
- [6] M. Metin and R. Güçlü, "Vibrations control of light rail transportation vehicle via PID type fuzzy controller using parameters adaptive method," *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 19, no. 5, pp. 807–816, 2011, doi: 10.3906/elk-1001-394.
- [7] M. Metin and R. Güçlü, "Rail vehicle vibrations control using parameters adaptive PID controller," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, Article ID 728946, 10 pages, Apr. 2014, doi: 10.1155/2014/728946.
- [8] Q. Zhu, J.-J. Ding, and M.-L. Yang, "LQG control based lateral active secondary and primary suspensions of high-speed train for ride quality and hunting stability," *IET Control Theory Appl.*, vol. 12, no. 10, pp. 1497–1504, Oct. 2018, doi: 10.1049/iet-cta.2017.0529.
- [9] Q. Zhu, L. Li, C.-J. Chen, C.-Z. Liu, and G.-D. Hu, "A low-cost lateral active suspension system of the high-speed train for ride quality based on the resonant control method," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 5, pp. 4187–4196, May 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2767547.
- [10] Y. C. Zeng, W. H. Zhang, and D. L. Song, "Lateral-vertical coupled active suspension on railway vehicle and optimal control methods," *Veh. Syst. Dyn.*, pp. 1–23, Sep. 2020, doi: 10.1080/00423114.2020.1814358.
- [11] M. Metin and F. C. Yılmaz, "Yüksek hızlı demiryolu araçlarında düşey titreşimlerin doğrusal olmayan uyarlamalı kontrol ile yarı aktif kontrolü," *Mühendis ve Makina*, vol. 62, no. 703, pp. 350–371, Apr.–Jun. 2021, doi: 10.46399/muhendismakina.849808.
- [12] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback control of dynamic systems*. 6th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2010.
- [13] K. Ogata, *Modern control engineering*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [14] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, *Robust and optimal control*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1996.
- [15] MathWorks, Natick, MA, USA, *Control System Toolbox User's Guide*, R2024a ed., 2024. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/control.html>.

Özgeçmiş



S. Mert ÖZER

S. Mert Özer, lisans ve yüksek lisans eğitimini 2013 ve 2016 yıllarında Anadolu Üniversitesi; doktora eğitimini ise 2022 yılında Eskişehir Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında geri beslemeli kontrol sistemleri, optimizasyon, makine öğrenmesi tabanlı modelleme ve MATLAB tabanlı mühendislik uygulamaları yer almaktadır.

E-Posta: smozer@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Demiryolu Ortamında Nesne Tespiti için Derin Öğrenme Yöntemlerinin Geliştirilmesi ve Zed Kamerası ile Mesafe Ölçümü

Muhammed Amir ELMUHAMMEDCEBBEN¹, İlhan AYDIN¹, Mehmet SEVİ^{*2}

¹ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elâzığ, Türkiye

² Muş Alparslan Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Muş, Türkiye

*m.sevi@alparslan.edu.tr

(Alınış/Received: 09.03.2025, Kabul/Accepted: 11.04.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Demiryolu güvenliğinin sağlanması, dinamik ortamlarda doğru ve gerçek zamanlı nesne tespiti gerektiren kritik bir mühendislik problemidir. Bu çalışmada, demiryolu izleme süreçlerini iyileştirmek amacıyla derin öğrenme tabanlı nesne tespiti modelleri geliştirilmiş ve RailSem19 veri seti kullanılarak YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11 ve Faster R-CNN modelleri eğitilerek entegre edilmiştir. Ayrıca, nesnelerin mesafe ölçümlerinin hassasiyetini artırmak için ZED stereo kamerası kullanılmıştır. DeneySEL bulgular, YOLOv9 modelinin doğruluk ve işlem verimliliği açısından en iyi dengeyi sağladığını ortaya koymakta olup, bu modelin ortalama doğruluk (mAP50) değeri %52,14 olarak hesaplanmış ve çıkarım süresi optimize edilmiştir. Önerilen yöntem, otonom demiryolu sistemleri ve güvenlik izleme uygulamaları için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalar, veri artırma teknikleri, yapay zekâ destekli yorumlanabilirlik ve çoklu sensör füzyonu ile modelin dayanıklılığını artırmaya odaklanacaktır.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Demiryolu güvenliği, Nesne algılama, Mesafe ölçümü, RailSem19, ZED kamera

Developing Deep Learning Methods for Object Detection and Using Zed Camera for Distance Measurement in Railway Environment

Abstract: Ensuring railway safety is a critical engineering problem that requires accurate and real-time object detection in dynamic environments. In this study, deep learning-based object detection models are developed to improve railway monitoring processes, and YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11, and Faster R-CNN models are trained and integrated using RailSem19 dataset. In addition, a ZED stereo camera is used to increase the precision of distance measurements of objects. Experimental findings reveal that the YOLOv9 model provides the best balance in terms of accuracy and computational efficiency, the average accuracy (mAP50) value of this model is calculated as 52.14% and the inference time is optimized. The proposed method has significant potential for autonomous railway systems and safety monitoring applications. Future studies will focus on improving the robustness of the model with data augmentation techniques, artificial intelligence-supported interpretability, and multi-sensor fusion.

Keywords: Deep learning, Railway safety, Object detection, Distance measurement, RailSem19, ZED camera

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı sistemleri, yolcu ve yük taşımacılığının verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayarak küresel ulaşım ve lojistik ağlarının temel unsurlarından biridir. Bununla birlikte, demiryolu güvenliğinin ve operasyonel verimliliğin sağlanması, özellikle raylar üzerinde ve çevresinde potansiyel engellerin tespit edilmesi ve giderilmesi açısından sürekli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu tür aksaklıkların yol açabileceği sonuçlar; gecikmeler ve finansal kayıplardan, ciddi kazalara kadar geniş bir yelpazede değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, nesne tespitinin doğruluğunu artırmak, mesafe ölçümünü geliştirmek ve gerçek zamanlı tepki

Atıf için/Cite as: M. A. Elmuhammedcebben, İ. Aydın, M. Sevi, "Demiryolu ortamında nesne tespiti için derin öğrenme yöntemlerinin geliştirilmesi ve zed kamerası ile mesafe ölçümü," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 10-24, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1645019

mekanizmaları oluşturmak, demiryolu güvenliğini artırmada kritik öneme sahiptir. Otomatik izleme sistemlerinde kaydedilen ilerlemelere rağmen, mevcut yöntemler, özellikle elverişsiz hava koşulları ve değişken ışık senaryoları altında dinamik ve öngörülemeyen ortamlarda yetersiz kalabilmektedir.

Demiryolu operasyonlarının sürekliliğini ve güvenliğini sağlamak, tehlikeleri gerçek zamanlı olarak belirleyip müdahale edebilen sağlam nesne tespit sistemlerini gerektirmektedir. Güvenilir engel tespiti, yalnızca çarpışmaların ve raydan çıkmaların önlenmesine katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda otomatik tren kontrol sistemlerine destek sağlayarak tespit edilen nesnelerin niteliğine ve konumuna göre proaktif önlemler alınmasını mümkün kılar. Buna ek olarak, nesne tespiti ile mesafe ölçüm teknolojisinin entegrasyonu, durumsal farkındalığı artırarak tren kontrolü ve altyapı bakımında zamanında karar alınmasını sağlar.

Son yıllarda derin öğrenme alanında kaydedilen ilerlemeler, demiryolu güvenliği uygulamalarında nesne tespit yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. YOLO (You Only Look Once) [1], Faster R-CNN [2], Mask R-CNN [3, 4] ve SSD (Single Shot Multibox Detector) [4] gibi en güncel algoritmalar, geleneksel görüntü işleme tekniklerine kıyasla önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Bu modeller, ortalama doğruluk (mAP) değerlerinde %88'e ve saniyede 48 kareye (FPS) kadar çıkabilen başarımlar sergilemiştir [5]. Modellerin etkinliği, uygulama alanına göre farklılık göstermektedir: YOLO, gerçek zamanlı performansta üstünlük sağlarken [6,7], Faster R-CNN, kısmen gizlenmiş veya küçük nesnelerin belirlenmesinde etkili olduğunu kanıtlamış, ancak hesaplama karmaşıklığı nedeniyle gerçek zamanlı işlem gücü açısından bazı sınırlamalar göstermiştir; Mask R-CNN ve U-Net ise yüksek doğrulukta segmentasyon gerçekleştirebilmektedir, U-Net'in demiryolu raylarının segmentasyonunda %91,8'lik bir ortalama kesişim oranı (mIoU) başarısı elde ettiği ve önceki modellere kıyasla önemli bir gelişme sağladığı rapor edilmiştir [8]. Ayrıca, SE dikkat birimleri, optimize edilmiş çapa kutuları ve iyileştirilmiş sınır regresyon kayıp fonksiyonları gibi ek geliştirmeler, özellikle küçük nesnelerin tespitinde bu modellerin doğruluğunu daha da artırmıştır [8].

Standart nesne tespitinin ötesinde, LiDAR (Light Detection and Ranging), termal görüntüleme ve derin öğrenme algoritmalarını bir araya getiren çok modlu yaklaşımlar, özellikle düşük ışık koşulları ve olumsuz hava şartlarında tespit performansını artırmıştır [9]. RFID (Radio Frequency Identification) [10], monoküler görüntüleme ve stereo kameralar (ZED kameralar [11]) gibi mesafe ölçüm teknolojileri, gerçek zamanlı mekânsal farkındalık ve çarpışma önleme mekanizmaları sunma potansiyeliyle araştırılmaktadır. Ancak, bu yöntemler genellikle yüksek hızlı demiryolu ortamlarında gerekli mekânsal hassasiyeti sağlayamamaktadır ve bu durum, ek iyileştirmelere duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, veri artırma stratejileriyle birleştirilen dönüşüm tabanlı öğrenme tekniklerinin tespit doğruluğunu önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Örneğin, Inception-ResNet-v2 ve dengeli sınıf artırma tekniklerinden yararlanan modellerin %94,06'ya varan tespit doğruluğu sağladığı, yüksek kesinlik ve geri çağırma oranlarına ulaştığı tespit edilmiştir [12]. Öte yandan, Generative Adversarial Networks (GANs) gibi üretken ağlar, veri kıtlığı sorununu gidermek amacıyla kullanılmış olup, pix2pix gibi çerçevelerle verilerin genişletilmesi ve yüksek hızlı demiryolu senaryolarında gerçek zamanlı nesne tespitinin iyileştirilmesi sağlanmıştır [13].

Bu gelişmelere rağmen, demiryolu güvenliğine yönelik nesne tespiti ve mesafe ölçümünün pratik uygulamalarında önemli eksiklikler devam etmektedir. Mevcut modeller, sınırlı veri seti çeşitliliği, demiryolu özelinde yetersiz eğitim ve derinlik algılama mekanizmalarıyla entegrasyon eksikliği nedeniyle çevresel zorluklarla mücadelede zorlanmaktadır [14,15,16]. Mevcut çalışmalar, genellikle tespit doğruluğuna odaklanırken, nesne tespiti ile stereo görüş, LiDAR veya radar gibi tamamlayıcı teknolojilerin entegrasyonunu ihmal etmektedir. Oysa, hassas mesafe ölçümü ve gerçek zamanlı karar alma süreçleri için bu teknolojilerin birlikte kullanımı kritik öneme sahiptir. Ayrıca, YOLOv8 ve Faster R-CNN gibi derin öğrenme tabanlı nesne tespiti

modelleri ile ZED kameraları gibi stereoskopik kameraların eşzamanlı kullanımı hala yeterince incelenmemiştir [17]. Bu durum, bu teknolojilerin etkili bir şekilde nasıl birleştirilebileceğine dair bilgi eksikliğini ortaya koymaktadır.

RailSem19 [18] gibi demiryolu özelindeki veri setlerinin sınırlı olması, model genellemesinin farklı operasyonel koşullara yayılmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, sınıf dengesizliği, olumsuz hava koşullarına duyarlılık ve hesaplama kısıtlamaları, bu sistemlerin gerçek zamanlı uygulamalara entegrasyonunu engellemektedir. Bunun yanı sıra, nesne tespiti ve mesafe ölçümünü entegre eden, aynı zamanda sensör konumlandırmasını optimize eden kapsamlı çerçevelerin eksikliği de dikkat çekmektedir. Gelecekteki araştırmalar, mevcut gelişmeleri değerlendirirken tamamlayıcı teknolojileri bütünleştirerek bu sınırlamaları ele alan sağlam ve ölçeklenebilir çözümler geliştirmeye odaklanmalıdır.

Bu çalışma, YOLOv8 ve YOLOv11 gibi modern derin öğrenme modellerini ZED kameralar aracılığıyla stereoskopik görüş teknolojisi ile entegre eden iki bileşenli bir sistem geliştirmeyi ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Temel hedefler, bu modellerin RailSem19 veri seti üzerindeki doğruluk, hız ve güvenilirliğini değerlendirmek ve zorlu demiryolu senaryolarında etkinliklerini analiz etmektir. Ayrıca, nesne tespiti ile mesafe ölçümünün birleştirilmesi, durumsal farkındalığı artırarak gerçek zamanlı karar alma süreçlerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen sistemin performansı, olumsuz hava koşulları ve değişken ışık ortamları dâhil olmak üzere çeşitli çevresel koşullar altında değerlendirilecek ve güvenilir gerçek zamanlı çalışmayı sağlayacak şekilde optimize edilecektir.

Gelişmiş derin öğrenme algoritmalarının stereoskopik görüntüleme teknolojisi ile entegrasyonu, demiryolu güvenliğini artırmada umut vadeden bir yaklaşımdır. Bu yöntem, gerçek zamanlı engel tespiti ve hassas mesafe tahmini yoluyla proaktif risk azaltımına olanak tanımaktadır. Bu araştırmanın bulguları, farklı ve zorlu koşullarda çalışabilen akıllı demiryolu sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak, dünya genelinde daha güvenli ve verimli demiryolu ağlarının oluşturulmasına yardımcı olacaktır.

2. Metot

Bu bölüm, önerilen derin öğrenme tabanlı nesne tespiti ve mesafe ölçüm çerçevesi için ayrıntılı ve tekrarlanabilir bir metodoloji sunmaktadır. Bu yaklaşım, gerçek dünya demiryolu koşullarında doğru engel tespiti ve mesafe tahmini sağlamak için ZED kamerası kullanarak stereoskopik vizyon ile gelişmiş nesne tespiti modellerini entegre etmektedir.

2.1. Veri kümesine genel bakış

Bu çalışmada, nesne tespiti modellerini eğitmek ve değerlendirmek için RailSem19 veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri kümesi, demiryolu sahnelerinin anlaşılması için özel olarak tasarlanmış ve halka açık olarak erişime sunulmuş bir veri kümesidir. RailSem19, çeşitli hava koşulları, farklı aydınlatma ve coğrafi ortamlar altında çekilmiş 8.500 görüntü içermektedir. Demiryolu hatları, insanlar, sinyaller ve araçlar dahil olmak üzere 19 farklı nesne kategorisini barındıran bu veri kümesi, demiryolu ortamlarında nesne tespiti görevleri için kapsamlı bir karşılaştırma ölçütü sunmaktadır.

Veri kümesi, demiryolu güvenliği için kritik unsurlara odaklanarak geniş bir nesne kategorisi yelpazesi sunmaktadır; bu unsurlar arasında insanlar ve demiryolu hatları öne çıkmaktadır. Tespit performansını artırmak amacıyla, Çalışmada beş temel kategoriye odaklanılmıştır: demiryolu hatları (demiryolu ortamının ana kategorisi), insanlar (demiryolu güvenliği açısından önemli bir kategori), engeller (demiryolu tehlikelerinin tespiti için temel bir kategori), sinyaller ve araçlar (her iki kategori de demiryolu hatları çevresindeki çevresel algılama ve güvenliğe katkı

sağlamaktadır). Bu kategorilerin seçimi, gerçek zamanlı olarak tehlikelerin önlenmesi amacıyla belirlenmiş olan ana hedefle uyumludur. Şekil 1’de veri setinden örnek görüntüler görülmektedir.



Şekil 1. Veri setinden örnek demiryolu hattı görüntüleri

RailSem19, farklı aydınlatma koşulları (gündüz, gece, sis ve bulutlar) altında çekilmiş görüntüler içermektedir, bu da modelin güçlü bir genelleme yeteneği kazanmasını sağlamaktadır. Ayrıca, veri kümesi coğrafi çeşitliliğe sahiptir hem de kentsel hem de kırsal demiryolu ortamlarını kapsayarak, modelin farklı operasyonel senaryolara uyum sağlama yeteneğini artırmaktadır.

2.2. Ön işleme

Ön işleme, derin öğrenme modelleri için veri kümesinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Aşağıdaki ön işleme teknikleri uygulanmıştır:

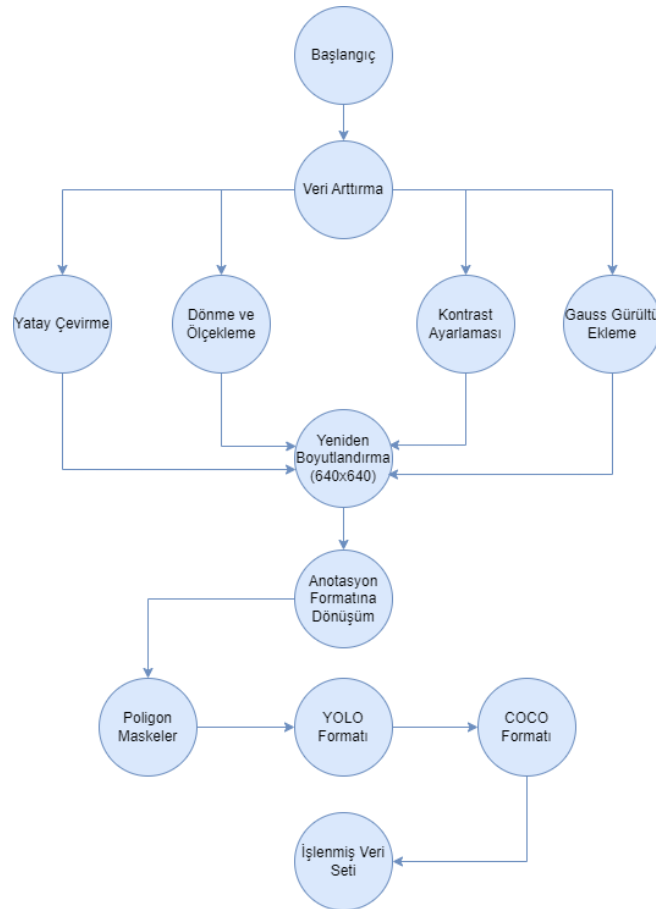
Modelin genelleme yeteneğini artırmak amacıyla çeşitli veri artırma teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler şunlardır:

- Yatay çevirme: İki yönlü demiryolu senaryolarını hesaba katmak amacıyla uygulanmıştır.
- Dönme ve ölçekleme: Perspektif değişimlerinden kaynaklanan varyasyonları oluşturmak için kullanılmıştır.
- Kontrast ayarlaması: Farklı aydınlatma koşullarını simüle ederek modelin bu koşullara karşı dayanıklılığını artırmayı hedeflemiştir.
- Gauss gürültüsü ekleme: Sensör kaynaklı gürültülere karşı modelin sağlamlığını artırmak amacıyla uygulanmıştır.

Bu veri artırma teknikleri, gerçek dünya senaryolarındaki çeşitliliği yansıtarak veri kümesinin etkin boyutunu artırmakta ve modelin daha geniş koşullarda başarılı bir şekilde çalışmasına katkı sağlamaktadır.

Tüm görüntüler, YOLO tabanlı modeller için standart giriş boyutu olan 640×640 piksele yeniden boyutlandırılmıştır. Bu, hesaplama verimliliğini sağlarken, temel özellik detaylarının korunmasını temin etmektedir.

RailSem19 veri setindeki anotasyonlar başlangıçta poligon maskeleri biçiminde sağlanmıştır. Bu anotasyonlar, nesne tespiti için kullanılan YOLO formatına dönüştürülerek sınırlayıcı kutu koordinatları elde edilmiş ve Faster R-CNN modeliyle eğitim yapılabilmesi amacıyla COCO formatına çevrilmiştir. Gerçekleştirilen bu dönüşüm, özel olarak geliştirilen tespit mimarilerimizle sorunsuz bir entegrasyon sağlanmasını kolaylaştırmıştır. Şekil 2’te, ön işleme sürecinde gerçekleştirilen adımların sırasını ve ilişkilerini görsel olarak sunan açıklayıcı bir akış diyagramı yer almaktadır.



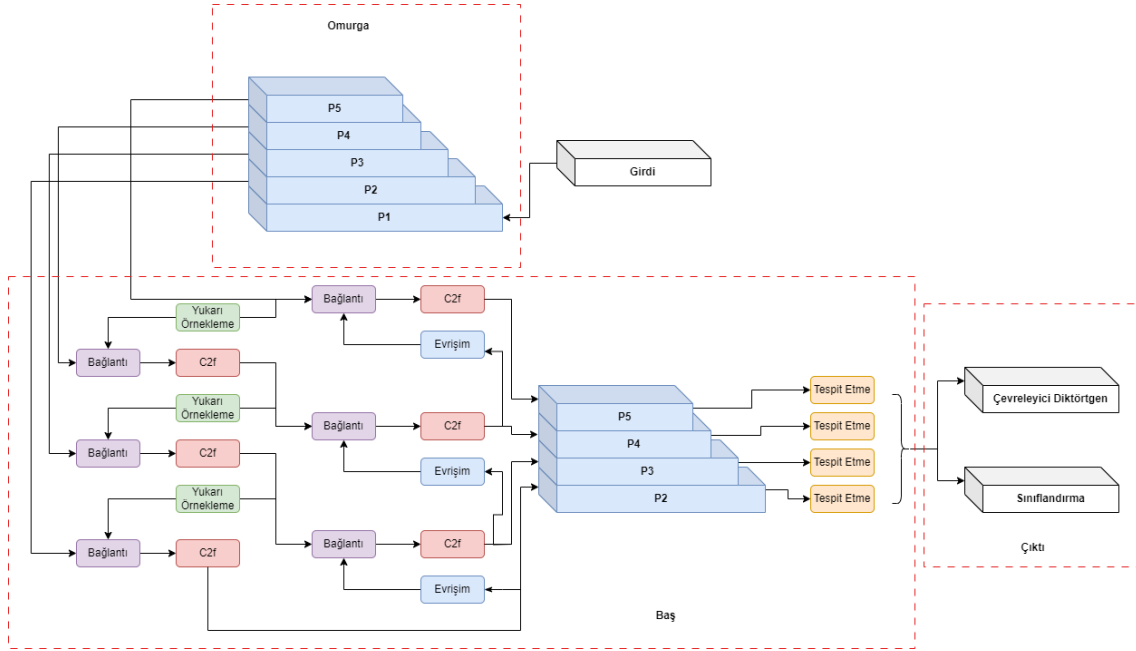
Şekil 2. Ön işleme akış diyagramı

2.3. Model mimarisi

Bu çalışmada, nesne tespiti için dört ileri düzey derin öğrenme modeli kullanılmıştır: YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11 ve Faster R-CNN. Her bir model, nesne tespiti görevlerinde sahip olduğu benzersiz güçlü yönleri nedeniyle seçilmiştir.

YOLOv8, gerçek zamanlı performans ve yüksek doğruluğun birleşimiyle tanınan, son teknoloji bir tek aşamalı dedektördür. YOLO serisinin önceki yinelemeleri üzerine inşa edilen YOLOv8 hem tespit hızı hem de doğruluğunu artıran birkaç yenilikçi özellik entegre etmektedir. Bu model, verimli özellik çıkarımı için CSPDarknet53 sırt kısmını kullanmakta ve önceden tanımlanmış

referans kutularına gerek duymadan referanssız tespit yöntemini tanıtarak, tespit verimliliğini artırmaktadır. YOLOv8 mimarisi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. YOLOv8 mimarisi [19]

YOLOv8'in ana özelliklerinden biri, çok ölçekli özellik füzyonunu kolaylaştıran Path Aggregation Network (PAN) olup, gelişmiş bir kayıp fonksiyonu da sınıflandırma ve lokalizasyon hatalarını birleştirerek model performansını daha da optimize etmektedir. Model, yüksek kare hızına sahip çıkarımlar için tasarlanmış olup, bu özellik onu gerçek zamanlı uygulamalar için uygun hale getirmektedir.

YOLOv9, YOLOv8 mimarisinin bir evrimini temsil etmekte olup, özellik çıkarımı, model verimliliği ve karmaşık tespit görevlerine uyum sağlama konularında önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Dikkate değer yenilikler arasında, çeşitli ölçeklerdeki nesnelerin tespitini optimize eden dinamik referans atama ve çok ölçekli özellik işleme yeteneğini geliştiren ileri düzey bir uzamsal piramit kümelenme yaklaşımı bulunmaktadır. Ayrıca, YOLOv9, modelin ilgili özelliklere odaklanmasını ince ayar yaparak performansı artıran dönüştürücü tabanlı dikkat mekanizmalarını da içermektedir, bu da zorlu ortamlarda daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

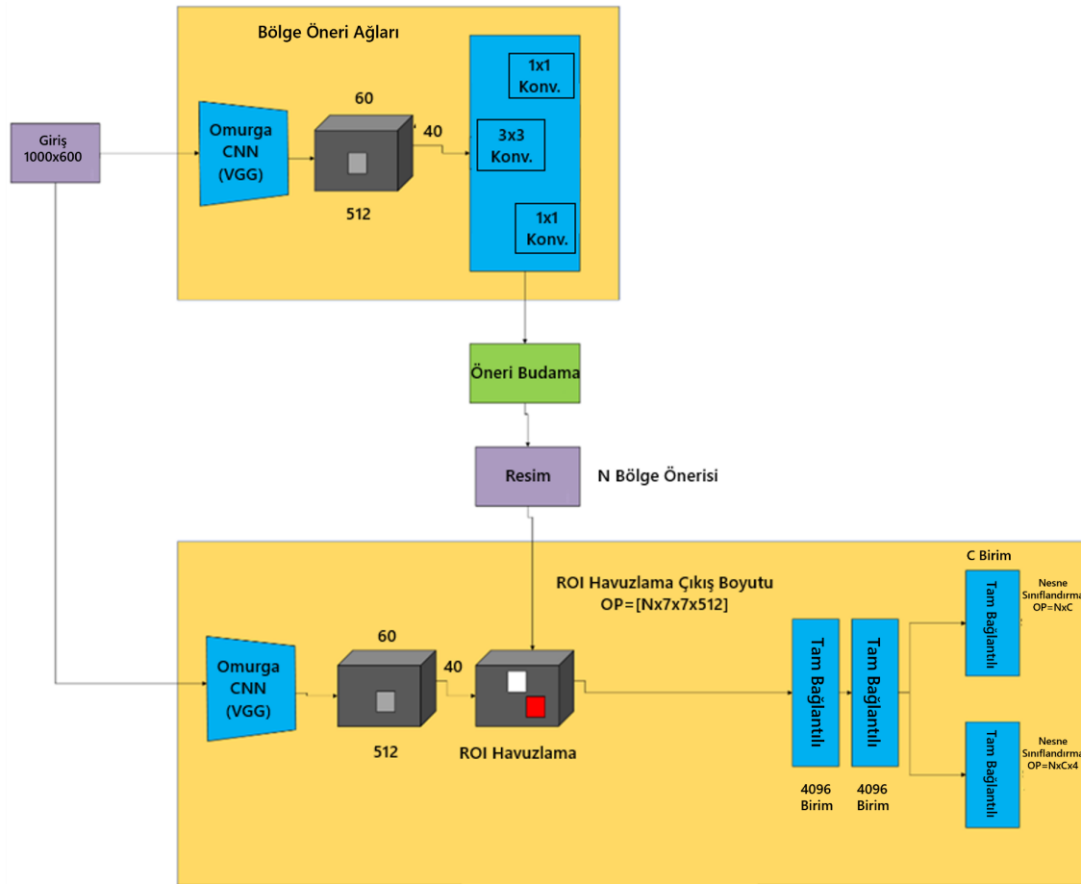
YOLOv9'un ana güçlü yönlerinden biri, küçük nesnelerin tespiti konusundaki başarısıdır; bu özellik, genellikle küçük ve yüksek hassasiyet gerektiren nesnelerin bulunduğu demiryolu ortamları için özellikle uygundur. Model, aynı zamanda küçük nesnelerin daha iyi işlenebilmesi için uyarlanabilir özellik örnekleme sunmakta olup, düşük hesaplama karmaşıklığını koruyarak, özellikle uç cihazlarda verimli performans sağlar. Diğer iyileştirmeler arasında, hızdan ödün vermeden doğruluğu artıran, optimize edilmiş son işlem teknikleri (non-maximum suppression-NMS) bulunmaktadır.

YOLOv11, YOLO serisinin en son evrimidir ve tespit doğruluğu ile hesaplama verimliliğinde önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Model, özelliklerin dinamik olarak farklı nesne ölçeklerine uyum sağlamasını sağlayan bir Mixture of Experts (MoE) sırt kısmına sahiptir, bu da genelleme yeteneğini artırmaktadır [20]. Adaptive Spatial Feature Fusion (ASFF) ise çok ölçekli agregasyonu daha da geliştirerek yanlış pozitifleri azaltmakta ve tespit hassasiyetini artırmaktadır [21].

Model, özellikle veri kısıtlamalarının olduğu demiryolu ortamlarında faydalı olan kontrastif öğrenme ile kendiliğinden denetimli ön eğitim kullanmaktadır. Ayrıca, dönüşüm tabanlı hafif dikkat mekanizması, karmaşık senaryolarda daha yüksek doğruluk için özellik seçimlerini optimize etmektedir. YOLOv11, kanal düzeyi ve uzamsal dikkat birleştiren hibrit bir dikkat modülü de entegre ederek, zorlu ortamlarda geliştirilmiş performans için özellik temsilini ince ayar yapmaktadır.

Dinamik bir sinirsel mimari arama (NAS) çerçevesi, RailSem19 gibi görevler için sırt kısmı ve tespit başlığının optimizasyonunu otomatikleştirmektedir. Semantik segmentasyon ve derinlik tahmini gibi görevlerle çoklu görev öğrenmesinin dahil edilmesi, özellik alanını zenginleştirir ve genelleme yeteneğini artırır. Modifiye edilmiş bir CSPNeXt sırt kısmı ve verimli referanssız tespit başlığı ile donatılan YOLOv11, RailSem19 üzerinde %55,2'lik bir ortalama mAP elde ederek YOLOv8 ve YOLOv9'u geride bırakmaktadır. NVIDIA Jetson Xavier gibi uç cihazlar için tasarlanmış optimize edilmiş çıkarım motoru, düşük gecikme süresi ve bellek kullanımı ile gerçek zamanlı performans sağlar.

Faster R-CNN, özellikle karmaşık ve yoğun nesne tespiti senaryolarında yüksek doğruluğu ile tanınan iki aşamalı bir nesne tespiti modelidir. Birinci aşamada, aday bölgeler oluşturmak için Region Proposal Network (RPN) kullanılır; ikinci aşamada ise sınıflandırma ve sınırlayıcı kutu regresyonu için Fast R-CNN modülü devreye girer. Çıkarım hızı YOLO tabanlı modellere göre daha yavaş olsa da yoğun veya üst üste binen nesnelerin tespitinde doğruluğu ile öne çıkar. Fast R-CNN mimarisi Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Faster R-CNN mimarisi [22]

Model, derin özellik çıkarımı için ResNet-101 sırt kısmını kullanmakta ve sabit boyutlu özellik haritaları üretmek için Region of Interest (RoI) havuzlama yöntemini uygulamaktadır, bu da performansını optimize etmektedir. Daha yavaş çıkarım hızına rağmen, Faster R-CNN'in doğruluğu, hızdan ziyade doğruluğun ön planda olduğu uygulamalar için ideal hale getirmektedir.

2.4. ZED kamerası ve mesafe ölçümü

ZED stereo kamerası, demiryolu ortamındaki tespit edilen nesnelere olan mesafeyi ölçmek için sisteme entegre edilmiştir. Kamera, sol ve sağ görüntü çiftleri arasındaki farkları hesaplayarak derinlik haritaları oluşturmak için stereoskopik bir vizyon sistemi kullanmaktadır. Nesne tespiti ve stereo derinlik tahmini entegrasyonu, gerçek zamanlı mesafe ölçümü yapılmasını sağlayarak demiryolu güvenliği uygulamalarını güçlendirmektedir. Çalışmada kullanılan ZED kamera Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. ZED 2 kamera

Mesafe ölçüm süreci, derinlik haritası hesaplamasıyla başlar; burada, fark değeri ZED SDK kullanılarak gerçek dünya derinlik değerlerine dönüştürülür. Nesne tespiti modellerinden (YOLO veya Faster R-CNN) elde edilen sınırlayıcı kutu koordinatları daha sonra derinlik haritasına yerleştirilir. Her bir nesnenin merkez noktasındaki Z-derinlik değeri çıkarılır ve mesafe ölçümü sağlanır.

Mesafe D hesaplaması Denklem 1'de görülmektedir.

$$D = \frac{f \cdot B}{d} \quad (1)$$

Burada f odak uzaklığı, B kameralar arasındaki temel mesafe ve d ise farktır. Post-processing işlemleri, örneğin medyan filtreleme, uç verilerin kaldırılması ve derinlik tahminlerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanır, böylece doğru mesafe ölçümleri sağlanır.

Sistemin senkronizasyonu, gerçek zamanlı işlemeyi garanti ederek, nesne tespiti çıktısını (sınırlayıcı kutular ve sınıf etiketleri) derinlik bilgisiyle birleştirir ve nesnenin türü, konumu ve mesafesini içeren kapsamlı bir sonuç elde edilmesini sağlar.

2.5. Eğitim hazırlığı

Bu bölüm, bu çalışmada kullanılan nesne tespiti modellerinin eğitim prosedürlerini ve ZED kamerası kullanarak mesafe ölçümü için uygulanan araçlar ve metodolojileri açıklamaktadır. Eğitim kurulumu, aydınlatma, hava koşulları ve coğrafi şartlardaki varyasyonları göz önünde bulundurarak, demiryolu ortamlarında doğruluk ve dayanıklılığı optimize etmek için titizlikle tasarlanmıştır.

Nesne tespiti modelleri (YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11 ve Faster R-CNN), RailSem19 veri kümesi üzerinde, hiper parametre optimizasyonu ve veri kümesine özgü değişiklikler içeren

yapılandırılmış bir işlem süreci kullanılarak eğitilmiştir. Eğitim süreci, aşağıdaki temel unsurları içermektedir:

- Giriş Görüntü Boyutu: Tüm modeller için 640×640 piksel.
- Öğrenme Hızı: 0.001, sinüzoidal soğuma planlamasıyla.
- Batch Boyutu: Tüm modeller için 16.
- Optimizatör: YOLO modelleri için Adam optimizatörü; Faster R-CNN için ise yakınsama iyileştirmek amacıyla momentumlu Stokastik Gradyan İnişi (SGD).
- Döngü Sayısı: YOLOv8 ve YOLOv11 için 50; YOLOv9 ve Faster R-CNN için 25 (hesaplama verimliliği göz önünde bulundurularak).
- Kayıp Fonksiyonu: Sınıflandırma için çapraz entropi; sınırlayıcı kutu regresyonu için tam kesişim üzerinden birlikte (CIoU).
- Veri Artırma: Genelleme ve dayanıklılığı artırmak amacıyla rastgele kırpma, döndürme, ölçekleme ve renk bozulması uygulanmıştır.
- Eğitim-Doğrulama Bölünmesi: Eğitim için %70, doğrulama için %20 ve test için %10; parametre ayarı ve model değerlendirmesi için yeterli veri sağlanmıştır.

2.6. Değerlendirme ölçütleri

Değerlendirme ölçütleri, nesne tespiti modellerinin ve entegre edilmiş mesafe ölçüm sisteminin performansını ve güvenilirliğini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Nesne tespiti modellerimizin performansını değerlendirmek için standart değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır.

- mAP@50 (IoU=0.5'te Ortalama Ortalama Doğruluk): Doğruluk ve hatırlama arasındaki dengeyi ölçer.
- mAP@50:95 (COCO ölçütü): Farklı IoU eşiklerinde tespit performansını değerlendirir.
- Kesinlik (Precision): Doğru şekilde tanımlanan nesnelerin yüzdesini ölçmektedir. Kesinlik hesaplaması Denklem 2'de görülmektedir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

- Geri Çağırma (Recall): Tüm ilgili nesnelerin tespit edilme yeteneğini değerlendirir. Denklem 3'te geri çağırma ait hesaplama görülmektedir

$$\text{Geri Çağırma} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

- Saniye Başına Kare (FPS): Her bir modelin gerçek zamanlı işleme kapasitesini ölçer.
- Gecikme (milisaniye): Her çıkarım adımının alacağı süreyi gösterir.
- Karekök Ortalama Hata (RMSE): Mesafe ölçüm hatalarının ortalama büyüklüğünü belirler. RMSE'ye ait hesaplama Denklem 4'te görülmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \hat{d}_i)^2} \quad (4)$$

Burada n toplam derinlik ölçüm sayısını, d_i yer gerçek derinlik değerini ve $\hat{d}_i$ ise tahmin edilen derinlik değerini temsil etmektedir. Bu ölçütlerin birleşimi, nesne tespiti çerçevesinin doğruluğunun ve gerçek zamanlı demiryolu güvenlik sistemlerinde uygulanabilirliğinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar.

3. Bulgular

Bu bölüm, demiryolu ortamlarında nesne tespiti için önerilen derin öğrenme yöntemlerinin deneysel sonuçlarını sunmakta olup, mesafe ölçümü için ZED kamerasının entegrasyonunun değerlendirilmesini içermektedir.

3.1. Gerçekleştirilen deneyler

Önerilen yöntemlerin performansını değerlendirmek için, RailSem19 veri seti kullanılarak bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler, dört nesne tespiti modelinin performansını karşılaştıracak şekilde tasarlanmıştır: YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11 ve Faster R-CNN. Ayrıca, mesafe ölçümü için ZED kamerasının entegrasyonu, gerçek dünya demiryolu senaryolarında test edilmiştir. Tüm modeller, Metot 'ta açıklandığı şekilde ön işleme tabi tutulan RailSem19 veri seti kullanılarak eğitilmiştir. Performansları, doğruluk, geri çağırma, F1 skoru, mAP50 ve mAP50-95 gibi standart metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Eğitim süreci, bir NVIDIA Tesla T4 GPU üzerinde gerçekleştirilmiş, çıkarım testleri ise bir NVIDIA RTX 2070 GPU üzerinde yapılmıştır.

3.2. Sayısal sonuçlar

Her modelin performans metrikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Sonuçlar, her yaklaşımın güçlü ve zayıf yönlerini vurgulamakta ve demiryolu ortamlarındaki nesne tespiti görevlerinde etkinliklerinin kapsamlı bir karşılaştırmasını sunmaktadır.

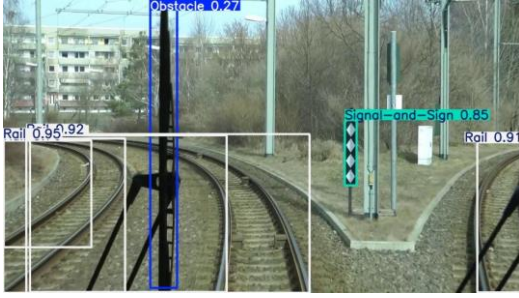
Tablo 1. Modellerin performans metrikleri

Model	Döngü Sayısı	Kesinlik	Geri Çağırma	F1-Skoru	mAP50	mAP50-95	Eğitim Zamanı
YOLOv11	50	0,63409	0,46402	0,53672	0,50412	0,32043	2s 52dk
YOLOv9	25	0,68196	0,46181	0,55017	0,52141	0,33722	2s 4dk
YOLOv8	50	0,67661	0,45112	0,54002	0,49569	0,31709	3s 14dk
Faster R-CNN	25	-	-	-	0,395	0,176	2s 45dk

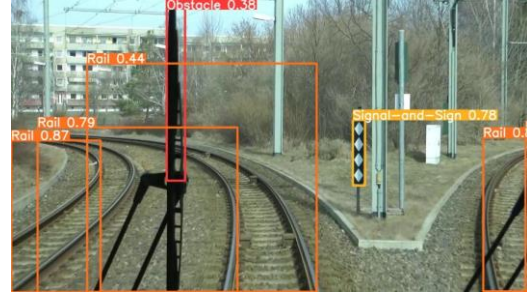
- YOLOv9, en yüksek kesinlik (0.68196) ve F1-skoru (0.55017) ile test edilen YOLO varyantları arasında en doğru model olmuştur.
- YOLOv11, geri çağırma ve mAP@50-95 açısından YOLOv8'i geride bırakmış, bu da zorlu senaryolarda geliştirilmiş bir dayanıklılığı işaret etmektedir.
- Faster R-CNN, yalnızca %39,5 mAP@50 ile belirgin bir şekilde daha düşük performans sergilemiştir; bu, iki aşamalı tespit sürecinin, RailSem19 veri setinin gerçek zamanlı gereksinimleri ve sınıf dengesizliği ile uyumsuz olmasından kaynaklanmaktadır.
- Roboflow 3.0, daha uzun eğitim süresi (16 saat) olmasına rağmen, hafifçe daha iyi bir kesinlik (0.65) elde etmiştir, ancak hesaplama açısından pahalıdır.

3.3. Görselleştirme

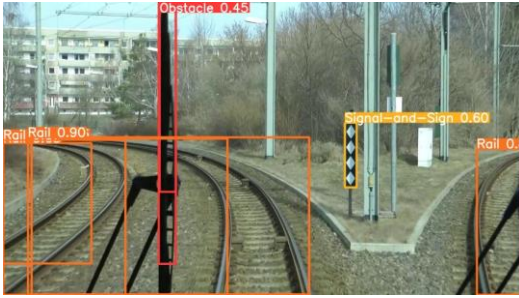
Modelin performansını daha ayrıntılı değerlendirmek için, örnek görüntüler için tespit sonuçları görselleştirilmiştir. Şekil 6'daki görseller, YOLOv8, YOLOv9 ve YOLOv11'in tespit çıktılarının yanı sıra, mesafe ölçümü için ZED kamerasının kullanımına dair niteliksel bir karşılaştırma sunmaktadır. Modeller, çeşitli aydınlatma koşulları, engellemeler ve perspektifler göz önünde bulundurularak farklı test görüntüleri üzerinde değerlendirilmiştir. Bu görselleştirmeler, her modelin gerçek dünya senaryolarındaki güçlü yönlerini ve sınırlamalarını vurgulamaktadır.



a)



b)



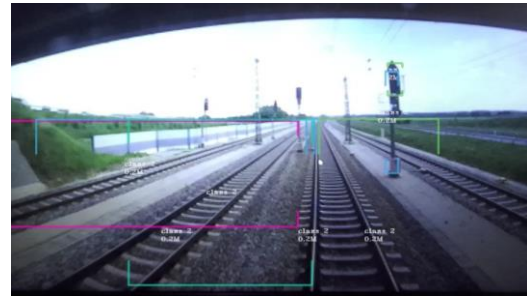
c)



ç)



d)



e)

Şekil 6. Görselleştirme sonuçları a) YOLOv11 tespit örneği b) YOLOv9 tespit örneği c) YOLOv8 tespit örneği ç) Roboflow 3.0 tespit örneği d) Mesafe ölçümü YOLOv8 ve ZED2 kamera kullanarak e) Mesafe ölçümü YOLOv8 ve ZED2 kamera kullanarak

ZED kamerası, derinlik verileri kullanarak nesne mesafelerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır. İdeal koşullarda, mesafe ölçümleri $\pm\%5$ doğrulukla yapılmıştır. Ancak, aşırı aydınlatma koşulları ve hızlı hareket eden nesnelerle performans düşüşü gözlemlenmiştir. ZED kamerasından gerçek zamanlı derinlik tahmini, durum farkındalığını artırmak amacıyla YOLO tabanlı modellerle entegre edilmiştir.

3.4. Tartışma

YOLOv9 modeli, yüksek doğruluk, yüksek hassasiyet ve F1-skorları ile olağanüstü bir performans sergilemiş ve Roboflow 3.0'a kıyasla eğitim süresi açısından en verimli model olmuştur. YOLOv9 ve YOLOv11, gerçek zamanlı çıkarım hızlarına ulaşmış ve YOLOv11, doğruluk ve hız arasında en iyi dengeyi sunmuştur. ZED kamerasının entegrasyonu, %5'ten daha az bir ortalama hata ile güvenilir derinlik tahmini sağlamış ve bu, sistemin demiryolu güvenliği uygulamaları için uygunluğunu artırmıştır. ZED kamerası ile elde edilen mesafe bilgileri, yalnızca nesnenin konumunu değil, aynı zamanda bu nesnenin trenin hareketine göre oluşturduğu potansiyel tehlike düzeyini de belirlemektedir. Bu bilgiler, trenin frenleme mesafesine göre engelin konumunu değerlendirerek sistemin kritik uyarılar üretmesini ve gerektiğinde otomatik tepki mekanizmalarını (örneğin, yavaşlama veya durdurma sinyali) devreye almasını sağlamaktadır. Bu yönüyle ZED kamerasının entegrasyonu, yalnızca tespit değil, aynı zamanda durumsal farkındalık ve karar destek süreçlerine katkı sağlayarak literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

RailSem19 veri setindeki sınıf dengesizliği, özellikle sinyaller ve yayalar için, model performansını sınırlamıştır. YOLO modelleri hesaplama açısından verimli olsa da kenar cihazlarına dağıtım için daha fazla optimizasyon gerekmektedir. Faster R-CNN'in yüksek kaynak talepleri ve alt optimal performansı, daha hızlı mimarilerin gerekliliğini pekiştirmiştir. Düşük ışık koşulları ve engellemeler altında, yanlış sınıflandırmalar ve atlanan tespitler gibi hata durumları gözlemlenmiştir.

Önerilen yöntemler, doğruluk ve hız açısından önceki yaklaşımlardan daha üstün performans sergilemektedir. Genel nesne tespiti ve diğer alanlarda yapılan araştırmalar, YOLO tabanlı modellerin geleneksel yöntemlere göre daha yüksek doğruluk ve hız sunduğunu göstermektedir [23, 24]. ZED kamerasının mesafe ölçümü için yenilikçi entegrasyonu, demiryolu güvenliği sistemlerinde önemli bir boşluğu doldurmuş ve mevcut YOLO tabanlı demiryolu tespiti yöntemlerine kıyasla önemli iyileştirmeler sunmuştur. Gerçek zamanlı uygulama potansiyeli açısından, sistemin kamera entegrasyonu ve ön işleme süreçlerinden kaynaklanabilecek toplam gecikme dikkate alınmış ve yapılan gözlemler doğrultusunda bu sürenin, gerçek zamanlı demiryolu hat kontrolü uygulamaları için uygun bir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışma, demiryolu ortamları için derin öğrenme tabanlı nesne tespiti modelleri geliştirmiş ve mesafe ölçümü için ZED stereo kamerasını entegre etmiştir. YOLOv8, YOLOv9, YOLOv11 ve Faster R-CNN modellerinin karşılaştırmalı analizi, YOLOv9'un doğruluk ve verimlilik arasında en iyi dengeyi sağladığını göstermiştir. Sonuçlar, otonom demiryolu taşımacılığı ve güvenlik sistemleri gibi uygulamalarda gerçek zamanlı demiryolu izleme olanağının uygulanabilirliğini vurgulamaktadır. Ancak, sınıf dengesizliği ve hesaplama kısıtlamaları gibi zorluklar devam etmektedir. Gelecekteki çalışmalar, GAN tabanlı veri artırma, yapay zekâ destekli model yorumlana bilirliliği ve çoklu sensör füzyonunu keşfederek dayanıklılığı ve genelleme yeteneğini artırmayı amaçlayacaktır. Çalışmada ayrıca, ZED stereo kamerası ile nesnelerin mesafe ölçümleri gerçekleştirilmiş ve derinlik tahminlerinin doğruluğu analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, stereo görüş tabanlı derinlik tahmininin nesne tespiti modelleri ile birleştirildiğinde, demiryolu güvenliği sistemlerinde durumsal farkındalığın önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir. Bununla birlikte, düşük ışık koşulları ve hızlı hareket eden nesnelerin bulunduğu senaryolarda, derinlik tahmin doğruluğunda düşüşler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, derin öğrenme tabanlı nesne tespit sistemlerinin demiryolu güvenliği alanında nasıl uygulanabileceğine dair kapsamlı bir analiz sunmuştur. YOLO tabanlı modellerin sağladığı yüksek işlem hızları ve doğruluk oranları, demiryolu ortamlarında proaktif güvenlik önlemlerinin geliştirilmesine olanak

tanımlanmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu modellerin daha geniş ölçekli senaryolarda test edilmesi ve otonom tren sistemleri ile entegrasyonuna odaklanarak, küresel demiryolu güvenliği alanında yenilikçi çözümler sunabilir.

Kaynakça

- [1] Z. Zhang, P. Chen, Y. Huang, L. Dai, F. Xu, and H. Hu, "Railway obstacle intrusion warning mechanism integrating YOLO-based detection and risk assessment," *J Ind Inf Integr*, vol. 38, pp. 100571, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.JII.2024.100571
- [2] A. Katham Mtashre, D. Mohsin Kareem, and Z. Abd Al-Abbas Muhsen, "Enhancing Object Detection Techniques Through Transfer Learning and Pre-trained Models," *Journal of Engineering Sciences and Information Technology (JESIT)*, vol. 3, no. 8, pp. 39–45, Sep. 2024, doi: 10.26389/AJSRP.K270724
- [3] A. Sychugov, V. Miheychikov, and M. Chernyshov, "Application of Neural Networks for Object Recognition in Railway Transportation," *Izvestiâ Peterburgskogo universiteta putej soobšeniâ*, vol. 20, no. 2, pp. 478–491, Jun. 2023, doi: 10.20295/1815-588X-2023-2-478-491
- [4] J. Zhao and M. Su, "Comparative Performance Analysis of Single-Shot Detector and Faster R-CNN for Object Detection," *Computer Science, Engineering and Information Technology*, pp. 209–222, Oct. 2024, doi: 10.5121/CSIT.2024.141919
- [5] M. Sevi and İ. Aydın, "Detection of Foreign Objects Around the Railway Line with YOLOv8," *Computer Science*, no. IDAP-2023, pp. 19–23, Oct. 2023, doi: 10.53070/BBD.1346317
- [6] C. Yong, W. Zhen, and Z. Fangchun, "Railway foreign object tracking and detection with spatial positioning and feature generalization enhancement," *Journal of Applied Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 3, pp. 260–274, Oct. 2024, doi: 10.59782/AAI.V1I3.329
- [7] N. Bilous, V. Malko, M. Frohme, and A. Nechyporenko, "Comparison of CNN-Based Architectures for Detection of Different Object Classes," *AI 2024*, vol. 5, no. 4, pp. 2300–2320, Nov. 2024, doi: 10.3390/AI5040113
- [8] S. Ning, F. Ding, and B. Chen, "Research on the Method of Foreign Object Detection for Railway Tracks Based on Deep Learning," *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4483, Jul. 2024, doi: 10.3390/S24144483
- [9] A. Selvi, S. G. Ragul Ram, K. Sharanraj, and K. Thirukumaran, "AI Precision on Rails Advanced Object Recognition for Train Track Safety - A Survey," *Proceedings - 2024 5th International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks*, Tirunelveli, India, 2024, pp. 388–394.
- [10] H. Xianzhi, "Rail traffic distance measurement system and method," 2025. [Online]. Available: <https://typeset.io/papers/rail-traffic-distance-measurement-system-and-method-3wci1a2uub>
- [11] M. Nitti et al., "3d stereo reconstruction of train paths for supporting maintenance operations," *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Mar. 2020, doi: 10.5194/EGUSPHERE-EGU2020-20265
- [12] H. K. Drizi and M. Boukadoum, "CNN Model with Transfer learning and Data Augmentation for Obstacle Detection in Rail Systems," *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Singapore, Singapore, 2024, pp. 1-5.
- [13] X. Wang, J. Yin, F. Pu, X. Chen, A. D'Ariano, and T. Tang, "A GAN-based Deep Learning Model for the Object Detection of Autonomous High-Speed Trains," *Proceedings - 2023 China Automation Congress*, Chongqing, China, 2023, pp. 4393–4398.
- [14] M. F. Nicolas and D. B. Megherbi, "Hidden Challenge in Deep-Learning Real-Time Object Detection on Edge Devices," *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Springfield, MA, USA, 2024, pp. 547–551.
- [15] H. Song, X. Song, M. Zhou, L. Liu, and H. Dong, "Unsupervised Deep Learning-Based Point Cloud Detection for Railway Foreign Object Intrusion," *2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications*, Kristiansand, Norway, 2024, pp. 1-6.
- [16] M. A. R. Alif and M. Hussain, "Lightweight Convolutional Network with Integrated Attention Mechanism for Missing Bolt Detection in Railways," *Metrology*, vol. 4, no. 2, pp. 254–278, May 2024. doi: 10.3390/METROLOGY4020016
- [17] N. T. Pham, A. N. Timofeev, and I. S. Nekrylov, "Study of the errors of stereoscopic optical-electronic system for railroad track position," *In Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, vol. 11056, pp. 622–635, Jun. 2019, doi: 10.1117/12.2526081
- [18] O. Zendel, M. Murschitz, M. Zeilinger, D. Steininger, S. Abbasi, and C. Beleznaï, "RailSem19: A dataset for semantic rail scene understanding," *IEEE Computer Society Conference on Computer*

- Vision and Pattern Recognition Workshops*, vol. 2019-June, pp. 1221–1229, Jun. 2019, doi: 10.1109/CVPRW.2019.00161
- [19] N. Jegham, C. Y. Koh, M. Abdelatti, and A. Hendawi, “YOLO Evolution: A Comprehensive Benchmark and Architectural Review of YOLOv12, YOLO11, and Their Previous Versions,” arXiv preprint arXiv:2311.10041, 2023.
- [20] S. Y. Rhyou, M. Yu, and J. C. Yoo, “Mixture of expert-based SoftMax-weighted box fusion for robust lesion detection in ultrasound imaging,” *Diagnostics*, vol. 15, no. 5, p. 588, 2025.
- [21] Y. Ji, D. Zhang, Y. He, J. Zhao, X. Duan, and T. Zhang, “Improved YOLO11 algorithm for insulator defect detection in power distribution lines,” *Electronics*, vol. 14, no. 6, p. 1201, 2025.
- [22] F. Saeed, A. Paul, and S. Rho, “Faster R-CNN based fault detection in industrial images,” in *Trends in Artificial Intelligence Theory and Applications. Artificial Intelligence Practices: Proc. 33rd Int. Conf. on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE 2020)*, Kitakyushu, Japan, Sep. 22–25, 2020, pp. 280–287, Springer.
- [23] O. Rodríguez-Abreo, M. A. Quiroz-Juárez, I. Macías-Socarras, J. Rodríguez-Reséndiz, J. M. Camacho-Pérez, G. Carcedo-Rodríguez, and E. Camacho-Pérez, “Automatic detection of railway faults using neural networks: A comparative study of transfer learning models and YOLOv11,” *Infrastructures*, vol. 10, no. 1, p. 3, 2024.
- [24] S. Y. Nikouei, Y. Chen, S. Song, R. Xu, B. Y. Choi, and T. Faughnan, “Smart surveillance as an edge network service: From Haar-cascade, SVM to a lightweight CNN,” in *Proc. 2018 IEEE 4th Int. Conf. on Collaboration and Internet Computing (CIC)*, Philadelphia, PA, USA, Oct. 2018, pp. 256–265.

Özgeçmiş**Muhammed Amir ELMUHAMMEDCEBBEN**

1997 Halep doğumlu. 2023 yılında Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Halen Fırat Üniversitesinde derin öğrenme ve bilgisayarlı görme üzerine yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

E-Posta: ajabban.edu@gmail.com

**İlhan AYDIN**

1981 yılında Elâzığ'da doğdu. Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde 2001 ve 2006 yıllarında aldı. Doktora derecesini 2011 yılında Fırat Üniversitesi, Elâzığ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden aldı. Halen Fırat Üniversitesi'nde Bilgisayar Mühendisliği bölümünde Profesör 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

**Mehmet SEVİ**

1988 yılında Denizli'de doğdu. Lisans derecesini Doğu Akdeniz Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde, Yüksek Lisans ve Doktora derecesini ise Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde aldı. Araştırma alanları arasında görüntü işleme ve derin öğrenme bulunmaktadır. Aynı zamanda Muş Alparslan Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığında çalışmaktadır.

E-Posta: m.sevi@alparslan.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Muhammed Amir ELMUHAMMEDCEBBEN: Metot, Kaynaklar, Görselleştirme, Yazma-orijinal taslak hazırlama. İlhan AYDIN: Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme. Mehmet SEVİ: Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme.

**Eskişehir Hasanbey Lojistik Merkezi Emniyet Kritik Personel İçin Görev Planlama Sistemi Geliştirilmesi**Meserret NALÇAKAN^{*1}, Pınar ASARBÜKÜ²¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Programı, Eskişehir, Türkiye² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye

*mnalcakan@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 25.04.2025, Kabul/Accepted: 31.05.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Taşımacılık Anonim Şirketi (TCDD Taşımacılık A.Ş.) çeşitli iş süreçlerini daha etkin yönetmek ve operasyonel verimliliği artırmak amacıyla Kurumsal Kaynak Yönetimi (KKY) sistemini kullanmaktadır. KKY sistemi hemen hemen tüm süreçlere entegre edilmiş olmasına rağmen trenlerde çalışacak personelin görev planlamasını halen bu iş için görevlendirilen çalışanlar geleneksel şekilde gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada Eskişehir Hasanbey Lojistik Merkezi'nin sorumluluk bölgesindeki trenlerde, "emniyet kritik görevleri yerine getiren tren makinistlerinin çalışma saatlerinin, Microsoft Office Access SQL programlama dilinde işlenmesi ve böylece söz konusu personelin görev planlamasının yapılması" amaçlanmıştır. Planlama ile personelden optimum düzeyde verimlilik sağlanması, eşit süreli çalışma saatlerine ulaşılması hedeflenmektedir. Düzenlenen görev planlamasının geleneksel yöntemlerle kontrolünün zaman alması nedeniyle ortaya çıkan zorlukların giderilmesi; hat yetkisi, lokomotif yetkisi, sağlık, psikoteknik yeterlilikleri gibi bileşenlerin de sistem tarafından kontrol altına alınabilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Emniyet kritik personel, Personel görev planlaması

Development of Task Planning System for Personnel Performing Safety Critical Duties at Eskişehir Hasanbey Logistics Center

Abstract: Turkish State Railways Transportation Inc. (TCDD Transportation Inc.) utilizes a Enterprise Resource Planning (ERP) system to manage various business processes more efficiently and increase operational productivity. Although the ERP system is integrated into almost all processes, the planning of personnel to be assigned to trains is still carried out traditionally by employees assigned to these tasks. This thesis aims to "process the hours of work of train drivers who perform safety-critical tasks on trains in the Eskişehir Hasanbey Logistics Center responsibility area using Microsoft Office Access SQL programming language, and thus plan the assignments of these personnel". The planning aims to ensure optimal productivity from personnel and achieve equal working hours. It is aimed to control components such as line authority, locomotive authority, health and psychotechnical competencies which are difficult and time-consuming to control with traditional methods by the system.

Keywords: Railway, Safety critical personnel, Staff scheduling

Atıf için/Cite as: P. Asarbükü, M. Nalçakan, "Eskişehir Hasanbey lojistik merkezi emniyet kritik personel için görev planlama sistemi geliştirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 25-45, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1683559

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığının serbestleştirilmesi ve TCDD'nin yeniden yapılandırılması çalışmaları kapsamında, 1 Mayıs 2013 tarihinde 6461 Sayılı Türkiye Demiryolu Ulaştırmasının Serbestleştirilmesi Hakkında Kanun yayınlanmıştır. Bu kapsamda; "TCDD, Altyapı İşletmecisi", "TCDD Taşımacılık A.Ş. ise Tren İşletmecisi" kuruluş olarak tanımlanmıştır [1].

1 Ocak 2017 tarihi itibarıyla TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin faaliyetlerine başlamasının ardından demiryolu taşımacılığının serbestleşme ve rekabete açılma süreci başlamıştır. TCDD Taşımacılık A.Ş. yolcu ve yük taşımacılığı, lojistik hizmetleri, feribot ile yük ve yolcu taşımacılığı hizmetlerini yürüten; trenleri işleten; araç filosu ve bu araçların teminini sağlayan kurumdur. TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin merkezde 13 daire başkanlığı, taşrada ise 8 Bölge Müdürlüğü bulunmaktadır [2].

TCDD Taşımacılık A.Ş. işlettiği trenlerde görev alacak "emniyet kritik personel statüsündeki tren makinistlerinin görev planlamasını", teşkilatlandığı 8 ayrı Bölge Müdürlüğü vasıtası ile yapmaktadır.

TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin bünyesinde demiryolu taşımacılık faaliyetini gerçekleştirecek çalışanların emniyetli, düzenli, verimli, sağlıklı ve adil bir çalışma düzeninde görevlerini yerine getirmesini sağlamak üzere Microsoft Office Access SQL programı ile "emniyet kritik personel statüsündeki tren makinistlerinin görev planlaması"nın gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Geliştirilen programda emniyet kritik görev personelinin çalışma bilgilerini tablolar halinde tutulan verilerin kullanılması söz konusu olup veri çeşidi yapısal veri özelliği taşımaktadır. Seçilecek programlama dilinin yapısal verinin işlenmesi, karmaşık sorgulamaların daha basit şekilde ifade edilmesi, hızlı ve güvenli olması gibi özellikleri barındırması gerektiğinden bu yeterlilikleri fazlasıyla karşılayan Microsoft Office Access SQL kullanılması tercih edilmiştir. Araştırmada kullanılan bilgiler tablolar halinde özetlenerek kullanıldığından betimsel istatistik yöntemi kullanılmıştır. Sıralama algoritması kullanılarak bir sonraki gün işleyecek trenler önem önceliğine göre sıralanmış, personel ise son 30 günlük toplam tren üstü çalışma saatine göre en azdan en çok olana doğru sıralanmıştır. Daha sonra son 30 günlük en az tren üstü çalışma saatine sahip personelden başlanarak personelin yeterliliklerinin uygun olduğu ve görev alabileceği saate en yakın olan ilk trene ataması yapılmıştır.

Aktan'a göre, "Yapısal veri" modellemesi, girdi olarak düzenli bir şekilde eklenebilen, depolanabilen, sorgulanabilen, işlenebilen ve görselleştirilebilen her türlü bilgiyi kapsamaktadır [3]. Genellikle, önceden belirlenmiş özellikler ve boyutlara sahip alanlarda sunulmakta ve ilişkisel veri tabanları veya tablolar aracılığıyla yönetilmektedir. Katı bir yapıya sahip olan bu veri türünde, süreçlerin yüksek performanslı yetenekler veya paralel teknikler gerektirmemesinden dolayı faydalı bilgilerin elde edilmesi diğer veri türlerine kıyasla daha kolaydır.

"Yarı yapısal" veya "kendi kendini açıklayan (self-describing) veri", hem belirli bir düzene sahip hem de esnek bir yapıya sahip verilerdir. Bu veriler, sadece sabit bir formatı takip etmekle kalmaz, aynı zamanda kendi içindeki farklı parçaları tanımlayan ek bilgiler de taşır. XML ve JSON gibi diller, bu tür verileri yönetmek için sıkça kullanılan araçlardır.

"Yapısal olmayan veri", tanımlı bir format haricinde sunulan ve depolanan kayıt türleridir. Genellikle, kitaplar, makaleler, belgeler, e-postalar gibi serbest formatlardaki metinlerden ve resim, ses ve video gibi medya dosyalarından oluşmaktadır. Bu türdeki verinin katı bir şekilde sunulmasının zor olması, veri işleme süreçlerinde NoSQL (Not only SQL) gibi yeni mekanizmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur [3].

2. Metot

TCDD Taşımacılık A.Ş.'ye bağlı her bir Bölge Müdürlüğü'nün yapısal farklılıklar arz etmesi ve farklı trenler (yüksek hızlı tren, banliyö, bölgesel trenler, yolcu ve yük trenleri) işletmesi nedeniyle emniyet kritik personelin görev planlaması işyeri bazında ayrı ayrı yapılmaktadır.

TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin çalıştırdığı birçok trenin sefer bilgileri düzenli ve belli olmasına karşın yük trenlerinin sefer bilgileri bir gün öncesinden belirlenmekte; bazı trenler Bölge Müdürlüklerinin kendi sorumluluk alanlarında çalışırken bazıları ise iki ya da daha fazla Bölge Müdürlüğü sınırlarından geçebilmektedir. Bazı trenler çıkışından varışına kadar aynı personelle işletilirken bazı trenler bir ya da birkaç defa personel değişikliği gerektirmektedir. Bu nedenlerle bir gün sonra işletilecek yük trenleri repartisyon (tren planlama) büroları aracılığıyla her Bölge Müdürlüğünün kendisine komşu diğer Bölge Müdürlükleri ile yaptığı planlamalar dâhilinde her gün saat 12:00'de belirlenmektedir. Bu aşamadan sonra işletilecek trenlerde görevlendirilecek emniyet kritik personelin görevlendirme planlamaları yapılmaktadır.

Bu planlama yapılırken görevlendirilecek personelin hat yetkisi, sağlık-psikoteknik yeterliliği, iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri, lokomotif brövesi (ehliyet) gibi birçok yeterliliği göz önüne alınmakta ayrıca personelin bir önceki görevinden dönüşü sonrası yeteri kadar dinlenip dinlenmediği, hafta tatili gibi birçok hesaplama zorluğu kriterleri nedeniyle bu işlemler uzun zaman almaktadır. Ayrıca yapılan görevlendirmeler, görevlendirmeyi yapan personelin inisiyatifine kalmakta adil bir görev dağılımı yapılmasında büyük zorluk çekilmektedir. Hepsinden öte planlama eksikliğinden kaynaklı mevcut emniyet kritik personel olan tren makinistlerinden tam anlamıyla verim alınıp alınmadığı da bilinmemektedir.

(Üstündağ, 2014)'a göre, ekip çizelgeleme ve ekip atama problemleri demiryollarında karşılaşılan en karmaşık ve çözümü en zor olan problemlerdendir. Personel maliyetleri şirketin kontrol edebileceği giderlerden olduğundan dolayı personeli tren seferlerine etkin bir şekilde atamak demiryollarında önemli rol oynar. Ekip çizelgeleme probleminde, her tren seferinin en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsandığı en düşük maliyetli eşleştirmeler kümesi bulunmaya çalışılır. Mevcut durumda ekip çizelgeleri elle hazırlanmaktadır. Bu nedenle bu konuda görevli personelin oluşturduğu ekip çizelgeleri sezgisel olup “en iyilikten” uzaktır. Çalışmada kullanılan sütun oluşturma algoritmasıyla ekip çizelgeleri, GAMS programı aracılığıyla 18 dakikalık sürede oluşturulmuştur [4].

(Duman vd., 2024)'a göre, mevcut durumda yüksek hızlı tren personel planlaması, manuel olarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, makinist çalışma sürelerindeki dengesizlikler, planlama yetersizlikleri ve uzun planlama süreçleri gibi sorunlara yol açmaktadır. Yeni açılacak Bursa ve İzmir hatlarıyla birlikte artan karmaşıklık, mevcut sistemi daha da karmaşık hale getirecektir. Yapılan çalışmalarla yüksek hızlı tren seferlerinin optimum şekilde eşleştirilmesiyle makinist ihtiyacı belirlenmiş; ilk aşamada sistemin kapasitesi analiz edilip ikinci aşamada da mevcut personelin optimum şekilde kullanılabilmesi için matematiksel modeller geliştirilmiştir [5].

3. Tablolar, Tablo Verileri ve Açıklamalar

Görev planlama sistemi olarak hazırlanan tarife programının geliştirilmesi aşamasında çok sayıda tablo ve tablo verileri kullanılarak açıklamalarına yer verilmiştir.

3.1. Tarife programı için kullanılan tablolar

Görev Planlama Sistemi olarak hazırlanan tarife programının geliştirilmesi aşamasında 7 adet tablo kullanılmıştır. Tablo 1'de programda kullanılan tablolar, tablo içeriğindeki alanlar ve bu alanların açıklaması ile birlikte veri türleri gösterilmiştir.

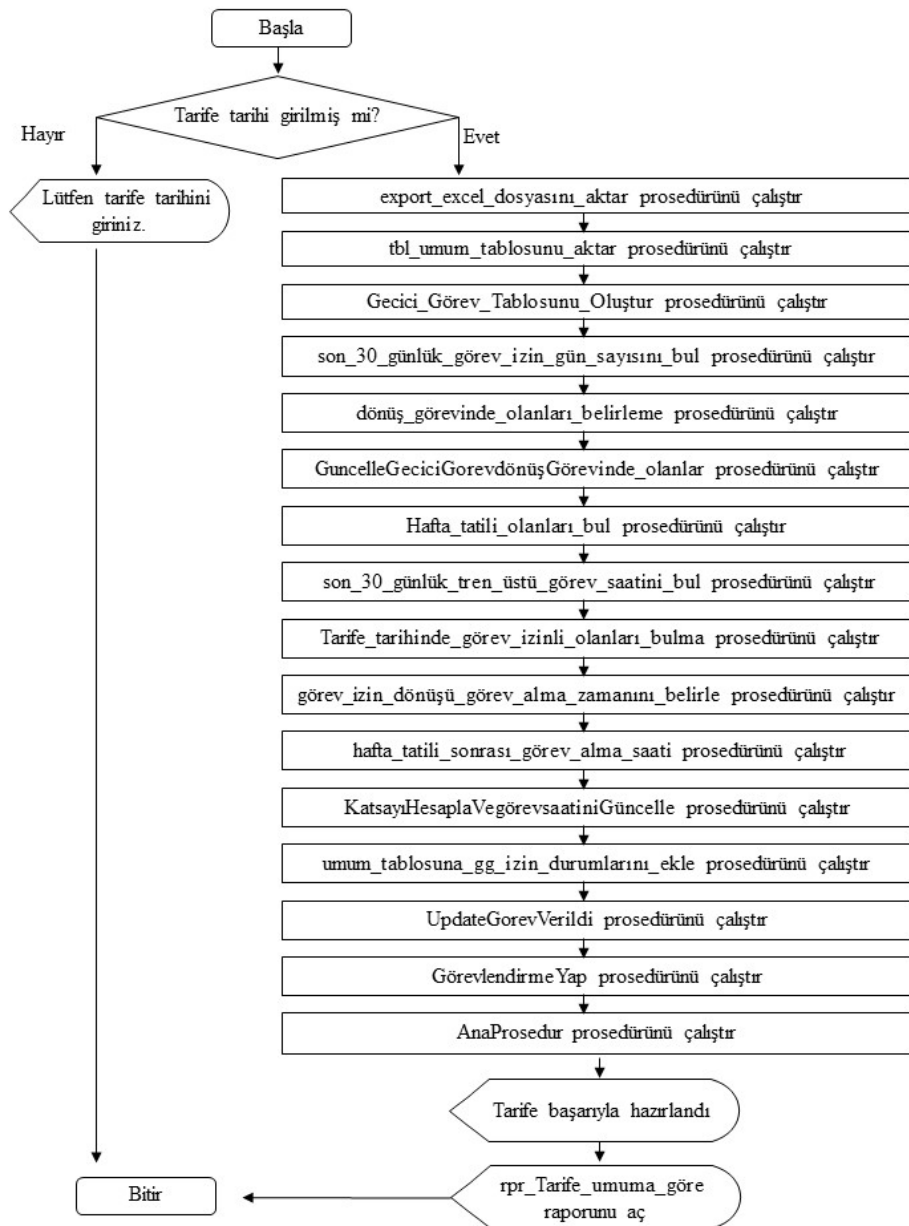
Tablo 1. Tarife programının hazırlanmasında kullanılan tablolar

Tablo Adı	Alan adı	Veri Türü	Alan Açıklaması
tbl_personel	kimlik	Sayı	Kayıt anahtarı
	kkysicil	Sayı	Personel sicil numarası
	adı	Kısa Metin	Personel adı
	soyadı	Kısa Metin	Personel soyadı
	işunvanı	Kısa Metin	Personel unvanı
	ceptelevonu	Kısa Metin	Personel cep telefonu
	evadres	Uzun Metin	Personel ev adresi
	izingunu	Sayı	Haftalık izin gününü belirleyen sayı
	rid	Tarih/Saat	RID eğitimi geçerlilik tarihi
	saglik	Tarih/Saat	Sağlık muayenesi geçerlilik tarihi
	psiko	Tarih/Saat	Psikoteknik muayenesi geçerlilik tarihi
	isg	Tarih/Saat	İSG eğitimi geçerlilik tarihi
	resim	Ole	Personel resmi
	e posta	Kısa Metin	Personel e-posta adresi
tbl_görev_izin	görev_izin_sicil	Sayı	Personelin sicil numarası
	görev_izin_türü	Kısa Metin	Personelin tren harici görev-izin açıklaması
	görev_izin_başlangıç	Tarih/Saat	Tren harici görev-izin başlangıç tarihi
	görev_izin_bitiş	Tarih/Saat	Tren harici görev-izin bitiş tarihi
tbl_hatyetki	hat_sicil	Sayı	Personelin sicil numarası
	hat_tanımı	Kısa Metin	Yetki sahibi olduğu hat tanımı
	hat_bitiş	Tarih/Saat	Hat yetkisi geçerlilik tarihi
tbl_loko	loko_sicil	Sayı	Personelin sicil numarası
	loko_tanım	Kısa Metin	Brövesine sahip olduğu lokomotif
	loko_bitiş	Tarih/Saat	Bröve geçerlilik tarihi
tbl_gecici_görev	gg_sicil	Sayı	Personelin sicil numarası
	gg_tarife_tarihi	Tarih/Saat	Görevlendirme yapılacak tarih
	gg_dönüş_tarihi	Tarih/Saat	Personelin son görevinden dönüş tarihi
	gg_görev_alma_saati	Tarih/Saat	Personeler görev verilebilecek tarih /saat
	gg_30_gün_saat_toplamı	Sayı	Personelin son 30 günlük çalışma saati
	gg_30_gün_izin_toplamı	Sayı	Personelin son 30 günlük tren üzerinde görev yapmadığı gün sayısı
	gg_izin_durumu	Kısa Metin	Tren üzerinde görev verilmeyecek personelin görev verilmeme nedeni
	gg_sefer_no	Sayı	Son görev aldığı trenin sefer numarası
	gg_görev_verildi	Kısa Metin	Personeler tarife tarihinde görev verilip verilmediği
tbl_umum	umum_sicil	Sayı	Personelin sicil numarası
	umum_görev	Kısa Metin	Personeler verilecek görev / tren no
	umum_görev_zamanı	Tarih/Saat	Görevin verileceği tarih / saat
	umum_loko	Kısa Metin	Görev yapacağı lokomotif cinsi
	umum_hatyetki	Kısa Metin	Görev yapacağı hat bilgisi
	umum_tren_önceliği	Kısa Metin	Trenin/ görevin önceliği (1,2,3 ...)
tbl_görevler	görevler_personelno	Sayı	Personelin sicil numarası
	görevler_adsoyad	Kısa Metin	Personelin adı soyadı
	görevler_trenno	Kısa Metin	İşletilen tren No
	görevler_çıkış	Kısa Metin	Çıkış istasyonu
	görevler_varış	Kısa Metin	Varış istasyonu

görevler çıkış tarihi	Tarih/Saat	Tren hareket tarihi
görevler varış tarihi	Tarih/Saat	Tren varış tarihi
görevler çıkış saati	Tarih/Saat	Tren hareket saati
görevler varış saati	Tarih/Saat	Tren varış saati
görevler görev saati	Sayı	Personelin tren üstü görev süresi
görevler çıkıştar	Tarih/Saat	Tren hareket tarihi + hareket saati
görevler varıştar	Tarih/Saat	Tren varış tarihi + varış saati
görevler varış_11	Tarih/Saat	görevler varıştar saati'ne minimum 11 saat dinlenmesi eklenmiş zaman
görevler sefer_no	Sayı	Tren sefer numarası

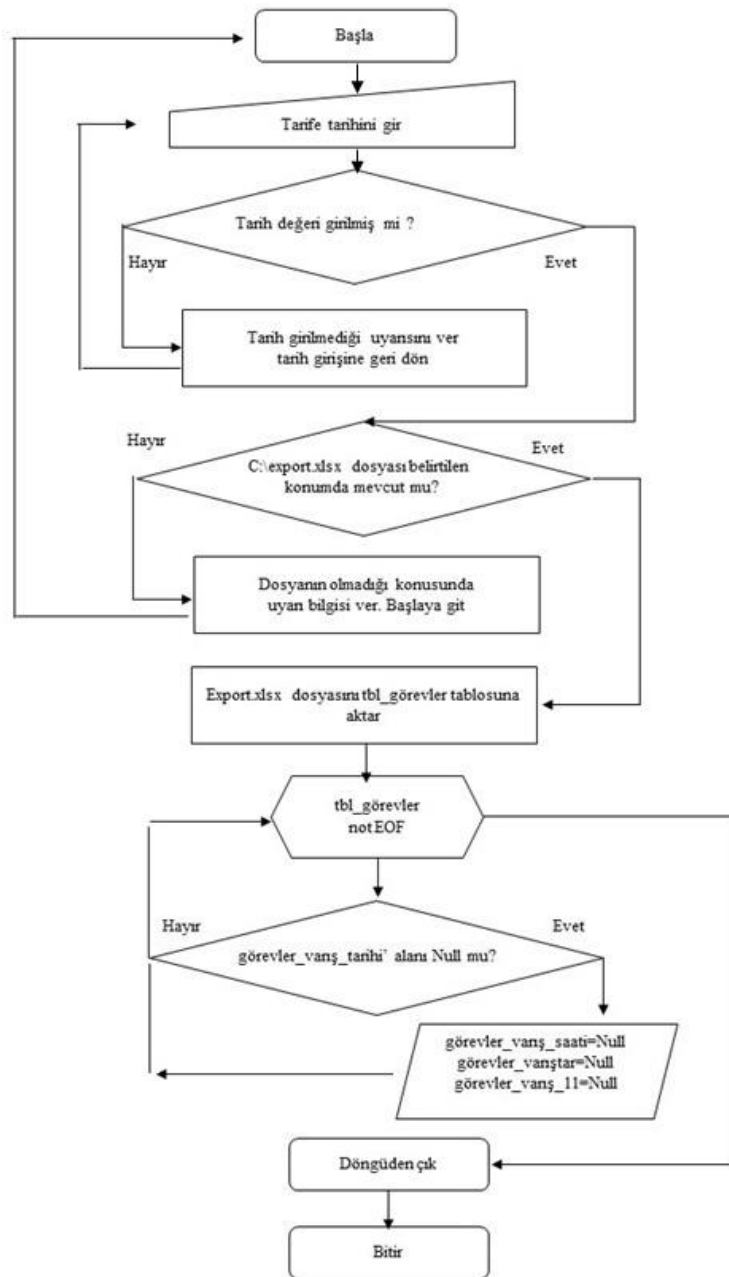
3.2. Tarifenin hazırlanması ana prosedürü

Tarifenin hazırlanması aşamasında kullanılan prosedürler sırasıyla bu bölüm içerisinde çağrılmaktadır. Şekil 1.'de tarifenin hazırlanması ana prosedürünün algoritması verilmiştir.



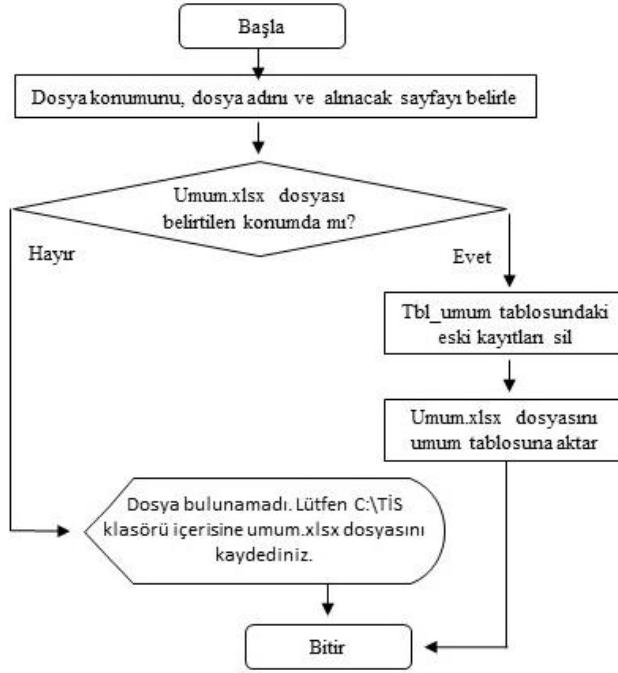
Şekil 1. Tarifenin hazırlanması ana prosedürünün algoritması

“Export.xlsx” Dosyasının Oluşturulmasının Aşamaları: TCDD Taşımacılık A.Ş.’nin kullanmakta olduğu KKY sistemine dışarıdan veri erişimi sınırlıdır. Belirli durumlarda ve kullanıcı yetkisine bağlı olarak verilere erişim sağlanabilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada KKY sistemine direkt erişim sağlanamadığından kullanılacak veriler KKY sisteminden bağımsız şekilde hazırlanmış ve gerçeğe yakın şekilde simüle edilmiştir. TCDD Taşımacılık A.Ş. işletilen tüm trenlerin bilgilerini KKY sistemi içerisinde anlık olarak takip ederek kayıt altına almaktadır. Hazırlanan program şirket tarafından kullanıldığında, emniyet kritik görev personelinin son otuz günlük tren üstü görev bilgilerinin raporlanarak excel dosyası halinde KKY sisteminden her gün saat 16.00’da dışa aktarılması planlanmıştır. Buradaki amaç bu saate kadar harici merkezde ya da halen tren üzerinde olan ve görev merkezine dönüşü gerçekleşmeyen tren üstü emniyet kritik görev personelini tespit etmektir. Excel dosyasının aktarılması ile tarife yapabilmek için gerekli olan bilgilerin alınması planlanmaktadır. Şekil 2’de “export.xlsx” dosyasının “tbl_görevler” tablosuna aktarılmasının algoritması mevcuttur.



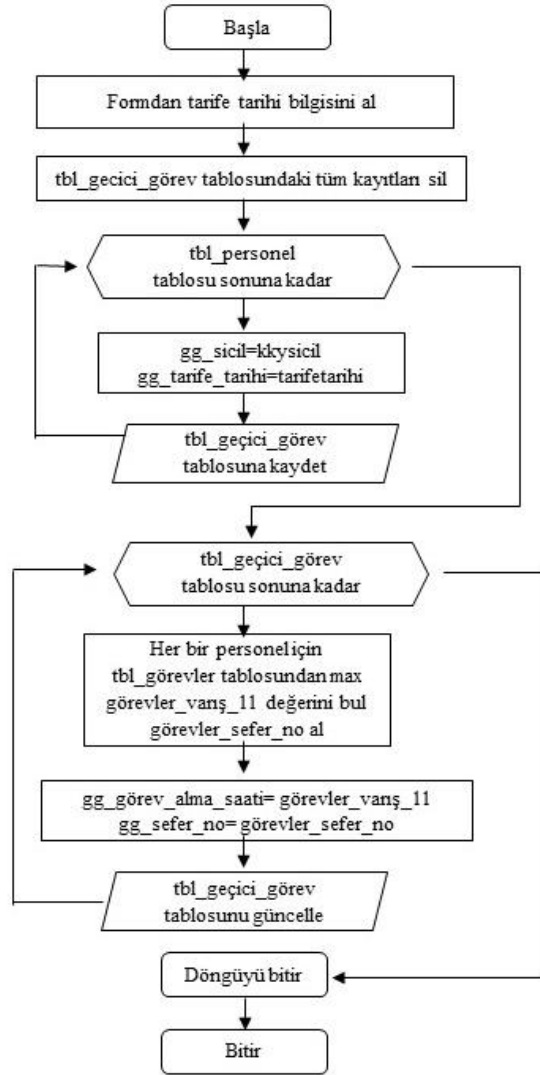
Şekil 2. “Export.xlsx” dosyasının “tbl_görevler” tablosuna aktarılmasının algoritması

“Umum.xlsx” dosyasının “Tbl_umum” tablosuna aktarılması: Her gün saat 12:00’de bir sonraki gün işletilecek trenlerin planlaması bitirilir. Yapılan bu planlama umum ismi ile yayınlanır. Yayınlanan umumda trenlerin numaraları, trenlerin hareket saatleri, hat yetki bilgileri, lokomotif bilgisi yer almaktadır. Ayrıca umumda yer alan görevlere olası emniyet kritik görev personel sayısı yeterli gelmediği durumlarda hangi görevlerin öncelikli olduğunu belirlemek amacıyla tren önceliği bilgisine yer verilir. Yayınlanan umumda merkez görev ihtiyaçları da (manevra, tablet (tren hazırlama) , ihtiyat (yedek) , tren takip, lojistik görev) belirtilmektedir. Emniyet kritik görev personelinin çalışma tarifeleri hazırlanırken bu bilgiler ışığında görevlendirmeler yapılmaktadır. Şekil 3’de “umum.xlsx” dosyasının “tbl_umum” tablosuna aktarılmasının algoritması mevcuttur.



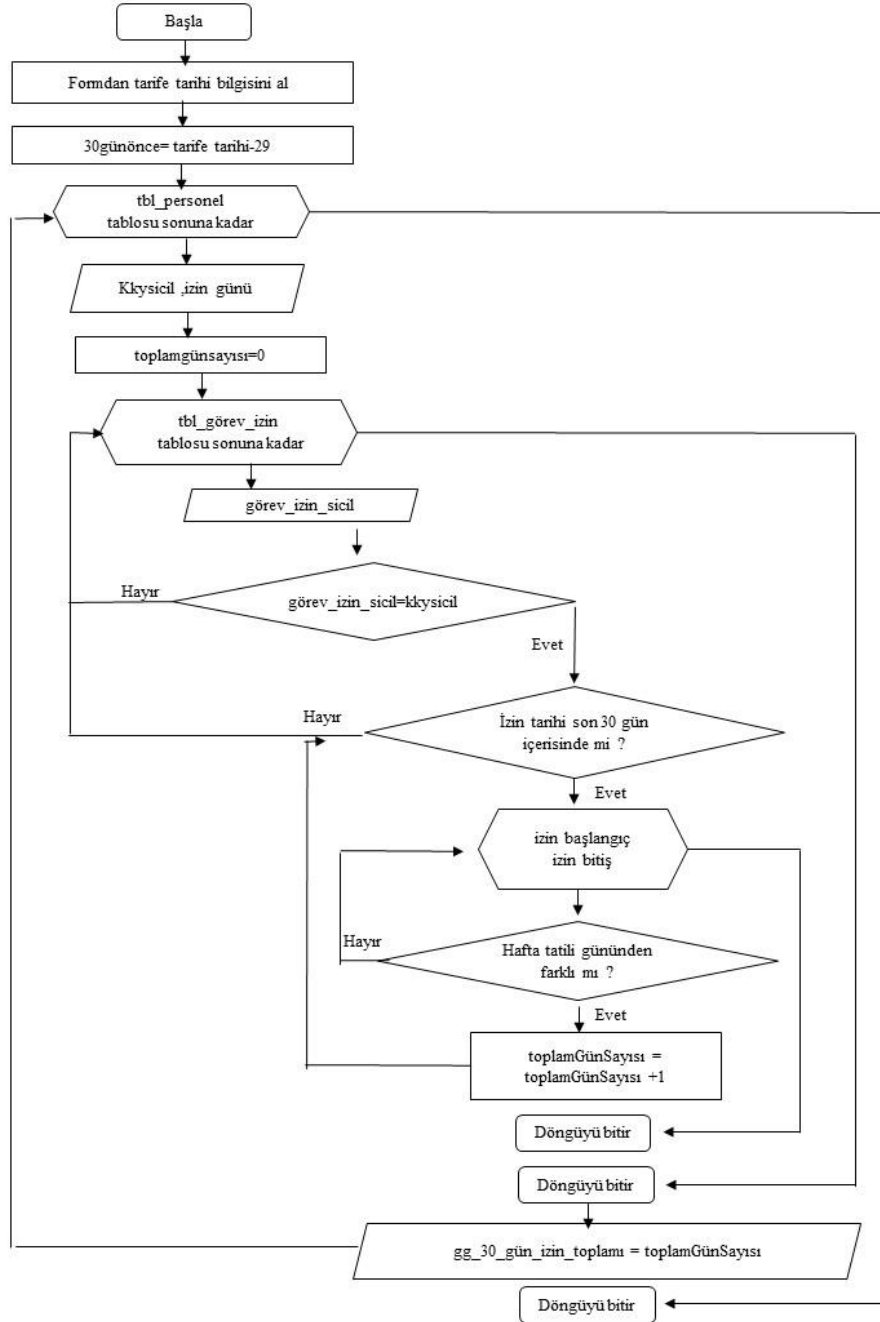
Şekil 3. “Umum.xlsx” dosyasının tbl_umum tablosuna aktarılması algoritması

Geçici görev tablosunun oluşturulmasının aşamaları: Bu tablonun oluşturulmasındaki amaç; birimde görev yapan tüm emniyet kritik görev personeline tarife tarihine ait bir kayıt açmaktır. Programın devamında bu tablodaki alan değerleri güncellenerek tarife için gerekli veriler işlenecektir. Şekil 4’de geçici görev tablosunun oluşturulmasının algoritması mevcuttur.



Şekil 4. Geçici görev tablosunun oluşturulmasının algoritması

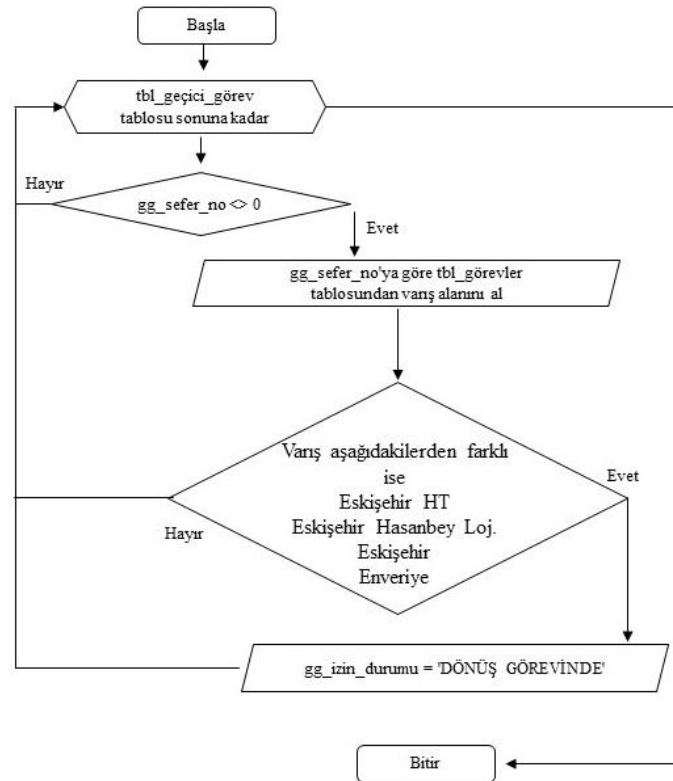
Son 30 günlük dönemde tren harici görevli, izinli olan personelin kaç gün görevli, izinli olduğunun belirlenmesi: Bazı emniyet kritik görev personeli tren üstü görev haricinde işlerde de görevlendirilebilmektedir. Ayrıca izinli, raporlu olan emniyet kritik görev personeli de bulunmaktadır. Bu personelin son 30 günde belirtilen durumlara uygun kaç günü olduğu tespit edilir. Buradaki amaç; tren üstü emniyet kritik görev personelin kaç gün tren üstü görev yapmadıklarının tespit edilmesidir. Şekil 5’de son 30 günlük dönemde tren harici görevli, izinli olan personelin kaç gün görevli, izinli olduğunun belirlenmesinin algoritması mevcuttur.



Şekil 5. Son 30 günlük dönemde tren harici görevli, izinli olan personelin kaç gün görevli, izinli olduğunun belirlenmesinin algoritması

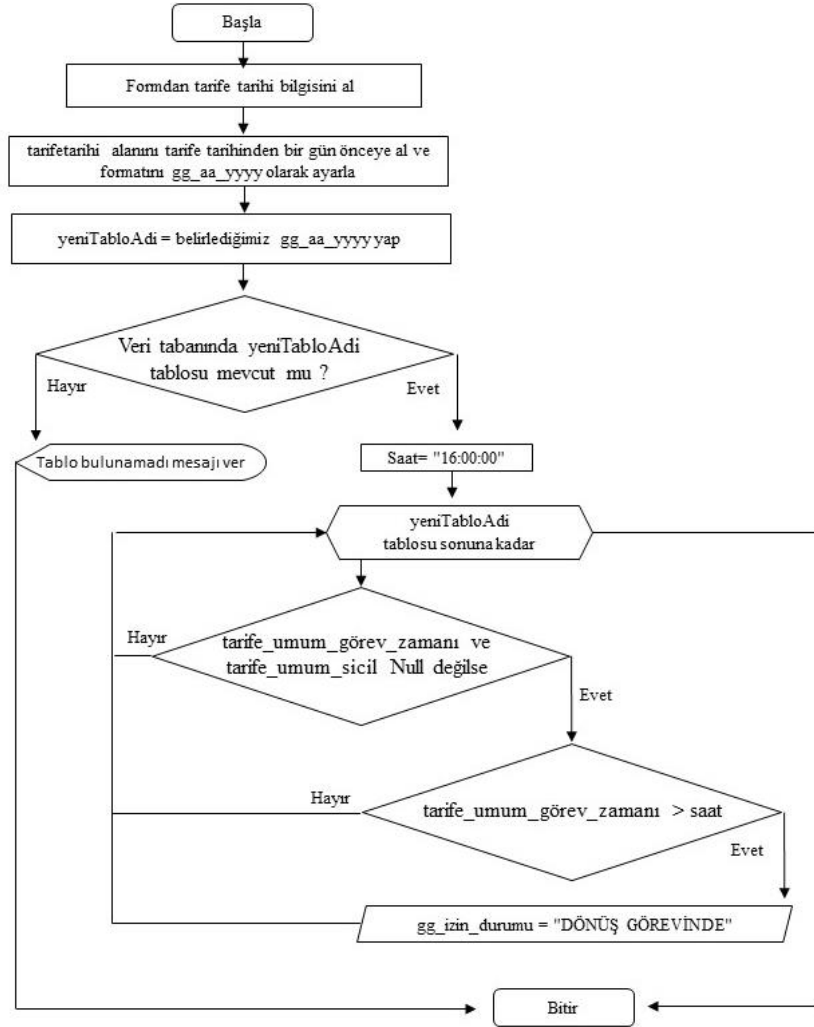
Aldığı görev sonrası henüz kendi merkezine dönmeyen emniyet kritik görev personelinin belirlenmesinin aşamaları: Tarifenin hazırlanacağı gün saat 16.00’ya kadar göreve gidip henüz yolda olan ya da harici varış yerinde kendisine verilecek dönüş görevini bekleyen emniyet kritik görev personelinin iş yerine geliş saatinin belli olmaması nedeniyle işyerine dönüş saatinden sonra gerekli olan dinlenme süresi eklendikten sonraki görev alabileceği saatte belli olmadığı için bu personel tarifede dönüş görevinde şeklinde gösterilmektedir. Son görevine ait “gg_sefer_no” bilgisinden varış istasyonu bilgisine ulaşılır. Eğer varış istasyonu “Eskişehir HT”, “Eskişehir Hasanbey Loj.”, “Eskişehir”, “Enveriye” değil ise henüz kendi işyerine dönüş yapmamış olduğundan “gg_izin_durumu” alanı “DÖNÜŞ GÖREVİNDE” olarak güncellenir.

Şekil 6’da aldığı görev sonrası henüz kendi merkezine dönmeyen emniyet kritik görev personelinin belirlenmesinin algoritması mevcuttur.



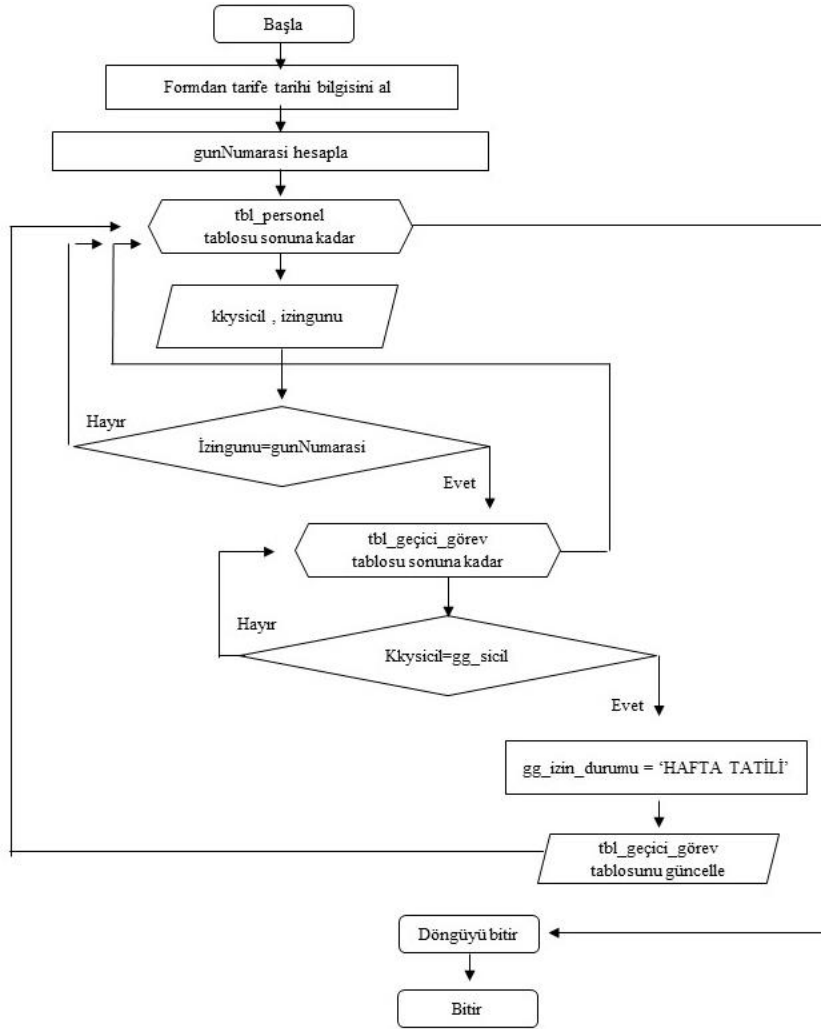
Şekil 6. Aldığı görev sonrası henüz kendi merkezine dönmeyen emniyet kritik görev personelinin belirlenmesinin algoritması

Tarife tarihinden bir gün önceki tarifiede saat 16.00’den sonrası için görev verilen personele dönüş görevi ataması yapılması: Tarife hazırlanıp kullanıcının gerekli onayı vermesinden sonra “tarifetarihi”nin formatı “gg_aa_yyyy” şekline getirilerek bu isimle bir tablo halinde kayıt edilir. Tarife her gün saat 16.00 itibarı ile bir gün sonrası için hazırlanmaktadır. Dolayısı ile saat 16.00 ile 00.00 arası için bir önceki gün görevlendirilen personel henüz göreve başlamamıştır. Bu durumda bu personelin tespit edilip bir sonraki günün tarifesinde dönüş görevinde gösterilmesi gerekmektedir. Şekil 7’de saat 16.00’den sonrası için görev verilen personele dönüş görevi ataması yapılması algoritması mevcuttur.



Şekil 7. Saat 16.00'dan sonrası için görev verilen personele dönüş görevi ataması yapılması algoritması

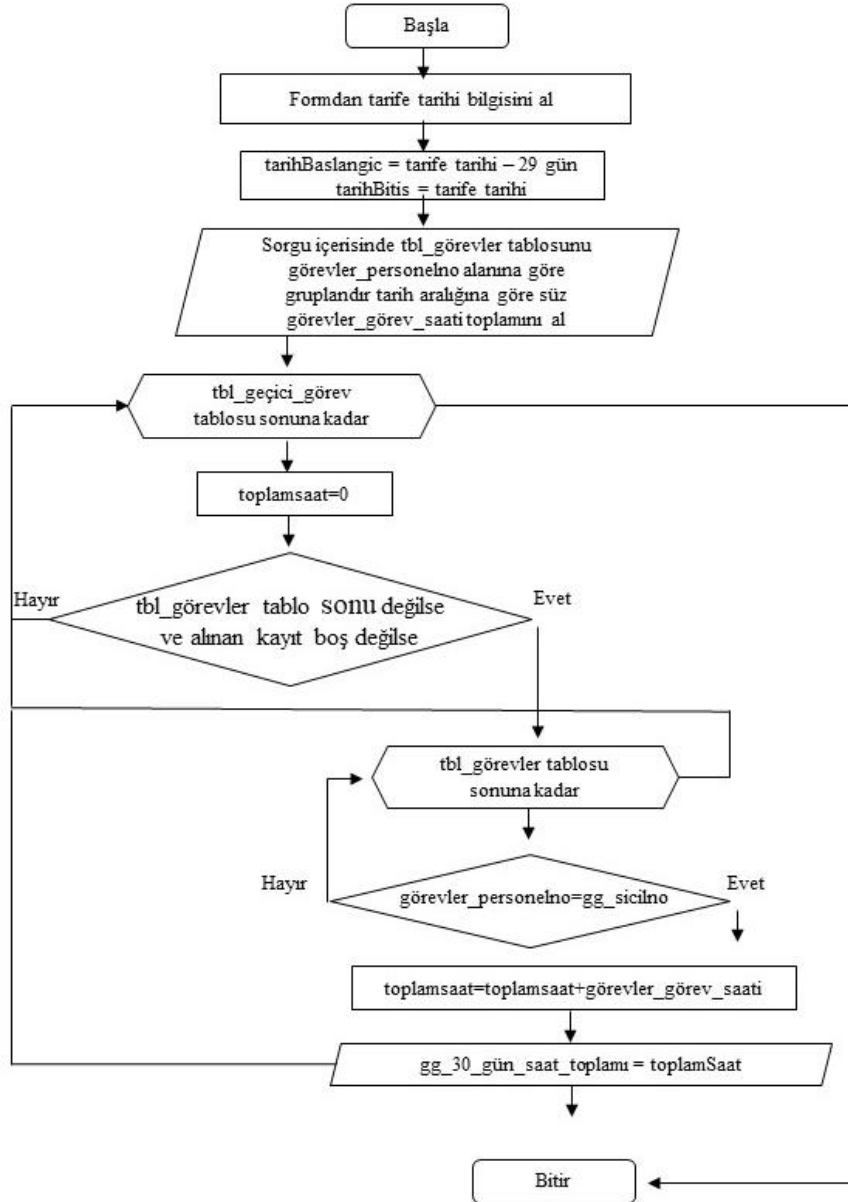
Emniyet kritik görev personelinin hafta tatilinin belirlenmesi: “Dinlenmek, çalışanların hakkıdır. Ücretli hafta ve bayram tatili ile ücretli yıllık izin hakları ve şartları kanunla düzenlenir (1982 Anayasası m.50)” [6]. Bu hüküm Anayasada yer almaktadır. Geliştirilen programda tüm personele aynı günde hafta tatili verilmesi mümkün olmadığından her bir personel için haftanın farklı günleri hafta tatili günü olarak belirlenmiştir. Tarife tarihinde hafta tatili olan personel belirlenerek bu personellere görev verilmemesi gerekmektedir. Şekil 8’de hafta tatili gününün belirlenerek geçici görev tablosunun güncellenmesi algoritması mevcuttur.



Şekil 8. Hafta tatili gününün belirlenerek geçici görev tablosunun güncellenmesi algoritması

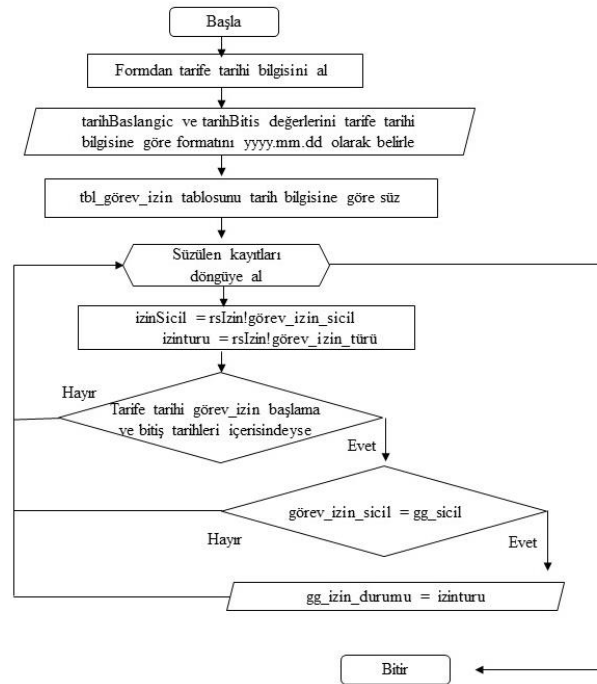
Emniyet kritik görev personelinin son 30 günlük tren üstü görev saatinin hesaplanmasının aşamaları: Eskişehir Hasanbey Lojistik Merkezinde emniyet kritik görev personelinin çalışma saatlerinin birbirine yakın olması hedeflenmektedir. Görevlendirmeler bu iş için ayrılmış personel tarafından yapılmaktadır. Her gün günlük olarak personelin son otuz günlük tren üzerinde toplam kaç saat görev yaptığının verisi her bir personel için ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Verileri işlemek çok uzun zaman almaktadır, bu işlem için zaman ayrılıp yapılsa dahi görevlendirmeler bu iş için görev yapan personelin inisiyatifine kaldığından hatalar olabilmektedir.

Geliştirilen çalışmanın bu aşamasında, Emniyet kritik görev personelinin son otuz günlük tren üstü görev saatinin hesaplanmasıyla personelin kaç saat tren üzeri görev yaptığı bulunur. Bu işlemin yapılmasındaki amaç her bir personelin görev saatlerini birbirine yaklaştırarak mümkün olduğunca eşit ve adil bir şekilde görevlendirilmesini sağlamaktır. Şekil 9'da emniyet kritik görev personelinin son 30 günlük tren üstü görev saatinin hesaplanması algoritması mevcuttur.



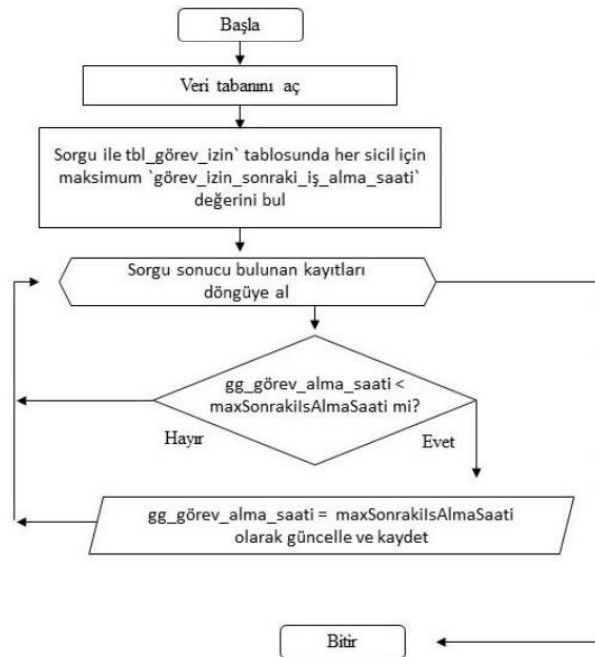
Şekil 9. Emniyet kritik görev personelinin son 30 günlük tren üstü görev saatinin hesaplanması algoritması

Tarife tarihinde tren harici görevli, izinli olan emniyet kritik görev personelinin tespit etme: Tarifenin yapıldığı tarihte tren üstü görev haricinde çalışan ya da izin, hastalık, vekalet görevi, eğitim görevi vb. nedenlerle tarifiede görevlendirme yapılamayacak emniyet kritik görev personelinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu durum belirlendikten sonra bu personel görev ataması yapılacak personel arasından ayrılır. Hazırlanan tarifiede görev ya da izin durumları belirtilir. Şekil 10'da tarife tarihinde tren harici görevli, izinli olan personelin bulunmasının algoritması mevcuttur.



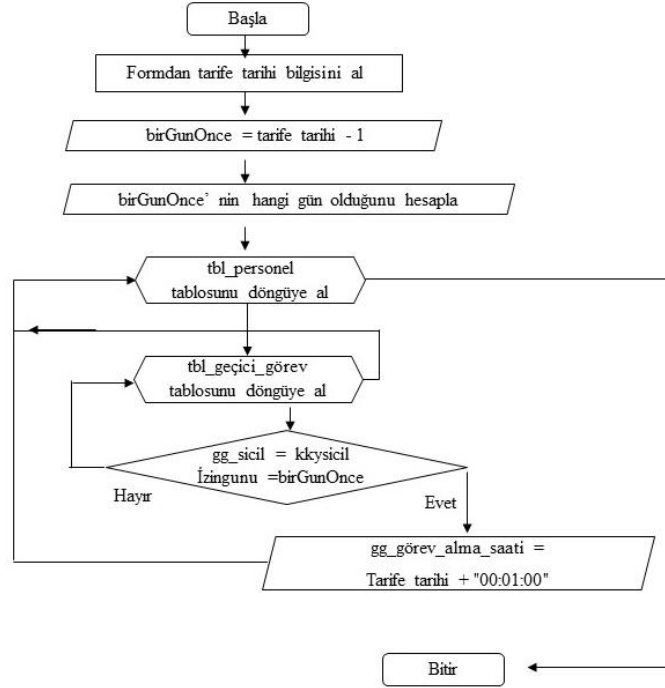
Şekil 10. Tarife tarihinde tren harici görevli, izinli olan personelin bulunmasının algoritması

Tren harici görevli olan, izinden dönen personelin bir sonraki görev alma zamanının belirlenmesi: Tren üstü görevde olan emniyet kritik görev personelinin işyerine dönüş saatleri “tbl_görevler” tablosundan faydalanılarak tespit edilmekte ve gerekli olan dinlenme süresi sonrası görev alabileceği saatler hesaplanmaktadır. Tren üstü görev harici görevlerde çalışan ve izin, hastalık, vekalet, eğitim, manevra, ihtiyat gibi nedenlerle tren üstü görev almayan emniyet kritik görev personelinin görev alabileceği zamanın belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 11’de tren harici görevli olan, izinden dönen personelin bir sonraki görev alma zamanının belirlenmesinin algoritması mevcuttur.



Şekil 11. Tren harici görevli olan, izinden dönen personelin bir sonraki görev alma zamanının belirlenmesinin algoritması

Emniyet kritik görev personelinin hafta tatili sonrası görev alma saatinin belirlenmesi: Tarife tarihinden bir gün önce hafta tatili olan dolayısı ile tren üstü görev almayan emniyet kritik görev personelinin hafta tatili sonrası görev alabileceği zamanın belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 12’de emniyet kritik görev personelinin hafta tatilinin sonrası görev alma saatinin belirlenmesinin algoritması mevcuttur.



Şekil 12. Emniyet kritik personelinin hafta tatilinin sonrası görev alma saatinin belirlenmesinin algoritması

3.3. Emniyet kritik görev personeli tren üstü görev süresinin tespiti için katsayının hesaplanması ve görev süresinin güncellenmesi

İşyerinde görev yapan emniyet kritik görev personelinin eşit koşullarda görev alabilmeleri için çalışma sürelerinin hesaplanmasına ihtiyaç vardır. Bu sayede tren üzeri görev süresi en az olan personel ile en fazla olan personel arasındaki fark minimum düzeye indirilerek adil bir iş paylaşımı hedeflenmiştir. Tarifenin hazırlanması aşamasında her bir emniyet kritik görev personelinin son 30 günlük çalışma süresi dikkate alınır. Görevlendirmeler çalışma süresi az olan personelden başlanılarak yapılır. En fazla çalışma saatine sahip emniyet kritik görev personeline ise en son görevlendirme yapılır, atama yapılacak görev kalmadığı zaman ise dinlenme verilir.

İş yerinde görev yapan tüm emniyet kritik görev personelinin son 30 günde yapmış olduğu tren üstü görev saatleri toplanır. Diğer taraftan tüm personel sürekli tren üstü görevde varsayılarak personel sayısı ile 30 gün çarpılıp olması gereken 30 günlük tren üstü çalışma gün sayısının toplamı elde edilir. Tüm personelin son 30 günlük dönemde tren üzeri görev yapmadığı (izin, hastalık, manevra, lojistik görev vb.) gün sayısının toplamı hesaplanır ve 30 günlük olması gereken tren üstü çalışma gün sayısından düşülerek tüm emniyet kritik görev personelinin son 30 günde kaç gün tren üzeri görev yaptığının toplamı bulunur. Son 30 günlük tren üzeri görev saati toplamı, bulunan bu sonuca bölünerek personel başına bir günlük tren üstü görev saati ortalaması bulunur. Bulunan bu sayı katsayı olarak ifade edilmiştir. Personelin çeşitli nedenlerle tren üstü görev almadığı (izin, hastalık vb.) son 30 günlük gün sayısı bu katsayı ile çarpılarak tren üstü görev süresine eklenir ve nihai görev saati bulunur.

3.4. Tarife tarihinde izin, hastalık, eğitim görevi gibi nedenlerle tarife dışında kalan emniyet kritik görev personelinin günlük tarifiede gösterilmesi

Tarife tarihinde tren harici görevli, izinli olanları tespit etme prosedüründe tarifenin yapıldığı tarihte tren üstü görev haricinde çalışan ya da izin, hastalık, vekalet görevi, eğitim görevi vb. nedenlerle tarifiede görevlendirme yapılamayacak emniyet kritik görev personeli belirlenmiştir. Hazırlanacak tarifenin temelini oluşturan excel dosyası olarak hazırlanan ve “tbl_umum” tablosuna aktarılması yapılan “umum.xlsx” dosyasında bu personelin kaydı yoktur. Bu prosedürde tespit edilen bu emniyet kritik görev personelinin tarifiede gösterilebilmesi için “tbl_umum” dosyasına kayıt işlemi gerçekleştirilmektedir.

3.5. Tarife tarihinde izin, hastalık izinli, eğitim görevi gibi nedenlerle tarife dışında kalan personelin “tbl_gecici_görev” tablosunun “gg_görev_verildi” alanının “evet” olarak güncellenmesi

Tarifenin hazırlanması aşamasında iki temel tablo kullanılmaktadır. Bu tablolardan birisi “tbl_gecici_görev” tablosudur. Tarifiede görev verilecek emniyet kritik görev personelinin seçimi bu tablodaki bilgilere dayanılarak yapılmaktadır. Tabloda yer alan “gg_görev_verildi” alanının başlangıç değeri null olup personele “tbl_umum” tablosunda görev verildiği anda “Evet” olarak güncellenmektedir. Böylelikle aynı emniyet kritik görev personeline ikinci bir görev verilmesinin önüne geçilmektedir.

3.6. Tarifenin hazırlanması

Tarifenin hazırlanmasında kullanılan iki temel tablo, “tbl_gecici_görev” tablosu ve “tbl_umum” tablosudur. Bu aşamaya kadar bulunan tüm veriler kullanılarak “tbl_gecici_görev” tablosuna aktarılmıştır. Bu tabloda görev verilecek emniyet kritik görev personel bilgileri yer almaktadır. Tablo içeriğinde her bir emniyet kritik görev personelinin bir önceki görevinden dönüş tarihi, dinlenmesi sonrası görev alabileceği zaman, son otuz günlük toplam çalışma saati, tren üstü görev harici görevleri, izin durumu, hafta tatili bilgileri yer almaktadır. “tbl_umum” tablosu ise görev verilecek trene ait bilgileri içermektedir. Bu bilgiler tren numarası, hareket tarihi ve saati, trende kullanılacak lokomotif cinsi, trenin yol alacağı hat bilgisi ve trenin öncelik sırasıdır. Bu bilgiler tren planlama bürolarınca hazırlanarak tarife yapacak birime elektronik ortamda teslim edilir. Programın genel olarak görevlendirme mantığı en az çalışma saatine sahip emniyet kritik görev personeline görev alma saatine en yakın zamandaki trende görev ataması yapmak, en fazla çalışma saatine sahip emniyet kritik görev personeline ise en son olarak görevlendirme yapış atama yapılacak görev bulunmadığı zaman ise dinlenme vermektir.

Görevlendirme ataması aşamasında emniyet kritik görev personelinin yeterlilikleri kontrol edilmekte; mevcut görevlerden hiç birine yeterlilik sağlamayan emniyet kritik görev personeline lojistik görev ataması yapılmaktadır. Emniyet kritik görev personelinin TCDD Taşımacılık A.Ş. Sağlık ve Psikoteknik Yönergesinde belirlenen yeterliliklere sahip olması gereklidir. Bu yeterlilikler belirli bir zaman dilimi için geçerlilik taşımakta süresi sonunda yetkilendirilmiş sağlık sunucularında yapılan muayenelerle yenilenmektedir. Ayrıca emniyet kritik görev personelinin görev yapabilmesi için alması zorunlu olan İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi (İSG) ve Demiryolu Taşımacılığı Tehlikeli Eşyanın Demiryolu ile Uluslararası Taşınmasına İlişkin Yönetmelik (RID, Regulations Concerning the International Transport of Dangerous Goods by Rail) eğitimi olup bu eğitimlerinde belirli periyotlarda yenilenmesi gerekmektedir. Eğitimlerinin geçerlilik süresi dolan emniyet kritik görev personeline tren üstü görev verilemez.

Lokomotiflerin özellikleri ve sürüş teknikleri farklı olduğundan her bir lokomotif tipi için ayrı ayrı olmak üzere yetkilendirilmiş eğitim merkezlerinde teorik, simülasyon ve tren üstü staj eğitimleri

sonrası yapılan sınavlarda başarılı olan personele lokomotif brövesi verilmektedir. Görevlendirme yapılacak trende kullanılan lokomotifte ait brövesi olmayan emniyet kritik görev personeline bu görev verilemez.

Alt yapı işletmecisi olan TCDD işletmiş olduğu hatları belirli kırılımları göz önüne alarak hat kesimlerine bölmüştür. Emniyet kritik görev personelinin bir hatta ait yeterliliği alabilmesi için o hatta en az beş gidiş ve en az beş geliş hat stajı yapması ve sonrasında yapılacak sınavda başarılı olması gerekmektedir. Buradaki amaç emniyet kritik görev personelinin görev yapacağı hattı tanımasıdır. Program tüm bu yeterlilikleri kontrol altında tutmakta ve hataya yer vermemektedir. Trenlere görevlendirme yapılırken tren önceliği sırasına göre emniyet kritik görev personel ataması yapılmakta görev verilecek personel sayısı yetersiz kaldığı durumlarda önceliği en son olan trene görevlendirme yapılmamaktadır.

3.7. Görev ataması yapılmayan personele dinlenme kaydı ekleme

Tarife hazırlanmasında eşit ve adil bir görev dağılımı yapılması hedeflenmiştir. Bu amaçla emniyet kritik görev personelinin son otuz günlük görev süreleri program tarafından hesaplanmış ve bu hesaplama sonrası en az görev süresine sahip personelden başlamak üzere görevlendirmeler yapılmıştır. Tüm görevlendirmeler tamamlandıktan sonra görev ataması yapılmayan personel (en çok görev süresine sahip personel) tarifede “DİNLENME” olarak gösterilmektedir.

3.8. Hazırlanan tarifenin rapor şeklinde alınması

Tarifenin hazırlanması aşaması sona erdikten sonra hazırlanan tarifenin belirli bir formatta yayınlanabilmesi için rapor hazırlanır. Hazırlanan rapor talebe göre elektronik ortamda ya da yazıcı çıktısı olarak tüm emniyet kritik görev personeline duyurulur. Bu kısımda, 1,2,3...156 rakamları personelin sicil numarasını, A1, A2, A3...A156 gösterimi personelin adını, S1, S2, S3...S156 gösterimi ise personelin soyadını temsil etmektedir.

3.9. Tren harici görev ataması yapılan personelin “tbl_görev_izin” tablosuna kaydedilmesi

Tren üstü görev alan personelin işyerine dönüş saati ve dönüşü sonrası bir sonraki görev alma saati “tbl_görevler” tablosundan faydalanılarak hesaplanmasına rağmen tren üstü görev haricinde görev verilen emniyet kritik görev personelinin “tbl_görevler” tablosunda kaydı olmayacağından görev bitiş ve bir sonraki görev alma saatlerinin belirlenerek kayıt altına alınması ihtiyacı vardır. Bu görevlere atanan emniyet kritik görev personeli 08.00/16.00, 16.00/00.00 ve 00.00/08.00 saatleri arası üç vardiya şeklinde çalışmaktadır. Görevlerinin bitiminden sonra gerekli olan dinlenme süresi verilerek daha sonra bir sonraki görev alma saati belirlenir ve “tbl_görev_izin” tablosuna kaydı yapılır.

3.10. Hazırlanan tarifenin veri tabanına kaydedilmesi

Bu aşamada, “tbl_umum” dosyası olarak hazırlanan tarife bir sonraki günün tarifesinde kullanılmak ve arşivlenmek üzere veri tabanına tarife tarihi “gg_aa_yyyy” formatına çevrilip tablo adı olarak belirlenir ve kaydedilir.

4. Program Ara Yüzünün Tanıtımı

Tarife programı kullanıcının rahat erişimi için tek ekran olarak tasarlanmış ve her tür işlemin tek ekran aracılığı ile yapılması sağlanmıştır. Ekran içerisinde emniyet kritik görev personelinin adı, soyadı, sicil numarası, unvanı, iletişim bilgileri, rıd, sağlık, psikoteknik, isg yeterlilik bilgileri, hafta tatili günü ve emniyet kritik görev personelinin fotoğrafına yer verilmiştir. Personele ait bu bilgilerde değişiklik olması durumunda ekran aracılığı ile bu değişiklikler yapılabilir.

Görev izin bölümünde personele tren üzeri görevler haricinde verilen görevlerin bilgisi ile izin, hastalık, vekalet görevi gibi bilgiler yer almaktadır.

Ekranın görev izin bölümünde emniyet kritik görev personeline program tarafından ataması yapılan tren üstü görev haricindeki depo manevra, ihtiyat, tablet, tren takip, gar manevra, işletme depo görevleri otomatik olarak kaydedilirken umum dışında verilen izin, hastalık, sağlık muayenesi, vekaleten dış görev, eğitim merkezi gibi umumba yer almayan izin ve görevlendirmeler kullanıcı tarafından ekranın görev izin bölümüne manuel olarak girilecektir. Yapılan manuel girişlerin sonrasında program otomatik olarak görev izin bitışı bir sonraki görev verilebilecek zamanı tespit etmektedir.

Ekranın hat bröveleri bölümünde emniyet kritik görev personelinin tren kullanmaya yetkili olduğu hat kırılımlarının bilgisi yer almaktadır. Görevlendirme yapılırken program hat yeterliliğini bu bilgilere dayanarak kontrol etmektedir. Emniyet kritik görev personeli yeni bir hat yetkisi aldığında bu bölümden yeni bir kayıt açılarak bu hat bilgisi eklenir. Yine hat kırılımı bilgilerinde değişiklik olduğu durumlarda bu bölümden gerekli değişiklikler yapılabilir.

Ekranın lokomotif bröveleri bölümünde emniyet kritik görev personelinin kullanmaya yetkili olduğu lokomotiflerin bilgileri bulunmaktadır. Görevlendirme yapılırken program lokomotif yeterliliğini bu bilgilere dayanarak kontrol etmektedir. Emniyet kritik görev personeli yeni bir lokomotif brövesi aldığında bu bölümden yeni bir kayıt açılarak bu bröve bilgisi eklenir. Yine lokomotif brövesi bilgilerinde değişiklik olduğu durumlarda bu bölümden gerekli değişiklikler yapılabilir.

Ekranın alt sol bölümünde emniyet kritik görev personelinin temin ettiği tren bilgileri yer almaktadır. Bu bölümde giriş ya da değişiklik yapılamamaktadır. Bu bölümden emniyet kritik görev personelinin tren üstü görevleri takip edilebilir. Ekranın alt sağ bölümünde personelin geçmiş tarifelerde verilen görev, izin bilgileri yer almaktadır. Bu bölümde giriş ya da değişiklik yapılamamaktadır. Ekranda yer alan tarifeyi hazırla butonunun solundaki alana tarife tarihi girilerek tarifeyi hazırla butonuna tıklanarak tarife hazırlanmaktadır. Şekil 13'de tarife programı ara yüzünün ekran alıntısı yer almaktadır.

PERSONEL AYRINTILARI									
5 A5 S5 - MAKİNİST				04.10.2024		Tarifeyi Hazırla			
Adı	A5	RİD	05.11.2025	Cep Tel	05050000000				
Soyadı	S5	Sağlık	03.09.2025	İzin Günü	PAZAR				
KKY Sicil No	5	Psikoteknik	21.09.2025	e_posta	A555@tcddtasimacilik.gov.tr				
İş Unvanı	MAKİNİST	İSG	29.06.2025	Ev Adresi	A555 'IN ADRESİ				
TREN HARİCİ GÖREV / İZİN					HAT BRÖVELERİ		LOKOMOTİF BRÖVELERİ		
GÖREV İZİN TÜRÜ	BAŞLANGIÇ	BİTİŞ	İŞ ALMA SAATİ		HAT_TANIMI	BİTİŞ	CER ARACI	BİTİŞ	
DEPO MANEVRA	02.10.2024	02.10.2024 08:00:00	02.10.2024 19:00:00		ENVERİYE-AYYON	03.02.2028	DE33000	31.05.2026	
TREN TAKİP	28.09.2024	28.09.2024 08:00:00	28.09.2024 19:00:00		ENVERİYE-ARİFİYE	18.12.2025	E 52500	31.05.2026	
DEPO MANEVRA	19.09.2024	19.09.2024 16:00:00	20.09.2024 11:00:01		ESKİŞEHİR YHT-GEBZE YHT	07.04.2026	DH3600	31.05.2026	
DEPO MANEVRA	11.09.2024	11.09.2024 08:00:00	12.09.2024 03:00:00		ESKİŞEHİR YHT-SİNCAN YHT	25.03.2026	DH7000	31.05.2026	
DEPO MANEVRA	10.09.2024	10.09.2024 08:00:00	11.09.2024 16:00:00		ESKİŞEHİR-ANKARA YOLCU	12.03.2026	DE22000	31.05.2026	
					ESKİŞEHİR-BALIKESİR	28.01.2028	DE24000	31.05.2026	
					ESKİŞEHİR-KÜTAHYA	03.02.2028	DE36000	31.05.2026	
					HASANBEY-ARİFİYE	18.12.2025	E68000	31.05.2026	
					HASANBEY-MARŞANDIZ	12.03.2026	DH33100	31.05.2026	
							DE18000	31.05.2026	
							E43000	31.05.2026	
EMNİYET KRİTİK GÖREV PERSONELİNİN TEMİN ETTİĞİ TRENER						TARİFE GÖREVLERİ			
TREN NO	ÇIKIŞ İSTASYONU	VARIŞ İSTASYONU	ÇIKIŞ ZAMANI	VARIŞ ZAMANI	GÖREV SAATİ	Tarife Tarihi	Görevi		
43411	Eskişehir	Arifiye	30.09.2024 01:10	30.09.2024 08:15:00	8,583	04.10.2024	89000		
32011	Mezitler	Eskişehir	23.09.2024 15:15	23.09.2024 20:45:00	5,500	03.10.2024	*DİNLENME		
72018	Eskişehir	Mezitler	23.09.2024 08:40	23.09.2024 14:25:00	7,250	02.10.2024	DEPO MANEVRA		
29001	Alpu	Eskişehir Hasanbey Loj.	21.09.2024 23:47	22.09.2024 04:00:00	4,217	01.10.2024	*DİNLENME		
29000	Eskişehir Hasanbey Loj.	Alpu	21.09.2024 21:00	21.09.2024 23:45:00	4,250	30.09.2024	43411		
81011	YHT Eryaman Garı	Eskişehir HT	17.09.2024 11:14	17.09.2024 12:21:00	1,117	29.09.2024	*HAFTA TATİLİ		
27111	Ankara	Ankara Loj.Müd.(Marş)	17.09.2024 08:53	17.09.2024 09:05:00	0,200	28.09.2024	TREN TAKİP		
12002	Eskişehir	Ankara	17.09.2024 05:00	17.09.2024 08:40:00	3,667	27.09.2024	*DİNLENME		
23217	Ankara Loj.Müd.(Marş)	Eskişehir Hasanbey Loj.	15.09.2024 11:55	15.09.2024 18:50:00	6,917	26.09.2024	*DİNLENME		
33356	Eskişehir Hasanbey Loj.	Ankara Loj.Müd.(Marş)	15.09.2024 06:00	15.09.2024 11:22:00	5,367	25.09.2024	*DİNLENME		

Şekil 13. Tarife programı ara yüzünün ekran alıntısı

5. Bulgular

Programın simülasyonu için farklı saatlerde, farklı lokomotiflerle, farklı hat kategorisinde çalışan 29 tren seçilmiştir. Seçilen bu trenlerin ortalama seyir süreleri tespit edilmiş, dönüş trenleri belirlenmiştir. Yönetmelikler gereği her bir trende iki makinist görevlendirilmiştir. Görev bitimi sonrası gerekli olan dinlenme süresi verilmeden ikinci bir görev verilmemiştir. Treni teslim almak için tanınan 60 dakika ve treni teslim etmek için tanınan 30 dakikalık süreler her görev bitiminde tren üstü görev süresine eklenmiştir, eklenen bu süre sonrasında gerekli olan dinlenme süresi verilmiştir. Her bir emniyet kritik görev personeline hafta tatili verilmiştir.

Günlük olarak depo manevra vardiyaları için 7, gar manevraları için 4, ihtiyat için 7, tablet görevi için 3, tren takip görevi için 3 emniyet kritik görev personeli görevlendirilmiştir.

Tarife programı 20 Eylül 2024 / 04 Ekim 2024 tarihleri arasında 15 günlük bir dönem için simüle edilmiştir. Simülasyonun gerçekleştirildiği her gün için "tbl_gecici_görev" tablosu alınarak emniyet kritik görev personelinin anlık olarak mevcut olan tarihten geri tarihe gidilerek son 30 günlük görev süreleri takip edilmiş sonuç olarak onbeş günlük kısa bir dönemde dahi emniyet kritik görev personelinin çalışma saatlerinin birbirlerine gittikçe eşitlendiği görülmüştür

6. Sonuç

Emniyet kritik personelinin görev planlamasını hazırlarken hali hazırda kullanılan geleneksel yöntem, uzun zaman alması, hatalı görevlendirmeler yapılma ihtimali, adil bir görev dağılımı sağlayamaması, planlamayı yapan kişinin inisiyatifine dayanması ve bu işlemler için fazladan personel görevlendirilmesi gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Emniyet kritik görev personeli görevlendirmelerinde personelin bir dizi farklı yeterliliğe sahip olması gerektiği için planlama süreci oldukça karmaşık hale gelmektedir. Lokomotif brövesi, hat yetkisi, sağlık ve psikoteknik yeterlilikleri, iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri gibi çok sayıda faktör göz önünde

bulundurulmaktadır ayrıca emniyet kritik görev personelinin bir önceki görevinden sonra yeteri kadar dinlenip dinlenmediği hafta tatilleri ve izinleri dikkate alınması gereken ek zorluklardır. Bu nedenlerle bu hesaplamalar bir program aracılığıyla yapılmak yerine geleneksel yöntem ile yapıldığında hata yapılma ihtimali yüksektir. Bu durumda planlamanın güvenilirliğini ve etkinliğini ciddi şekilde etkileyebilir.

Geliştirilen program, tüm bu kriterleri otomatik olarak kontrol ederek personelin yeterliliğini ve görev sürelerini izler. Bu sayede olası hataların önüne geçilerek daha doğru ve güvenli bir görevlendirme süreci sağlanmıştır. Bu tür bir planlama yalnızca personelin yeterliliklerini sağlamakla kalmamakta aynı zamanda görevlerin adil bir şekilde dağıtılmasını da sağlamaktadır. Program, en az görev alan personelin ilk olarak görevlendirilmesini yaparken en fazla görev alan personelin görevlendirilmesini ise en sona bırakmakta ya da atama yapılacak görev kalmadığında dinlenme atayarak personel arası çalışma sürelerini dengelemektedir. Bu dengeli durum, personelin yorgunluk seviyelerinin düşük tutulmasına yardımcı olduğu gibi daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturmaktadır. Program, görev sürelerini dengeleyerek personel arasında daha adil bir iş yükü dağılımı sağlar böylece her personel benzer miktarda görev alır ve personelin görev süreleri eşitlenir. Her personelin görev almadığı günler yeterli dinlenme sürelerini sağlamak amacıyla dikkatle belirlenmiştir. Bu sayede personelin çalışma süreleri birbirine daha yakın hale gelmiş ve verimlilik artmıştır. Bu, geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkin bir görev dağılımı sağlamıştır ve verimlilik açısından önemli bir iyileşme elde edilmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre program; personel yeterliliklerini titizlikle kontrol etmekte, görev sürelerini dengelemekte ve adil bir görev dağılımı sağlamaktadır. Personelin yeterlilikleri ve dinlenme süreleri doğru şekilde yönetildiği için güvenli ve verimli bir çalışma ortamı elde edilmiştir. Geleneksel planlama yöntemlerinde yaşanan zorluklar, hatalar, zaman kaybı ve görevlendirmeyi yapacak fazladan personel ayrılması göz önünde bulundurulduğunda bu programın avantajları daha belirgin hale gelmektedir. Hem görevlerin adil bir şekilde dağıtılması hem de personelin çalışma verimliliğinin artırılması açısından bu sistem demiryolu taşımacılığında güvenliği ve verimliliği artıran önemli bir çözüm sunmaktadır.

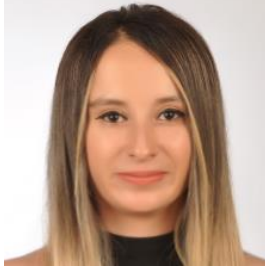
Sonuç olarak; bu programın uygulanması demiryolu işletmelerinde emniyet kritik görev personelinin görev planlamasını ve yönetimini iyileştirebilir, potansiyel hataları minimize edebilir ve emniyetli bir çalışma ortamı yaratabilir. Bu sistemin benzer uygulamalarda kullanılması, güvenli ve verimli bir demiryolu taşımacılığı için önemli bir adım olabilir. Geliştirilen bu sistem veri tabanı dosyalarının güncellenmesi ile diğer lojistik merkezlerde de kullanılabilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın yapılmasında desteklerini esirgemeyen TCDD Taşımacılık A.Ş. Hasanbey Lojistik Merkezi personellerine teşekkürü bir borç biliriz.

Kaynakça

- [1] Resmî Gazete. Demiryolu Ulaştırmasının Serbestleştirilmesi Hakkındaki Kanun (Kanun No: 6461), 01 Mayıs 2013, sy: 28634. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/05/20130501-1.htm> (Erişim Tarihi: Mart 2025).
- [2] TCDD Taşımacılık AŞ. 2025, <https://www.tcdrtasimacilik.gov.tr/tr/hakkimizda> (Erişim Tarihi: 12 Şubat 2025).
- [3] E. Aktan. “Büyük veri: Uygulama alanları, analitiği ve güvenlik boyutu”. Bilgi Yönetimi Dergisi C:1, sy: 1, ss.1-22, 2018. <https://doi.org/10.33721/by.403010>
- [4] Y.Üstündağ, “Ekip çizelgeleme problemi”, Demiryolu Mühendisliği, sy. 1, ss. 72–83, Aralık 2014.
- [5] H. Duman, F. Çakır ve H. Gökçen, “Yüksek hızlı trenlerde (YHT) sefer-makinist eşleştirmesi”, Demiryolu Mühendisliği, sy. 20, ss. 155–168, Temmuz 2024, doi: 10.47072/demiryolu.1501204.
- [6] Resmî Gazete, Türkiye Cumhuriyeti Anayasası. 20.10.1982, sy:17844. <https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/17844.pdf> (Erişim Tarihi: 10 Mart 2025).

Özgeçmiş**Pınar ASARBÜKÜ**

Anadolu Üniversitesi Ulaştırma Meslek Yüksekokulu Raylı Sistemler Elektrik ve Elektronik Teknolojisi Programı'ndan 2013'de; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2018'de mezun oldu. Eskişehir Teknik Üniversitesi, LEE, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansını 2025 yılında tamamladı. 2015-2023 yılları arasında TCDD Taşımacılık A.Ş. Hasanbey Lojistik Merkezi'nde Makinist olarak çalıştı. 2023 yılından itibaren Millî Eğitim Bakanlığı, Eskişehir/ Odunpazarı Emine-Emir Şahbaz Bilim ve Sanat Merkezi'nde Öğretmen olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: asarbukup@gmail.com

**Meserret NALÇAKAN**

Gazi Üniversitesi İİBF İktisat Bölümü'nden mezun oldu. Anadolu Üniversitesi'nde 1989'da Yüksek Lisans; 2003'de Doktora eğitimini tamamladı. Demiryolu İşletmeciliği, Demiryolu Lojistiği ve Ulaştırma Ekonomisi alanında yayınlar yaptı. 2018 yılından itibaren Doçent Doktor olarak Eskişehir Teknik Üniversitesi Ulaştırma Meslek Yüksekokulu'ndaki öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: mnalcakan@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Pınar ASARBÜKÜ: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-Görselleştirme, Yazılım, Kaynaklar; Meserret NALÇAKAN: Doğrulama, Orijinal taslak hazırlama, İnceleme, Kontrol, Gözden geçirme ve Düzenleme.

**Mobil Cihaz Tabanlı Atalet Ölçümleriyle Demiryolu Kurp Tespiti ve Yarıçap Belirleme**

Ferhat ÇEÇEN^{*1}, Erdal MELEMEZ², Bekir AKTAŞ³, Recep Koray KIYILDI⁴, Mehmet SALTAN⁵

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye

² TCDD Bakım Dairesi Başk., 62 YBO Müdürlüğü, 621 Yol Bakım Onarım Şefliği, Adana, Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

⁴ Ömer Halis Demir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye

⁵ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

*cecenferhat@sdu.edu.tr

(Alınış/Received: 15.05.2025, Kabul/Accepted: 21.06.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Bu çalışmada, taşınabilir cihazlar aracılığıyla demiryolu hatlarında kurp yarıçapının belirlenmesine yönelik düşük maliyetli ve pratik bir yöntem geliştirilmiştir. GNSS ve jiroskop verileri, mobil cihaz sensörlerinden zaman senkronlu olarak toplanmış ve Python ortamında analiz edilmiştir. Ölçümler, Adana Beledemik–Pozantı hattında bir drezin ve bir yolcu treni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zaman uyumsuzluğu nedeniyle GNSS ve açısal hız verileri interpolasyon yoluyla senkronize edilmiş; Z eksenine ait açısal hız ve hız verileri kullanılarak kurp yarıçapları hesaplanmıştır. Veriler, farklı alçak geçiren filtre (AG) kesim frekanslarıyla işlenmiş ve bu parametrelerin ölçüm doğruluğu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. En uygun sonuçlar, drezin için 0,2 Hz ve yolcu treni için 0,4 Hz frekanslarında elde edilmiştir. Yirmi farklı kurpta yapılan analizlerde, referans ölçümlere göre ortalama sapma drezin için %2,6; yolcu treni için %2,2 olarak hesaplanmıştır. En yüksek sapma %12,5'e ulaşırken, bazı kurplarda sapma %0,01 düzeyine kadar düşmüştür. Geçiş eğrisi ve gelişim uzunluğu sınırlı olan kurplarda, mobil cihaz verileri ile referans ölçümler arasında sapmaların nispeten arttığı; geçiş sürekliliği bulunan ve daha uzun geometrik gelişime sahip kurplarda ise daha yüksek düzeyde örtüşme sağlandığı gözlenmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin demiryolu hat geometrisinin gerçek zamanlı izlenmesinde düşük maliyetli, erişilebilir ve uygulanabilir bir teknik çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu geometrisi, Kurp yarıçapı, Mobil cihazlar, Python kodlama, Açısal hız

Railway Curve Detection and Radius Estimation Using Mobile Device-Based Inertial Measurements

Abstract: This study presents a low-cost and practical method for determining railway curve radii using portable sensor-equipped devices. Time-synchronized GNSS and gyroscope data were collected from mobile sensors and analyzed using Python. Measurements were conducted on the Adana Beledemik–Pozantı railway segment using both a track inspection vehicle and a passenger train. Due to differences in sampling rates, GNSS and angular velocity data were synchronized via interpolation, and curve radii were calculated using Z-axis angular velocity and speed data. The raw data were processed using various low-pass filter cutoff frequencies to assess their influence on measurement accuracy. The most accurate results were obtained at 0.2 Hz for the inspection vehicle and 0.4 Hz for the passenger train. Across 20 different curves, the average deviation from reference measurements was calculated as 2.6% for the inspection vehicle and 2.2% for the passenger train. While the highest deviation reached 12.5%, some curves yielded deviations as low as 0.01%. In curves with limited transition curves and development length, relatively higher deviations were observed between mobile device data and reference measurements; whereas in curves with continuous transitions and longer geometric development, a higher level of agreement was achieved. These findings demonstrate that the proposed method can serve as a cost-effective, accessible, and field-applicable solution for real-time monitoring of railway track geometry using mobile devices.

Keywords: Railway geometry, Curve radius, Portable devices, Python coding, Angular velocity

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, E. Melemez, B. Aktaş, R.K. Kıyıldı, M. Saltan “Mobil cihaz tabanlı atalet ölçümleriyle demiryolu kurp tespiti ve yarıçap belirleme,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 46-57, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1699940

1. Giriş

Demiryollarında yatay kurp (viraj) yarıçapının doğru şekilde belirlenmesi; güvenlik, bakım, konfor ve işletme ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Gereğinden küçük yarıçaplara sahip keskin kurplar, yüksek merkezkaç kuvvetleri ve tekerlek-ray etkileşimlerine yol açarak [1], ray ve tekerleklerde daha fazla aşınmaya neden olmaktadır [2]. Bu durum ise hem işletme maliyetlerini artırmakta hem de yolcu konforunu olumsuz etkilemektedir [3]. Öte yandan, kurp yarıçapları hattın ilk inşası sırasında optimum değerlerde tasarlanmış olsa bile, bu değerlerin zamanla korunması her zaman mümkün olmayabilmektedir. Özellikle balastlı hatlarda, uzun süreli tekrarlı yüklemeler ile termal genleşme ve büzülme yanıl hat kaçmalarına neden olabilmektedir. Ayrıca, bakım ve revizyon işlemleri sonrasında da kurp geometrisinde proje değerlerinden sapmalar meydana gelebilmektedir. Günümüzdeki yüksek işletim kapasiteleri göz önüne alındığında, kurp yarıçaplarının periyodik ya da gerçek zamanlı olarak izlenmesi; güvenlik, bakım planlaması ve hız/değer optimizasyonu açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir [4].

Demiryollarında kurp yarıçaplarının ölçülmesi veya belirlenmesi sırasında çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin başında, geleneksel fleş (Fransızca flèche), bir diğer deyişle versin (İngilizce versine) ölçümü gelmektedir. Bu yöntemde, belirli uzunlukta bir kiriş, kurptaki dış rayın iç tarafına yerleştirilmekte ve kirişin orta noktasının raydan olan uzaklığı ölçülmektedir [5]. Dairesel bir kurpta fleş değeri (f), kiriş uzunluğu (L) ve kurp yarıçapı (R) arasında yaklaşık olarak Denklem 1 ile verilen bir ilişki bulunmaktadır [6, 7]. Fleş yöntemiyle kurp yarıçapının belirlenmesi düşük ekipman gereksinimi açısından avantajlı olmakla birlikte; insan hatasına açıklığı, yoğun iş gücü gereksinimi ve ölçüm sırasında tren seferlerinin durdurulması gerekebileceği gibi önemli dezavantajlara da sahiptir [8].

$$f = \frac{L^2}{8R} \quad (1)$$

Bir diğer geleneksel yöntem ise jeodezik ölçümlerdir. Bu yöntemde, teodolit veya total station gibi cihazlar kullanılarak kurp boyunca defleksiyon açıları ve mesafe ölçümleri yapılmakta, ardından kurp yarıçapı hesaplanmaktadır. Günümüzde bu tür ölçümler, Amberg GRP1000 veya Trimble GEDO gibi otomatik sistemlerle milimetrik hassasiyette gerçekleştirilebilmekte olup, pek çok kuruluş tarafından mutlak referans yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajı yüksek doğruluk düzeyidir; ancak uygulamada yüksek maliyet, eğitilmiş personel gereksinimi, işlem süresinin uzunluğu ve tren trafiğinin durdurulma zorunluluğu gibi önemli sınırlamalar da bulunmaktadır [5, 8].

Demiryollarında kurp yarıçapı ölçümüne yönelik son yıllarda öne çıkan modern alternatiflerden biri, seyir halindeki trenler üzerinden yapılan ölçümlerdir. Bu ölçümler temelde iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, GNSS (Global Navigation Satellite System – Küresel Konumlama Uydu Sistemi) tabanlı analizlerdir. Bu yöntemde, trenin güzergâhı boyunca elde edilen ardışık konum koordinatlarından eğrilik türevlenmekte ve her nokta için kurp yarıçapı hesaplanmaktadır. İkinci yöntem ise IMU (Inertial Measurement Unit – Ataletsel Ölçüm Birimi) tabanlıdır. Bu yöntemde, tren gövdesine entegre edilen jiroskoplardan alınan açısal hız verileri ile hız ölçümleri birlikte değerlendirilerek gerçek zamanlı yarıçap hesaplaması yapılmaktadır [7]. Literatürde bu iki yöntem hem deneysel hem de simülasyon temelli çalışmalarla karşılaştırılmıştır [9]. Özellikle karmaşık hat kesimlerinde, gyro tabanlı yöntemin daha kararlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir; söz konusu çalışmada bu iki yöntem arasındaki maksimum fark %13,7 olarak rapor edilmiştir.

Son dönemde, kişisel taşınabilir cihazların (akıllı telefonlar ve tabletler), ray kırığı gibi önemli hat kusurlarının ya da kurp yarıçapı gibi geometrik parametrelerin ölçümünde kullanılıp kullanılamayacağına yönelik çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [10]. Örneğin, Macaristan'da

Samsung Galaxy S serisi akıllı telefonlar (Galaxy S6 – 200 Hz ve Galaxy S10 – 500 Hz örnekleme hızlarıyla), resmi Hat Ölçüm Treni (Track Recording Vehicle) üzerine yerleştirilerek demiryolu hat geometrisi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Budapeşte–Esztergom hattı üzerindeki Pilisvörösvár İstasyonu yakınında bulunan iki kısa yarıçaplı kurpta uygulanmıştır. Telefonların jiroskop verileri, 0.005–2 Hz frekans aralığında bir Cauer (eliptik) bant geçiren filtre ile işlenmiş; bu verilerden elde edilen kurp yarıçapları ile referans ölçümler arasında %0,8 ila %4,3 arasında değişen sapmalar rapor edilmiştir [11]. Elde edilen sonuçlar, bu mobil cihazların düşük maliyetli ve yaygın erişilebilir olmaları sayesinde raylı sistemlerde yardımcı tanılama araçları olarak önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir [11]. Özellikle gerçek zamanlı işleme yeteneklerinin ön plana çıktığı bu uygulamalarda; sensör kalibrasyonu, cihaz modeli farklılıkları ve GPS sinyal zayıflığı gibi etkenler ölçüm tutarlılığını ve tekrarlanabilirliğini etkilemektedir. Ancak literatürde bu sorunlara yönelik çeşitli iyileştirme önerileri sunulmakta olup, yeni çözümler geliştirilmeye devam edilmektedir [12].

Bu çalışmada, akıllı taşınabilir cihazlarla toplanan veriler standart bir analiz sürecine tabi tutularak demiryolu hatlarında kurp yarıçapının belirlenmesine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Türkçe demiryolu literatüründe bu konudaki ilk uygulamalardan biri olma niteliği taşıyan çalışmada, Python tabanlı bir algoritma kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem, hem mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek nitelikte sonuçlar üretmekte hem de ileride yapılacak araştırmalar için bir temel teşkil etmektedir.

2. Metot

Bu çalışmada veri toplama sürecinde, iOS işletim sistemine sahip ve çift frekanslı (dual frequency) hassas nokta konumlandırma özellikli GNSS çipi barındıran bir iPhone 14 Pro cihazı kullanılmıştır. Sensör verilerinin zaman senkronlu biçimde kaydedilmesini sağlayan ve RWTH Aachen Üniversitesi tarafından geliştirilen açık kaynaklı Phyphox uygulaması [10] ölçüm aracı olarak tercih edilmiştir. Uygulama ayarlarında örnekleme frekansı, cihazın desteklediği en yüksek düzeyde veri toplanmasını sağlamak amacıyla “0” değeri girilerek yapılandırılmıştır. Bu konfigürasyonla, jiroskop sensörü saniyede yaklaşık 100 örnek (100 Hz), GNSS çipi ise saniyede bir örnek (1 Hz) konum ve hız verisi sağlamaktadır. Ölçümler, Adana Belediyek ve Pozantı İstasyonları arasında; TCDD Pozantı 621 Yol Bakım Onarım Şefliği envanterinde kayıtlı bir oto drezin ile ve aynı hat kesiminde seyir halindeki Erciyes Ekspresi yolcu treni ile gerçekleştirilmiştir. Mobil cihaz, Şekil 1’de görüldüğü üzere, oto drezinde kontrol panelinin pencereye yakın bir konumuna; yolcu treninde ise 1. vagonun 12 numaralı koltuğunda, pencere kenarındaki kol dayanağı üzerine sabitlenmiştir. Sabitleme işlemi, titreşimleri absorbe etmeyen ve kolay uygulanabilen bir yapıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. İki farklı demiryolu taşıtıyla veri toplanmasının amacı, farklı süspansiyon sistemlerinin (oto drezin: klasik makaslı süspansiyon; yolcu treni: pnömatik veya helezon yaylı modern sistemler) atalet verilerine ve hesaplanan kurp parametrelerine etkisini karşılaştırmak ve geliştirilen yazılımın tekrarlanabilirliğini değerlendirmektir.



Şekil 1. Ölçüm sırasında cihaz yerleşimi: oto drezin dış görünüşü, kontrol paneli üzerindeki konum ve yolcu trenindeki sabitleme

Ölçümler, 02.04.2025 tarihinde, yağmurlu ve yoğun bulut örtüsüne sahip bir günde gerçekleştirilmiştir; böylece GNSS verilerinin zorlu hava koşullarındaki performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen iki veri seti, aynı analiz parametreleriyle Python ortamında, Jupyter Notebook arayüzü kullanılarak işlenmiş; kurplar otomatik olarak belirlenmiş ve açılal hız-zaman grafiklerinden yararlanılarak kurp yarıçapları hesaplanmıştır. İzleyen alt bölümlerde, geliştirilen kod yapısının işleyişine ilişkin teknik ayrıntılara yer verilmiştir.

2.1. Mobil cihaz montaj açısı telafisi

Mobil cihazın demiryolu düzlemine tam dik (ray düzlemiyle ortonormal) şekilde monte edilmemesi, ivme ve jiroskop verilerinde yönse hatalara yol açmaktadır. Ancak ölçüm alınan taşıtlar bu tür cihazlarla veri toplamak amacıyla tasarlanmadığı için, mobil cihazların ray düzlemine tam dik yerleştirilmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu durum özellikle yanıl ivme ve açılal hız ölçümlerinde fiziksel gerçeklikten sapmalara neden olabilmekte; dolayısıyla bu verilerin global koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir.

Hazırlanan kod yapısı, veri kaydının ilk 5 saniyesindeki ölçümleri analiz ederek trenin hareketsiz olduğunu doğrulamakta ($\text{hız} < 0.5 \text{ m/s}$ ve ≥ 20 örnek koşuluyla), bu aralıktaki ortalama ivme vektörünü yerçekimi yönü olarak kabul etmektedir. Elde edilen bu vektör, dünya koordinat sisteminde $[0, 0, 1]$ yönü ile hizalanmakta ve jiroskop verilerine bu doğrultuda bir dönüş matrisi uygulanmaktadır. Bu yöntem, literatürde özellikle giyilebilir sensörler ve atalet navigasyonu çalışmalarında yaygın olarak kullanılmakta olup [13], mobil cihaz tabanlı demiryolu hat geometrisi ölçümlerinde ise ilk kez bu çalışmada uygulanmıştır. Montaj açısına bağlı hataların doğru biçimde telafi edilebilmesi için, veri kaydı tren hareket etmeden en az 5 saniye önce başlatılmıştır.

2.2. Jiroskop kalibrasyonu

Literatürde de vurgulandığı üzere, özellikle uzun süreli açılal hız ölçümlerinde sıfır kayması (bias) ve çarpan hataları (scale factor errors) meydana gelebilmektedir [9]. Bu nedenle, kurp yarıçapı hesaplamalarında kullanılan jiroskop verilerinin bu tür sistematik hatalardan arındırılması kritik öneme sahiptir. Aksi takdirde, açılal hızlar yanlış tahmin edilecek ve kurp tespiti sağlıklı şekilde gerçekleştirilemeyecektir. Bu çalışmada, Z eksenine ait açılal hız verisinde (gyro_z) bias düzeltilmesi uygulanmıştır. Bu işlem için, trenin düşük hızda ve düz hat boyunca ilerlediği anlara ait veriler arasından ($|\text{gyro_z}| < 0.002 \text{ rad/s}$, $\text{hız} < 3 \text{ m/s}$) ortanca değeri alınmakta ve bu değeri bias olarak tüm verilerden çıkarılmaktadır. Çarpan düzeltilmesi için ise, GNSS tabanlı yön bilgisi (direction) 0.2 Hz kesim frekanslı bir alçak geçiren filtre ile süzölmekte, ardından faz sarma düzeltilmesi (unwrap) uygulanmakta ve türev alınarak GNSS yönelme hızı (yaw_rate) elde edilmektedir. Bu veri ile jiroskop verileri doğrusal regresyon analizine tabi tutularak bir ölçek çarpanı hesaplanmaktadır. Söz konusu yöntem; mobil robotlar, taşıt dinamiği ve atalet navigasyonu çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmakta olup, bu tür bir kalibrasyon ilk olarak Foxlin (1996) tarafından önerilmiştir [14].

2.3. Kurp tespiti

Hazırlanan kod yapısı, Z eksenine ait açılal hız verisini (gyro_z) analiz ederek, bu verideki değışimlere dayanarak kurp bölgelerini zaman serisi içerisinde otomatik olarak tespit etmektedir. Analiz sürecinde, açılal hız verisine düşük geçişli bir filtre uygulanmakta ve bu amaçla çeşitli kesim frekansları denenerek en tutarlı sonuçları veren değeri tercih edilmiştir. Filtrelenmiş sinyal üzerinden, ilk olarak 0.020 rad/s'lik yüksek bir eşik değeri kullanılarak ön segmentler belirlenmekte; ardından bu segmentler, 0.0005 rad/s'lik düşük eşik değeriyle genişletilmektedir. Eşik değeri, çeşitli ön denemeler sonucunda bu çalışmanın veri yapısına özgü olarak belirlenmiş olup, farklı cihaz veya ölçüm koşulları için benzer ön analizlerle kolaylıkla

güncellenebilir. Bu tür sinyal tabanlı eğri tespiti yaklaşımı, literatürde araçların şerit değiştirme ve viraj alma analizlerinde de yaygın şekilde kullanılmaktadır [15].

2.4. Kurp yarıçapı hesaplamaları

Mobil cihazlarla toplanan ham GNSS verileri ile açısal hız verilerinin doğrudan senkronize edilmesi mümkün değildir. Bunun temel nedeni, en modern mobil cihazlarda dahi GNSS çiplerinin genellikle 1 Hz'in üzerinde veri sağlayamamasıdır. Buna karşılık, açısal hız verileri bu çalışmada olduğu gibi 100 Hz gibi yüksek bir örnekleme hızıyla elde edilmektedir. Bu nedenle, her iki veri türünün senkronize edilebilmesi için örnekleme hızlarının eşitlenmesi gerekmektedir. Bu noktada iki farklı yaklaşım mümkündür: açısal hız verilerinin örnekleme azaltma (down-sampling) yöntemiyle 1 Hz düzeyine düşürülmesi ya da GNSS verilerinin örnekleme artırma (up-sampling) yöntemiyle 100 Hz düzeyine çıkarılması. Bu çalışmada, veri kaybını önlemek amacıyla ikinci yöntem tercih edilmiştir.

Senkronize edilen GNSS hız verileri (m/s) ile Z eksenine ait açısal hız verileri (rad/s) kullanılarak kurp yarıçapları hesaplanmıştır. Kod yapısında, her bir kurp segmenti için en yüksek açısal hız değerinin mutlak değeri belirlenmekte; bu andaki GNSS hız verisi (v), Z eksen açısal hızının mutlak değerine ($|w_z|$) bölünerek kurp yarıçapı (R) otomatik olarak hesaplanmaktadır (Denklem 2 [16]).

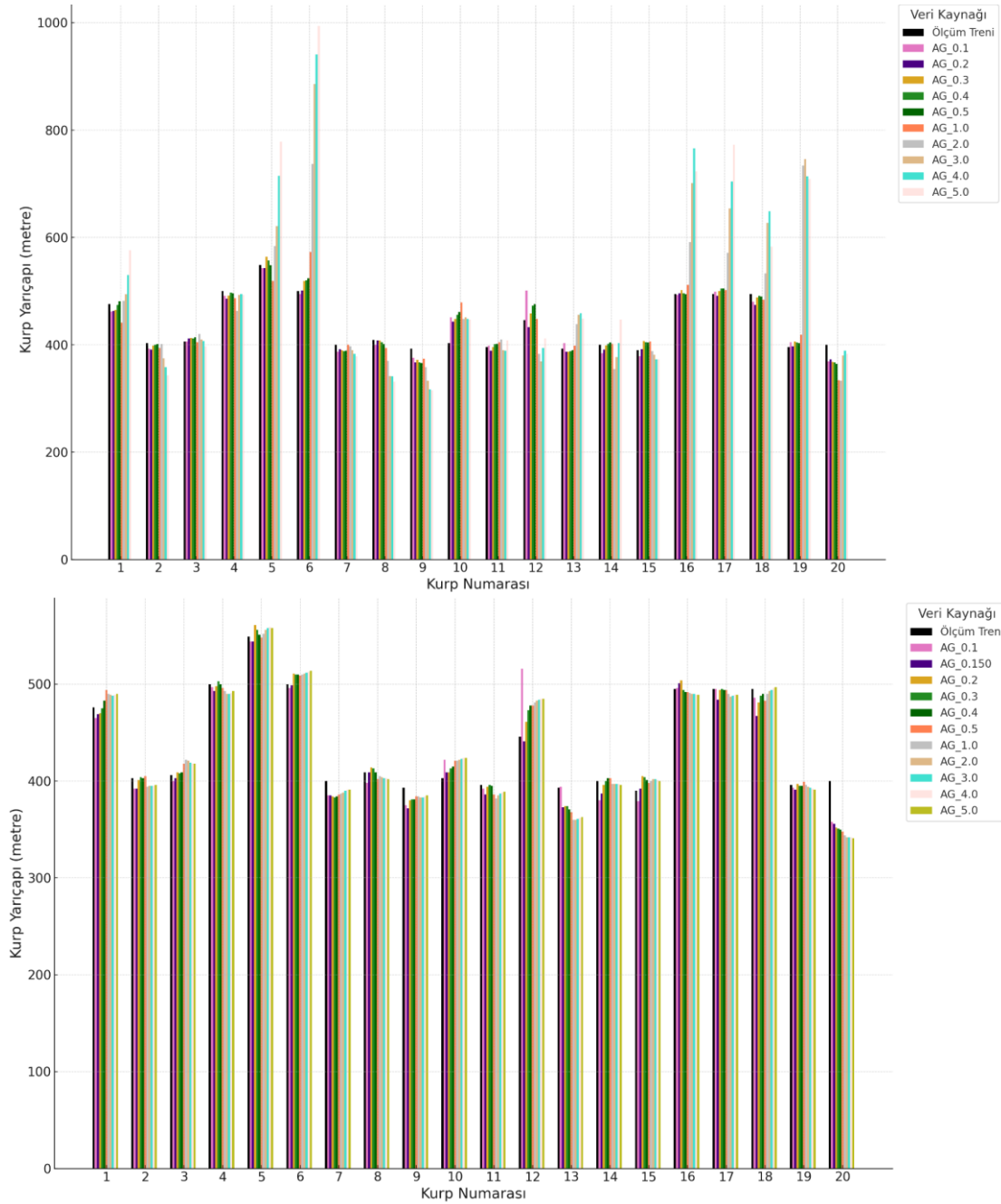
$$R = \frac{v}{|w_z|} \quad (2)$$

Geliştirilen hesaplama algoritması, Python ortamında Jupyter Notebook üzerinden iki farklı veri seti için uygulanmış ve elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, TCDD envanterine kayıtlı bir ölçüm treninden aynı hat kesiminde elde edilen veriler referans alınarak doğrulama yapılmış; önerilen yöntemin doğruluğu ve sınırlılıkları ölçüm koşulları bağlamında tartışılmıştır.

3. Bulgular

Şekil 2'de, üstte oto drezine, altta ise yolcu trenine ait veriler üzerinde uygulanan farklı alçak geçiren (AG) filtre kesim frekansları değerlerine göre hesaplanan kurp yarıçapları sunulmaktadır. Uygulanan filtre frekansları 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 ve 5.0 Hz olmak üzere toplam 10 farklı değeri kapsamaktadır. Her bir AG değeri için hesaplanan kurp yarıçapları, ölçüm treni ile elde edilen referans yarıçaplarla karşılaştırılmış ve sonuçlar, her biri 20 kurba karşılık gelen sütun grafikler şeklinde, farklı renklerle görselleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, AG filtresinin doğru seçilmesinin kurp yarıçapı hesaplamalarının doğruluğu açısından kritik olduğunu göstermektedir. Filtre frekansı optimum aralıktan uzaklaştıkça, özellikle oto drezin verilerinde referans değerlerden sapma belirgin şekilde artmaktadır. Bu fark tüm kurplarda sabit olmayıp, kısa süreli yanal salınımların arttığı bazı eğrilerde daha yüksek sapmalar gözlemlenmektedir.

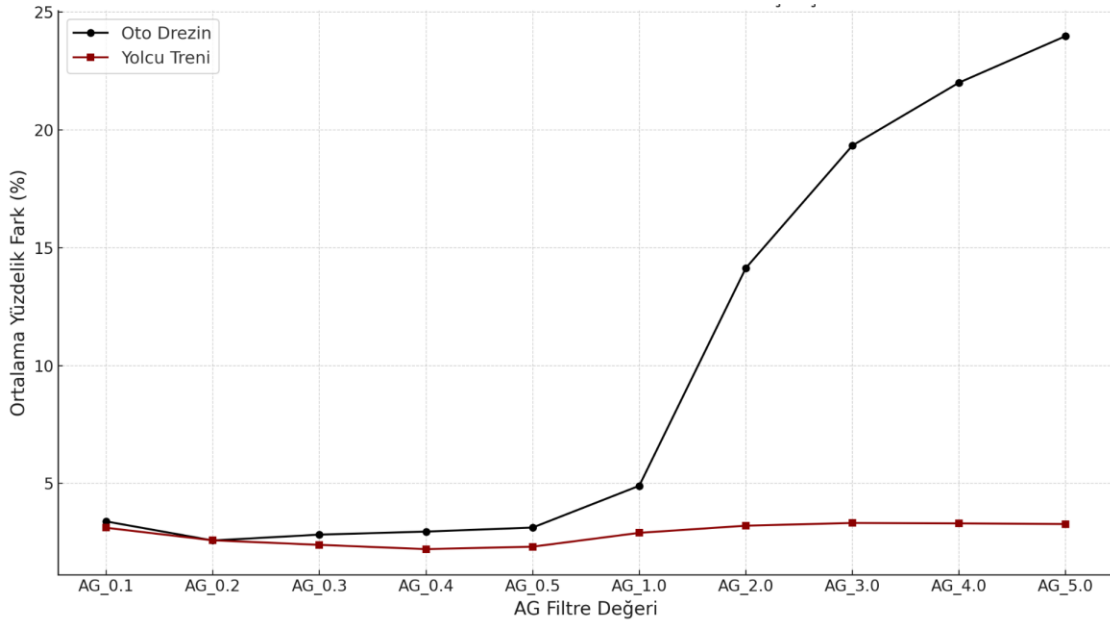
Şekil 3'te sunulan grafik, farklı alçak geçiren (AG) filtre kesim frekanslarının, her iki veri seti için hesaplanan kurp yarıçaplarının referans değerlerden ortalama yüzdelik farkı üzerindeki etkisini göstermektedir. Yüksek AG frekanslarında, özellikle oto drezin verilerinde hata oranı belirgin şekilde artmakta; 5 Hz'lik AG filtresi kullanıldığında yaklaşık %25 oranında sapma meydana gelmektedir. Bu durumun temel nedeni, oto drezinin yolcu trenlerine kıyasla daha düşük sönümlenme kapasitesine sahip aks sistemidir. Ancak uygun bir AG frekansının seçilmesiyle bu fark büyük ölçüde azaltılabilmekte ve yolcu trenine benzer doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir. Her iki taşıt için minimum ortalama sapmayı sağlayan AG değerleri yakın olmakla birlikte, oto drezin için bu değer 0.2 Hz, yolcu treni için ise 0.4 Hz olarak belirlenmiştir.



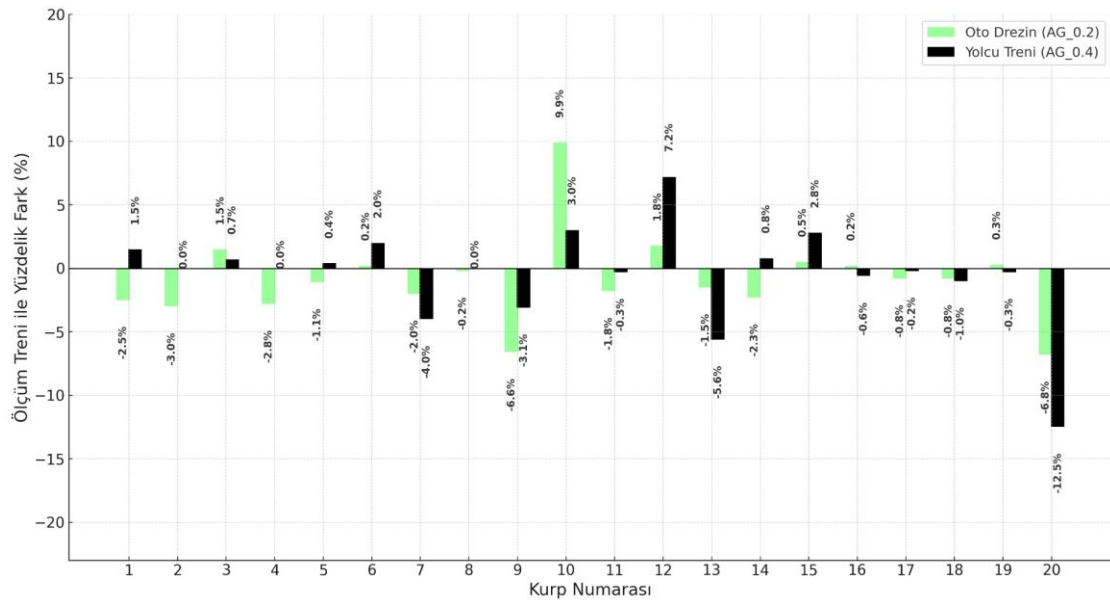
Şekil 2. Farklı alçak geçiren filtre kesim frekansları ile hesaplanan kurp yarıçaplarının karşılaştırılması (üst: oto drezin, alt yolcu treni verileri kullanılarak hazırlanmıştır)

Dikkat çeken bir diğer bulgu ise, her iki veri setinde de belirli bir optimum AG frekansının altına veya üstüne çıkıldığında sapma oranlarının yeniden artmasıdır. Bu durum, çok düşük AG frekanslarının da hatayı artırabileceğini göstermektedir. Nitekim 0.1 Hz'lik AG filtresi her iki veri setinde de sapma oranını artırmıştır. Yapılan bu ön analizler doğrultusunda, oto drezin verilerinin 0.2 Hz, yolcu treni verilerinin ise 0.4 Hz AG filtresi ile işlenmesinin, gerçek değerlere daha yakın sonuçlar ürettiği tespit edilmiş ve ilgili Python kod yapıları bu doğrultuda güncellenmiştir. Şekil 4'te sunulan grafik, filtreleme işleminde belirlenen optimum AG frekansları kullanılarak elde edilen kurp yarıçapı değerlerinin, kurplar bazında referans değerlere göre sapmalarını görselleştirmek amacıyla hazırlanmıştır. Grafik, her bir kurptaki sapma düzeylerinin önemli ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bazı kurplarda yolcu treni verileri daha düşük

sapma üretirken, bazı kurplarda oto drezin verileri daha isabetli sonuçlar sağlamıştır. Bununla birlikte, birkaç karp dışında tüm sapmalar %6–7 aralığının altında kalmıştır.

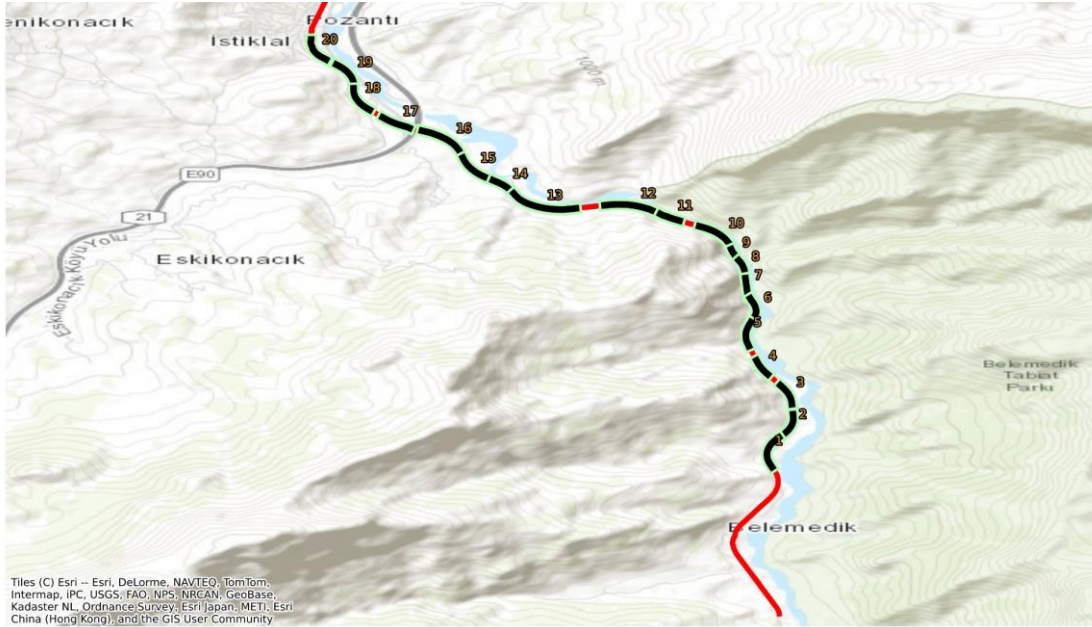


Şekil 3. Farklı AG filtre frekanslarında ortalama karp yarıçapı sapmalarının karşılaştırılması

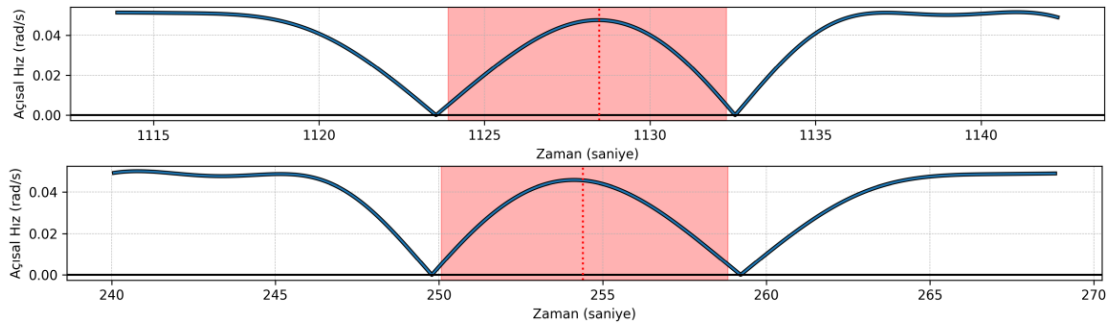


Şekil 4. Kurplar bazında referansla karşılaştırılan karp yarıçapı sapmaları (filtrelenmiş verilerle)

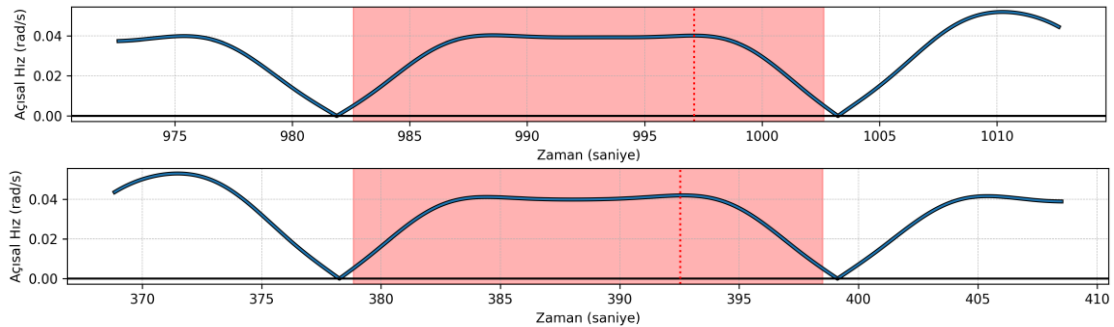
Tüm kurplar ortalaması alındığında, oto drezinle ölçülen karp yarıçaplarının referans değerlere göre ortalama %2,6, yolcu treni ile ise %2,2 oranında sapma gösterdiği hesaplanmıştır. Bazı kurplarda sapma oranı %0'a yakın çıkmış, örneğin 16. kurpta her iki taşıtta da en düşük sapma elde edilirken; en yüksek sapma 10. kurpta gözlemlenmiştir. İlgili kurpların harita üzerindeki konumları, geliştirilen Python kodu aracılığıyla otomatik olarak oluşturulmuş ve Şekil 5'te sunulmuştur. Ayrıca, bu kurplara ait ayrıntılı açısal hız–zaman grafiklerine, oto drezin ve yolcu treni verilerine karşılık gelen versiyonlarıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de yer verilmiştir.



Şekil 5. Seçilen kurpların coğrafi konumları (Python ile otomatik oluşturulmuştur)



Şekil 6. Yüksek sapma tespit edilen 10 no.lu kurba ait açışal hız–zaman grafikleri (üst: oto drezin, alt: yolcu treni veri seti)



Şekil 7. Düşük sapma tespit edilen 16 no.lu kurba ait açışal hız–zaman grafikleri (üst: oto drezin, alt: yolcu treni veri seti)

Şekil 6'dan da görülebileceği üzere, 10. kurp yaklaşık 170 metre gibi kısa bir geometrik gelişim uzunluğuna sahiptir ve kurp yarıçapına ulaşıldıktan hemen sonra çıkış bölgesi başlamaktadır. Ayrıca bu kurpta, geçiş eğrisi (transition curve) uzunluğu da oldukça sınırlıdır. Bu geometrik özellikler, mobil cihaz sensörlerinin açısız hız verisini yeterli sürede kararlı biçimde ölçmesini güçleştirmekte ve referans ölçümlerle karşılaştırıldığında sapmaların nispeten artmasına neden olabilmektedir. Geliştirilen yöntem, özellikle geçiş eğrisi ve gelişim uzunluğu sınırlı olan kurp segmentlerinde daha yüksek hata payları üretebilmektedir. Buna karşılık, en düşük sapma değeri

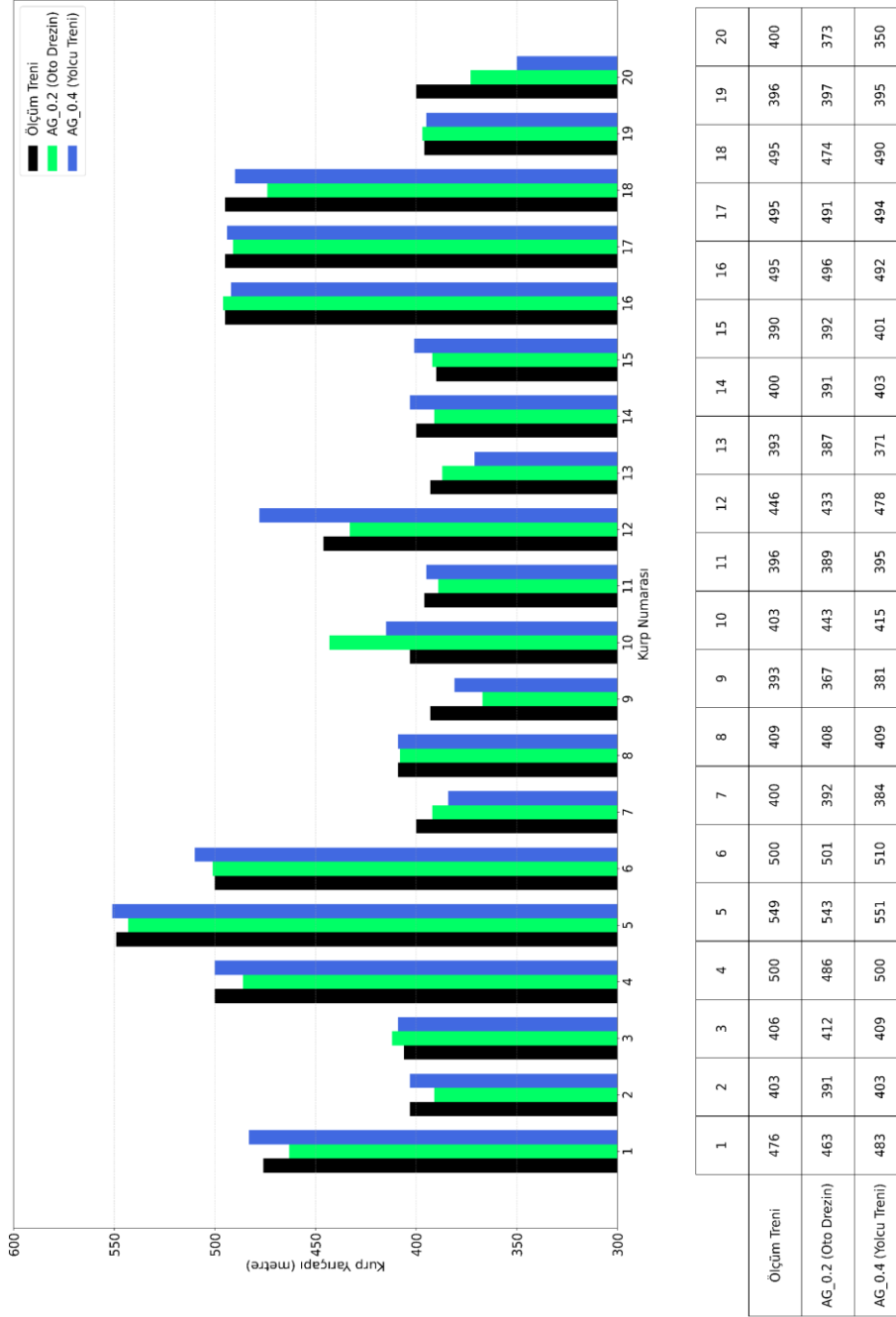
elde edilen 16. kurpta ise, geçiş eğrisi sürekliliği ve yeterli gelişim uzunluğu sayesinde mobil cihaz tabanlı hesaplamalar ile referans veriler arasında yüksek düzeyde örtüşme sağlandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, mobil ölçüm yöntemiyle yalnızca kurp yarıçapı bilgisinin değil, aynı zamanda geçiş eğrilerinin varlığı, düzgünlük ve geometrik süreklilik gibi kurp karakteristiklerinin de saniye düzeyinde izlenebildiğini ortaya koymaktadır. Bu da yöntemin hat geometrisine ilişkin daha kapsamlı bir analiz olanağı sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Şekil 8’de, ölçüm treni ile en iyi uyumu sağlayan alçak geçiren filtre kesim frekansları uygulanmış veri setleri kullanılarak hesaplanan kurp yarıçapları referans değerlerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu kapsamda, oto drezin verileri 0.2 Hz, yolcu treni verileri ise 0.4 Hz’lik alçak geçiren filtre kesim frekansı ile işlenmiş; her iki veri seti için elde edilen kurp yarıçapları, referans ölçüm treni verileriyle bar grafikler biçiminde görselleştirilmiştir. Analiz edilen toplam 20 kurp verisine ilişkin sonuçlar göstermektedir ki, ön testler ile uygun analiz parametreleri belirlendiği takdirde, mobil cihazlarla yapılan kurp yarıçapı ölçümleri referans verilere oldukça yakın ve karşılaştırılabilir sonuçlar sunabilmektedir. Bu yönüyle yöntem, demiryolu hat geometrisinin izlenmesi ve değerlendirilmesinde tamamlayıcı nitelikte, ekonomik ve pratik bir ölçüm yaklaşımı sunmaktadır. Elde edilen sapma değerleri, literatürde modern GNSS ve IMU tabanlı sistemlerle kaydedilen %13,7’ye kadar ulaşan hata oranları [9] ve mobil cihazlarla yapılan önceki çalışmalarda bildirilen %0,8–%4,3 aralığındaki sapmalar [10] ile kıyaslandığında, başarılı bir doğruluk düzeyine işaret etmektedir. Bu çalışmada, tüm kurplar ortalaması alındığında, oto drezinle elde edilen kurp yarıçaplarının referans değerlere göre ortalama %2,6; yolcu treni verilerinde ise %2,2 oranında sapma gösterdiği hesaplanmıştır. Bazı kurplarda sapma oranı %0’a yaklaşırken, en yüksek sapma %12,5 olarak kaydedilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, mobil cihazlardan elde edilen atalet verileri (IMU) ve küresel konumlama sistemi (GNSS) ölçümleri, demiryolu kurplarının tespiti ve yarıçaplarının hesaplanmasında alternatif bir yöntem olarak kullanılmıştır. GNSS örnekleme hızının düşük olması nedeniyle, jiroskop verileriyle zaman senkronizasyonu sağlamak için interpolasyon tabanlı bir örnekleme artırma (up-sampling) tekniği uygulanmıştır. Z eksenine ait açısal hız verisi (gyro_z), düşük geçişli filtreleme (low-pass filtering) sonrasında değerlendirilmiştir; kurp segmentasyonu ise eşik tabanlı sinyal ayırıştırma algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Ardından, GNSS hız verisinin mutlak açısal hıza bölünmesiyle kurp yarıçapları gerçek zamanlı olarak tahmin edilmiştir. Veriler, Adana Belediyek-Pozantı demiryolu kesiminde, farklı süspansiyon sistemlerine sahip iki taşıt (drezin ve yolcu treni) kullanılarak toplanmış, Python programlama dili aracılığıyla Jupyter Notebook ortamında analiz edilmiştir. Alçak geçiren filtrenin kesim frekansı üzerine yapılan parametrik analizlerde, drezin verileri için en uygun frekans 0.2 Hz, yolcu treni için ise 0.4 Hz olarak belirlenmiştir. Bu değerler referans ölçüm treni verileriyle yapılan karşılaştırmalarla doğrulanmıştır. Yirmi farklı kurpta gerçekleştirilen analizler sonucunda, ortalama sapma oranı drezin verisinde %2,6; yolcu treninde ise %2,2 olarak hesaplanmıştır. Kurpların büyük çoğunluğunda sapma oranları %6’nın altında kalmıştır. Ancak, geçiş eğrisi (transition curve) ve gelişim uzunluğu (curve development length) kısa olan kurplarda, mobil cihaz tabanlı hesaplamalarda hata oranlarının nispeten arttığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, geçiş eğrisi uzunluğu ve gelişim mesafesi daha yüksek olan kurplarda, mobil cihaz verilerinin referans sistemlerle daha yüksek düzeyde örtüştüğü belirlenmiştir. Ayrıca açısal hız-zaman grafikleri üzerinden, yalnızca yarıçap değil, aynı zamanda geçiş eğrisi varlığı, yön değişim karakteristiği ve kurp profili sürekliliği gibi geometrik detaylara da erişilebilmiştir. Elde edilen bulgular, taşınabilir cihazlarla gerçekleştirilen bu yöntemin, demiryolu hat geometrisinin düşük maliyetli, erişilebilir ve tren trafiğini aksatmadan, normal işletim koşulları altında uygulanmasına olanak tanıyan bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, sensör kalibrasyon gereksinimi ile sinyal zayıflamasının yaşandığı güzergâh kesimlerinde veri tutarlılığının azalması, yöntemin mevcut sınırlılıkları arasında yer almaktadır.

Gelecekte, daha yüksek frekanslı GNSS modülleri, çok eksenli filtreleme algoritmaları, eğri tespiti için makine öğrenmesi temelli sınıflandırıcılar ve sensör füzyonuna dayalı sistemlerle bu yöntemin doğruluğu ve yaygınlığı artırılabilir. Ayrıca, mobil cihaz tabanlı gerçek zamanlı hat izleme uygulamalarının geliştirilmesiyle, bu tür düşük maliyetli çözümler sahada mühendislik kararlarını destekleyici bir bileşen haline gelebilecektir.



Şekil 8. Mobil cihaz verileriyle hesaplanan kırp yarıçaplarının referans değerlerle karşılaştırılması

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ile Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından 1001 – UDAP Programı kapsamında, 124M618 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, sağlanan bu değerli destek için ilgili kurumlara ve yetkililerine teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] W. M. Zhai ve K. Y. Wang, “Lateral interactions of trains and tracks on small-radius curves: Simulation and experiment,” *Vehicle Syst. Dyn.*, cilt 44, sayı Suppl. 1, ss. 520–530, 2006, doi: 10.1080/00423110600875260.
- [2] H. Li, J. Sun ve G. Zhao, “Research on rail wear of small radius curve in EMU depot,” *Railway Sci.*, sayı 1, ss. 16–39, 2022, doi: 10.1108/rs-04-2022-0014.
- [3] A. Çoşkun, “Demiryollarında geçiş eğrileri ve dever uygulamaları,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı 5, ss. 57–59, Haz. 2017.
- [4] C. Esveld, *Modern railway track*, 2. baskı. Zaltbommel, Hollanda: MRT-Productions, 2001.
- [5] Wikipedia, “Hallade method,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Hallade_method. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2025.
- [6] PWayBlog, “The versine formulae,” 2016. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://pwayblog.com/2016/05/09/the-versine-formulae/>. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2025.
- [7] Trackopedia, “Versine measurement,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.trackopedia.com/en/encyclopedia/maintenance-of-way/track-measurements/versine-measurement>. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2025.
- [8] Q. Chen, X. Niu, L. Zuo, T. Zhang, F. Xiao, Y. Liu ve J. Liu, “A railway track geometry measuring trolley system based on aided INS,” *Sensors*, cilt 18, sayı 2, s. 538, Şub. 2018, doi: 10.3390/s18020538.
- [9] Y. Zhou, Y. Yang, Z. Ren ve M. Hecht, “Estimating railway track curvature using gyroscope and GPS sensors,” *Sci. Rep.*, cilt 15, makale no. 8037, 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91255-x>.
- [10] F. Çeçen, “Demiryollarında ray kırılmalarının, ani rijitlik değişimlerinin ve geometrik süreksizliklerin akıllı telefonlarla, seyir hâlinde ölçümler alınarak, sürekli takibi,” *Demiryolu Dergisi*, sayı 20, ss. 54–66, Tem. 2024, doi: 10.47072/demiryolu.1464183.
- [11] Á. Vinkó, T. Simonek, C. Ágh, A. Csikós ve B. Figura, “Feasibility of onboard smartphones for railway track geometry estimation: Sensing capabilities and characterization,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, cilt 67, sayı 1, ss. 200–210, 2023, doi: 10.3311/PPci.20187.
- [12] J. S. Wood ve S. Zhang, “Identification and calculation of horizontal curves for low-volume roadways using smartphone sensors,” *Transp. Res. Rec.*, cilt 2672, sayı 39, ss. 1–9, Nis. 2018, doi: 10.1177/0361198118759005.
- [13] A. M. Sabatini, “Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, cilt 53, sayı 7, ss. 1346–1356, Tem. 2006, doi: 10.1109/TBME.2006.875664.
- [14] E. Foxlin, “Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter,” in *Proc. Virtual Reality Annu. Int. Symp.*, Santa Clara, CA, USA, 1996, pp. 185–194.
- [15] C. Roberts vd., “Curve negotiation monitoring for railway vehicles using onboard inertial sensors,” *Vehicle Syst. Dyn.*, cilt 48, sayı S1, ss. 529–544, 2010.
- [16] J. Pombo vd., “Onboard measurement of railway vehicle dynamic behaviour,” *Measurement*, cilt 44, sayı 6, ss. 1044–1057, 2011.

Özgeçmiş

**Ferhat ÇEÇEN**

TCDD’de geçen 16 yıllık hizmeti akabinde, Süleyman Demirel Üniversitesinde Dr. Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Demiryollarında vibro-termal analizlerle yenilikçi çözümler geliştirilmesi, depreme dayanıklılığının artırılması ve milli demiryolu traversleri geliştirilmesi konulu araştırmaları devam etmektedir. E-Posta: cecenferhat@sdu.edu.tr

**Erdal MELEMEZ**

Meslek yaşamına 1999 yılında TCDD’de başlayan yazar, lisans eğitimini 2021 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2025 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Ulaştırma Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamış olup, halen TCDD Pozantı 62 Demiryolu Bakım Müdürlüğü’nde Yol Bakım Şefi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: erdalmelemez@tcdd.gov.tr

**Bekir AKTAŞ**

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde görev yapan yazarın, Ulaştırma mühendisliği, karayolu ve demiryolu üstyapısı ile ilgili çalışmaları bulunmaktadır. Akademik kariyeri boyunca birçok ulusal ve uluslararası bilimsel çalışma yapmış olup ayrıca tescillenmiş 2 adet patenti bulunmaktadır. Dirençli ve sürdürülebilir ulaştırma üstyapısı geliştirilmesi konularında araştırmaları devam etmektedir.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

**Recep Koray KIYILDI**

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 1991 yılında mezun olmuş, yüksek lisans ve doktora derecelerini Süleyman Demirel Üniversitesi’nde sırasıyla 1996 ve 2005 yıllarında tamamlamıştır. 2010 yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı’nda öğretim üyesi olarak görev yapmakta; ulaştırma mühendisliği, trafik analizi ve altyapı performansı konularında çeşitli ulusal ve uluslararası çalışmalarda yer almaktadır.

E-Posta: rkoray@ohu.edu.tr

**Mehmet SALTAN**

1992 yılında Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun olan yazar, 1994 yılında başladığı akademik kariyeri boyunca ulaştırma ve yol mühendisliği alanlarında çok sayıda ulusal ve uluslararası çalışmaya imza atmıştır. Halihazırda Süleyman Demirel Üniversitesi Rektörü olarak görev yapan yazar, akademik yaşamı süresince birçok TÜBİTAK projesinde yer almış, mühendislik alanına önemli katkılar sunmuş ve çalışmalarına aktif olarak devam etmektedir.

E-Posta: mehmetsaltan@sdu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ferhat ÇEÇEN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Yazma – orijinal taslak hazırlama. Erdal MELEMEZ: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma – orijinal taslak hazırlama. Bekir AKTAŞ: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol. Recep Koray KIYILDI: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol. Mehmet SALTAN: Yazma – gözden geçirme ve düzenleme.

**Bulanık Modelleme ve CNN-BILSTM Ağı Kullanılarak Ray Yüzeyi Kusurlarının Tespiti ve Sınıflandırılması için Kararlı İki Aşamalı Yaklaşım**İlhan AYDIN^{*1}, Mehmet SEVİ², Erhan AKIN¹¹ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elâzığ, Türkiye² Muş Alparslan Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Muş, Türkiye

*m.sevi@alparslan.edu.tr

(Alınış/Received: 14.06.2025, Kabul/Accepted: 23.07.2025, Yayınlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Ray yüzeyindeki kusurlar, demiryolu taşımacılığını olumsuz etkileyen önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu tür kusurların zamanında tespit edilmesi, hat üzerindeki tehlikelerin belirlenmesi ve erken bakımın sağlanması sayesinde ciddi kazaların önlenmesine olanak tanır. Ancak, yüzeydeki pas ve yağ gibi safsızlıklar nedeniyle kusurların doğru şekilde tespit edilmesi oldukça zordur. Yüzey kusurlarının tespitinde temel amaç, yüksek doğruluk elde ederek gerçek kusurlar ile yalancı alarmların karıştırılmasını engellemektir. Bu çalışmada, söz konusu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla iki aşamalı, hızlı bir ray yüzeyi kusur tespit yöntemi önerilmektedir. İlk olarak, demiryolu görüntüsünde rayları içeren piksellerin farklılıkları analiz edilerek ray çıkarımı gerçekleştirilir. Daha sonra, ön işleme adımıyla oluşabilecek gürültüler giderildikten sonra, sağlam bir ray görüntüsünün histogramı bulanık üyelik fonksiyonu kullanılarak modellenir. Kusurlu ray, bu bulanık üyelik değerlerine göre bölütlenir ve kusur olup olmadığı belirlenir. Kusur türünün sınıflandırılmasında ise Evrişimsel Sinir Ağı- Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (CNN-BILSTM) yöntemi kullanılır. Önerilen yüzey kusur tespit yöntemi, iki farklı kıyaslama veri kümesinde (Rail Surface Defect Datasets - RSDD-I/II) mevcut yöntemlerden daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca, kusur türünü belirlemede %98,00 oranında tanıma başarısı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Görüntü Segmentasyonu, Bulanık Ölçüm, Evrişimsel Sinir Ağları, Yüzey Kusurları, Kusur Tespiti.

A Stable Two-Stage Approach for Detection and Classification of Rail Surface Defects Using Fuzzy Modeling and CNN-BILSTM Network

Abstract: Surface defects on railway tracks pose a significant challenge that adversely affects railway transportation. Timely detection of such defects enables the identification of potential hazards on the track and facilitates early maintenance, thereby preventing serious accidents. However, accurate detection of these defects is quite difficult due to surface impurities such as rust and oil. The primary objective in detecting surface defects is to achieve high accuracy to prevent confusion between actual defects and false alarms. In this study, a fast, two-stage method for detecting rail surface defects is proposed to address these challenges. First, rail extraction is performed by analyzing the differences in pixels containing rails in railway images. Then, after eliminating noise that may occur during the preprocessing step, the histogram of a sound rail image is modeled using a fuzzy membership function. The defective rail is segmented based on these fuzzy membership values to determine the presence of a defect. For the classification of defect types, a Convolutional Neural Network–Bidirectional Long Short-Term Memory (CNN-BILSTM) method is employed. The proposed surface defect detection method has demonstrated superior performance compared to existing methods on two benchmark datasets (Rail Surface Defect Datasets – RSDD-I/II). Furthermore, a classification accuracy of 98.00% was achieved in identifying defect types.

Keywords: Railway, Image Segmentation, Fuzzy Measure, Convolutional Neural Networks, Surface Defects, Defect Detection

Atıf için/Cite as: İ. Aydın, M. Sevi, E. Akın, “Bulanık modelleme ve CNN-BILSTM ağı kullanılarak ray yüzeyi kusurlarının tespiti ve sınıflandırılması için kararlı iki aşamalı yaklaşım,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 58-75, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1719591

1. Giriş

Raylar, demiryolu sistemlerinde ulaşım güvenliğini sağlamak açısından kritik bileşenlerdir. Demiryolu taşımacılığı sistemlerinde yüksek hızlı tren hatlarının inşası ve kullanımının artması, vagonların ray yüzeyinde oluşturduğu gerilme, zorlu çalışma koşulları ve yoğun kullanım gibi etkenler, raylarda kusur oluşma olasılığını artırmaktadır [1]. Bu kusurların erken aşamada tespit edilememesi durumunda, zamanla ilerleyerek ciddi kazalara yol açabilmektedir [2]. Bu nedenle, demiryolu hatlarının periyodik olarak denetlenmesi ve bakımlarının yapılması, daha büyük kusurların oluşmasının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Raylarda meydana gelen kusurlar; Göçme (squattening), ezilme (crushing), dalgacık oluşumu (corrugation), ardışık raylar arasındaki boşluklar (gaps) ve ray çatlakları (rail cracks) gibi gruplarda sınıflandırılabilir [3]. Geleneksel, insan tabanlı kontrol sistemleri, deneyime dayalı olmaları, yavaş işlemleri ve hata yapma olasılıklarının yüksek olması nedeniyle ray kusurlarının tespitinde pratik değildir [4]. Ayrıca, ray denetimleri genellikle gece saatlerinde gerçekleştirildiğinden, personel güvenliği ve düşük görüş koşulları yanlış tespitlere yol açabilmektedir. Sensör tabanlı yöntemler; ultrasonik dalgalar [5], eddy current (foucault akımı) [6] ve lazer teknolojileri [7] gibi teknikleri kullanmaktadır. Ancak bu yöntemler, yüksek sensör güvenilirliği gerektirmesi ve sahada uygulanmalarının zorluğu gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle, otomatik olarak çalışabilen hızlı ve güvenilir ray kusur tespit sistemlerinin geliştirilmesi gereklidir.

Görsel tabanlı teknikler, ray bileşenlerindeki kusurların tespitine yönelik temassız denetim yöntemleri arasında önemli bir yer tutmakta olup, son yıllarda araştırmacılar tarafından giderek daha fazla kullanılmaktadır [8]. Zhuang ve ark. [1], sağlıklı ve kusurlu rayların ayırt edilmesi ve kusur türünün tanınması amacıyla kademeli bir derin öğrenme yöntemi önermiştir. Bu yöntem, kusur sınıflandırması için derin evrimsel sinir ağı ile görüntü işleme tabanlı özellikleri birleştirmektedir. Ray yüzeyindeki kusurlar, demiryolu sistemlerinin kalite ve güvenliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Ancak, ray kusurlarının çeşitli ve rastlantısal yapısı nedeniyle, bu tür yüzey kusurlarının tespiti oldukça zorlu bir süreçtir.

Wang ve ark. [9], ray kusurlarını tespit etmek amacıyla Mask-R-CNN tabanlı yeni bir yüzey kusur tespit ağı önermiştir. Bu ağ, çok ölçekli füzyon için tasarlanmış yeni bir özellik piramidi ile yapılandırılmıştır. Deneysel değerlendirme sonuçları, önerilen modelin oluşturulan veri kümesinde ortalama doğruluk (mAP) oranı olarak %98,70'e ulaştığını ve kusurların konumlarını daha hassas şekilde belirleyebildiğini göstermektedir. Başka bir çalışmada, Gan ve ark. [10], ön bilgiye ihtiyaç duymadan arka plan modelleme yoluyla ray yüzeyi kusurlarını tespit edebilen arka plan odaklı bir kusur tespit yöntemi önermiştir.

Yang ve ark. [2], ray yüzeyi kusurlarını tespit etmek için segmentasyon ve sinir ağı tabanlı bir yaklaşım geliştirmiştir; bu çalışmada dört farklı kusur türü tanımlanmıştır. Önerilen model, segmentasyon doğruluğunu artırmak amacıyla tam bağlantılı katmanı ortadan kaldırmıştır. Ayrıca, ray yüzeyi kusurlarını hassas şekilde bölütlemek amacıyla Gauss karışım modeli ve eğrilik filtresi tabanlı bir yöntem sunulmuştur [11]. Bu yöntemde, görüntü ön işleme ve ray yüzey alanının çıkarılmasının ardından, komşu pikseller Gauss yöntemi ile modellenmiştir.

Zhang ve ark. [12], az örnek içeren veri kümelerinde ray yüzeyi kusurlarını tespit etmek için CNN ve LSTM tabanlı bir yöntem önermiştir. Bu yaklaşım, ardışık piksellerin satır düzeyinde etiketlenmesini ve segmentasyon sırasında kusurlu satırların tamamının bölütlenmesini içermektedir. Her ne kadar bu yöntem az örnekli durumlarda etkili sonuçlar sunsa da, kusurun boyutunu belirleyememekte ve türünü tanıyamamaktadır. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, yakın zamanda yapılan bir çalışmada koşullu rastgele alanlar (CRF) ile evrimsel sinir ağlarının birleştirildiği bir yaklaşım önerilmiştir [13]. Önerilen çift yönlü evrimsel sinir ağı modeli, biri

anlamsal anlamı yakalamaya, diğeri ise küçük kusurları tespit etmeye yönelik iki bölümden oluşmaktadır. CRF yöntemi ile CNN'in birleşimi sayesinde kusurlar daha hassas bir şekilde analiz edilebilmektedir.

Wu ve ark. [14], ray yüzeyi kusurlarını tespit etmek için segmentasyona dayalı hibrit bir derin öğrenme yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemde, belirginlik (saliency) tahmini için ray sınırlarını tanımlayan bir kılavuz ağ oluşturulmakta, ardından klasik görüntü işleme teknikleri ile kusurlar tespit edilmektedir. Yang ve ark. [15], karmaşık ortamlarda ray yüzeyi kusurlarını tespit etmek için derin öğrenme ve makine görüşü tabanlı bir yaklaşım sunmuştur. Bu çalışmada, ray tespiti için kenar piksellerinin standart sapması kullanılmakta, ardından Grabcut segmentasyonu ile kusur bölütlemesi yapılmakta ve tespit edilen kusurlar YOLOv2 algoritması ile konumlandırılmaktadır.

Ray yüzeyindeki farklı kusurların doğru şekilde tespit edilebilmesi için topluluk öğrenmesine dayalı bir nesne tespit yaklaşımı önerilmiştir [16]. Bu yaklaşım, tespit performansını artırmak amacıyla çok omurgalı (multi-vertebrate) bir topluluk yöntemi kullanmaktadır. Aydın ve Akın [17], ray yüzeyi kusurlarını tanıma yönelik iki aşamalı bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, kusur tespiti için görüntü işleme ve bulanık mantık sistemleri, kusur türünün belirlenmesi için ise transfer öğrenme kullanılmıştır. Başka bir çalışmada, Tu ve ark. [18], ray bağlantı elemanları ve ray yüzeyine ilişkin kusurları tespit etmek için derin öğrenme tabanlı bir yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmada, ray ve bağlantı elemanlarının tespiti için YOLACT tabanlı bir segmentasyon algoritması kullanılmakta, segmentasyonu yapılan ray yüzeylerinde kusur tespit edilirse, kusur türünü belirlemek için Mobilenetv2 yöntemi devreye sokulmaktadır. Aydın ve ark. [19] ise, Mobilenetv2 ve SqueezeNet derin sinir ağı modellerinden elde edilen özellikleri birleştirerek, bu özellikleri destek vektör makineleri (SVM) ile sınıflandırmış ve ray yüzeyindeki dört farklı kusur türünü ayırt edebilen bir veri kümesi oluşturmuştur.

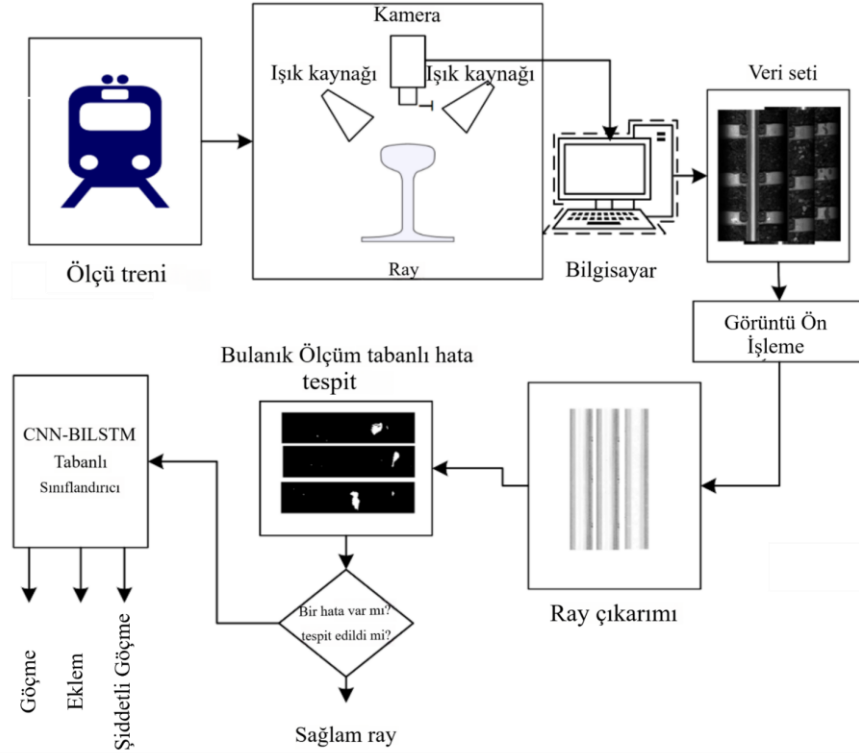
Birçok çalışma, ray yüzeyinde kusur olup olmadığını yalnızca görüntü segmentasyonu tabanlı yaklaşımlar kullanarak analiz etmiş; ancak kusur türünü incelememiştir. Diğer bazı çalışmalar ise kusur türünü belirlemek amacıyla derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yaklaşımları önermiştir. Bu çalışma ise hem tespit hem de sınıflandırma görevlerini iki aşamalı bir yaklaşımla ele almaktadır. İlk olarak, ray görüntüsünden ray yüzeyi bölgesi çıkarılmaktadır. Ardından, ön işleme aşamasında kusurların belirginleştirilmesi için bulanık üyelik modellemesi kullanılarak yüzeyde kusur olup olmadığı tespit edilmektedir. Eğer kusur tespit edilirse, geliştirilen CNN-BILSTM yaklaşımı aracılığıyla kusurun türü belirlenmektedir. Önerilen çalışmanın katkıları aşağıda sunulmaktadır:

- Ray çıkarımı, kusur segmentasyonu ve kusur türü tanıma işlemlerini otomatikleştirmek amacıyla sağlam bir ray yüzeyi kusur tespit algoritması önerilmiştir.
- Önerilen bulanık modelleme tabanlı kusur tespit yaklaşımında, yalnızca tek bir sağlıklı ray yüzeyi görüntüsü kullanılarak elde edilen model ile kusurlu raylar başarılı bir şekilde bölütlenmektedir.
- Görüntü ön işleme ve bulanık modellemenin birleştirilmesiyle, gri seviye görüntülerde piksellerin kusurlu bir duruma ait olup olmadığı öngörülebilmektedir.
- Önerilen yaklaşım, düşük çözünürlüklü görüntülerde birçok farklı kusur türünü yüksek doğrulukla tespit edebilmektedir.
- Kusur türü belirlendikten sonra, geliştirilen CNN-BILSTM yaklaşımı ile doğru bir şekilde sınıflandırılmaktadır.

Çalışmanın yapısı şu şekildedir: Bölüm 2, önerilen iki aşamalı yaklaşıma ilişkin ayrıntılı bir giriş sunmaktadır. Bölüm 3'te, demiryolu raylarındaki kusurların tespiti ve tanınmasına yönelik deneysel sonuçlar ele alınmaktadır. Sonuçlara ise Bölüm 4'te yer verilmektedir.

2. Metot

Önerilen sistem iki ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada ray tespiti yapılmakta, ardından ön işleme ve bulanık modelleme tabanlı kusur segmentasyonu gerçekleştirilmektedir. İlk adımda bir kusur tespit edilirse, kusur türünün belirlenmesi için CNN-BILSTM modeli kullanılmaktadır. Önerilen sistemin blok diyagramı Şekil 1’de sunulmuştur. Sistem, görüntü toplama, ön işleme, bulanık modelleme ile kusur tespiti ve CNN-BILSTM tabanlı sınıflandırma aşamalarını kapsamaktadır.



Şekil 1. Önerilen iki aşamalı ray yüzeyi kusur tespiti ve sınıflandırma sistemine ait blok diyagram

Şekil 1’de gösterilen blok diyagramda, görüntüler uygun aydınlatma koşulları altında yüksek hızlı bir kamera kullanılarak ölçüm treni üzerinden elde edilmekte ve bir bilgisayarda depolanmaktadır. Oluşturulan veri setinde, görüntü ön işleme işleminin ardından ray çıkarımı gerçekleştirilmektedir. Elde edilen ray görüntüsünde, bulanık modelleme yöntemi kullanılarak kusur bölgeleri bölütlenmektedir. Eğer kusur tespit edilirse, önerilen evrişimsel sinir ağı modeli kusur türünün sınıflandırılması için kullanılmaktadır.

2.1. Görüntü ön işleme ve ray çıkarımı

Ölçüm treninden görüntü alınırken genellikle bir aydınlatma sistemi kullanılmasına rağmen, çevresel koşullar ve gün ışığı etkileri nedeniyle görüntülerde hâlen gürültü bulunabilir. Bu nedenle, belirli türdeki gürültüleri gidermek amacıyla bir görüntü ön işleme aşaması gereklidir. Önerilen yöntemde, ray desenini güçlendirmek ve ray hattını çıkarmak için 2 boyutlu (2D) Gabor filtresi kullanılmıştır. Gabor filtresi, görüntüyü filtrelemek için (1)-(4) numaralı denklemlerde verilen filtreyi uygulamıştır.

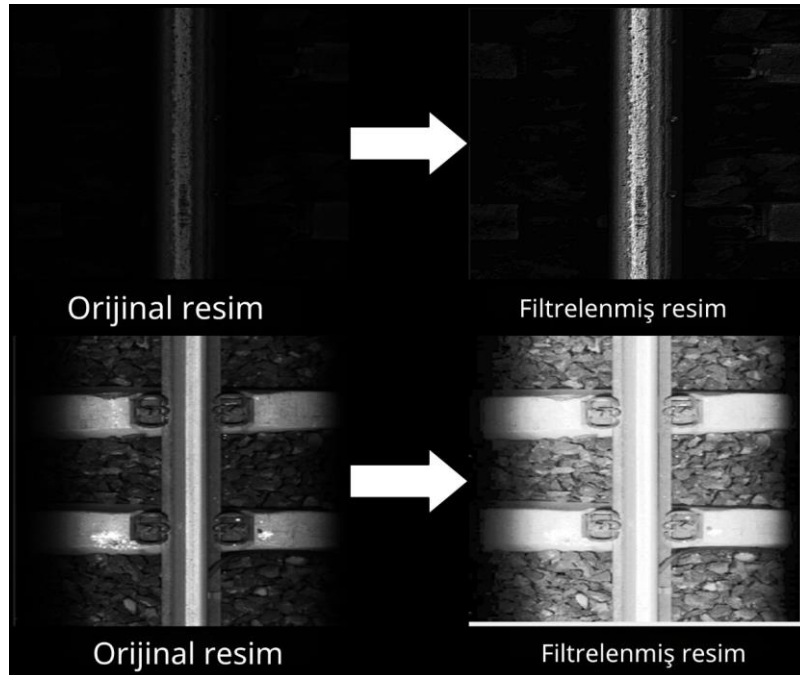
$$G(x, y) = \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_{\theta}^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_{\theta}^2}{\sigma_y^2} \right) \right) \cos \left(\frac{2\pi x_{\theta}}{\lambda} + \Psi \right) \quad (1)$$

$$x_{\theta} = x \cos(\theta) - y \sin(\theta) \quad (2)$$

$$y_{\theta} = x \sin(\theta) + y \cos(\theta) \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sigma, \sigma_y = \sigma/\gamma \quad (4)$$

(1) numaralı denklemde, $G(x,y)$ önerilen yöntemde kullanılan iki boyutlu Gabor filtresini temsil etmektedir. Gabor filtresi beş parametreden oluşmaktadır: Gauss dağılımının standart sapması (σ), sinüs dalga boyu (λ), mekânsal en-boy oranı (γ), sinüzoidal fonksiyonun faz ofseti (Ψ) ve Gabor fonksiyonunun normali ile paralel şeritler arasındaki yönelim açısı (θ). Gabor filtresi, giriş görüntüsüne θ yönünde bir alçak geçiren filtre uygulayarak [20] ray görüntüsünün doğruluğunu artırmaktadır. Şekil 2, iki farklı ray görüntüsü için Gabor filtresi sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 2. Gabor filtresi uygulanmadan önceki orijinal ray görüntüleri ve filtre sonrası iyileştirilmiş çıktılar

Şekil 2, Gabor filtresinin uygulanmasından önce ve sonra ray yüzeyinin görüntüsünü göstermekte olup, filtre görüntünün netliğini artırmaktadır. Ön işleme sonrasında ray kenarlarının tespiti için bir algoritma önerilmiştir. Bu yaklaşım, her sütundaki gri piksel değerlerini sırasıyla elde etmekte ve sütun değerlerinin toplamı arasındaki farkı hesaplayarak ray kenarlarını belirlemektedir. Ayrıca, kenar tespiti işlemi standart sapma değeri kullanılarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Önerilen ray çıkarım algoritması Şekil 3'te gösterilmiştir.

```

Girdi: Orijinal bir giriş görüntüsü I

Çıktı: Ayıklanmış ray bölgesi Ir

[r, c] ← I görüntüsünün satır ve sütun sayıları

H ← sıfırlardan oluşan 1 × c boyutlu bir dizi

c sütunları üzerinde döngü:
  toplam ← 0
  r satırları üzerinde döngü:
    toplam ← toplam + I(i, j)
  döngü sonu
  H(j) ← H(j) + toplam
döngü sonu

D ← sıfırlardan oluşan 1 × (c-1) boyutlu dizi
STD ← sıfırlardan oluşan 1 × c boyutlu dizi

c sütunları üzerinde döngü:
  D(i) ← |H(i) - H(i-1)|
  STD(i) ← I(:, i) sütununun standart sapması
döngü sonu

leftB ← D dizisindeki en yüksek iki değerin daha küçük indeksi

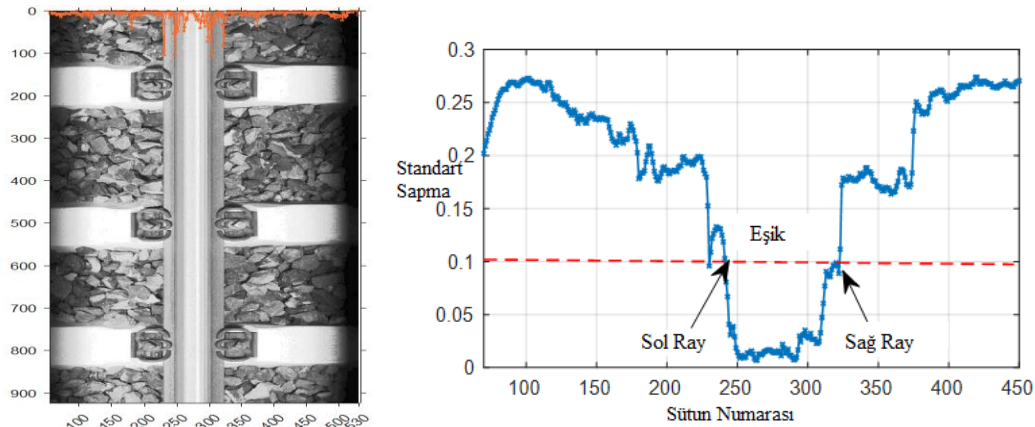
S ← STD(leftB : c) < eşik değeri
rightB ← leftB + S içindeki **doğru** (true) değerlerin toplamı

Ir ← I(1:r, leftB : rightB) // Belirlenen sütun aralığındaki ray bölgesi

```

Şekil 3. Ray kenarlarının belirlenmesi için geliştirilen algoritmanın sözde kodu

Şekil 3'te alınan gri tonlamalı görüntüde, her sütundaki piksel değerleri hesaplanmaktadır. Ardından, ardışık sütunlardaki piksel değerlerinin toplamalarının ardışık farkları alınarak rayın sol ve sağ sınırları belirlenmektedir. Rayın sol sınırı net bir şekilde tanımlanırken, elde edilen görüntülerdeki düzensiz ışık dağılımı sağ ray sınırının belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, sağ ray sınırını seçmek için sol ray sınırından itibaren standart sapma değeri ile bir eşik değeri karşılaştırılmaktadır. Şekil 4, görüntüye uygulanan ray çıkarım algoritmasını göstermektedir.

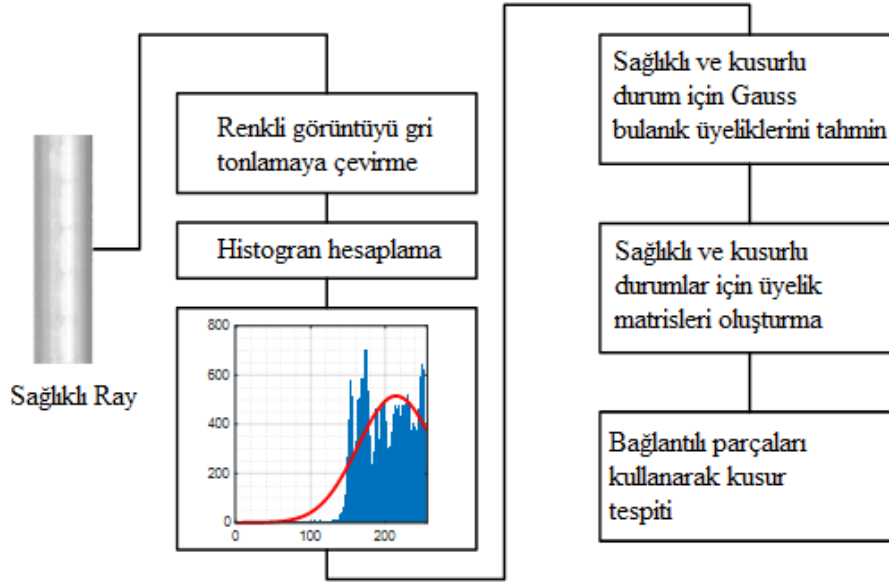


Şekil 4. a) Ray görüntüsü ve hesaplanan D sinyali b) Her sütunun standart sapma değerleri

Şekil 4.a)'da ray çıkarım algoritmasında D sinyali elde edildikten sonra, en yüksek iki D sinyali değeri arasından daha düşük indeks değerine sahip olan seçilmektedir. Daha sonra, sol ray kenarından görüntünün sonuna kadar her sütun için hesaplanan standart sapma değerleri bir eşik değerinin altında toplanarak sağ ray kenarı belirlenmektedir. Elde edilen ray görüntüsü çıkarılarak bir dizine kaydedilmektedir.

2.2. Bulanık modelleme tabanlı kusur tespiti

Önerilen kusur tespit yaklaşımı, sağlıklı ray yüzeyini modellemek için bulanık ölçüm yöntemini kullanmaktadır. Özellikle, sağlıklı ray görüntüsünün histogramı Gauss fonksiyonu ile modellenmektedir. Aynı zamanda, sağlıklı ray yüzeyi modeli dışındaki alan da ayrı bir Gauss fonksiyonu ile modellenmektedir. Önerilen yaklaşım Şekil 5'te sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan bulanık entropi, belirsizliğin ölçülmesinde kullanılan bir bilgi kuramı metriğidir ve kusurlu bölgelerin ayırımında kullanılmaktadır. Sağlıklı ray histogramının Gauss modeli ile temsil edilmesi ve kusur tespit süreci şematize edilmiştir.

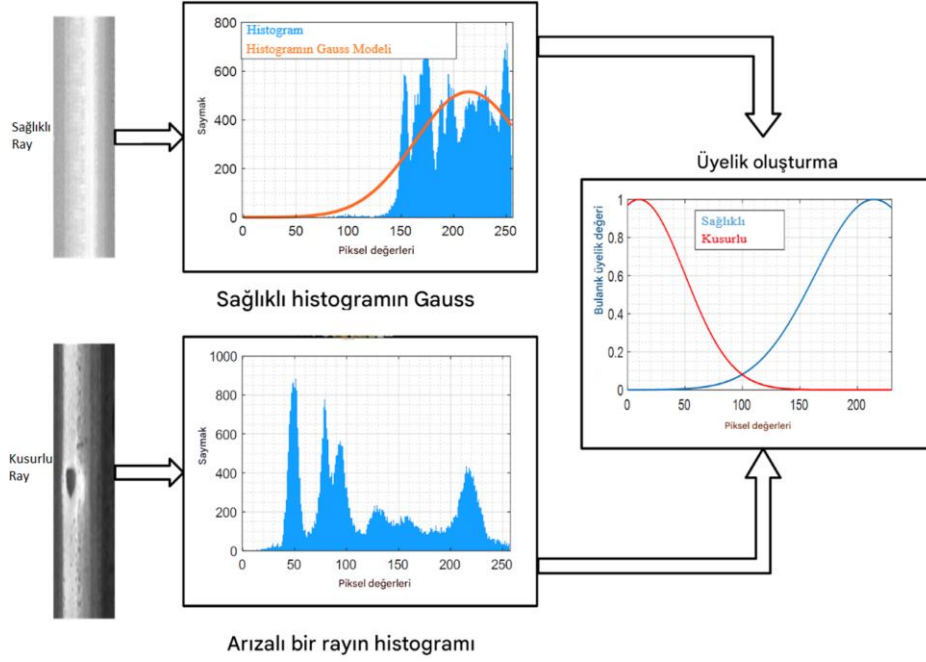


Şekil 5. Bulanık entropi tabanlı kusur tespit algoritmasının adımları

Şekil 5'te, ilk RGB görüntü gri tonlamalı bir görüntüye dönüştürülmüştür. Sağlıklı ray hattının histogramı, (5) numaralı denklemle gösterilebilen bir Gauss fonksiyonu olarak modellenmiştir.

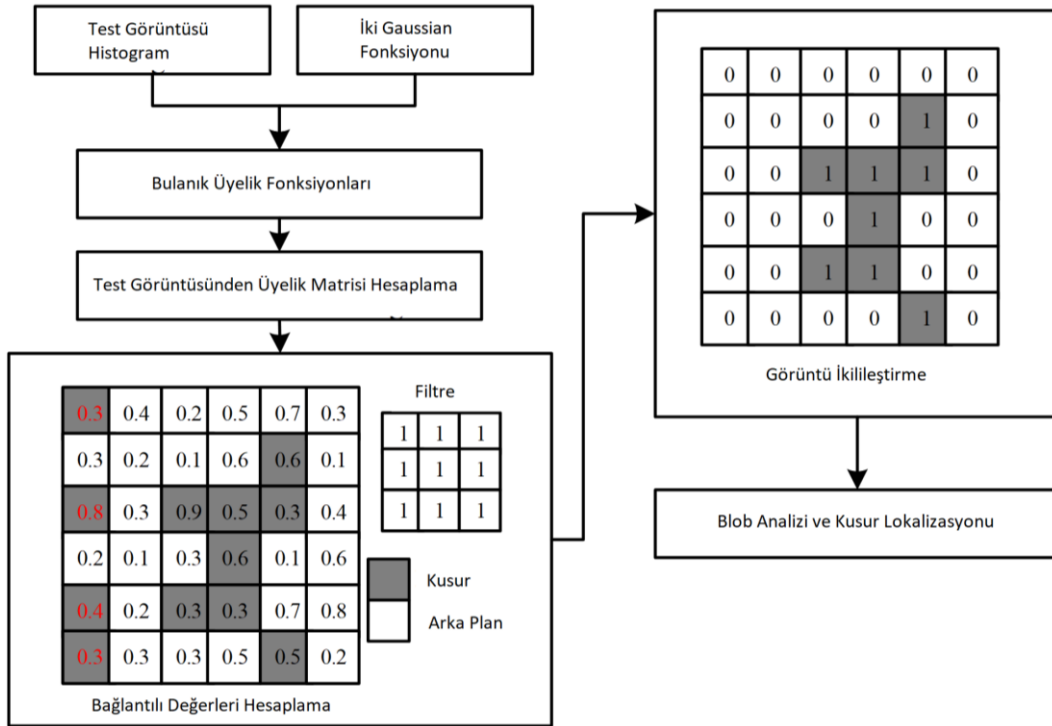
$$(x, y) = \frac{y}{\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad (5)$$

(5) numaralı denklemde, μ ve σ sırasıyla ortalama ve standart sapma değerlerini temsil etmektedir. x ve y değerleri ise histogramdaki piksel değerleri ile her piksel değerinin frekansını göstermektedir. Histogramı modellemek için μ ve σ değerlerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu iki parametrenin tahmini için Neelder-Mead simplex yöntemi kullanılmıştır [21]. Yöntem, n boyutlu x vektörü için n noktalı bir simplex ile başlar. Noktalar öncelikle sıralanır. Her adımda en kötü nokta elenir ve yerine başka bir nokta eklenir. Şekil 6, sağlıklı ray görüntüsü için elde edilen Gauss fonksiyonuyla kusurlu rayın modellenmesini göstermektedir.



Şekil 6. Sağlıklı ve kusurlu ray yüzeyleri için oluşturulan bulanık üyelik fonksiyonları

Şekil 6’da sağlıklı ray modeli için elde edilen Gauss fonksiyonu, kusurlu raylar için bir üyelik fonksiyonu oluşturmaktadır. Bulanık üyelik fonksiyonları belirlendikten sonra, görüntüdeki her pikselin üyeliğine göre bir üyelik matrisi oluşturulmaktadır. Üyelik matrisinde, bir piksel ya kusurlu ya da sağlıklı üyelik grubuna ait olarak sınıflandırılmaktadır. Ardından, üyelik matrisi üzerinden parçalar tespit edilmekte ve kusurlar belirlenmektedir. Şekil 7, bağlantılı parçalar ile kusur tespit algoritmasını göstermektedir.

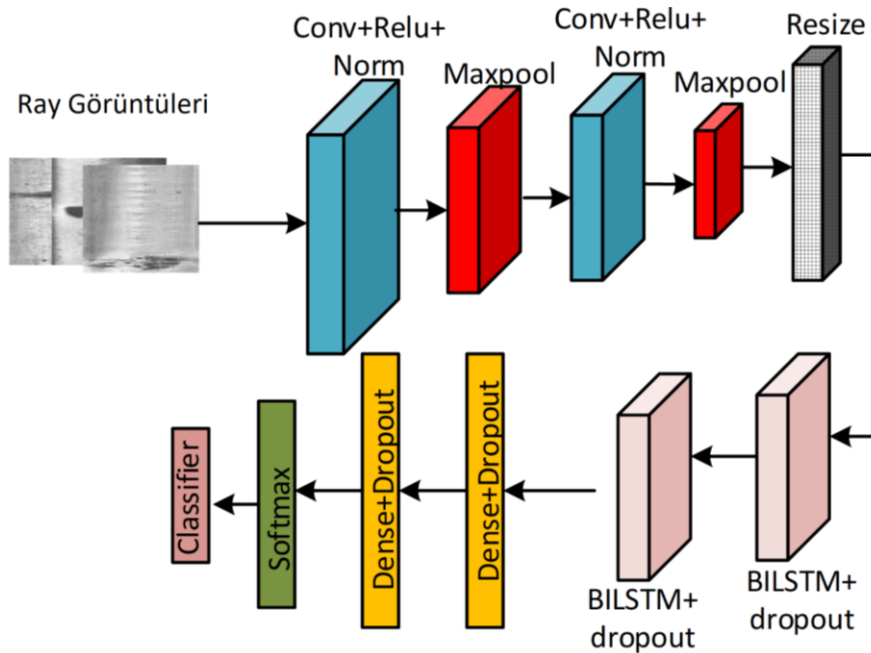


Şekil 7. Bulanık üyelik matrisine dayalı bağlantılı bileşen analizi ile kusur tespiti adımları

Şekil 7’de, test görüntüsünün histogramı alınarak iki bulanık üyelik fonksiyonuna verilmektedir. Daha sonra, her piksel için iki üyelik değeri hesaplanmakta ve maksimum değere göre piksel arka plan veya kusur olarak kabul edilmektedir. Bağlantılı parçaları belirlemek için görüntü üzerinde bir filtre kaydırılmakta ve komşu piksel değerlerine göre bağlantısız pikseller gürültü olarak değerlendirilmektedir. Ardından, oluşturulan ikili görüntüde kusurlu bölge blob analizi ile işaretlenmektedir.

3. CNN-BILSTM tabanlı kusur sınıflandırması

Kusurların bulanık ölçüm tabanlı yöntemle tespit edilmesinin ardından, kusur türünü sınıflandırmak için CNN-BILSTM ağı önerilmiştir. Önerilen hibrit yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada kullanılan evrişim katmanlarıyla filtreleme yapılırken, BILSTM katmanları ile önceki gözlemlerin bellek elemanları arasındaki ilişki dikkate alınmaktadır. Önerilen CNN-BILSTM modeli Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. CNN-BILSTM mimarisine sahip kusur sınıflandırma modelinin katman yapısı

Şekil 8’de, evrişim katmanından sonra eklenen iki Yönlendirilmiş Uzun Kısa Süreli Bellek (Bidirectional Long Short-Term Memory- BILSTM) katmanı gösterilmektedir. İkinci evrişim katmanından sonra, girdilerin BILSTM katmanı için uygun formata getirilmesi amacıyla bir boyutlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. BILSTM ve LSTM, ardışık verileri işlemek için yaygın olarak kullanılan tekrarlayan sinir ağlarıdır (Recurrent Neural Networks- RNN). Geleneksel sinir ağlarının aksine, RNN’ler giriş verileri arasında ilişki olduğunda ardışık verileri modellemektedir. LSTM modeli, RNN modellerinde ortaya çıkan kaybolan gradyan (vanishing gradient) sorununu çözmektedir. BILSTM ise verileri hem ileri hem de geri yönde ele alarak veriler arasındaki ilişkiyi iki yönlü olarak analiz etmektedir. Oluşturulan ağ modeline ait parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

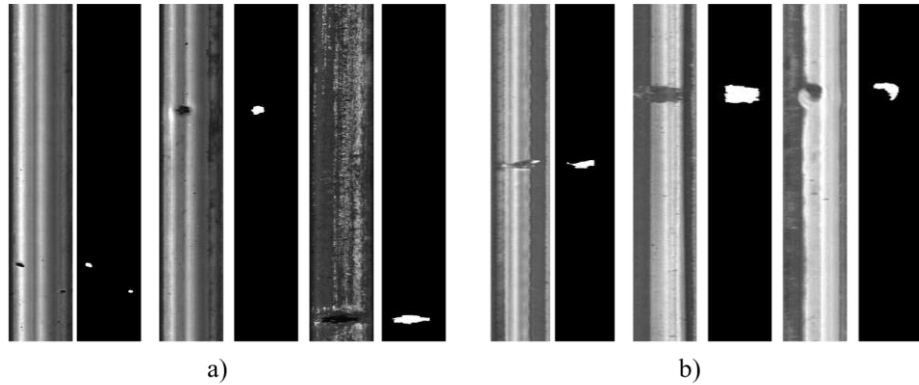
Tablo 1. BILSTM-CNN mimarisinin parametreleri

Katman	Filtre	Kernel Boyutu	Diğer	Bellek Birimi
2D Conv+Relu	16	5x5	-	-
2DMaxpool	-	5x5	Adım:2	-
2D Conv+Relu	32	5x5	-	-
Reshape	-	-	-	-
BILSTM	-	-	-	32
Dropout	-	-	Oran:0.4	-
BILSTM	-	-	-	64
Dropout	-	-	Oran:0.4	-
Dense	-	-	-	256
Dropout	-	-	Oran:0.3	-
Dense	-	-	-	1024
Dropout	-	-	Oran:0.3	-
Softmax	-	-	-	3

Tablo 1’de sunulan ağ modeli, iki ardışık BILSTM katmanından elde edilen ara çıktıları tam bağlantılı (fully connected) katmana giriş olarak kullanmaktadır. Önerilen mimaride kullanılan filtre sayıları, çekirdek (kernel) boyutları ve bellek birimi sayıları, geliştirme sürecinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar doğrultusunda belirlenmiştir.

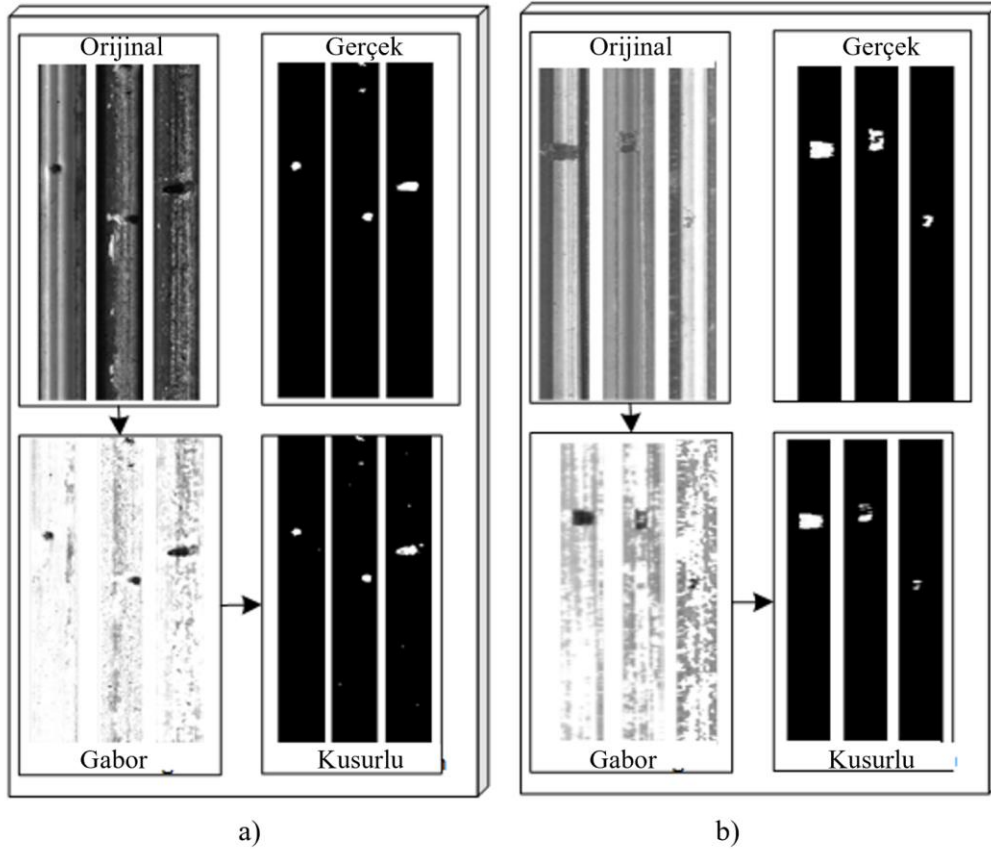
4. Bulgular

Önerilen yaklaşım iki farklı veri kümesi üzerinde test edilmiştir. İlk olarak, RSDD-I ve RSDD-II olmak üzere iki bölümden oluşan Demiryolu Yüzey Kusur Veri Kümesi (Rail Surface Defect Dataset – RSDD) üzerinde değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. RSDD-I veri kümesi, her biri 1000x160 piksel boyutlarında olan 67 görüntüden oluşmaktadır. RSDD-II veri kümesi ise ağır hizmet yollarından elde edilen, her biri 1250x55 piksel boyutlarında olan 128 görüntüyü içermektedir. Her iki veri kümesine ait örnek görüntüler Şekil 9’da sunulmaktadır.



Şekil 9. Kusur tespiti için kullanılan veri kümelerine ait örnek görüntüler: a) RSDD-I b) RSDD-II

Şekil 9’da gösterilen her iki veri kümesinde de kusurlu bölgelerin gürültüyle karışma olasılığı yüksektir. Bu nedenle, ön işleme uygulanmış görüntüler üzerinde bulanık modelleme tabanlı bir kusur tespit sistemi kullanılmaktadır. RSDD-I ve RSDD-II veri kümelerine ait bazı görüntüler için kusur tespit sistemi Şekil 10’da gösterilmektedir.



Şekil 10. a) RSDD-I b) RSDD-II görüntüleri üzerinde bulanık modelleme ile kusur tespiti sonuçları

Şekil 10'da gösterildiği üzere, Gabor yöntemiyle gerçekleştirilen ön işlem sonrasında, kusurların daha kolay modellenebildiği bir görüntü elde edilmiştir. Gabor yöntemine ait parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Gabor yönteminde kullanılan parametreleri

Parametre	Değer
Kernel boyutu	5
σ	5
θ	$\pi/4$
λ	$11 * \pi/4$
γ	0.5
ψ	1.24

Tablo 2'de verilen parametreler ile elde edilen ön işleme tabi tutulmuş görüntü, sağlıklı bir rayın histogram modelini elde etmek amacıyla bulanık üyelik modellemesine tabi tutulmuştur. Şekil 10'da yer alan bazı görüntülerde kusurlu bölgeye yakın alanlarda gürültü bulunmasına rağmen, ön işleme adımı bu gürültüleri başarıyla ortadan kaldırmıştır. Önerilen yaklaşımın RSDD-I ve RSDD-II veri kümeleri üzerindeki performansı, literatürde yer alan bazı görüntü işleme ve derin öğrenme tabanlı segmentasyon teknikleri ile karşılaştırılmıştır. RSDD-I ve RSDD-II veri kümeleri için karşılaştırma metriklerine ait sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

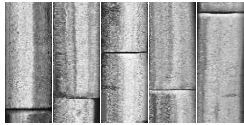
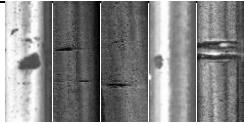
Tablo 3. RSDD-I/RSDD-II veri setlerindeki performans karşılaştırmaları

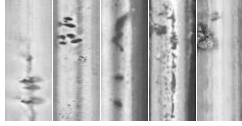
Veri Sei	Metot	PR	RC	F1	PR*	RC*	F1*
		Piksel Seviyesi			Kusur Seviyesi		
RSDD-I	MSFM [22]	0.37	0.43	0.36	0.76	0.25	0.38
	CTFM [23]	0.86	0.77	0.80	0.84	0.77	0.80
	Segnet [24]	0.84	0.65	0.68	0.37	0.57	0.45
	Unet++[25]	0.90	0.67	0.74	0.79	0.61	0.69
	PSPnet[26]	0.75	0.73	0.72	0.63	0.73	0.67
	Bizim	0.82	0.78	0.80	0.91	0.89	0.90
RSDD-II	MSFM [22]	0.61	0.64	0.59	0.86	0.71	0.78
	CTFM [23]	0.84	0.73	0.76	0.85	0.83	0.84
	Segnet [24]	0.70	0.68	0.64	0.54	0.68	0.60
	Unet++[25]	0.60	0.77	0.62	0.39	0.74	0.51
	PSPnet[26]	0.68	0.79	0.71	0.74	0.80	0.77
	Bizim	0.85	0.69	0.74	0.85	0.95	0.90

Tablo 3'te Coarse-to-Fine Model (CTFM), kusurlu bölgeleri üç aşamada tanımlamaktadır: arka plan modelinin çıkarılması, görsel belirginlik tahmini ve son aşamada piksel çıkarım yöntemi. Ancak bu yöntemin bir dezavantajı, her bir aşamada ayrı parametre ayarlarının gerekliliğidir. CTFM, yalnızca PR değeri açısından önerilen yaklaşımdan daha iyi performans göstermektedir. Çoklu Özellik Belirginlik Birleştirme Yöntemi (MSFM), ray yüzeyi kusurlarını tespit etmek için belirginlik tahmini kullanmaktadır. Belirginlik görüntüsü elde edildikten sonra, görüntüyü bölütlemek ve kümelemek amacıyla mean-shift algoritması ve uyarlamalı eşikleme yöntemleri uygulanmıştır. Ayrıca, Segnet, Unet++ ve PSPnet gibi yaygın bölütleme yöntemleri de bu veri seti üzerinde uygulanmıştır. Önerilen yaklaşım, bu yöntemlerin tümünden daha iyi performans sergilemektedir. Bu veri seti yalnızca kusurlu örnekler içerdiğinden ve veri setinin boyutu nispeten küçük olduğundan, sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmemiştir.

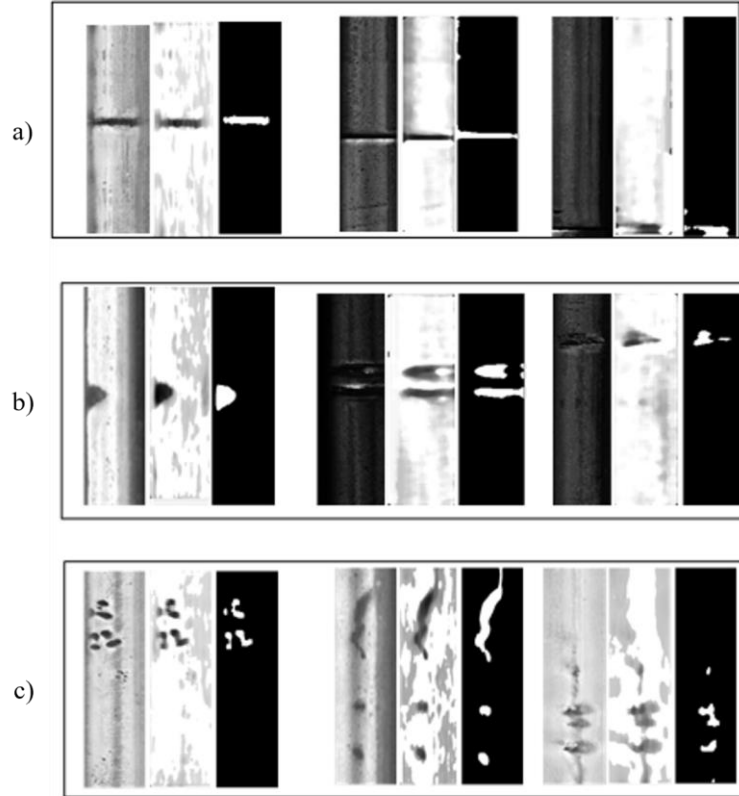
İkinci veri seti, biri sağlıklı sınıf olmak üzere toplam dört sınıftan oluşmaktadır; diğer kusurlar Squat, Joint ve Severe Squat olarak etiketlenmiştir. Veri seti, bir ölçüm treninin altından alınan görüntülerle oluşturulmuştur. Tablo 4'te, veri setinden bazı örnekler ve bunlara karşılık gelen örnek sayıları verilmiştir.

Tablo 4. Demiryolu yüzey kusuru veri seti

Etiket	Örnek	Örnek Sayısı
Sağlıklı		492
Ekleme		491
Göçme		713

Şiddetli		330
Göçme		

Tablo 4’te verilen veriler toplam 2068 örnekten oluşmaktadır. Bu veri seti için Ground Truth (gerçek etiket) bilgileri oluşturulmamıştır. Önerilen bulanık ölçüm yöntemi, düşük çözünürlük ve zayıf aydınlatma koşulları altında bu veri seti üzerinde test edilmiştir. Önerilen yaklaşımın örnek görüntüler üzerindeki sonuçları Şekil 11’de sunulmuştur.



Şekil 11. Özgün veri setimizdeki üç farklı kusur türü için tespit sonuçları: a) Eklem b) Göçme c) Şiddetli Göçme

Şekil 11, bulanık üyelik modellemesinin çeşitli kusur türleri için kusurlu bölgeleri doğru bir şekilde tespit ettiğini göstermektedir. Ayrıca, düşük kaliteli görüntüler üzerinde uygulanan ön işleme adımıyla elde edilen yeni görüntü, kusurlu bölgelerin bölütlenmesini mümkün kılmaktadır. RSDD veri setinden farklı olarak, bu veri seti hem sağlıklı örnekler hem de çeşitli kusur sınıflarını içermektedir. Bununla birlikte, veri seti sınıflandırma amacıyla toplandığı için Ground Truth (gerçek etiket) görüntülerini içermemektedir. Bir görüntü bölütlendikten sonra, kusurlu bölge blob analizi ile işaretlenmektedir. Blob analizinden elde edilen kusurlu bölgenin boyutu, deneme-yanılma yöntemiyle belirlenen 10 piksel eşik değeriyle karşılaştırılmaktadır. Kusurlu alan boyutu bu eşik değeri aştığında, görüntü kusurlu olarak işaretlenmektedir. Tahmin sonuçlarına ilişkin performans ölçütleri Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Bulanık modellemenin kusur tespit oranı

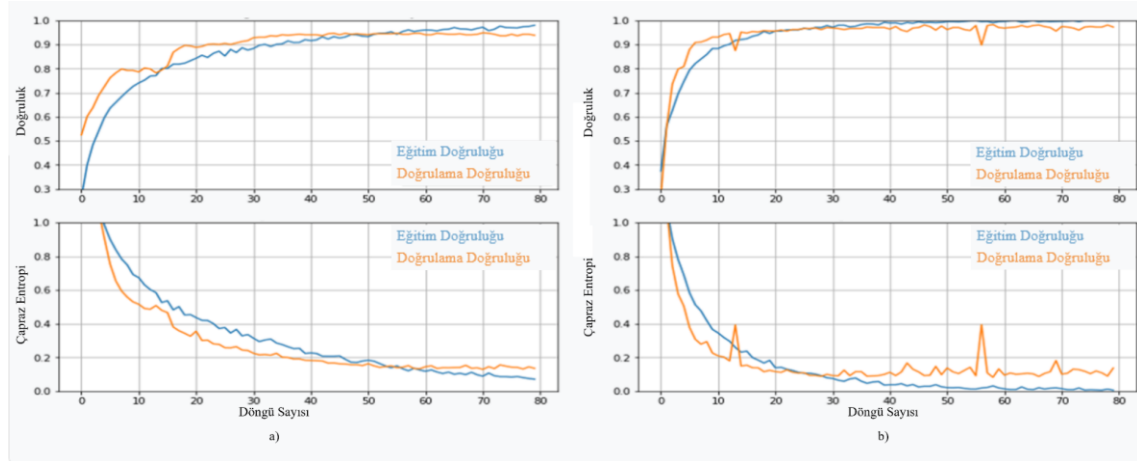
Sınıf	Sağlıklı	Kusurlu	Tespit Oranı (%)
Sağlıklı	480	12	97.56
Göçme	1	713	99.85
Ekleme	2	489	99.59
Şiddetli Göçme	5	325	98.48
Ortalama Tespit Oranı			98.87

Tablo 5, kusur tespit oranının yüksek olduğunu ve sağlıklı olarak işaretlenen görüntüler için yanlış tespit oranının oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Sağlıklı olarak etiketlenen görüntülerin kusurlu olarak tespit edilmemesi büyük önem taşımaktadır. Ray yüzeyindeki kusurlar belirlendikten sonra, bir sonraki aşamada kusur türünün sınıflandırılmasında CNN-BILSTM yöntemi kullanılmaktadır. Önerilen ağız parametreleri Tablo 6’da verilmiştir.

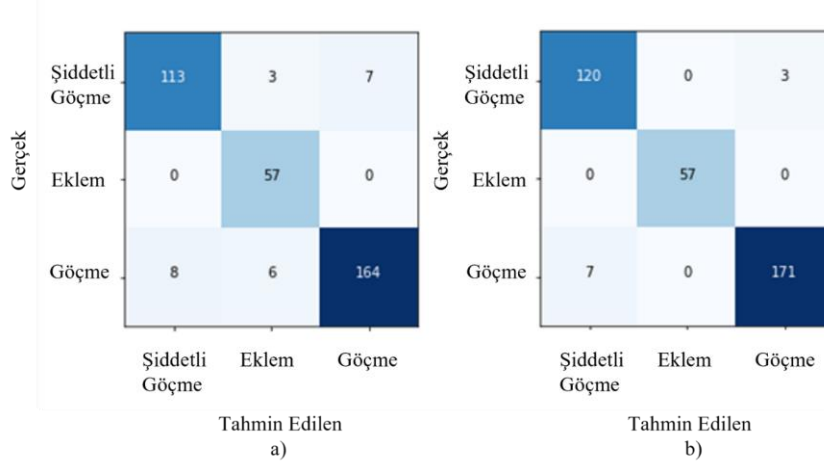
Tablo 6. CNN-BILSTM'nin eğitim parametreleri

Parametre	Değer
Girdi Boyutu	224x224
Optimizasyon Fonksiyonu	Adam
Momentum	0.9
Öğrenme Oranı	1e-4
Minumun Batch Boyutu	32
Maksimum Döngü	80

Temel CNN ve CNN-BILSTM modelleri, Tablo 6’da verilen parametreler kullanılarak eğitilmiştir. Özellikle, önerilen CNN-BILSTM modeli yalnızca 1,7 milyon parametre içermektedir. Şekil 12, eğitim ve doğrulama süreçlerine ait doğruluk oranı ve kayıp grafikleri göstermektedir.

**Şekil 12.** CNN ve CNN-BILSTM modellerine ait eğitim/doğrulama doğruluk ve kayıp eğrileri

Şekil 12, CNN-BILSTM modelinin temel CNN modeline kıyasla daha erken yakınsadığını ve hem eğitim hem de doğrulama doğruluğunun daha yüksek olduğunu göstermektedir. Şekil 12’de görülen doğruluk eğrisi, modelin eğitim ve doğrulama verileri üzerindeki başarı oranını; kayıp eğrisi ise modelin öğrenme sürecindeki hata düzeyini göstermektedir. Buna ek olarak, Şekil 13 her iki modele ait karmaşıklık matrislerini sunmaktadır. Her bir sınıfa ait doğru ve yanlış sınıflandırma sonuçları karışıklık matrisleri ile sunulurken model başarımı görselleştirilmiştir.



Şekil 13. a) CNN ve b) CNN-BILSTM modellerine ait karışıklık matrisleri

Şekil 13'te gösterilen karmaşıklık matrislerinden her bir sınıf için doğruluk (accuracy), kesinlik (precision, PR), duyarlılık (recall, RC) ve F1 skoru hesaplanmıştır. Tablo 7, bu değerlendirme ölçütleri açısından iki yöntemin performansını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Tablo 7. İki CNN modeli için performans ölçümlerinin karşılaştırılması

Metot	Sınıf	PR	RC	F1	Doğruluk
CNN	Şiddetli Göçme	0.93	0.92	0.93	0.93
	Eklem	0.86	1.00	0.93	
	Göçme	0.96	0.92	0.94	
CNN-BILSTM	Şiddetli Göçme	0.94	0.98	0.96	0.98
	Eklem	1.00	1.00	1.00	
	Göçme	0.98	0.96	0.97	

Tablo 7, önerilen CNN-BILSTM modelinin tüm değerlendirme ölçütleri ve doğruluk açısından temel CNN modelinden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Önceki birçok çalışmada, araştırmacılar kendi veri setlerini kullanarak kusur tespiti yöntemleri önermiştir. Bu çalışmada ise veri seti bir ölçüm treninden toplanmış olup, literatürde halka açık olarak yalnızca RSDD veri seti bulunduğundan, bu veri seti karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım ayrıca literatürdeki çalışmalarla da karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmanın sonuçları Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. İki CNN modeli için performans ölçümlerinin karşılaştırılması

Referans	Metot	Kusur	Doğruluk (%)
[1]	DenseNet+ Manuel özellikler	3	93.80
[15]	GrabCut+ YOLOv2	1	97.11
[18]	MobileNetv2+ YOLACT	4	93.50
[19]	MobileNetV2+SqueezeNet	3	97.11
[27]	Piramitsel özellikler + LWCNN	1	81.41
[28]	Bölümlenmiş kenar özellikleri	1	92.03
[29]	Piksel düzeyinde derin segmentasyon	1	96.20
[30]	CNN modeli	5	91.11
Bizim	Bulanık Modelleme + CNN-BILSTM	3	98.00

Tablo 8, tespit edilen kusur sayısını sunmaktadır. [1] numaralı çalışmada, özellik çıkarımı için DenseNet ile kombine edilen görüntü işleme tabanlı yöntemler kullanılmıştır. Ancak, ağırlık büyüklüğü ve ek özellik çıkarma aşaması nedeniyle, önerilen sistemin gerçek zamanlı uygulaması sınırlı olabilir. [15] numaralı çalışmada, kusurlu bölgenin görüntü segmentasyonu temelinde elde edilmesi için GrubCut ve YOLOv2 modeli kullanılmış, ardından kusur YOLOv2 ile tespit

edilmiştir. Ayrıca, [18] referansında ray ve kelepçe kusurları eş zamanlı olarak tespit edilmiştir. Ray kusurlarını tespit etmek için YOLACT tabanlı segmentasyon algoritması kullanılmıştır. RSDD veri setini analiz etmek için piramit özellikler ve hafif yapılı CNN [27] yöntemi uygulanmıştır. Ancak, veri setindeki örnek sayısının sınırlı olması nedeniyle derin öğrenme modelinin genelleme yeteneği düşük olmuştur. Bölümlenmiş kenar özellikleri [28] ray kusurlarının tespiti için hassas eşik değerlerine ihtiyaç duymakta olup, gürültülü görüntülerde yanlış tespit olasılığını artırmaktadır. Kusur tespit performansını artırmak amacıyla, rezidüel tabanlı dikkat ağı ve LSTM tabanlı konvolüsyonel sinir ağı önerilmiştir [29]. Bu çalışma yalnızca kusurun varlığını belirlemiştir. [30] numaralı çalışmada ise çeşitli kusur türlerini sınıflandırmak için özel bir CNN modeli önerilmiştir. Önerilen ağ yapısının performansı, tekli ve çoklu kusur türü sınıflandırmaları için değerlendirilmiştir. [17] çalışmasında, iki hafif ağdan elde edilen özellikler destek vektör makineleri ile sınıflandırılarak kusur türü belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen yaklaşım hem kusur tespiti hem de kusur türü sınıflandırması için iki aşamalı bir yöntemden oluşmaktadır. Önerilen bulanık modellemeye dayalı kusur tespit yöntemi, ön işleme nedeniyle görüntüdeki gürültüden etkilenmemektedir. Ayrıca, kusurlar belirlendikten sonra sınıflandırma aşamasında kullanılan CNN-BILSTM modeli, hızlı yakınsama ve hafif yapısı sayesinde gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir niteliktedir.

5. Sonuç

Bu çalışma, ray yüzey kusurlarının tespitine yönelik iki aşamalı bir yaklaşım sunmaktadır. Birinci aşamada, sağlıklı ve kusurlu ray yüzeylerini ayırt etmek amacıyla, ön işleme tabi tutulmuş görüntülerde kusurları belirlemek için bulanık modellemeye dayalı bir yöntem önerilmektedir. Önerilen Gabor filtresi, yüksek kontrastlı ve düşük gürültülü bir görüntü elde etmeyi sağlamaktadır. Sağlıklı durumu karakterize etmek için tek bir görüntü örneği üzerinde histogram modellemesi gerçekleştirilirken, histogramın kalan kısmı kusurlu durumları modellemektedir. Bu iki histogram, bulanık üyelik fonksiyonları olarak kullanılmaktadır. Kusurlar, bulanık üyelik fonksiyonlarıyla işlenen görüntüden elde edilen ikili (binary) görüntüdeki bağlı bileşenlerin değerlendirilmesiyle tespit edilmektedir. Önerilen yöntemin literatürdeki çalışmalardan daha yüksek performans göstermesinin başlıca nedeni, gürültüye karşı dayanıklı bulanık modelleme yaklaşımı ve CNN-BILSTM mimarisinin birlikte kullanılmasıdır. Bu sayede hem kusur tespiti hem de sınıflandırma görevlerinde yüksek doğruluk elde edilmiştir. Ayrıca modelin düşük parametre sayısı, gerçek zamanlı uygulamalar için uygunluk sağlamaktadır. Çalışmanın temel katkısı, yalnızca tek bir sağlıklı görüntüden elde edilen model kullanılarak kusurların saptanmasıdır. Ayrıca, önerilen ön işleme yöntemi, görüntüdeki gürültü ve aydınlatma problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Yanlışlıkla kusur olarak tespit edilen gürültü ise bağlı bileşenler yöntemiyle elenmektedir. Kusurlu görüntüler belirlendikten sonra, kusur türü önerilen CNN-BILSTM modeli ile sınıflandırılmaktadır. Bu hafif ağ modeli, temel CNN modeline göre daha hızlı yakınsamaya sahiptir. Önerilen yaklaşım, literatürde rapor edilen yöntemlere kıyasla farklı kusur türlerini daha başarılı bir şekilde tespit etmektedir. Literatürde iki aşamalı yapı öneren bazı çalışmalar (ör. [17], [19]) bulunsada bu çalışmanın özgün yönü, yalnızca tek bir sağlıklı görüntü üzerinden bulanık histogram modellemesiyle kusur segmentasyonu yapılması ve düşük çözünürlüklü, gürültülü görüntülerde dahi yüksek doğruluk sağlayan CNN-BILSTM mimarisi ile sınıflandırma işleminin gerçekleştirilmesidir. Gelecek çalışmalarda, kusur şiddetinin tahmini ve yöntemin mobil denetim sistemlerine entegrasyonu üzerinde durulması önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] L. Zhuang, H. Qi, & Z. Zhang, "The automatic rail surface multi-flaw identification based on a deep learning powered framework," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 2021.
- [2] H. Yang, Y. Wang, J. Hu, J. He, Z. Yao, & Q. Bi, "Segmentation of track surface defects based on machine vision and neural networks," IEEE Sensors J., vol. 22, no. 2, pp. 1571–1582, 2021.

- [3] M. Sevi, İ. Aydın, E. Akin, "Detection of rail surface defects based on ensemble learning of YOLOv5," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 115-132, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1205483.
- [4] M. Guerrieri, G. Parla, & C. Celauro, "Digital image analysis technique for measuring railway track defects and ballast gradation," *Measurement*, vol. 113, pp. 137-147, 2018.
- [5] Y. Jiang et al., "Non-contact ultrasonic detection of rail surface defects in different depths," in 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), pp. 46-49, IEEE, 2018.
- [6] G. Piao, J. Li, L. Udpal, J. Qian, & Y. Deng, "Finite-element study of motion-induced eddy current array method for high-speed rail defects detection," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 12, pp. 1-10, 2021.
- [7] Y. Santur, M. Karaköse, & E. Akin, "A new rail inspection method based on deep learning using laser cameras," in 2017 Int. Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), pp. 1-6, IEEE, 2017.
- [8] H. Zhong, L. Liu, J. Wang, Q. Fu, & B. Yi, "A real-time railway fastener inspection method using the lightweight depth estimation network," *Measurement*, vol. 189, p. 110613, 2022.
- [9] H. Wang, M. Li, & Z. Wan, "Rail surface defect detection based on improved Mask R-CNN," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 102, p. 108269, 2022.
- [10] J. Gan, J. Wang, H. Yu, Q. Li, & Z. Shi, "Online rail surface inspection utilizing spatial consistency and continuity," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.: Syst.*, vol. 50, no. 7, pp. 2741-2751, 2018.
- [11] H. Zhang et al., "Automatic visual detection system of railway surface defects with curvature filter and improved Gaussian mixture model," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 67, no. 7, pp. 1593-1608, 2018.
- [12] D. Zhang et al., "Two deep learning networks for rail surface defect inspection of limited samples with line-level label," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 10, pp. 6731-6741, 2020.
- [13] Z. Zhang, M. Liang, and Z. Wang, "A deep extractor for visual rail surface inspection," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 21798-21809, 2021.
- [14] Y. Wu et al., "Hybrid deep learning architecture for rail surface segmentation and surface defect detection," *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 227-244, 2022.
- [15] H. Yang et al., "Deep learning and machine vision-based inspection of rail surface defects," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1-14, 2021.
- [16] H. Li et al., "Ensemble model for rail surface defects detection," *PLoS One*, vol. 17, no. 5, p. e0268518, 2022.
- [17] İ. Aydın & E. Akin, "Two-stage rail defect classification based on fuzzy measure and convolutional neural networks," in *Intelligent and Fuzzy Systems: Digital Acceleration and The New Normal- Proceedings of the INFUS 2022 Conf.*, vol. 1, pp. 769-776, Springer, Cham, 2022.
- [18] Z. Tu, S. Wu, G. Kang, & J. Lin, "Real-time defect detection of track components: Considering class imbalance and subtle difference between classes," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1-12, 2021.
- [19] İ. Aydın, E. Akin, & M. Karaköse, "Defect classification based on deep features for railway tracks in sustainable transportation," *Appl. Soft Comput.*, vol. 111, p. 107706, 2021.
- [20] A. K. Jain & F. Farrokhnia, "Unsupervised texture segmentation using Gabor filters," *Pattern Recognit.*, vol. 24, no. 12, pp. 1167-1186, 1991.
- [21] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, & P. E. Wright, "Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions," *SIAM J. Optim.*, vol. 9, no. 1, pp. 112-147, 1998.
- [22] H. Zhai & Z. Ma, "Detection algorithm of rail surface defects based on multifeature saliency fusion method," *Sensor Rev.*, ahead-of-print, 2022.
- [23] H. Yu et al., "A coarse-to-fine model for rail surface defect detection," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 3, pp. 656-666, 2018.
- [24] V. Badrinarayanan, A. Handa, and R. Cipolla, "Segnet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for robust semantic pixel-wise labelling," *arXiv preprint arXiv:1505.07293*, 2015.
- [25] Z. Zhou, M. M. Rahman Siddiquee, N. Tajbakhsh, & J. Liang, "Unet++: A nested u-net architecture for medical image segmentation," in *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support*, pp. 3-11, Springer, Cham, 2018.
- [26] H. Zhao, J. Shi, X. Qi, X. Wang, & J. Jia, "Pyramid scene parsing network," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 2881-2890, 2017.
- [27] Y. Liu, H. Xiao, J. Xu, & J. Zhao, "A rail surface defect detection method based on pyramid feature and lightweight convolutional neural network," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1-10, 2022.
- [28] X. Ni, H. Liu, Z. Ma, C. Wang, & J. Liu, "Detection for rail surface defects via partitioned edge feature," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2021.
- [29] L. Yang, S. Xu, J. Fan, E. Li, & Y. Liu, "A pixel-level deep segmentation network for automatic defect detection," *Expert Syst. Appl.*, vol. 215, p. 119388, 2023.

- [30] S. Faghih-Roohi, S. Hajizadeh, A. Núñez, R. Babuska, & B. De Schutter, “Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects,” in 2016 Int. Joint Conf. Neural Netw. (IJCNN), pp. 2584–2589, IEEE, 2016.

Özgeçmiş



İlhan AYDIN

Prof. Dr. İlhan Aydın, 1981 yılında Elazığ’da doğmuştur. Lisans ve yüksek lisans eğitimini sırasıyla 2001 ve 2006 yıllarında Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde tamamlamıştır. Doktora derecesini ise 2011 yılında Fırat Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden almıştır. Halen Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde profesör olarak görev yapmaktadır. Araştırma ilgi alanları arasında optimizasyon, gerçek zamanlı sistemler, arıza teşhisi ve durum izleme, sinyal ve görüntü işleme ile derin öğrenme yer almaktadır.

E-Posta: iaydin@firat.edu.tr



Mehmet SEVİ

Mehmet Sevi, 1988 yılında Denizli’de doğmuştur. Lisans eğitimini Doğu Akdeniz Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde, yüksek lisans eğitimini ise Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde tamamlamıştır. Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde doktora eğitimini tamamlamıştır. Araştırma ilgi alanları arasında görüntü işleme ve derin öğrenme bulunmaktadır. Ayrıca, Muş Alparslan Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığında Daire Başkanı olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: m.sevi@alparslan.edu.tr



Erhan AKIN

Prof. Dr. Erhan Akın, lisans eğitimini 1984 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde, yüksek lisans eğitimini 1987 yılında aynı üniversitenin Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde tamamlamış, doktora derecesini ise 1994 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden almıştır. Halen Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde Profesör Doktor olarak görev yapmakta olup, aynı bölümün başkanlığını yürütmektedir. Araştırma alanları arasında yumuşak hesaplama, elektrik motor sürücüler, bulanık kümeler ve sistemler, doğrusal olmayan kontrol sistemleri, arıza teşhisi ve bilgisayarlı görme bulunmaktadır.

E-Posta: eakin@firat.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: İlhan AYDIN: Metot, kaynaklar, görselleştirme, yazma-orijinal taslak hazırlama. Mehmet SEVİ: Kontrol, yazma-gözden geçirme ve düzenleme, inceleme. Erhan AKIN: Kontrol, yazma-gözden geçirme ve düzenleme, inceleme.



Cer Transformatörlerinde Kaçak Reaktansın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Farklı Geometrik Eksen Sistemi ile Hesaplanması

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE^{*1}, Oluş SÖNMEZ¹, Bora ALBOYACI², Yunus Berat Demiroğlu³

¹ Sönmez Transformatör San. ve Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye

² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

³ Genetek Güç Enerji Ltd., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, Türkiye

*s.curukova@sonmeztrafo.com.tr

(Alınış/Received: 23.06.2025, Kabul/Accepted: 17.07.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Elektrikli lokomotif sistemlerinde gerilim dönüşümünü gerçekleştirip konverter ve trenin iç ihtiyaç donanımlarına güç sağlayan eleman cer transformatörüdür. Cer transformatörlerinin tasarımı aşamasında, belirlenmesi gerekli olan kritik elektriksel parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerden en önemli olanlardan biri de transformatörün kaçak reaktans değeridir. Transformatörün kaçak reaktans değerine göre konverter sistemlerinin çalışması etkilenmektedir. Uyum açısından cer transformatörlerinin kaçak reaktans değerleri belirlenen aralıklarda olmalıdır. Bundan dolayı da tasarım aşamasında cer transformatörü dizaynının kaçak reaktans değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi önem taşımaktadır. Bu aşamada ise teorik hesaplamalar cer transformatörünün yapısı gereği yetersiz kalabilmektedir. Cer transformatörlerinde genellikle birden fazla sayıda cer çıkışı olmakla beraber yüksek gerilim tarafında paralel sargı yapısı bulunmaktadır. Bu paralel sargıların kendi aralarında bulunan kuplajdan dolayı teorik hesaplamaların doğruluğu sınırlı olmaktadır. Bu aşamada sonlu elemanlar yöntemi (SEY) gibi nümerik analiz programları ile modelleme gerçekleştirilip sonuçlar hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörü üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile kaçak reaktans hesaplama uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmaları yapılırken farklı geometrik eksen sistemleri kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun yanında ilgili cer transformatörü üzerinde saha testleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda cer transformatörlerinde kaçak reaktans hesaplamalarında sonlu elemanlar yönteminin kullanımı açıklanmış ve gerekliliği vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Cer transformatörü, Sonlu Elemanlar Yöntemi, IEC 60310, Kaçak reaktans, Kısa devre empedansı

Calculation of Leakage Reactance in Traction Transformers with Three Different Geometric Axis Systems by Finite Element Method

Abstract: In electric locomotive systems, the traction transformer is the component that performs voltage transformation and provides power to the converter and internal equipment of the train. During the traction transformers' design phase, critical electrical parameters need to be determined. One of the most important of these parameters is the leakage reactance value of the transformer. The operation of the converter systems is affected by the leakage reactance value of the transformer. In terms of compliance, the leakage reactance values of the traction transformers should be within the specified ranges. Therefore, it is important to accurately calculate the leakage reactance values of the traction transformer during the design phase. Theoretical calculations may be insufficient due to the structure of the traction transformer. Traction transformers usually have more than one traction output and parallel winding structure on the high-voltage side. The theoretical calculations are insufficient due to the coupling between these parallel windings. Calculations can be performed with numerical analysis programs such as the finite element method, and results can be calculated. In this study, leakage reactance calculation applications were performed on a sample traction transformer using the finite element method (FEM). Different geometric axis systems were used during the modeling studies, and the results were compared. In addition, field tests were performed,

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, O. Sönmez, B. Alboyacı, Y. B. Demiroğlu, "Cer transformatörlerinde kaçak reaktansın sonlu elemanlar yöntemi ile üç farklı geometrik eksen sistemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 76-90, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1721553

and the analysis results were compared. As a result of the study, the use of the finite element method in leakage reactance calculations in traction transformers is explained, and its necessity is emphasized.

Keywords: Traction transformer, FEM, IEC 60310, Leakage reactance, Short-circuit impedance

1. Giriş

Demiryolu ulaşım sistemlerinde kullanılan elektrikli lokomotiflerin tahrik gücünü üretebilmesi için, lokomotif içerisinde birden fazla ekipman ve sistem bulunmaktadır. Bu sistemler basitçe pantograf, cer transformatörü, konvertör ve cer motorları olarak sıralanabilir. Bu ekipman ve sistemler içerisinde cer transformatörü de önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada cer transformatörünün elektriksel parametrelerinden biri olan kaçak reaktans değeri üzerine inceleme yapılmıştır. Elektrikli lokomotif sisteminin genel yapısı düşünüldüğünde, ekipman ve sistemler kendi aralarında bir düzen ve uyum içinde çalışmaktadır. Bu uyumun sağlanması için ise çeşitli elektriksel ve mekanik parametrelerin belirli isterleri sağlanması gereklidir. Cer transformatörleri için inceleme yapıldığında birden fazla elektriksel ve mekanik parametre vardır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir: sargı doğru akım direncine bağlı oluşan kayıplar, sargı girdap akımı kayıpları, yapısal bileşenler üzerinde meydana gelen kayıplar, kaçak reaktans, inrush akımları, boşta çalışma kayıpları, boşta çalışma akımı, kısa devre dayanımı özellikleri, termal yüklenme özellikleri, harmonikli yüklenme durumlarında oluşan kayıplar, titreşim davranışı, kapasitans değerleri, elektrik alan dayanımı özellikleri.

Bu özelliklerin her biri ayrı bir çalışma konusu olmakla beraber, bu çalışma içerisinde kaçak reaktans parametresi üzerinde durulmuştur. Cer transformatörleri, katener sisteminden pantograf ve kesici üzerinden aldıkları yüksek gerilimi, uygun seviyede alçak gerilime dönüştürmekte ve bu gerilim ile konverter sistemini beslemektedir. Konverter sisteminde bulunan yarı-iletken tabanlı güç elektroniği elemanlarından kaynaklı olarak bu sistem üretmiş olduğu belirli bir akım harmoniği spektrumu ile işletilmektedir. Bu harmonik spektrumu ise sistem empedansına bağlı olarak değişmektedir. Bu aşamada cer transformatörünün de kaçak reaktans değeri, bu harmonik spektrumunun oluşumunda belirleyici olmaktadır. Sistem tasarımı aşamasında, konverter sisteminin özelliklerine göre cer transformatörünün sağlaması gerekli olan bir kaçak reaktans değeri bulunmaktadır. Bundan dolayı cer transformatörlerinin tasarım aşamasında kaçak reaktans değerinin doğru bir şekilde hesaplanması önem taşımaktadır.

Kaçak reaktans parametresinin üretim tolerans değerleri önemlidir. IEC 60310:2016 standardına göre üretilen transformatörün kısa devre empedansı ile garanti değeri arasındaki fark %10'dan az olmalıdır [1]. Bu standart, cer transformatörlerinin tabi olduğu bir standarttır. Standart içerisinde direkt olarak kaçak reaktans değeri sınır toleransı tanımlanmamıştır. Bunun yerine kısa devre empedansı değeri tanımlanmıştır. Bir transformatörün nominal gücü baz güç ve nominal gerilimi baz gerilim alındığında transformatörün bağıl kısa devre gerilimi (%U_k) değer olarak transformatörün kısa devre empedansına eşit olmaktadır. Bağıl kısa devre geriliminin ise indüktif ve rezistif olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır. Buna göre %U_r, bağıl kısa devre geriliminin rezistif bileşenidir ve transformatörde oluşan toplam kayıplara bağlıdır. %U_x ise bağıl kısa devre geriliminin indüktif bileşenidir ve transformatörün geometrik yapısına bağlı olarak oluşan kaçak indüktanstan kaynaklanmaktadır.

Kısa devre empedansı deney yolu ile IEC 60076-1:2011 standardına göre belirlenmektedir [2]. Buna göre transformatörün sekonderi kısa devre edilip primer gerilimi akım nominal akıma gelinceye kadar artırılmaktadır. Elde edilen gerilimin nominal gerilime oranının yüzdesi alındığında bağıl kısa devre gerilimi (%U_k) dolayısıyla kısa devre empedansı deney yöntemi ile elde edilmiş olmaktadır. Bunun yanında kısa devre empedansının teorik ve analitik olarak hesaplanması için literatürde çeşitli formüller bulunmaktadır. Bu formüllerden Bölüm 2. içerisinde bahsedilmiştir.

Transformatör sargı parametrelerine göre %U_x ile %U_r arasındaki oran değişmekle beraber, genellikle konverter sistemini besleyen sargılarda %U_x değeri çok daha baskın olmaktadır. %U_r değeri transformatörün toplam yükte çalışma kayıplarının, baz güce oranının yüzdesini ifade etmektedir. Bundan dolayı, %U_r değerinin hesaplanması için transformatörün yükte çalışma kayıplarının ayrı ayrı olarak hesaplanması gerekmektedir. Yükte çalışma kayıpları ise şu şekilde sıralanabilir: sargı doğru akım direncine bağlı olarak oluşan doğru akım kayıpları, sargıda kullanılan iletken özelliklerine ve transformatörün geometrik yapısına bağlı olarak iletkenlerde oluşan radyal ve eksenel girdap akımı kayıpları, transformatör kazanı gibi metal yapısal bileşenler üzerinde oluşan girdap akımı kayıpları. Buna göre, kayıp hesaplamaları, üzerinde çalışma yapılması gerekli olan ayrı bir konu olduğundan dolayı, bu çalışma içerisinde sadece kaçak reaktans değerini oluşturan %U_x üzerinde durulmuştur.

Literatürde çeşitli güç transformatörlerinin kısa devre empedanslarının farklı analitik yaklaşımlar ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile hesaplandığı ve bu hesaplamaların deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır [3], [4]. Ayrıca, wound-core tip transformatörlerde kısa devre empedansının teorik yöntemlerle ve SEY ile belirlenip deneysel sonuçlarla doğrulandığı araştırmalara da rastlanmaktadır [5]. Güç transformatörlerinde kısa devre empedansı için farklı teorik modellerin, SEY sonuçlarının ve yeni önerilen yöntemlerin karşılaştırmalı analizlerinin yapıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır [6]. Bununla birlikte, kuru tip cer transformatörlerinde kısa devre empedansının SEY ile modellenip deneysel verilerle karşılaştırıldığı çalışmalar da mevcuttur [7], [8]. [9] çalışmasında cer transformatörlerinde sargılar arası kısa devrelerin simülasyon ortamında analiz edilerek transformatör performansına etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu tür transformatörlerde çeşitli tasarım parametrelerinin etkisi [10], [11], eksenel boşlukların manyetik davranış ve kayıplar üzerindeki rolü [12], farklı sargı konfigürasyonlarının endüktif özellikler üzerindeki etkisi [13] gibi konular incelenmiştir. Bunun yanında cer transformatörlerinde sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilebilen hesaplamalardan bahsedilen [14], boşta çalışma analizleri gerçekleştirilen [15], cer trafosu ve baralar etrafında oluşan manyetik alan analizi gerçekleştirilen [16] çalışmaların olduğu görülmektedir. Bunların yanında, cer transformatörlerinde primer ve sekonder sargılarının farkı kombinasyonlarda üst üste yerleştirildiği durumlarda üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile kısa devre empedansının hesaplandığı [17], sekonder sargısı kademeli yapıda olan bir cer transformatöründe sargı indüktansları kullanılarak matematiksel model oluşturulan [18], manyetik akı saptırıcı kullanılan cer transformatöründe kısa devre empedansının hesaplandığı [19], cer transformatöründe LCL filtre elemanı tasarlanırken aynı zamanda kısa devre empedansı hesaplarının da gerçekleştirildiği [20] çalışmalar bulunmaktadır.

Bu kapsamda, cer transformatörlerinde sonlu elemanlar yaklaşımı ile farklı geometrik eksen sistemlerinde kısa devre reaktanslarının hesaplandığı ve karşılaştırma yapıldığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, örnek bir cer transformatörünün kaçak reaktans hesaplamaları sonlu elemanlar yönteminde üç boyutlu geometrik eksen sisteminde modelleme ile, iki boyutlu kartezyen geometrik sisteminde modelleme ile ve iki boyutlu silindirik geometrik sisteminde modelleme ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında ilgili cer transformatörü üretilmiş ve üzerinde doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak literatürde bulunan teorik yaklaşımlar ile de hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve bu teorik hesapların ilgili cer transformatörü yapısında neden sınırlayıcı olduğu, sonlu elemanlar yönteminin neden kullanılması gerektiği açıklanmıştır. Bu kapsamda çalışma literatüre cer transformatörlerinde kısa devre empedansının farklı modelleme yaklaşımları ile hesaplanması ve test sonuçları ile doğrulanması alanında katkı sağlamaktadır.

Bu kapsamda ikinci bölümde ilgili transformatör yapısı, analitik yaklaşımlar, sonlu elemanlar yaklaşımları, iki boyutlu kartezyen sistem modeli, iki boyutlu silindirik sistem modeli, üç boyutlu model, teorik yöntemlerin hesaplamalarda neden yetersiz kaldığı, test yöntemi ve test düzeneği

açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise hesaplama sonuçları detaylı olarak paylaşılmıştır ve dördüncü bölümde çalışmanın sonucu özetlenmiştir.

2. Metot

İlgili çalışmada kullanılmış olan cer transformatörünün bir adet 25kV gerilim ve 1900kVA güçte yüksek gerilim sargısı, dört adet 1.04kV gerilim ve 425kVA güçte cer sargısı, bir adet 0.6kV gerilim ve 100kVA güçte filtre sargısı, bir adet 0.4kV gerilim ve 100kVA güçte yardımcı sargısı bulunmaktadır. Cer transformatörlerinde lokomotifin farklı güç ihtiyaçları için farklı özelliklerde sargılar bulunmaktadır. Cer sargıları konverterleri beslemektedir, yardımcı sargı ise trenin iç ihtiyaçları ve kontrol sistemleri için kullanılmaktadır. Filtre sargısının oluşturduğu indüktanslar ise filtreleme elemanı olarak kullanılmaktadır.

Cer transformatörlerinde çok sayıda sargı olduğundan dolayı çok sayıda kaçak reaktans değeri bulunmaktadır. Örneğin bu çalışmada incelenen cer transformatöründe 21 adet empedans değeri bulunmaktadır. Tüm sargıların birbirleri arasında bulunan kaçak reaktans değerleri bunu oluşturmaktadır. Tren sistemi üreticilerine göre değişmekle beraber, genellikle garanti değerleri yüksek gerilim ve cer sargıları arasında istenmektedir. Bundan dolayı ve aynı zamanda makalenin amacından sapmamak adına hesaplamalar sadece yüksek gerilim ve cer sargısı arasında bulunan kaçak reaktans için gerçekleştirilmiştir. Bütün senaryoların bulunduğu empedans matrisinin oluşturulmasının ayrı bir çalışma kapsamında gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

2.1. Analitik yaklaşım

Transformatörlerde kaçak reaktans değerinin hesaplanması için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu bölümde bunlardan biri gösterilmiştir. Literatürde bulunan kaçak reaktans hesaplama yaklaşımları paralel sargılar olması durumunda yetersiz kalmaktadır. İlgili cer transformatöründe paralel yüksek gerilim sargıları bulunmaktadır. Paralel sargıların kendi aralarındaki kuplajdan dolayı, kaçak reaktans değerleri etkilenmektedir. Örneğin yüksek gerilim ve cer-1 sargısı arasında kaçak reaktansın bir büyük bir bölümü cer-1 sargısının karşısında bulunan yüksek gerilim sargısından gelmektedir. Ancak diğer yüksek gerilim sargılarının paralel yapısından dolayı kaçak reaktans bir miktar azalmaktadır. Bu durum sargıların yüksekliklerine göre, paralel sargılar arasında bulunan mesafeye göre ve nüve yapısına göre değişmektedir.

Teorik yaklaşımlar bu durumu değerlendirmeye almamaktadır. Buna karşın, yüksek gerilim sargıları ile tüm cer sargılarının kısa devre olması durumunda ise teorik yaklaşımlar daha tutarlı olmaktadır ancak bu durumda da sargı yüksekliklerine bağlı olarak sapmalar olabilmektedir. Bu çalışma içerisinde gerçekleştirilen hesaplamalar ile bu durumlar gösterilmiş ve incelenmiştir. Literatürde bulunan, kaçak reaktansın hesaplanması için kullanılan olan analitik formül aşağıda bulunan Denklem 1.-4. arasında gösterilmiştir [21].

$$\%X = 2.48 \times 10^{-5} \cdot f \frac{(Amper - sarım)}{H_{eq} \left(\frac{Gerilim}{Sarım} \right)} \sum_{k=1}^n ATD \quad (1)$$

$$\sum ATD = \frac{1}{3} (T_1 \times D_1) + (T_g \times D_g) + \frac{1}{3} (T_2 \times D_2) \quad (2)$$

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} \quad (3)$$

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_1 + T_g + T_2)}}{\pi H_w / (T_1 + T_g + T_2)} \quad (4)$$

Burada, T_1 = Birinci sargının kalınlığı, T_2 = İkinci sargının kalınlığı, T_g = Sargılar arasında bulunan boşluğun kalınlığı, D_1 = Alçak gerilim sargısının ortalama çapını, D_2 = Yüksek gerilim sargısının ortalama çapını, D_g = Hava aralığının ortalama çapını, H_w = Sargı yüksekliğini, K_R = Rogowski faktörünü, ATD = Amper-sarım diyagramı olarak tanımlanmaktadır. Formülasyondan görüleceği üzere paralel sargı yapısı ile ilgili bir parametre bulunmamaktadır. İlgili transformatörün nüvesi üzerinde dört adet yüksek gerilim ve cer sargısı bulunmaktadır. Bunların ikisi nüvenin bir bacağına eksenel olarak, diğer ikisi ise nüvenin diğer bacağına eksenel olarak yerleştirilmiştir. Bu hesaplama tüm cer sargılarının aktif olduğu durumdaki kaçak reaktansı ifade edecektir. Buna göre gerçekleştirilen hesaplama sonuçları Bölüm 3. içerisinde gösterilmiştir.

2.2. Sonlu elemanlar yöntemi

Güç sistemlerine yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalarda elektrik ve manyetik alanlar, iletkenlerden akan akımların dağılımları, akımın iletken kesiti içerisindeki dağılımı, öz ve karşıt endüktans değerleri, manyetik indüksiyon değerleri, enerji dağılımları gibi elektriksel parametrelerin elde edilmesi oldukça zahmetli çalışmalardır. Birçok faktör tarafından etkilenen bu parametrelerin elde edilmesinde analitik yöntemler çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu gibi hesaplamaların kısa zamanda ve yüksek doğrulukla gerçekleştirilmesinde nümerik yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi önemli avantaj sağlamaktadır. Sonlu elemanlar analizleri ile güç sistemlerinin tasarımı aşamasında elektriksel parametrelerin hesaplanması ve tasarım optimizasyonu mümkün olmaktadır. Bu yöntem ile sadece transformatörlerde değil, baralı kanal birimi [22], yüksek gerilim yeraltı kablosu sistemleri [23], alçak gerilim kablo sistemleri [24], kablo başlıkları [25], yüksek gerilim izolatör sistemleri [26], yüksek gerilim teçhizatları [27] gibi sistemler üzerinde de elektriksel ve termal parametreler hesaplanabilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile model üzerinde sonlu sayıda üç yüzlü veya dört yüzlü eleman oluşturulmakta ve bir ağ yapısı oluşturan bu elemanlara Maxwell denklemleri uygulanmaktadır. Bu işlemin yapılması çok basit yapılar dışında analitik olarak mümkün olmamakla beraber sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik yöntemler kullanan programlar ile işlem basitleşmektedir. Oluşturulan ağ yapısı üzerinde çözülen Maxwell denklemleri Denklem 5.-8. Arasında gösterilmiştir [21].

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (8)$$

Burada E elektrik alan şiddeti (V/m), B manyetik akı yoğunluğu (Wb/m^2), H manyetik alan şiddeti (A/m), J akım yoğunluğu (A/m^2), D elektrik akı yoğunluğu (C/m^2), ρ yük yoğunluğu (C/m^3) olarak tanımlanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile sistemde oluşan enerji miktarı hesaplandıktan sonra, kaçak reaktans değeri Denklem 9.-12. yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$L = \frac{2W_m}{I^2} = \frac{1}{I^2} \int B \cdot H \, dv = \frac{1}{I^2} \int A \cdot J \, dv \quad (9)$$

$$X_L = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2W_m}{I^2} \quad (10)$$

$$Z_B = \frac{V_{phase}}{I_{phase}} \quad (11)$$

$$\%U_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2W_m \cdot 100}{I^2 \cdot Z_B} \quad (12)$$

Burada, L Endüktans, W_m Kapalı bir yolda akan akım I tarafından üretilen manyetik alandaki enerji, X_L Reaktans, I Akım, Z_B Baz empedans değeri olarak tanımlanmaktadır. Burada enerji değeri sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi standart olmayan sargı yapısına sahip olan transformatörlerin kaçak reaktans hesabında yaygın olarak kullanılmakta olan bir yöntemdir. Standart dışı sargı yapısında bulunan transformatörlerin kaçak reaktans hesabının gerçekleştirilmesi oldukça zor olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi bu kısımda kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır.

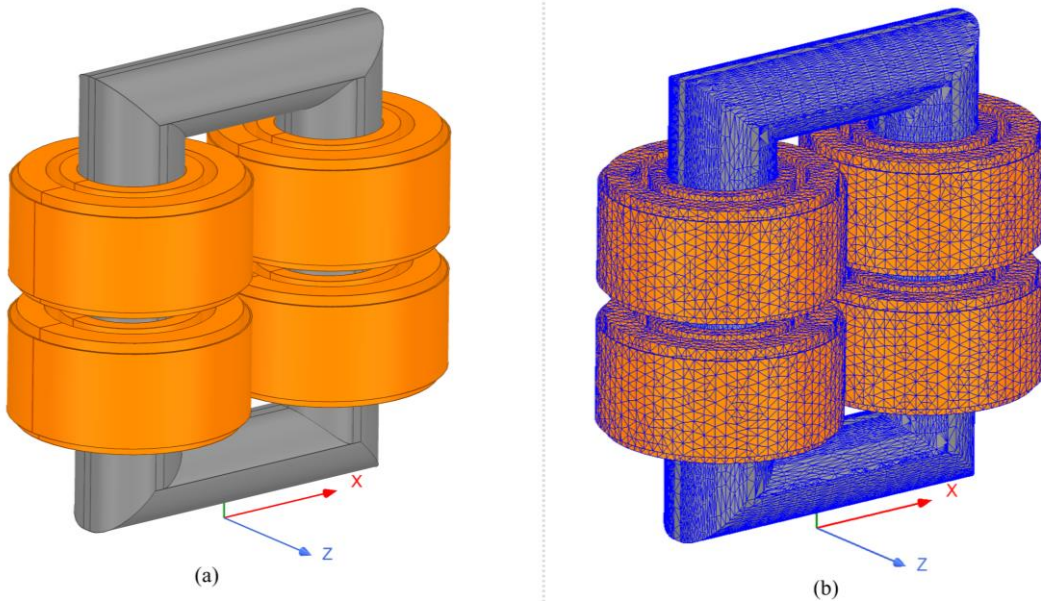
Analiz çalışmalarında Ansys Electronics Suite 2022R1 versiyonunda bulunan düşük frekanslı manyetik analizler için kullanılan Maxwell modülü kullanılmıştır. Analizlerin gerçekleştirildiği iş istasyonunda “128 Gb 1866 Mhz” bellek, “NVIDIA Quadro K2000” ekran kartı ve iki adet “Intel(R) Xenon(R) CPU E5-2683 v3 işlemci kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde ağ yapısı önemli bir rol oynamaktadır ve analiz sonuçları oluşturulan ağ yapısının kalitesinden etkilenmektedir. Ansys Maxwell modülünün adaptif ağ yapısı oluşturma özelliği bulunmaktadır. Bu özelliğe göre program tarafından başlangıçta bir ağ yapısı oluşturulmaktadır, daha sonra bu ağ yapısı iyileştirilerek tekrar oluşturulmaktadır. İki ağ yapısı için oluşan enerji miktarı ve aralarında bulunan fark hesaplanmaktadır. Enerji miktarları arasında bulunan fark, belirlenen kriteri sağlayana kadar ağ yapısı iyileştirilmektedir. Analizler için enerji hatası %1 olarak ayarlanmış ve ağ yapısı program tarafından buna göre oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar programı içerisinde malzeme tanımlamaları, uyarma akımlarının ve gerilimlerinin tanımlanması, sarım sayılarının tanımlanması, ağ yapısı özelliklerinin tanımlanması, harici devre bağlantılarının tanımlanması gibi uygulamalardan sonra sonlu elemanlar modeli analize hazır duruma gelmektedir.

Ansys Electronics Suite yazılımının Maxwell modülü içerisinde manyetik alan çözücü bölümünde manyetostatik, eddy ve transient çözücü bulunmaktadır. Manyetostatik çözücü anlık olarak analiz gerçekleştirmektedir, eddy çözücüsü frekans domeninde, transient çözücü ise zaman domeninde çözüm gerçekleştirmektedir. Hesaplanması istenen parametrelerin isterlerine göre uygun çözücüde modelleme yapılmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalarda frekans domeni çözücüsü olan eddy çözücüsü kullanılmıştır. Uygun modelleme çalışmaları ile manyetostatik ve transient çözücüler de kaçak reaktans hesabında kullanılabilir ancak, bu hesap için hem zaman tasarrufu hem de verilerin işlenebilmesi açısından eddy çözücü tipi daha uygundur.

2.3. Sonlu elemanlar modeli: 3D eksen modeli

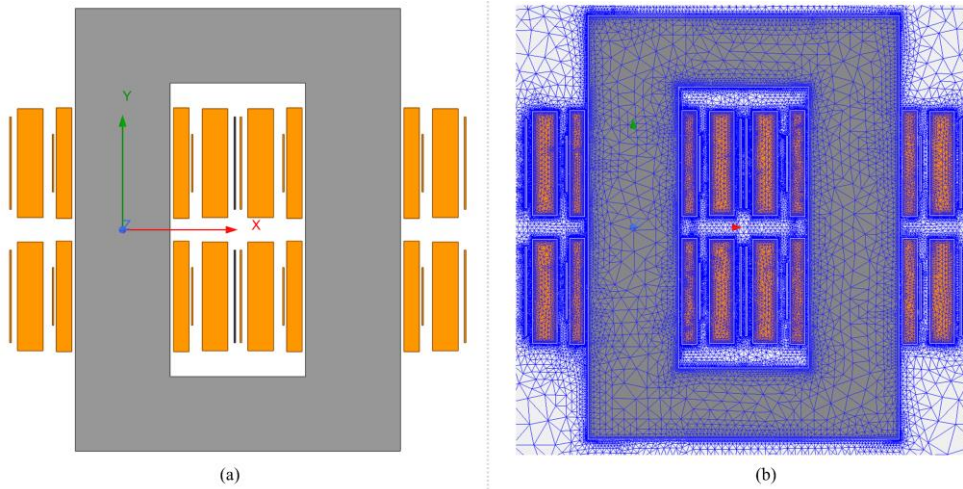
Modelleme çalışmaları kapsamında hazırlanan üç boyutlu model ve bu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 1. üzerinde gösterilmiştir. Program içerisinde bulunan her bir sargı, harici devrede uygun bağlantı ile bağlanmaktadır.



Şekil 1. (a) üç boyutlu model (b) üç boyutlu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı

2.4. Sonlu elemanlar modeli: 2DXY eksen modeli

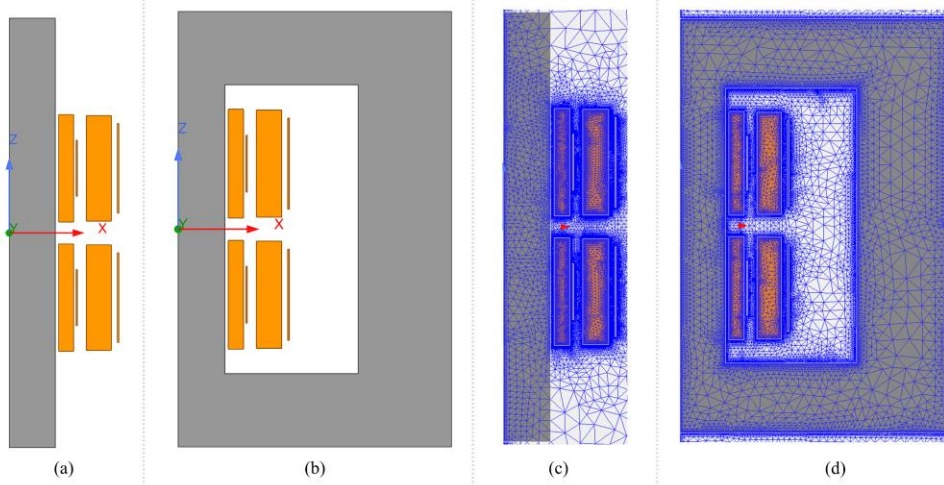
Modelleme çalışmaları kapsamında hazırlanan iki boyutlu XY Kartezyen sistem modeli ve bu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 2. üzerinde gösterilmiştir. İki boyutlu modelde, program ilgili geometrinin bir model derinliğine sahip olduğunu varsaymakta ve buna göre çözüm yapmaktadır. Programın verdiği enerji değeri ise program içerisinde otomatik olarak bir metre için hesaplanmaktadır. Kaçak reaktans hesaplarında ise uygun model derinliğinde oluşan enerji miktarına göre hesap yapılması gerekli olmaktadır.



Şekil 2. (a) iki boyutlu XY Kartezyen sistem modeli (b) iki boyutlu XY Kartezyen sistem modeli üzerinde oluşturulan ağ yapısı

2.5. Sonlu elemanlar modeli: 2DRZ eksen modeli

Modelleme çalışmaları kapsamında hazırlanan iki boyutlu RZ silindirik sistem modeli ve bu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 3. üzerinde gösterilmiştir. İki boyutlu RZ modelinde, program ilgili geometrinin Z eksenini merkezli olarak üç yüz altmış derece döndürüldüğünü varsaymakta ve buna göre çözüm yapmaktadır. RZ ekseninin doğasından dolayı tek bir modelde transformatör sargısının tamamı modellenememektedir. Pencere içinde kalan ve pencere dışında kalan kısımlar ayrı ayrı modellenerek yaklaşım yapılmış ve ilgili alanlardaki sonuçlar birleştirilmiştir.



Şekil 3. (a) iki boyutlu RZ silindirik sistem modeli (b) iki boyutlu RZ silindirik sistem modeli üzerinde oluşturulan ağ yapısı

2.6. Test yöntemi

Transformatörler üretildikten sonra elektriksel parametrelerinin uygunluğunun test edilmesi gerekmektedir. IEC 60310:2016 standardında, cer transformatörleri üzerinde yapılması gerekli olan tüm testler detaylı olarak açıklanmıştır. Üretimi gerçekleştirilmiş olan cer transformatörü üzerinde kısa devre empedansının ölçümüne yönelik testler gerçekleştirilip sonuçlar kaydedilmiştir. Buna göre kaçak reaktans olan %U_x değeri Denklem 13.'e göre hesaplanmıştır.

$$\%U_x = \sqrt{\left(\frac{100 * (V_m) * (I_n)}{25000 * (I_m)}\right)^2 - \left(\frac{100 * (L_m) * \frac{(I_n)^2}{(I_m)^2}}{(S)}\right)^2} \quad (13)$$

Burada V_m ölçülen uyarma gerilimi, I_n nominal akım, I_m ölçülen akım, L_m ölçülen kayıp, S baz güç olarak tanımlanmaktadır.

3. Bulgular

Bu bölümde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen bulgular gösterilmiştir. Analiz ve hesaplama gerçekleştirilen senaryolar Tablo 1. üzerinde gösterilmiştir. Transformatörün geometrik yapısına göre cer sargılarının konumları simetriktir. Bundan dolayı, HV-CER1, HV-CER-2, HV-CER3, HV-CER4 empedanslarının ideal şartlarda birbirleri ile aynı olması beklenmektedir. Bundan dolayı hesaplamalarda sadece bir adet tek cer kısa devresi durumu incelenmiştir. Ancak üretim şartlarına bağlı olarak, tüm bu sargıların konumlarının tamamen

simetrik olması mümkün değildir, bundan dolayı farklı cer sargıları arasında gerçek hayatta sapma olabilmektedir. Bundan dolayı test sonuçları ise farklı cerler arasında ayrı ayrı olarak gösterilmiştir.

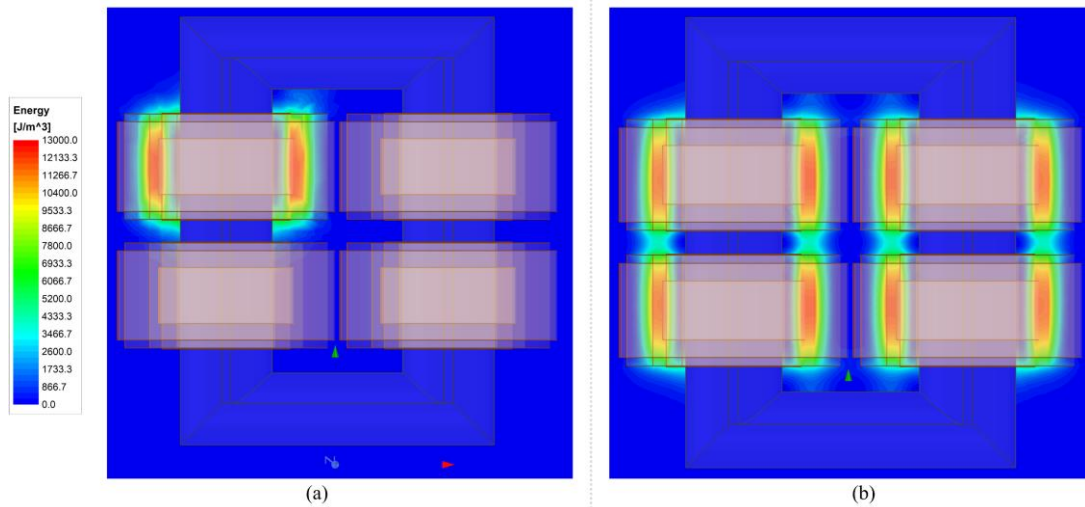
Tablo 1. Analiz senaryoları

Senaryo	Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Baz güç (kVA)	Hesap yöntemi
1	YG	CER1	425	3D
2	YG	CER1	425	2DXY
3	YG	CER1	425	2DRZ
4	YG	CER1234	1700	3D
5	YG	CER1234	1700	2DXY
6	YG	CER1234	1700	2DRZ
7	YG	CER1234	1700	Teorik

3.1. Teorik yaklaşım ve sonlu elemanlar analizi sonuçları

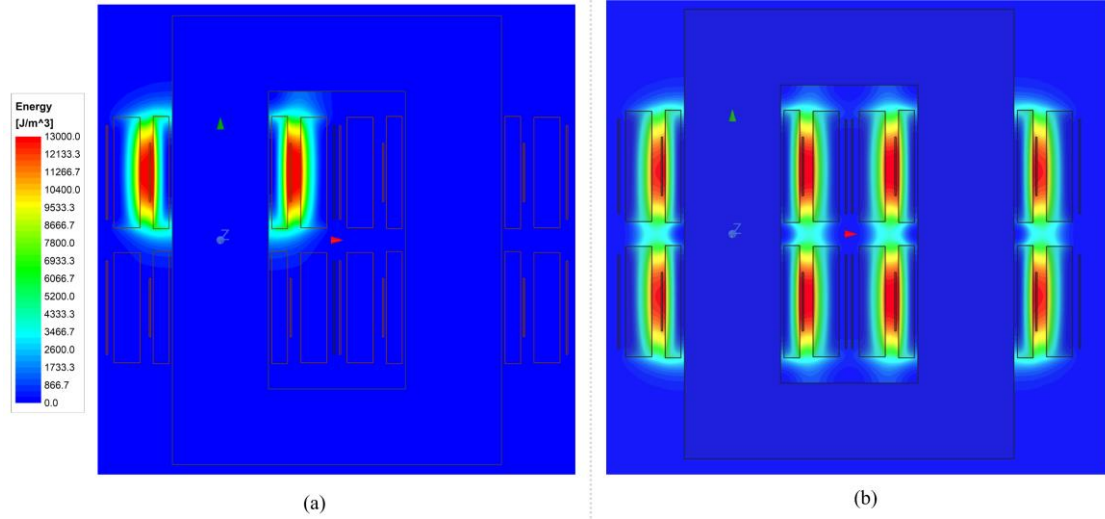
İlgili transformatör geometrisi üzerinde teorik hesaplama gerçekleştirildiğinde kaçak reaktans değeri %24.56 olarak bulunmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde ise 3D model kullanımında HV-CER1 (senaryo-1) durumunda %21.97, HV-CER1234 (senaryo-4) durumunda ise %23.70 olarak hesaplanmıştır. Bu durumlar için modeller üzerinde oluşan enerji dağılımının kesit görünümü Şekil 4. üzerinde gösterilmiştir (yatay eksen X eksenini, düşey eksen Y eksenini ifade etmektedir).



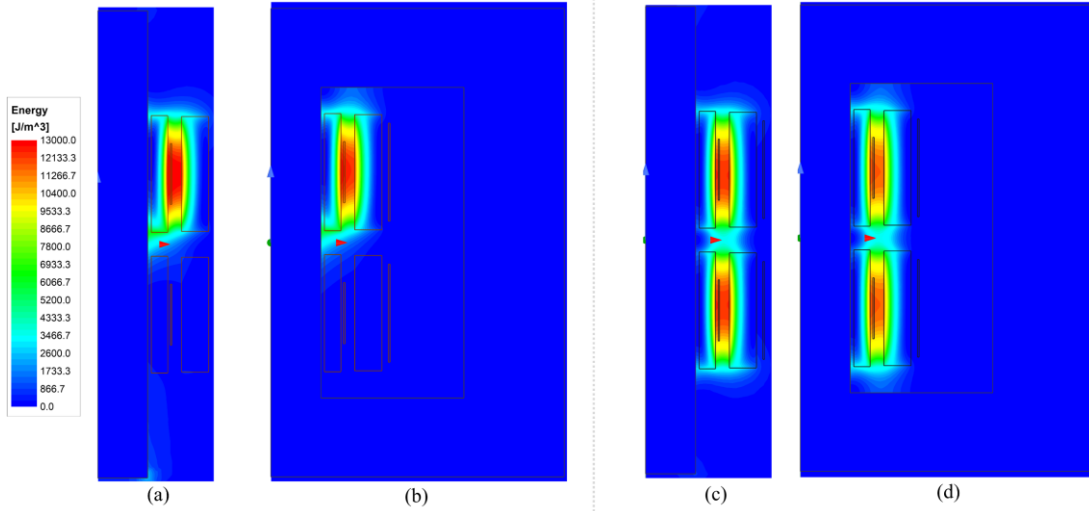
Şekil 4. (a) 3D model kullanımında HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (b) 3D model kullanımında HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde ise 2DXY modeli kullanımında HV-CER1 (senaryo-2) durumunda %22.04, HV-CER1234 (senaryo-5) durumunda ise %23.42 olarak hesaplanmıştır. Bu durumlar için modeller üzerinde oluşan enerji dağılımı Şekil 5. üzerinde gösterilmiştir (yatay eksen X eksenini, düşey eksen Y eksenini ifade etmektedir).



Şekil 5. (a) 2DXY model kullanımında HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (b) 2DXY model kullanımında HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde ise 2DRZ modeli kullanımında HV-CER1 (senaryo-3) durumunda %19.42, HV-CER1234 (senaryo-6) durumunda ise %22.49 olarak hesaplanmıştır. Bu durumlar için modeller üzerinde oluşan enerji dağılımı Şekil 6. üzerinde gösterilmiştir (yatay eksen R eksenini, düşey eksen Z eksenini ifade etmektedir)..



Şekil 6. (a) 2DRZ model kullanımında pencere içinde HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (b) 2DRZ model kullanımında pencere dışında HV-CER1 durumunda enerji dağılımı (c) 2DRZ model kullanımında pencere içinde HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı (d) 2DRZ model kullanımında pencere dışında HV-CER1234 durumunda enerji dağılımı

Farklı senaryolarda modeller üzerinde empedans hesapları gerçekleştirmek için uygulanan gerilimlerin nominal gerilimin yüzde kaçı olduğu, bu durumda oluşan akımlar, oluşan toplam enerji, hesaplanan kaçak indüktans değeri ve buna bağlı olarak hesaplanan kaçak reaktans değerleri Tablo 2. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 2. Analiz sonuçlarına bağlı olarak hesaplanan değerler

Senaryo	Kısa devre edilen cer sargısı	Baz güç (kVA)	Hesap yöntemi	Uygulanan gerilim (%)	YG sargı akım (Arms)	Enerji (J)	L (H)	XL (Ohm)	Z _{baz} (Ohm)	%U _x
1	1	425	3D	25.00	19.21	189.83	1.029	323.14	1470.59	21.97
2	1	425	2DXY	25.00	19.15	189.10	1.032	324.13	1470.59	22.04
3	1	425	2DRZ	25.00	21.76	215.17	0.909	285.53	1470.59	19.42
4	1234	1700	3D	25.00	71.23	703.64	0.277	87.15	367.65	23.70
5	1234	1700	2DXY	25.00	72.08	711.94	0.274	86.10	367.65	23.42
6	1234	850	2DRZ	25.00	37.55	370.96	0.526	165.33	735.29	22.49

3.2. Test sonuçları

Üretimi gerçekleştirilen cer trafosu üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Buna göre test sonuçları farklı cer sargıları için Tablo 3. üzerinde gösterilmiştir. Trafonun cer sargıları arasında bulunan fark ise gerçek hayatta oluşan geometrik farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Tablo 3. Test sonuçları

Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Baz güç (kVA)	%U _x
YG	CER-1	425	22.58
YG	CER-2	425	22.17
YG	CER-3	425	21.78
YG	CER-4	425	21.69
YG	CER-1234	1700	23.95

Eş cer çıkışlarının ortalama %U_x değeri %22.06 olarak hesaplanmıştır. Cer sargılarının kendi aralarında ortalama değere göre olan sapmaları ise maksimum %2.38 olarak hesaplanmıştır. Test laboratuvarından bir kesit Şekil 7. üzerinde gösterilmiştir. İlgili cer transformatörü ise Şekil 8. üzerinde gösterilmiştir.

**Şekil 7.** Test laboratuvarı



Şekil 8. Çalışmada incelenen cer transformatörü

3.2. Sonuçları karşılaştırılması

Gerçekleştirilen analiz ve test sonuçlarına göre sonuçların doğrulukları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde üç boyutlu ve iki boyutlu XY kartezyen sistem modelinin sonuçlarının tutarlı olduğu görülmektedir. Sonuçların incelenmesi için Tablo 4. üzerinde hesaplanan tüm değerler gösterilmiştir. Tüm durumlar için test sonuçları referans alındığında oluşan sapma Tablo 5. üzerinde gösterilmiştir. İki boyutlu silindirik sistemde modelin gerçeği tam olarak temsil etmesi mümkün olmadığı ve pencere içinde kalan alanlar ile pencere dışında kalan alanların arasında bulunan farktan dolayı sonuçlarda sapma olmaktadır.

Tablo 4. Analiz ve test sonuçları

Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Baz güç (kVA)	Test %U _x	Teorik %U _x	Analiz 3D %U _x	Analiz 2DXY %U _x	Analiz 2DRZ %U _x
YG	CER-1	425	22.58	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-2	425	22.17	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-3	425	21.78	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-4	425	21.69	-	21.97	22.04	19.42
YG	CER-1234	1700	23.95	24.56	23.70	23.42	22.49

Tablo 5. Analiz ve test sonuçları arasındaki % cinsinden sapma

Besleme yapılan sargı	Kısa devre edilen sargı	Teorik %Hata	Analiz 3D %Hata	Analiz 2DXY %Hata	Analiz 2DRZ %Hata
YG	CER-1	-	-2.70	-2.40	-14.03
YG	CER-2	-	-0.90	-0.60	-12.43
YG	CER-3	-	0.89	1.20	-10.86
YG	CER-4	-	1.30	1.61	-10.49
YG	CER-1234	2.55	-1.02	-2.21	-6.11

4. Sonuç

Elektrikli lokomotif sistemlerinde transformatör empedansı sürücü sistemleri için önemli bir parametredir ve dizayn aşamasında yüksek doğruluk ile hesaplanması gerekmektedir. Çalışma kapsamında örnek bir cer transformatörü üzerinde kaçak reaktans hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hem teorik yöntem ile hem de sonlu elemanlar yöntemleri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Teorik yöntemler ile kuplaj yapısı hesaplamalara dahil edilemediğinden dolayı tek sekonder kısa devre reaktanslarının hesaplanmasında yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı sonlu elemanlar gibi yöntemlerin kullanılması gerekli olmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde ise farklı geometrik eksenlerde modelleme çalışmaları yapılabilmektedir. Bu kapsamda sonlu elemanlar programında modelleme çalışmaları üç boyutlu, iki boyutlu kartezyen ve iki boyutlu silindirik geometrik eksenlerde gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar paylaşılmıştır.

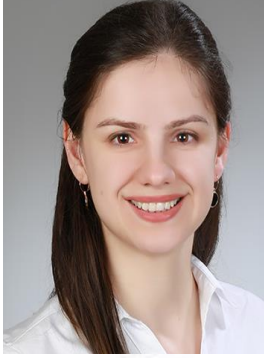
Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre tüm cer sargıları kısa devre edilmiş ve tek cer sargısı kısa devre edilmiş durumlarda %Ux değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu durum sargılar arasında bulunan kuplajdan kaynaklanmaktadır. Teorik yaklaşım ile farklı sargılar arasında bulunan kuplajlar hesaplanamadığından dolayı, tek cer kısa devre durumlarındaki %Ux hesaplamalarında teorik yaklaşım yetersiz kalmaktadır. Analiz ve test sonuçları karşılaştırıldığında 3D ve 2DXY modellerinin sonuçlarının birbirine yakın ve test sonuçları ile tutarlı olduğu görülmektedir. Buna göre 3D modelde tüm cer sargıları kısa devre edilmişken hata %-1.02, 2DXY modelinde %-2.21 olarak bulunmuştur. Tek cer sargı kısa devre edildiğinde ise 3D modelde hata %-2.7 ile %1.30 arasında, 2DXY modelinde ise hata %-2.4 ile %1.61 arasında bulunmuştur. Üretim toleranslarına bağlı olarak oluşabilen sapmalar ile birlikte incelendiğinde 3D ve 2DXY model yaklaşımlarının test ile tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. 2DRZ modelleme yaklaşımında ise tüm cer sargıları kısa devre edilmişken hatanın %-6.11, tek cer sargısı kısa devre edilmişken hatasının %-14.03 ile %-10.49 arasında olduğu görülmektedir. Bu durum 2DRZ modelinin ilgili proje için güvenilirliğinin düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, 2DRZ modelinde transformatörün geometrik sargı yapısının tam olarak temsil edilememesinden kaynaklanmaktadır. Buna bağlı olarak ilerleyen çalışmalarda, 2DRZ modelleme çalışmalarının geliştirilmesine ve transformatörün tüm sargıları arasında oluşan kaçak reaktans değerlerinin hesaplanmasına yönelik olarak çalışmaların gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Kaynakça

- [1] *Railway applications - Traction transformers and inductors on board rolling stock*, IEC 60310, 2016.
- [2] *Power transformers - Part 1: General*, IEC-60076-1, 2011.
- [3] K. Dawood, B. Alboyaci, M. A. Cinar, and O. Sonmez, "A new method for the calculation of leakage reactance in power transformers," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 5, pp. 1883–1890, 2017, doi: 10.5370/JEET.2017.12.5.1883.
- [4] K. Dawood, M. A. Cinar, B. Alboyaci, and O. Sonmez, "Calculation of the leakage reactance in distribution transformers via numerical and analytical methods," *J. Electr. Syst.*, vol. 15, no. 2, 2019.
- [5] R. L. C. Hernandez, G. A. D. Florez, J. J. P. Gelves, and E. E. Mombello, "Analytic formulation for the calculation of leakage reactance in wound-core transformers," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 65, no. 2, 2021, doi: 10.3233/JAE-190140.
- [6] B. S. Alves, P. Kuo-Peng, and P. Dular, "Contribution to power transformers leakage reactance calculation using analytical approach," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.044.
- [7] D. Azizian and M. Bigdeli, "Leakage inductance calculations in different geometries of traction transformers," *ECTI Trans. Electr. Eng. Electron. Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 28–34, 2014.
- [8] D. Azizian, "Winding temperature prediction in split-winding traction transformer," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 4, 2016, doi: 10.3906/elk-1403-304.

- [9] C. Yang, Y. Ding, H. Qiu, and B. Xiong, "Analysis of turn-to-turn fault on split-winding transformer using coupled field-circuit approach," *Processes*, vol. 9, no. 8, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/pr9081314.
- [10] I. Sitar, M. Bilo, and D. Vale, "New design of traction transformers for fixed installations," in *International Colloquium Transformer Research and Asset Management*, 2009, pp. 1–10.
- [11] I. Sitar and M. Jurković, "Modern design of EMU traction transformers," in *Automation in transportation 2014*, 2014, pp. 234–237.
- [12] D. Liu, B. Xiong, Z. Cheng, and F. Liu, "Effects of axial gap length between disc windings on magnetic fields and power losses of evaporative cooling traction transformers," in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2020, vol. 2020-Septe, doi: 10.1109/APPEEC48164.2020.9220626.
- [13] B. G. Park, T. S. Kim, K. J. Lee, R. Y. Kim, and D. S. Hyun, "Magnetic-field analysis on winding disposition of transformer for distributed high-speed train applications," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 6, doi: 10.1109/TMAG.2010.2043646.
- [14] S. Çürükova, Y. B. Demiroğlu, O. Sönmez, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Çer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66–78, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1110515.
- [15] S. Çürükova Kale, O. Sönmez, Y. B. Demiroğlu, E. Sakallıoğlu, and B. Alboyacı, "Calculation of no-load losses in traction transformers with finite element method," *Railw. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 171–183, 2024, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1395174>.
- [16] S. Çürükova Kale, Y. B. Demiroğlu, O. Sönmez, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Elektrikli lokomotif sistemlerinde cer transformatörü ve baraların oluşturduğu manyetik alanların sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 17, pp. 54–65, 2023, [Online]. Available: 10.47072/demiryolu.1175771.
- [17] Z. Ye et al., "A Calculation Method to Adjust the Short-Circuit Impedance of a Transformer," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223848–223858, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042983.
- [18] A.M. Evstaf'ev, A.Y. Yakushev, & A.G. Sereda, "A simulation mathematical model of a traction transformer with tapped secondary windings. Russ. Electr. Engin. 87, 275–281 (2016). <https://doi.org/10.3103/S1068371216050072>
- [19] C. Tian, J. Fang and X. Zhao, "Short-Circuit Impedance Analysis of HTS Traction Transformer With Flux Diverters Using Magnetic Energy Method," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 8, pp. 1–5, Nov. 2024, Art no. 5501405, doi: 10.1109/TASC.2024.3420293
- [20] J. Xiang, J. Xu, Q. Wu, Z. Shuai, N. Tong, and Y. Liu, "Traction transformer integrated LCL filtering method for high-frequency harmonic and resonance suppression in AC train," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 148, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108922
- [21] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer engineering design, technology, and diagnostics*. CRC Press, 2004.
- [22] B. Alboyacı, M. A. Çınar, and Y. B. Demiroğlu, "Influence of busbar trunking system design on thermal performance operating with non-sinusoidal currents," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, no. 108815, pp. 1–9, 2023.
- [23] Y. B. Demiroğlu and Ö. Kalenderli, "Investigation of effect of laying and bonding parameters of high-voltage underground cables on thermal and electrical performances by multiphysics FEM analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 227, p. 109987, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109987>.
- [24] Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Evaluation of cable and busbar system in multiconductor distribution systems in terms of current and magnetic field distributions," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, no. 7, pp. 3119–3132, 2021, doi: 10.3906/ELK-2103-108.
- [25] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demiroğlu, and A. Ince, "Evaluation of the effect of structural defects in the heat-shrink cable terminal on electric field distribution," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 132, no. 105920, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105920.
- [26] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demiroğlu, and M. Uzar, "Reducing the failures with adding glass insulators to composite insulators of 400 kV transmission line at high altitude," *Eng. Fail. Anal.*, p. 106678, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106678.
- [27] M. Uzar, Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, "Investigation of the effect of corona ring design parameters on electric field distribution by finite element method," *Turk J Electr Power Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2023, [Online]. Available: <https://tepesjournal.org/en/investigation-of-the-effect-of-corona-ring-design-parameters-on-electric-field-distribution-by-finite-element-method-1679>.

Özgeçmiş

**Serenay ÇÜRÜKOVA KALE**

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2013 yılında tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2015-2017 yılları arasında aynı üniversitede 'Transformatörlerin Kazan Duvarlarında Meydana Gelen Kayıpların Azaltılması için En Uygun Şönt Eleman Boyutunun Belirlenmesi' konulu tez çalışması ile tamamlamıştır. 2013 yılından beri Sönmez Transformator Sanayi ve Ticaret A.Ş. 'de tasarım müdürü olarak görev yapmaktadır. İlgili alanına giren çalışma konuları, transformatörler ve bunlara dair hesapların geliştirilmesidir. E-Posta: s.curukova@sonmeztrafo.com.tr

**Oluş SÖNMEZ**

Elektrik mühendisliği alanında lisans eğitimini 2009 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi'nde, yüksek lisans eğitimini ise 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamladı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine devam etmektedir. Transformator ve reaktör tasarımı, elektriksel ve termal modellenmesi ve benzetimi konu başlıklarında araştırmalar gerçekleştirmektedir. E-Posta: osonmez@sonmeztrafo.com.tr

**Bora ALBOYACI**

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini 1995 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini ise sırasıyla 1995 ve 1998 yıllarında Kocaeli Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Halen aynı üniversitede Elektrik Tesisleri ABD'da öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2008-2010 yılları arasında Milli Güç Kalitesi Projesi'nde ODTÜ'de doktora sonrası araştırmacı olarak görev yapmıştır. 2012 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Teknoparkta bulunan GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti.'nde Ar-Ge Müdürlüğü görevini yürütmektedir. Uzmanlık alanları enerji dağıtım sistemleri, güç kalitesi ve manyetik dizayn uygulamalarıdır. E-Posta: alboyaci@kocaeli.edu.tr

**Yunus Berat DEMİROL**

Elektrik mühendisliği lisans programını Kocaeli Üniversitesi'nde 2020 yılında tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans programını 2024 yılında tamamlamıştır. 2024 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde başladığı doktora programına devam etmektedir. 2020 yılından beri Genetek Güç Enerji şirketinde elektrik mühendisi olarak transformatorler başta olmak üzere güç sistemi ekipmanlarının sonlu elemanlar analizi ile elektriksel parametrelerinin hesaplanması alanında çalışmaktadır. E-Posta: yunusberat.demirol@genetek.com.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Serenay ÇÜRÜKOVA KALE: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Doğrulama, Kaynaklar, Görselleştirme. Oluş SÖNMEZ: Kaynaklar, Doğrulama, İnceleme, Kontrol. Bora ALBOYACI: İnceleme, Kontrol. Yunus Berat DEMİROL: Yazılım, Görselleştirme, Kavramsallaştırma.



Alüminyum Alaşımlarının Yapıştırılmasında Kullanılan Mekanik Yüzey İşlemlerinden Zımparalamanın Farklı Numaralarının Kayma Kesme Dayanımı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Melih KEKİK^{*1}, Timuçin ÖĞRENİR², Salim ASLANLAR³

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Arifiye MYO, Sakarya, Türkiye

² Türesaş, Sakarya, Türkiye

³ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Sakarya, Türkiye

*melihkekik@subu.edu.tr

(Alınış/Received: 20.06.2025, Kabul/Accepted: 11.07.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Alüminyum alaşımları yüksek dayanım - ağırlık oranı ve mükemmel enerji sönmüleme yeteneğinden dolayı gün geçtikçe kendilerine daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Enerji verimliliği hayatın her alanında olduğu gibi demiryolu sektöründe de çok önemlidir. Bu sebeple alüminyumdan imal edilmiş şasilerin ve diğer komponentlerin kullanım oranları artmıştır. Alüminyumun kaynaklanabilirliğindeki dezavantajlarından dolayı yapıştırma daha da önemli bir hale gelmiştir. Her birleştirme metodunun avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Yapısal yapıştırma işlemlerinde yapıştırma işleminden önce yüzey hazırlığı gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında alüminyum malzemelerin yüzey hazırlığında sıklıkla kullanılan mekanik işlemlerden zımparalama işlemi ele alınmıştır. Zımpara işleminde 60, 80, 150, 400 ve 1500 farklı kum numaralarındaki zımparalar ile çelik ve alüminyum oksit olarak iki farklı kum türünün mekanik dayanıma olan etkileri incelenmiştir. Hedef çalışmada 60 kum ile alüminyum oksit kum türü ile optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Yapıştırma, Pürüzlülük, Yüzey hazırlığı

Investigation of the Effect of Different Numbers of Sandpaper, One of the Mechanical Surface Treatments Used in Bonding of Aluminum Alloys, on Shear Strength

Abstract: Due to their high strength-to-weight ratio and excellent energy absorbing ability, aluminum alloys are finding more and more applications day by day. Energy efficiency is very important in the railway sector as in all areas of life. For this reason, the use of chassis and other components made of aluminum has increased. Due to the disadvantages in the weldability of aluminum, bonding has become even more important. Each joining method has its advantages and disadvantages. In structural bonding processes, surface preparation is required before bonding. In this study, sanding process, which is one of the mechanical processes frequently used in the surface preparation of aluminum materials, is discussed. The effects of abrasives with different grit numbers of 60, 80, 150, 400 and 1500 and two different grit types as steel and aluminum oxide on mechanical strength were investigated. In the target study, optimum results were obtained with 60 grit and aluminum oxide grit type.

Keywords: Aluminum, Bonding, Roughness, Surface treatment

1. Giriş

Alüminyum malzemelerin yapıştırılmasında kullanılabilecek çok sayıda yüzey işlemi bulunmaktadır. Bağlantının güvenlik sınıfına göre tasarımcı tarafından belirlenecek olan yüzey işlemlerinin her biri kendine has avantaj ve dezavantajlar barındırmaktadır. Genellikle yüzey işlemi seçilirken ekonomiklik, uygulanabilirlik, uzun süreli dayanım, mekanik dayanım gibi kriterler baz alınır. Bahsedilen yüzey işlemleri, kimyasal, fiziksel, elektrokimyasal veya elektro

Atıf için/Cite as: M. Kekik, T. Öğrenir, S. Aslanlar, "Alüminyum alaşımlarının yapıştırılmasında kullanılan mekanik yüzey işlemlerinden zımparalamanın farklı numaralarının kayma kesme dayanımı üzerine etkisinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 91-105, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1724065

fiziksel olabilir. Bu çalışmada mekanik yüzey işlemlerinden zımparalamanın yapıştırıcının tutunma (hasar türü) özelliklerine etkisi incelenmiştir [1-4].

Yapılan çalışma kapsamında yürütülmüş literatür araştırmalarında yüzey hazırlığı üzerine farklı teknikler ile ilgili çalışmalar mevcut olsa da çelik ve alüminyum oksit kum türleriyle 5 farklı kum seviyesinin AA6061 için araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır, yapılan bazı çalışmaların örnekleri şöyle özetlenmektedir; 2021 yılında Fei Cheng vd. karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile alüminyum alt tabakalar arasındaki yapışma dayanımını artırmak amacıyla, üç farklı sülfürik asit çözeltisi kullanılarak oluşturulan yüzey morfolojilerini incelemiştir. Farklı asit çözeltilerinin alüminyum yüzeyinde oluşturduğu mikroyapısal değişikliklerin, yapışma kuvveti üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Uygun yüzey işlemleriyle CFRP-alüminyum birleşimlerinde daha güçlü ve dayanıklı yapısal bağlantıların elde edilebileceğini göstermiştir [9].

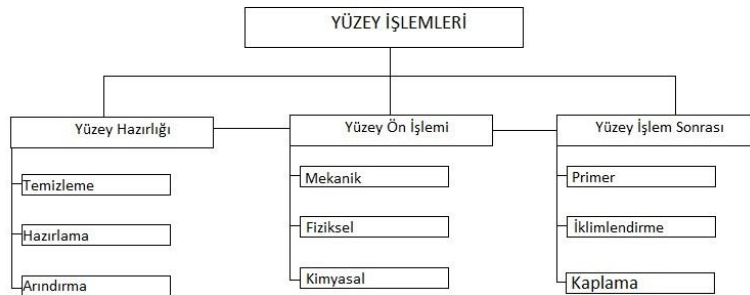
2022 yılındaki diğer çalışmada Amir Safari vd. farklı yüzey hazırlama yöntemleri ve yapıştırıcı türlerinin 2024-T3 alüminyum alaşımındaki yapıştırma bağlantılarının dayanımı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Mekanik ve kimyasal yüzey işlemlerinin yanı sıra epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların kullanımı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, uygun yüzey işlemi ve yapıştırıcı kombinasyonunun bağlantı dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymuştur [10].

2024 yılında Mani Mohan Tiwari vd. yaptığı çalışmada ise yapısal yapıştırma uygulamalarında 6061-T6 alüminyum alaşımının yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin çekme-sıyırma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Farklı yüzey işleme teknikleriyle elde edilen pürüzlülük seviyeleri, yapışma performansını doğrudan etkilemiştir. Belirli bir yüzey pürüzlülüğü aralığının yapışma kuvvetini optimize ederek daha yüksek kayma dayanımı sağladığını göstermiştir [11].

2. Yüzey İşlemleri

Yüzey hazırlığındaki temel amaçlar, yüzeyde daha önce oluşmuş zayıf tabakaların yüzeyden uzaklaştırılması, yapıştırıcı ve yüzeyler arasındaki etkileşimin en üst seviyeye taşınması, bağlantının uzun süreli dayanımını sağlayacak yüzeyler arasındaki yapışma kuvvetlerinin yüksek olması, işleme özel yüzey mikro yapısı elde edilmesidir [1-4].

Birçok malzeme türünde yapıştırma işlemi yapılmadan önce çeşitli yüzey hazırlıklarının yapılması gerekmektedir. Bu yüzey hazırlıkları temizleme, fiziksel veya kimyasal değişime uğratma, aşındırma gibi işlemler içermektedir. Genel olarak yapılan yüzey hazırlıklarının temel amacı, yüzeylerin ıslatılabilirliğini artırarak yapışmanın iyileştirilmesidir. Aynı zamanda, uzun süreli dayanım yapılacak olan iyi bir yüzey hazırlığı ile artırılabilir [4-7]. Bazı düşük enerjili yüzeylerin, kimyasal ve fiziksel bazı işlemler ile enerjisi yüzey enerjisi değiştirilmelidir [8].



Şekil 1. Yüzey işlemleri [1,2]

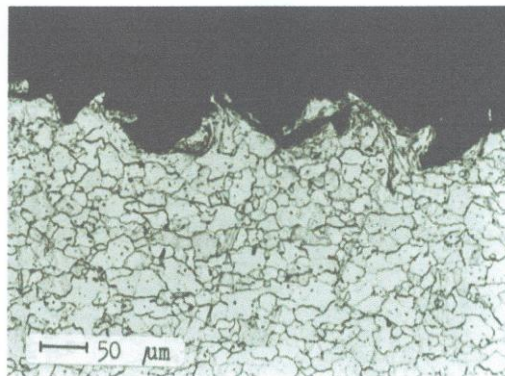
Yapıştırılacak olan parçaların yüzeylerinde bulunabilecek ve adezyonu olumsuz etkileyecek olan kontaminasyonlardan arındırılması gerekir. Genellikle güvenlik gereksinimi taşıyan tüm yapıştırma işlemlerinde bu adımlardan bir veya birkaçı yapılmaktadır. Yapıştırılacak parçaların yüzeylerinde bulunabilecek ve yapışma performansını olumsuz etkileyecek yağ, kir, pas, boya, vernik gibi katmanların genellikle kaldırılmaları gerekmektedir. Özel uygulamalar dışında bu yüzey katmanları, yapışma performansını olumsuz etkiler [1,2].

Yüzey hazırlığı işlemlerinden sonra genellikle yüzeyi tam anlamıyla hazırlamak, yüzeyin ıslatılabilirliğini, efektif temas alanını arttırabilmek için ilave bazı yüzey ön işlemleri yapılır. Bu işlemler mekanik, fiziksel veya kimyasal olabilirler. Teori ve pratikte tüm metalik malzemelerin yüzeylerinde kontrolsüz bir oksit tabakası yer alabilir. Kimi metalde bu tabaka yüzeye zayıf şekilde bağlandığı için yapıştırma bağlantısı açısından dezavantaj yaratabilir. Bu yüzden yüzeyden tamamen kaldırılması ve/veya kontrollü şekilde tekrar oluşturulması gerekebilir [9,10].

2.1. Mekanik yüzey işlemleri

Mekanik işlemler genellikle bir yüzeyin çok belirgin bir şekilde pürüzleşmesine neden olur, ancak yapışma üzerindeki etkisi karmaşıktır. Pürüzlü bir yüzeyin yalnız başına yapışma için temel bir gereklilik olmadığı unutulmamalıdır. Mekanik işlemin en önemli gereksinimi, zayıf yüzey tabakalarını ortadan kaldırmak ve temiz, yeni bir yüzey ortaya çıkarmaktır [7]. Taşlama, fırçalama, zımparalama veya kumlama en önemli yöntemlerdir. Her halükârda önceden yağ alma gereklidir, aksi takdirde olası yağ kalıntıları yüzeye yayılabilir veya hatta ince gözeneklere veya diğer girintilere bastırılabilir [6].

Taşlama, fırçalama ve zımparalama, kumlamaya kıyasla düşük toz yükü ile karakterize edilir, ancak ön işlemin düzgünlüğü daha düşüktür. Taşlama veya fırçalama etkisi, işlemi 90°'lik bir açıyla tekrarlayarak (çapraz taşlama) geliştirilebilir. Daha büyük yüzeylerin ön işlemi için tampon zımparalar ve bant zımparalar mevcuttur. Taşlama ve fırçalamadan daha etkili olan yöntem, farklı tür ve formlarda (alüminyum oksit aşındırıcı, çelik kum, cam inciler) satılan bilyeli zımparalamadır (kumlama). Maliyetleri göz önüne alındığında, özellikle yapıştırılmış bağlantıların uzun süreli gerilmesi durumunda, kumlama ideal bir yüzey ön işlemi yöntemi olarak kabul edilebilir. Jet basıncına ve aşındırıcı tane çapına bağlı olarak farklı pürüzlülük değerlerindeki yüzeyler elde edilebilir. Örnek olarak, tane çapı 0,5-1mm arasında değişen alümina aşındırıcısı ile 0,8MPa'lık jet basıncı ile kumlanan çelik yüzeye ait örnek Şekil 2'de verilmiştir [1-5].



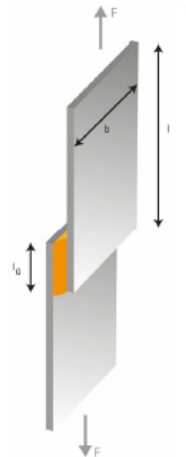
Şekil 2. Kumlanmış çelik yüzeyi [2]

2.2. Zımparalama

Yapıştırma işlemlerinde zımparalama genellikle yüzeyde yer alan ve kontrolsüz olan oksit tabakasını kaldırmak ve yüzeyi temizleyerek pürüzlendirmek için kullanılır. Kullanılacak zımpara kâğıdının elde edilecek yüzey temizliği ve pürüzlülüğünde büyük etkisi bulunmaktadır. Yapıştırma mekanizmalarından olan mekanik adezyon teorisine göre yapıştırıcının yüzeye kilitlenmesini sağlayan kavram yüzey pürüzlülüğüdür [8].

3. Deneysel Çalışmalar

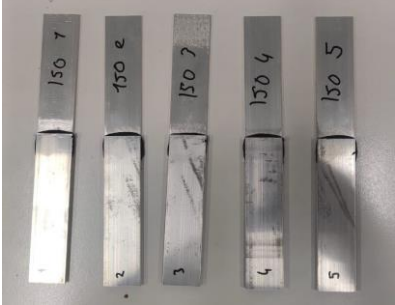
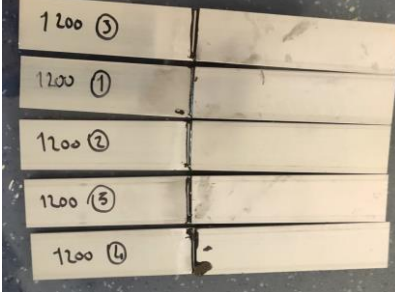
Bu çalışmanın tamamında, yapılacak olan tüm senaryolar, demiryolu aracı üretiminde kullanılması muhtemel metotlardır. Her bir senaryodan çok daha iyi alternatiflerin bulunması ve bilinmesine rağmen uygulanabilirlik, ekonomiklik, pratiklik gibi sebeplerle gerçekçi seçimler yapılmıştır. Örnek olarak zımpara, kumlama vb. işlemler, araçların imalatında uygulandığı şekilde yapılmıştır. Tüm yapıştırma işlemleri aynı sıcaklık ($25,5\text{ C}^\circ$), nem değerleri (%57) ve aynı operatör ile gerçekleştirilmiştir. Tüm işlemlerde Şekil 3.'de yer alan test numunesi kullanılmıştır. Bu düzende, kalınlığı tüm bağlantılarda sabit tutmak ve yapıştırıcı kalınlığını, yapıştırıcı içerisinde yer alan cam küreciklerin çapı ile sınırlandırmak için şimler kullanılmıştır. Testlerin yapıldığı Bu çalışmada farklı numaralara sahip zımpara kâğıtları ile elde edilecek olan yüzey pürüzlülüğü ve buna bağlı olarak yapışma performansı değerlendirilecektir. Çalışmada kullanılacak zımpara numaraları 60, 80, 150, ,400, 1200 şeklinde belirlenmiş olup elde edilen bağlantıların görselleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Örnek lap-shear test numunesi

Tablo 1. İzopropil alkol +kum zımpara ile hazırlanmış deney numuneleri

Kum zımpara	Deney numuneleri
60 kum zımpara	

80 kum zımpara	
150 kum zımpara	
400 kum zımpara	
1200 kum zımpara	

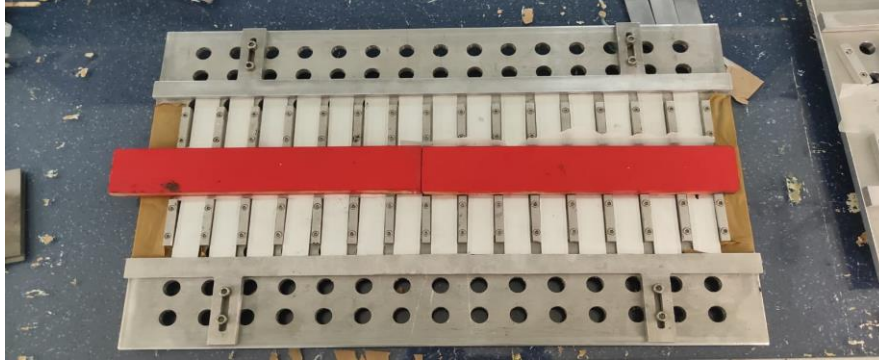
Bu çalışmada hafif raylı demiryolu araçlarında ve Milli Elektrikli Tren Setinde sıklıkla kullanılan Al 6061-T6 Alüminyum alaşımı seçilmiş, spektral analizi yapılarak sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Al6061-T6 spektral analizi

Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)	Ni(%)	Zn(%)	Ti(%)
0.754	0.520	0.270	0.122	0.890	0.151	0.0118	0.0797	0.0402
Be (%)	Bi (%)	Pb (%)	Sn (%)	V (%)	Zr (%)	Al (%)		
0.00002	0.0946	0.0055	0.0025	0.0015	0.0023	97.0		

Tüm test numunelerine kayma-kesme gerilmesinin ölçülmesi için lap-shear testi uygulanmıştır. Buna göre, TS EN 1465 standardına göre (Bindirmeli sistemlerin ayrılma dayanımının tayini) numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler 2x25x100 ebatlarında standarda göre ayarlanmıştır.

Tüm test numunelerinde bindirme uzunluğu $17 \pm 1,50$ mm olacaktır. Bunun için Şekil 4'te verilen test aparatı hazırlanmıştır.



Şekil 4. Test düzeneği

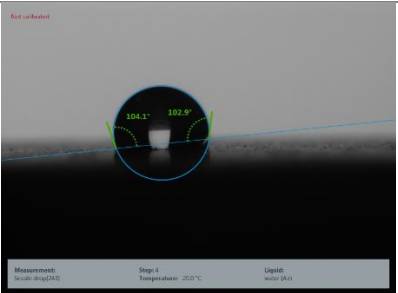
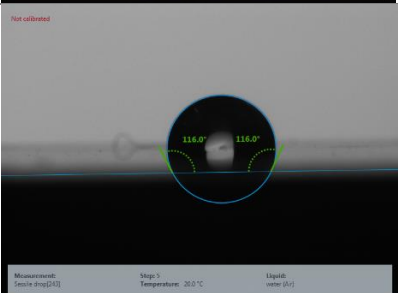
Yapılacak tüm yüzey işlemlerinde yüzeyi kontaminasyonlardan arındırmak için izopropil alkol kullanılmıştır. Yalnızca zımparanın değişken numaralarını test edilebilmesi için, laboratuvar şartları, temizleyici, operatör vb. Tüm değişkenler sabit tutulmuştur. Her bir zımparalama işleminden sonra numuneler tekrar izopropil alkol ile temizlenip SEM görüntüleri alınmıştır.

Tüm numuneler aynı standarda aynı test düzeneğinde hazırlanıp aynı kayma gerilmesi testine tabi tutulmuştur. Yapıştırıcı olarak, demiryolu araçlarında yapısal yapıştırıcı olarak kullanılan ve yanmazlık gereksinimlerini de sağlayan iki bileşenli, toklaştırılmış epoksi olan 3M™ Scotch-Weld™ 7240 FR ürünü tercih edilmiştir.

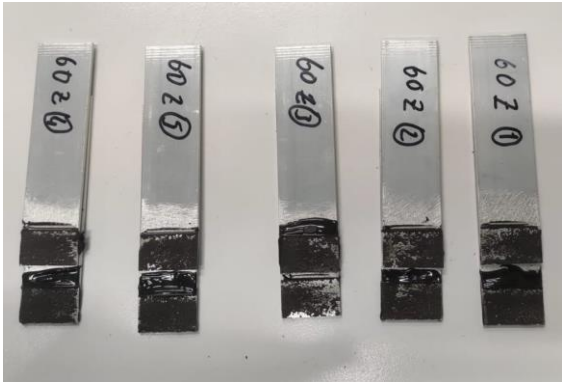
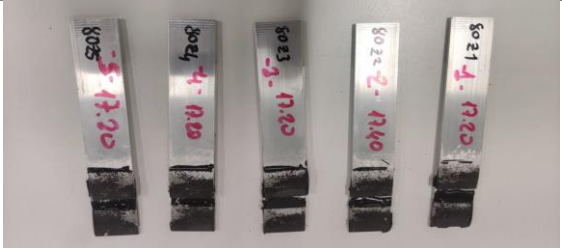
Yapıştırma işleminden önce Temas Açısı/Optik Yüzey Gerilimi Ölçüm cihazı ile farklı kum zımparalar ile elde edilmiş yüzeylerin ıslatma açıları ölçülmüş ve Tablo 3'de verilmiştir. Yapıştırma işleminden sonra yapılan çekme makaslama deneyinde elde edilen hasar türleri Tablo 4'te verilmiştir.

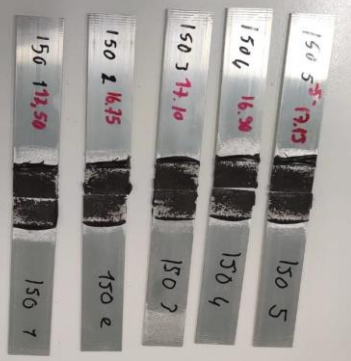
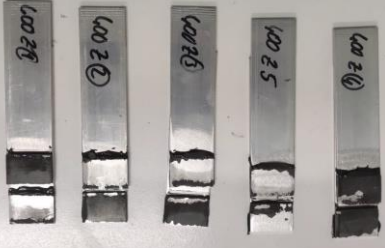
Tablo 3. Izopropil alkol +kum zımpara ile temizlenen yüzeylerin ıslatma açıları

Kum zımpara	Islatma açıları
60 kum zımpara	
80 kum zımpara	

150 kum zımpara	
400 kum zımpara	
1200 kum zımpara	

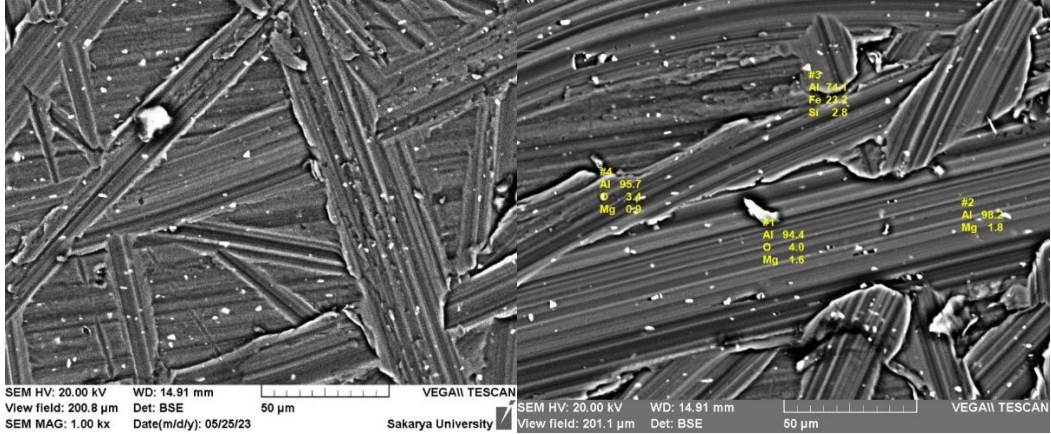
Tablo 4. İzopropil alkol +kum zımpara ile elde edilen bağlantıların test sonucunda meydana gelen hasar türleri

Kum zımpara	Hasar türü	Kopma yüzeyi
60 kum zımpara	Kohezif	
80 kum zımpara	Kohezif	

150 kum zımpara	Kohezif	
400 kum zımpara	Adezif	
1200 kum zımpara	Adezif	

3.1. İzopropil alkol + 60 kum zımpara ile mekanik yüzey işlemi

60 kum zımpara ile hazırlanacak yüzeyler öncelikle izopropil alkol ile temizlenmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında tekrar izopropil alkol ile temizlenmiştir. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümünde elde edilen veriler ve TS EN 1465 standardına göre yapılan çekme testine ait veriler 5 numunenin ortak değerleri Tablo 4'te, grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Yüzeye ait sem görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. İzopropil alkol + 60 kum zımpara ile temizlenen yüzeyin 1000x SEM görüntüsü ve EDX analizi

MALZEME TANIMI

AL 6061 - 3M 7240 FR - 60 ZIMPARA NUMUNE

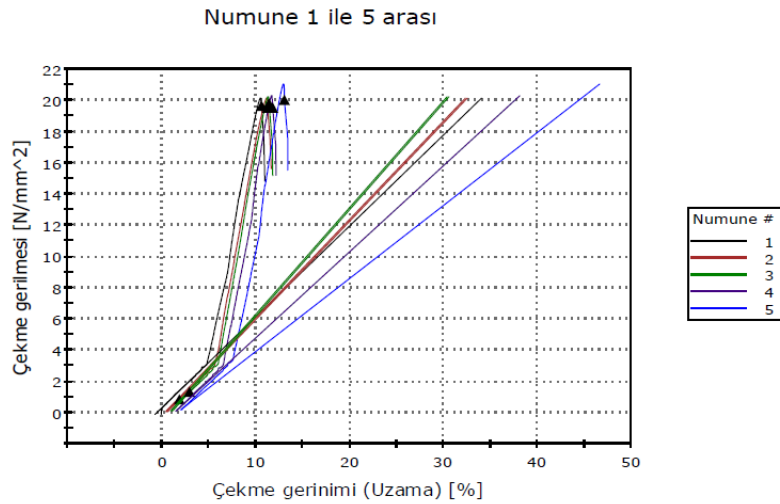
YÜZEY İŞLEMİ

60 ZIMPARA

YAPIŞTIRICI

3M 7240 FR

Test Grafiği



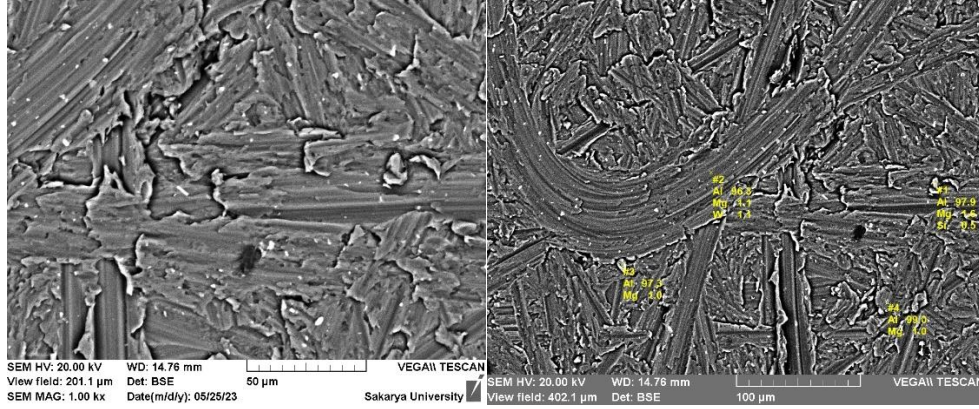
Şekil 6. İzopropil alkol + 60 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin çekme testi grafiği

Tablo 5. İzopropil alkol + 60 kum zımpara numunelerinin ortalama test sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü (Rz) (µm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Bindirme Genişliği (mm)	Maksimum Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)	Hasar Türü
15-18	15,83	24,99	8052,8	20,35	Kohezif

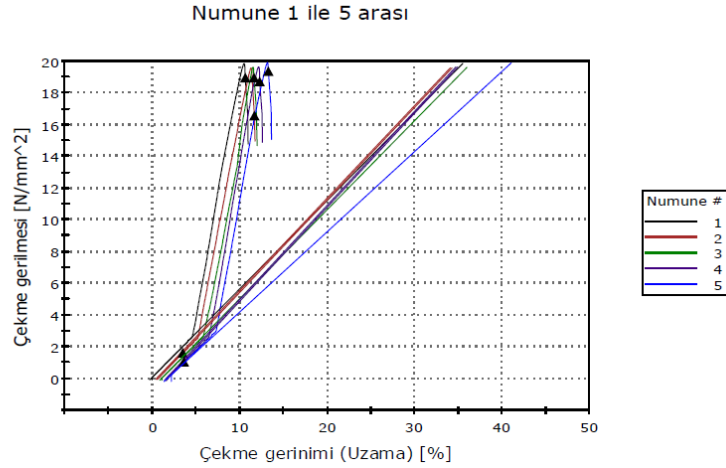
3.2. İzopropil alkol + 80 kum zımpara ile mekanik yüzey işlemi

80 kum zımpara ile hazırlanacak yüzeyler öncelikle izopropil alkol ile temizlenmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında tekrar izopropil alkol ile temizlenmiştir. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümünde elde edilen veriler ve TS EN 1465 standardına göre yapılan çekme testine ait veriler 5 numunenin ortak değerleri Tablo 6’da, grafiği Şekil 8’de verilmiştir. Yüzeye ait sem görüntüleri Şekil 7’te verilmiştir.



Şekil 7: İzopropil alkol + 80 kum zımpara ile temizlenen yüzeyin 1000x SEM görüntüsü ve EDX analizi

MALZEME TANIMI
AL 6061 - 3M 7240 FR - 80 ZIMPARA NUMUNE
YÜZEY İŞLEMİ
80 ZIMPARA
YAPIŞTIRICI
3M 7240 FR
Test Grafiği



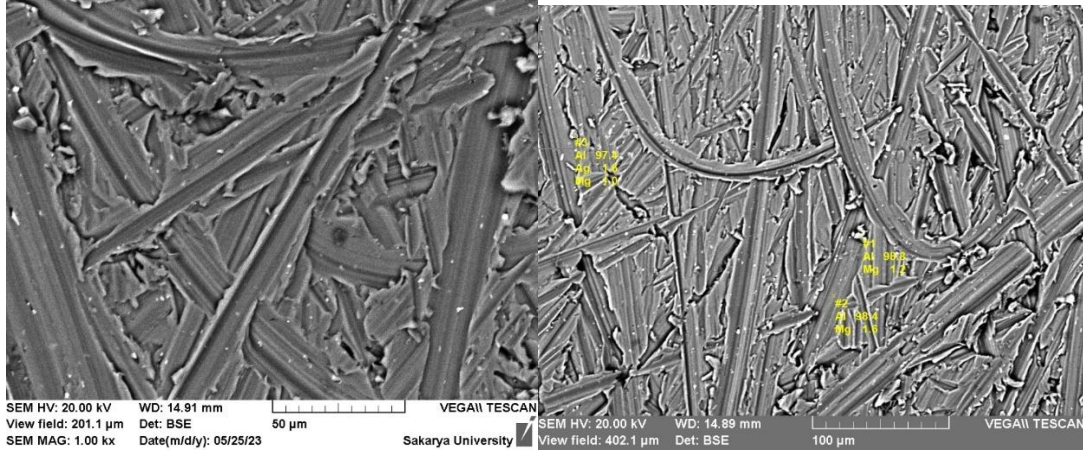
Şekil 8. İzopropil alkol + 80 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin çekme testi grafiği

Tablo 6. İzopropil alkol + 80 kum zımpara numunelerinin ortalama test sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü(Rz) (µm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Bindirme Genişliği (mm)	Maksimum Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)	Hasar Türü
8-9	17,24	24,96	8500	19,70	Kohezif

3.3. İzopropil alkol + 150 kum zımpara ile mekanik yüzey işlemi

150 kum zımpara ile hazırlanacak yüzeyler öncelikle izopropil alkol ile temizlenmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında tekrar izopropil alkol ile temizlenmiştir. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümünde elde edilen veriler ve TS EN 1465 standardına göre yapılan çekme testine ait veriler 5 numunenin ortak değerleri Tablo 7’de, grafiği Şekil 10’da verilmiştir. Yüzeye ait SEM görüntüleri Şekil 9’da verilmiştir.

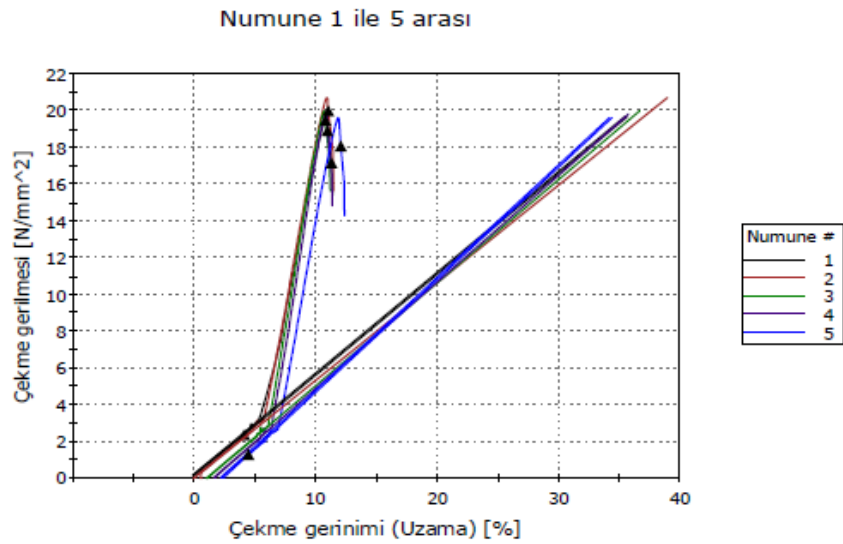


Şekil 9. İzopropil alkol + 150 kum zımpara ile temizlenen yüzeyin 1000x SEM görüntüsü ve EDX analizi

YÜZEY İŞLEMİ
150 C

YAPIŞTIRICI
3M 7240 FR

Test Grafiği



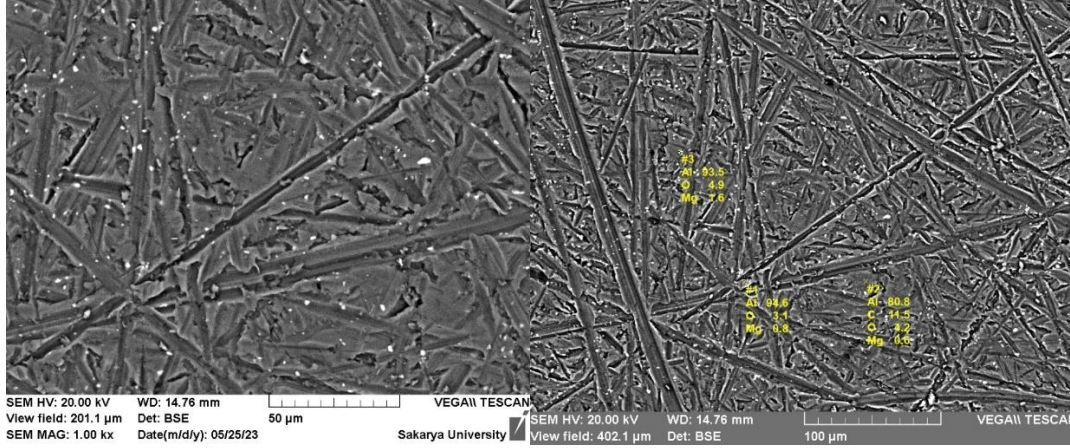
Şekil 10. İzopropil alkol + 150 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin çekme testi grafiği

Tablo 7. İzopropil alkol + 150 kum zımpara numunelerinin ortalama test sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü(Rz) (µm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Bindirme Genişliği (mm)	Maksimum Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)	Hasar Türü
6-7	17,08	24,99	8528,4	19,98	Kohezif

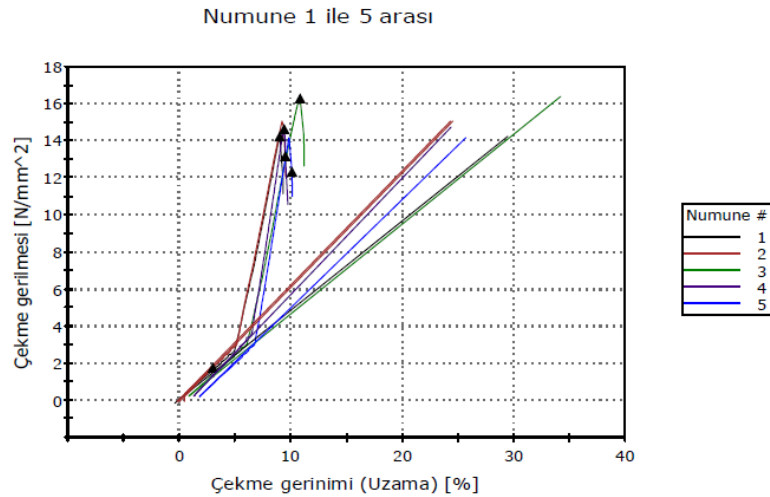
3.4. İzopropil alkol + 400 kum zımpara ile mekanik yüzey işlemi

400 kum zımpara ile hazırlanacak yüzeyler öncelikle İzopropil Alkol ile temizlenmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında tekrar İzopropil Alkol ile temizlenmiştir. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümünde elde edilen veriler ve TS EN 1465 standardına göre yapılan çekme testine ait veriler 5 numunenin ortak değerleri Tablo 8'de, grafiği Şekil 12'de verilmiştir. Yüzeye ait sem görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. İzopropil alkol + 400kum zımpara ile temizlenen yüzeyin 1000x SEM görüntüsü ve EDX analizi

MALZEME TANIMI
AL 6061 - 3M 7240 FR - 400 ZIMPARA NUMUNE
YÜZEY İŞLEMİ
400 ZIMPARA
YAPIŞTIRICI
3M 7240 FR
Test Grafiği



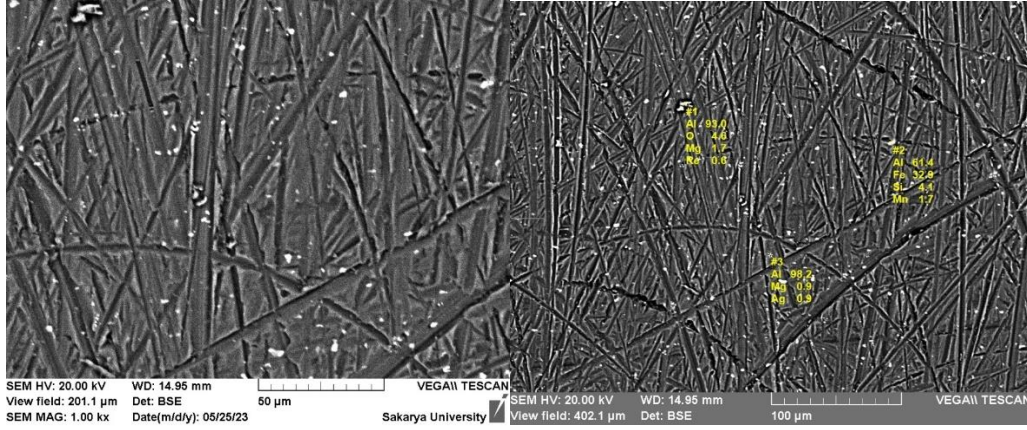
Şekil 12. İzopropil alkol + 400 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin çekme testi grafiği

Tablo 8. İzopropil alkol + 400 kum zımpara numunelerinin ortalama test sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü(Rz) (µm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Bindirme Genişliği (mm)	Maksimum Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)	Hasar Türü
2-3	17,40	24,97	6125,4	14,91	Adezif

3.5. İzopropil alkol + 1200 kum zımpara ile mekanik yüzey işlemi

1200 kum zımpara ile hazırlanacak yüzeyler öncelikle İzopropil Alkol ile temizlenmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında tekrar İzopropil Alkol ile temizlenmiştir. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümünde elde edilen veriler ve TS EN 1465 standardına göre yapılan çekme testine ait veriler 5 numunenin ortak değerleri Tablo 9'da, grafiği Şekil 14'de verilmiştir Yüzeye ait SEM görüntüleri Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. İzopropil alkol + 1200kum zımpara ile temizlenen yüzeyin 1000x SEM görüntüsü ve EDX analizi

MALZEME TANIMI

AL 6061 - 3M 7240 FR - 1200 ZIMPARA NUMUNE

YÜZEY İŞLEMİ

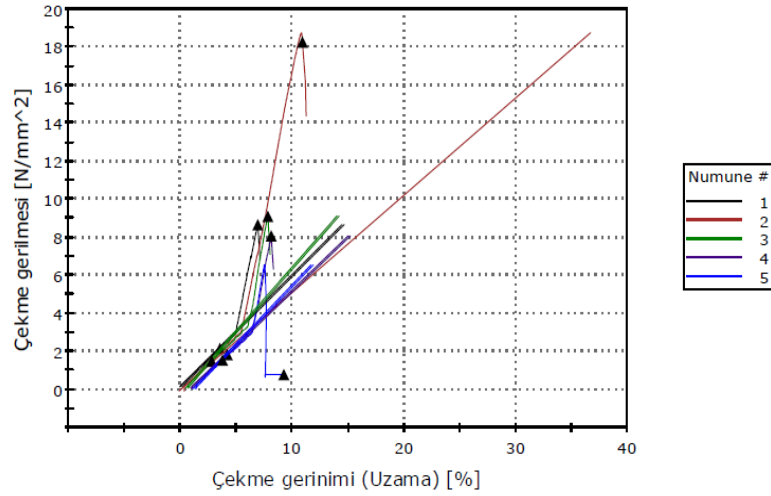
1200 ZIMPARA

YAPIŞTIRICI

3M 7240 FR

Test Grafiği

Numune 1 ile 5 arası



Şekil 14. İzopropil alkol + 1200 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin çekme testi grafiği

Tablo 9. İzopropil alkol + 1200 kum zımpara numunelerinin ortalama test sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü(Rz) (µm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Bindirme Genişliği (mm)	Maksimum Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)	Hasar Türü
1-2	16,60	24,99	4231,7	10,22	Adezif

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Mekanik yüzey işlemlerinden zımparalama işlemleri için 5 farklı zımpara kâğıdı seçilmiştir. Bu kâğıtlar 60 kum, 80 kum, 150 kum, 400kum ve 1200 kumdur. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Rz değerleri 1 µm ile 20 µm arasında değiştiği görülmektedir. 400 kum ve sonrasında kopma artık tamamen adezife dönüştüğü için 400 ve üzeri zımparaların kullanılması

teknik açıdan özel uygulamalar haricinde tavsiye edilmemektedir. Daha küçük numaralı zımparalardan en iyi sonuç 60 kumda elde edilmiştir. Ancak dikkat edilmelidir ki, oluşan yüksek pürüzlülük korozyon ve hava kabarcığı ihtimalini arttırmaktadır. Bu sebeple, özellikle yüksek nem içeriği ile yaşlanma testlerinin yapılması ve mekanik testlerin tekrarlanması gerekmektedir. 80 kum zımparanın yüzey pürüzlülüğü daha düşük olmasına rağmen elde edilen mekanik dayanımlar benzerdir. 80 kum zımparada ortalama 19,75 MPa dayanım elde edilirken, 60 kum zımparada bu değerin 20,4 MPa olduğu görülmüştür. Aradaki fark oldukça küçük olup iki alternatif için de yaşlanma testleri yapılması gerekmektedir. 150 zımparada elde edilen değerler 400 zımparaya göre çok daha iyidir. 400 zımpara ve sonrasında artık kopmaların adeziv olmasından dolayı tavsiye edilmez. Böylelikle 400 ve üzeri zımparalarda herhangi bir yaşlanma testine dahi gerek bulunmamaktadır. 80 ve 150 kum zımparalar arasında ise dayanım olarak 80 kum öndedir. Yapılacak yaşlanma testleri sonrasındaki dayanım düşümleri benzer olması halinde 80 kum zımpara veya 150 kum zımpara tercih edilebilir.

Kumlama işlemlerinde iki farklı kum tipi, aynı parametreler ile aynı operatör tarafından uygulanmıştır. Çelik kum ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü çok yüksektir. Her ne kadar elde edilen kırılma paterni kohezif kırılmayı gösteriyor olsa da, alüminyum yüzeyine gömülü kalan ve operatörün göremeyeceği kum taneleri sıcaklık farkı, nem ve farklı malzemeler arasında gelişecek olan korozyon sebebiyle zayıf sınır tabakası oluşturacak ve adezyonu azaltacaktır. Dolayısıyla bir yüzeyi tamamen kumdan ayırmak ya mümkün değildir, ya da işlemin zorluğu ve maliyeti fazladır. Bu sebeple elde edilen değerlerin yüksek olmasına karşın alüminyum oksit kullanılan kumlamaya göre bir avantajı bulunmamaktadır. Alüminyum oksit ile kumlanan parçaların yüzey pürüzlülüğü, çelikle kumlanan parçaların yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık olarak yarısı olmasına karşın iki yöntemle de ortalama 20 MPa'lık dayanım elde edilmiştir. Ayrıca çelik kumun sağladığı yüzey pürüzlülüğünün solvent ile temizlenmesi sonrasında yüzeyde artık madde kalma ihtimali ve yüzey pürüzlülük noktalarının içinde solvent hapsolme ihtimali bulunmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmalar neticesinde, ilave bir yaşlanma testi gereksiz alüminyum oksit kumu tercih edilebilir.

Kaynakça

- [1] E. M. Petrie, Handbook of Adhesives & Sealants, USA, 2000.
- [2] S. Ebnesajjad, Handbook of Adhesives and Surface Preparation, William Andrew, 2010.
- [3] J. Minford, Handbook of aluminum bonding technology and data, New York, 1993.
- [4] G. Gierenz, W. Karmann, Adhesives and Adhesive Tapes, Wiley-Vch, 1997.
- [5] J. Minford, Aluminum Adhesive Bond Performance Treatise on Adhesion and Adhesives, USA, 1981.
- [6] G. Habenicht, Applied Adhesive Bonding: A Practical Guide for Flawless Results, Wiley-Vch, 2009.
- [7] A. Hutchinson, "Surface Preparation of Component Materials, Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using FRP Composites", Woodhead, 2008.
- [8] T. Şekercioğlu ve M. Özenç, "Metallerin Yapıştırılmasında Kullanılan Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi," *Mühendis ve Makine Dergisi*, 2012.
- [9] F. Cheng, Y. Hu, X Zhang, X Hu, Z. Huang, "Adhesive bond strength enhancing between carbon fiber reinforced polymer and aluminum substrates with different surface morphologies created by three sulfuric acid solutions," *Composites Part a: Applied Science and Manufacturing*, 2021.
- [10] A. Safari, M. Farahani, P. Ghabezi, "Experimental study on the influences of different surface treatment processes and adhesive type on the aluminum adhesive-bonded joint strength," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020.
- [11] M.M. Tiwari, S. Noormohammed, D.K. Sarkar, & X. G. Chen, "Effects of surface roughness parameters on the shear strength of AA 6061-T6 aluminium alloy in structural adhesive bonding applications," *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2024.

Özgeçmiş**Melih KEKİK**

Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora Eğitimini Sakarya Üniversitesinde tamamladı. Küçükoğlu Holding ve Yeşilova Holding’te Ar-Ge Mühendisi olarak görev yaptıktan sonra Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi’nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: melihkekik@subu.edu.tr

**Timuçin ÖĞRENİR**

Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesinde tamamladı. Doktora eğitimine Sakarya Üniversitesinde devam ediyor. Türkiye Raylı Sistem Araçları Anonim Şirketine Kalite Kontrol Koordinatörü olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: timucin.ogrenir@turasas.gov.tr

**Salim ASLANLAR**

Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimini Fachhochschule Niederrhein Üniversitesinde tamamladı. Sakarya Üniversitesinde sırasıyla Araştırma Görevlisi, Öğretim Görevlisi, Yardımcı Doçent ve Doçent olarak görev yaptı. Halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesinde Profesör Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: aslanlar@subu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Melih KEKİK: Kavramsallaştırma, Görselleştirme, Metodoloji, Yazım, Doğrulama. Timuçin ÖĞRENİR: Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama ve Düzenleme.

Salim ASLANLAR: İnceleme, Yazma-gözden geçirme, Kontrol.

**Demiryolu Araçlarında Yalıtım Kalınlığının Vagon İç Sıcaklığına ve Isıl Yüke Etkisinin İncelenmesi**Mustafa DÖNMEZ¹, Mehmet Mete ÖZTÜRK^{*2}, Bahadır DOĞAN³¹ Eskişehir Teknik Üni., Lisansüstü Eğitim Ens., Raylı Sistemler Müh. Bölümü, Eskişehir, Türkiye² Eskişehir Osmangazi Üni., Müh. Mim. Fak., Uçak Mühendisliği. Bölümü, Eskişehir, Türkiye³ Eskişehir Osmangazi Üni., Müh. Mim. Fak., Makine Mühendisliği. Bölümü, Eskişehir, Türkiye

*mete.ozturk@ogu.edu.tr

(Alınış/Received: 24.06.2025, Kabul/Accepted: 17.07.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Yolcu taşımacılığında kullanılan vagonlarda yalıtım kalınlığı ve malzemesinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. Trenin ısı kayıplarını minimize etme hedefiyle, tren zarfı olarak adlandırılan yapısal model alt bölümlere ayrılarak incelenmiştir. Belirlenen bu bölümler için farklı yalıtım kalınlıkları ve malzeme çeşitleri tanımlanmış, bu sayede parametrik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler, yaz ve kış mevsimlerine özgü farklı sıcaklık senaryoları altında enerji tüketimi üzerindeki etkiyi belirlemek üzere yürütülmüştür. Ticari bir mühendislik yazılımı olan ANSYS kullanılarak yapılan bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen veriler, karşılaştırmalı analize uygun biçimde derlenmiştir. Çalışma, malzeme ısı iletim katsayısının düşmesi ve yalıtım kalınlığının artmasıyla enerji tüketiminde gözlemlenen azalma arasındaki doğrudan ilişkiyi nicel verilerle desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Tren zarfı, Yalıtım malzemesi, Nümerik analiz, Raylı sistemler, Enerji verimliliği

Investigation of the Effect of Insulation Thickness on Interior Wagon Temperature and Thermal Load in Railway Vehicles

Abstract: This study focuses on the effect of insulation thickness and material on energy consumption in passenger wagons. With the aim of minimizing heat losses of the train, the structural model, referred to as the "train envelope," was divided into sub-sections and examined. Different insulation thicknesses and material types were defined for these determined sections, thereby conducting a parametric analysis. The analyses were carried out under various temperature scenarios specific to summer and winter seasons to determine the effect on energy consumption. The data obtained from these evaluations, performed using ANSYS, a commercial engineering software, were compiled in a format suitable for comparative analysis. The study supports with quantitative data the direct relationship between the decrease in energy consumption and the reduction in the material's thermal conductivity coefficient and the increase in insulation thickness.

Keywords: Train envelope, Insulation material, Numerical analysis, Railway, Energy efficiency

1. Giriş

Teknolojinin hızla ilerlemesi ile kullanımı her geçen gün artan enerjinin verimli kullanılması tüketilen toplam enerjinin %20'sini oluşturan ulaştırma sektörü açısından önemli bir konudur. Taşımacılıkta oluşan yüksek enerji talebi ve bunlara ilave olarak son yıllarda fosil yakıt tüketiminin çevresel etkileri, enerjinin daha verimli kullanılması gerekliliği gibi hususlar, yaygın olarak elektrik kullanımına izin veren, süratli insan ve eşya taşımacılığına müsaade eden demiryolunun daha çok ön plana çıkmasına sebep olmuştur. 2000'li yıllar ile birlikte yolcu ve yük taşımacılığında büyüme gösteren demiryolu taşımacılığı gelişme dönemine girmiş ve toplanan veriler doğrultusunda, bu büyüme trendi ile birlikte, 2025 yılına kadar yolcu taşımacılığında %3,2, yük taşımacılığında %1,4 ve şehir içi taşımacılıkta %5,2 paya sahip olması

Atıf için/Cite as: M. Dönmez, M. M. Öztürk, B. Doğan, "Demiryolu araçlarında yalıtım kalınlığının vagon iç sıcaklığına ve ısı yüküne etkisinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 106-120, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1725159

beklenmektedir [1]. Demiryolu taşımacılığında enerjinin verimli kullanılması için birçok akademik çalışma yapılmıştır.

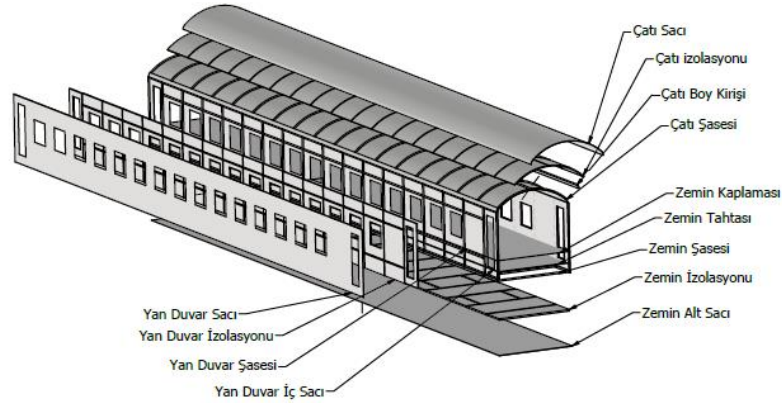
Aliahmadi vd. [2] iklimlendirme sisteminden vagona sağlanan havanın çoğunlukla bölmenin sol tarafına doğru meyilli olduğunu ve termal konfor koşullarının elde edilmediğini belirtmişlerdir. Bazı basit değişiklikler ile hava akışı dağılımını simetrik hale getirebileceğini göstermişlerdir. Dullinger vd. [3], demiryolu araçlarında enerji tüketimini hesaplayabilmek için hafif raylı araçlar için geliştirilen modül ile HVAC sistemlerinin enerji tüketimlerinin hesaplanması konusunda bir çalışma yapmışlardır. Önerilen modül, kullanıcı dostu bir arayüze entegre edilmiş ve bu arayüz yardımıyla veri setlerini işlemek, sonuçları zaman domainleri içinde göstermek ve yıllık enerji tüketimlerinin kolay bir şekilde incelenebileceğini belirtmişlerdir. Powell vd. [4] şehir içi raylı sistemlerde kullanılan bir metro aracının yıllık enerji tüketiminin yaklaşık %11'inin yardımcı sistemler tarafından kullanıldığını ve yardımcı sistemler tarafından tüketilen enerjinin %45'nin ısıtma ihtiyacı için tüketildiğini tespit etmişlerdir. Barone vd. [5], TRNSYS programı ile bütün çevresel şartları bir demiryolu aracı üzerine uygulayarak gerçek zamanlı dinamik bir analiz yapmayı, enerji kaybını azaltabilecek çözümler bulmayı amaçlamıştır. Daha önceki yapılan çalışmalardan farklı olarak trenin yapısalında kullanılan yalıtım malzemesi ve HVAC tasarımıdaki iyileştirmeler yapılabileceğini açıklamıştır. Çalışma sonucunda yapılabilecek değişiklikler ile yolcuların konfor şartları değiştirilmeden enerji tüketiminin 0,4 – 6 MWh/yıl azaltılabileceği belirtilmiştir. Hofstadter vd. [6] Avusturya'nın Viyana şehrinde çalışan bir tramvay için konfor ve enerji analizi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Tam sayılı doğrusal optimizasyona dayalı bu yöntem ile kontrol stratejisine bağlı olarak %9 ile %32 arasında değişen elektrik enerjisi tasarrufu sağlanmıştır. Vetterli vd. [7] Basel Üniversitesi ve diğer kurumlar ile birlikte İsviçre Rhaetian Demiryolunda bulunan bir EWII yolcu trenini üç yıl boyunca incelemiştir. Trenden alınan veriler ile analiz programı kalibre edilmiştir. Tren enerji tüketiminin %20-40 arasında olan bölümünün konfor fonksiyonları olarak kullanıldığı anlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu konfor fonksiyonları için kullanılan enerjide tren yapısalı ve HVAC sisteminden kaynaklı kayıplar yaşandığı anlaşılmıştır. Amri vd. [8] yaptıkları çalışmada bir metro aracı için özel olarak tasarlanmış talebe dayalı bir kontrol stratejisinden bahsedilmiştir. Isıtma ve havalandırma için kullanılan mevcut kontrol sistemi, talep kontrollü (akıllı) bir ısıtma ve havalandırma ünitesi ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan talep kontrollü ısıtma ve havalandırma ünitesi ile enerji tüketiminde 325 MWh/yıl azalma simülasyon ile doğrulanmıştır. Marcos vd. [9] yolcu taşımacılığında kullanılan klimanın araç tarafından tüketilen toplam enerjinin içerisinde önemli bir paya sahip olduğunu belirtmiştir. Çalışmada bir araç için basit ve dinamik bir model hazırlanmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Liu vd. [10] klimalı bir tren bölmesinde dinamik soğutma yükünü simüle etmek için matematiksel bir model oluşturmuştur. Modelleme için Gambit, dinamik simülasyon için FLUENT kullanılmıştır. Sonuçlar tren bölmesinin toplam soğutma yükü talebinin farklı bölgelerde farklı saat dilimlerinde maksimum 40,4 – 43,8 kW ve minimum 4,5 kW olduğunu göstermiştir. Çin ulusal standardı ile sonuçlar karşılaştırılmıştır ve daha az enerji tüketimi için çalışmanın dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Shravanth vd. [11] Hindistan Demiryollarına ait bir vagonun çatısına monte edilen fotovoltaiik modüller ile vagonunun günde en az 18 kWh elektrik üretebileceği ve bunun da yıllık 1700 litre dizel yakıt tasarrufu sağlayabileceğini tespit etmişlerdir. Ampofo vd. [12] demiryolu hatları üzerindeki tünellerde tren geçişleri sebebiyle oluşan sıcak havanın diğer kabin içi sıcaklık etkileriyle birleşerek yolcuların konfor şartlarını düşürdüğünü belirterek tünellerin soğutulmasına yönelik bir çalışma yapmıştır. Tünel içi farklı soğutma yöntemleri ile soğutma yükü için talep edilen enerji miktarının azaltıldığı görülmüştür.

İncelenen literatür çalışmaları, yolcu taşımacılığında kullanılan demiryolu araçlarının toplam tükettiği enerjinin yaklaşık %20-40'nın yolcuların konfor şartlarını sağlamak için kullanıldığı göstermiştir [7]. Yıllık tüketim olarak değerlendirildiğinde bu miktar ciddi bir enerji tüketiminin olduğunu ve enerji verimlilik çalışmalarının bu alanda yapılması gerektiğini bize anlatmaktadır.

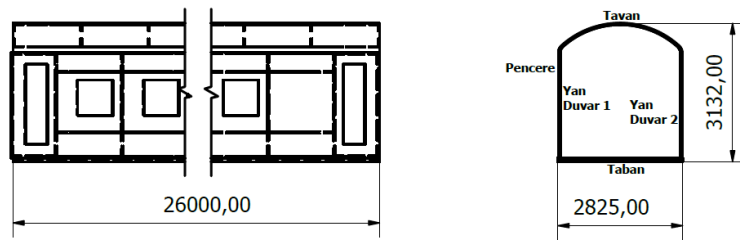
Daha önceki çalışmalarda İklimlendirme aydınlatma gibi sistemlerde yapılan çok sayıda değişikliğin yıllık enerji tüketimine etkisi net bir şekilde ifade edilmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda tren zarf yapısı ve yapının enerji tüketimine olan etkisinin detaylı bir şekilde incelenmediği görülmüştür.

2. Metot

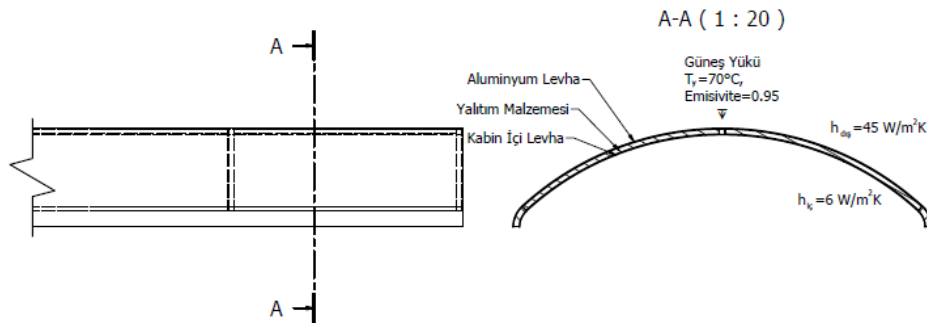
Demiryolu yolcu taşımacılığında kullanılan vagon çeşitlerinden olan, üretimi ülkemizde gerçekleştirilen konvansiyonel yolcu vagonu modellenmek ve analizde kullanılmak üzere seçilmiştir. Vagonun analiz programında incelenebilmesi için tüm geometrisi teknik özelliklerinde belirtilen ölçülerde Autodesk Inventor programı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 1’de vagonun hangi parçalardan oluştuğu belirtilmiştir. Vagon modellemesi sonrasında geometri incelenmek üzere dört farklı bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler; tavan, taban, yan duvarlar ve pencereden oluşmaktadır. Şekil 2’de ayrılan bölümler belirtilmiştir. Tavan, taban, yan duvarlar ve pencerenin farklı geometri ve malzemelere sahip olmaları, maruz kaldıkları ısı yüklerinin farklı olması sebebiyle ayrı modeller olarak değerlendirilmiştir. Şekil 3’te vagonun tavan geometrisi gösterilmiştir. Modelleme ve analizde kullanılmak üzere tavan, taban, yan duvarlar dört farklı kalınlıkta tekrar modellenmiştir.



Şekil 1. Konvansiyonel vagonun patlatılmış teknik resmi



Şekil 2. Konvansiyonel vagonun geometrik ölçüleri ve bölümleri



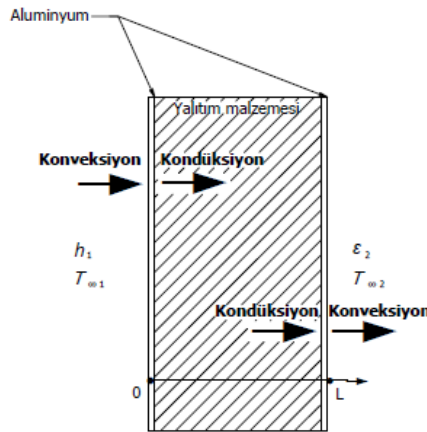
Şekil 3. Konvansiyonel vagonun tavan teknik resmi

Değişen kalınlıklar, yapıda kullanılan yalıtım malzemesinin değişiminden kaynaklanmaktadır. Kullanılan kalınlıklar; 50 mm, 70 mm, 80 mm ve 90 mm'dir. Analizlerde değişen diğer bir parametre farklı kalınlıklarda kullanılan yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısıdır. Tablo 1'de gösterildiği şekilde, dört farklı malzeme için dört farklı ısı iletim katsayısı analize dahil edilmiştir. Bu ısı iletim katsayıları; Liu vd. [10] ve Ampofo vd. [12]'nin çalışmalarında kullandığı 0,08 W/(mK) ve 0,096 W/(mK) katsayılarına ek olarak sektörde uygulamada kullanılan ısı iletim katsayıları olan 0,03 W/(mK) ve 0,046 W/(mK)'dir .

Tablo 1. Analizde kullanılan yalıtım malzemelerinin özellikleri

Yalıtım Malzemesi	Isı İletim Katsayısı	Yangın Tepki Sınıfı	Yoğunluk
Poliüretan Sert Köpük	0,030 W/(mK)	D	30 kg/m ³
Cam Yünü	0,046 W/(mK)	A1-A2	50 kg/m ³
Yalıtım malzemesi-A [10]	0,096 W/(mK)	-	-
Yalıtım malzemesi-B [12]	0,080 W/(mK)	-	-

Analizler için gereken iç ve dış duvarlarda oluşan konveksiyon katsayıları belirlenmiştir. Kabin içi konveksiyon katsayısı iç ortamlar için tespit edilen ve yararlanılan tipik bir değer olmakla birlikte, dış ortam konveksiyon katsayısı, bu tür uygulamalar için Çin demiryollarında önerilen hesaplama yöntemi ile 80 km/s ortalama hızla hareket eden bir demiryolu aracı için konveksiyon katsayısı 45 W/m²K olarak hesaplanmıştır. İç ortam yüzey konveksiyon katsayısı 6 W/m²K olarak kabul edilmiştir. Duvar ve taban için sınır şartları Şekil 4'te belirtilmiştir.



Şekil 4. Tren zarfı için konveksiyon sınır şartları

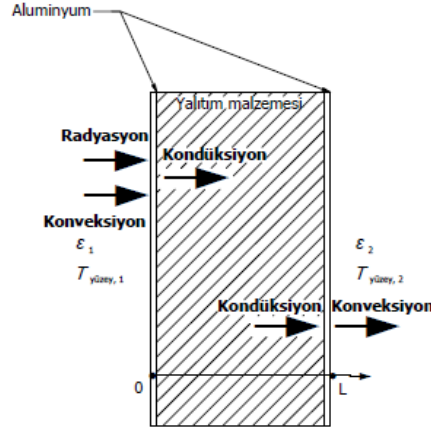
Isı transfer katsayısı dış yüzeyde konvektif kabul edilmiş olup, Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır [10]. Burada; h konveksiyon ısı taşınım katsayısı ve V hızdır. Isı transfer mekanizmasının vagon zarfı boyunca ısı iletim, zarfın her iki yüzeyinde ise konveksiyon ile transfer gerçekleşmektedir. Bu durumu belirten denge denklemleri Denklem 2 ve Denklem 3'teki gibidir [13]. Burada; k ısı iletim katsayısı, h konveksiyon ısı taşınım katsayısı ve T sıcaklıktır.

$$h_0 = 9 + 3.5 V^{0.66} \quad (V > 0) \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)] \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_2 [T(L, t) - T_{\infty 2}] \quad (3)$$

Analizdeki bir diğer parametre olan iç ve dış ortam sıcaklıkları yaz ve kış mevsimleri için belirlenmiştir. Yaz mevsimi için; iç ortam sıcaklığı 25°C kabul edilerek dış ortam sıcaklığı 30°C ve 35°C, kış mevsimi için; iç ortam sıcaklığı 20°C kabul edilerek dış ortam sıcaklığı 0°C ve 10°C olacak şekilde dikkate alınmıştır. Duvar, cam ve taban için yukarıda belirtilen eşitliklerden yararlanmak mümkünken, Marcos vd. [9]'nin belirttiği üzere araçların tavan bölümlerinin ısı analizlerinde radyasyon etkisinin dikkate alınması gerekmektedir. Tavan için radyasyon sınır şartları Şekil 5'te belirtilmiştir.



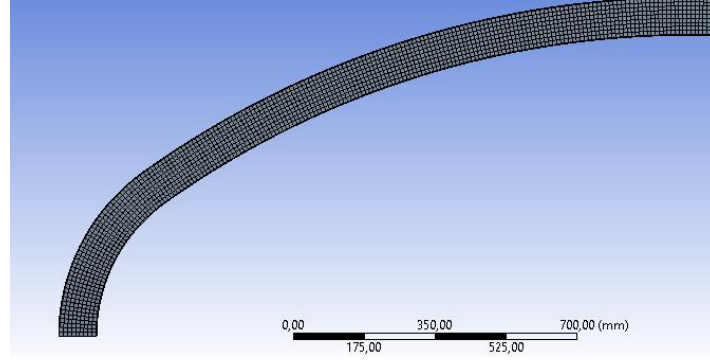
Şekil 5. Tren zarfı için radyasyon sınır şartları

Isı transfer mekanizmasının vagon zarfı boyunca kondüksiyon, zarfın dış yüzeyinde radyasyon ve konveksiyon, zarfın iç yüzeyinde ise konveksiyon ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu durumu belirten denge denklemleri Denklem 4 ve Denklem 5'teki gibidir [13]. Burada; k ısı iletim katsayısı, ε emisivite, σ Stefan Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır.

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \varepsilon_1 \sigma [T_{yüzey,1}^4 - T(0, t)^4] + h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)] \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_2 [T(L, t) - T_{yüzey,2}] \quad (5)$$

Marcos vd. [9] belirttiği üzere, araçların termal analizinde yan yüzeylerden farklı olarak, radyasyon etkisi etkindir ve ihmal edilemez. Bu bölümlere dair yapılacak simülasyonlarda sonuçların daha gerçekçi olması için güneş yükünün etkisi ortalama bir sıcaklık ve emisivite (yayıcılık) değeri ile analize dahil edilmiştir. Değerlerin gerçeğe yakın olabilmesi için benzer geometriye sahip bir yapının belirtilen koşullar altında pik saat sıcaklığı kızılötesi lazer sıcaklık ölçüm cihazı ile yüzey sıcaklığı ve emisivite ölçümleri yapılmıştır. Modelin taban bölümünün analizinde ise, duvar için belirtilen analize ilave olarak zeminde kullanılan tahta tabaka da analize dahil edilmiştir. Üç boyutlu modeller analiz için ANSYS [14] ortamına aktarılmıştır. Sürekli rejim termal modülü kullanılarak analizler yapılmıştır. Şekil 6'da tavan kesitinin analiz ortamındaki ağ yapısı verilmiştir. Ağ yapısına ait kesit, 141956 düğüm sayısı ve 23990 elemandan oluşmaktadır. Ağ yapısı için eleman boyutu 10 mm olarak belirlenmiştir.

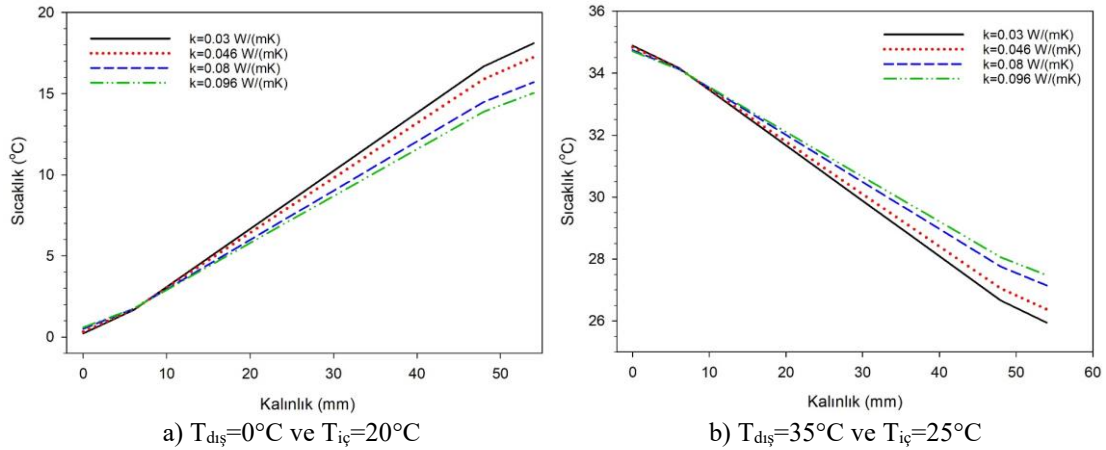


Şekil 6. Tavan geometrisine ait ağ yapısı

3. Bulgular

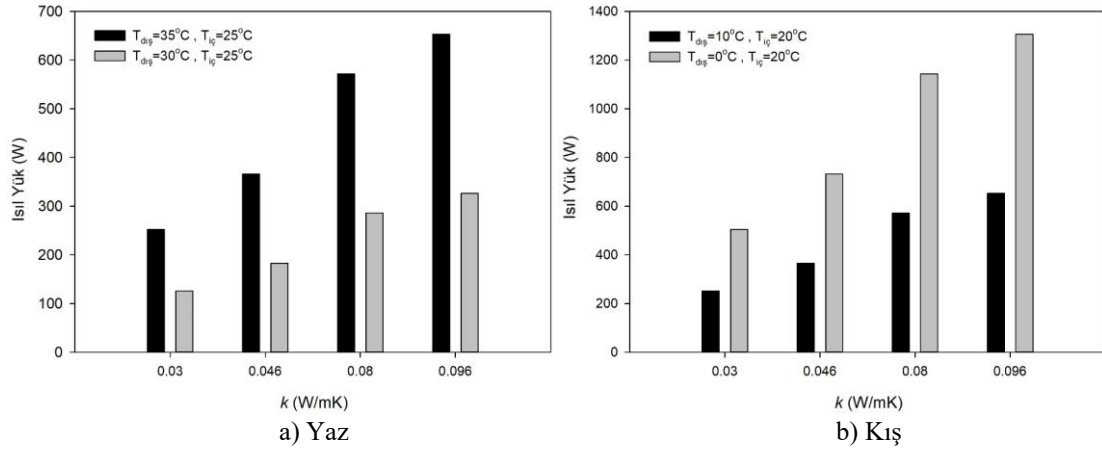
3.1. Yan duvar için bulgular

Şekil 7’de 50 mm kalınlığında yalıtım malzemesi bulunan geometri parametrik olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar dört farklı dış ortam koşulunda dört farklı yalıtım malzemesi için oluşturulmuştur. Beklenildiği şekilde aynı kalınlıkta iletkenlik artırıldığında tren zarfı ısıyı daha iyi iletmektedir. Şekil 7’den görüldüğü üzere yalıtım malzemeleri benzer eğilime sahip olmalarına rağmen aralarında fark yalıtım malzemesinin kalınlığı arttıkça ortaya çıkmaktadır. Yaz şartlarında değerlendirildiğinde ısı iletim katsayısının düşük olması iç ortamı izole etmekte ve aşırı sıcaklık artışını engellemektedir. Isı iletim katsayısı $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan yalıtım malzemesinde yaz koşullarında iç sıcaklığın 25°C ’de tutulamadığı görülürken $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ için iç ortam sıcaklığının bu değere yaklaştığı görülmektedir. Kış koşullarında aynı şekilde 20°C olması beklenen iç ortam sıcaklığı $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan yalıtım malzemesinde 16°C ’ye kadar düşerken $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ olan yalıtım malzemesinde 18°C mertebesinde tutulabilmektedir.



Şekil 7. 50 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

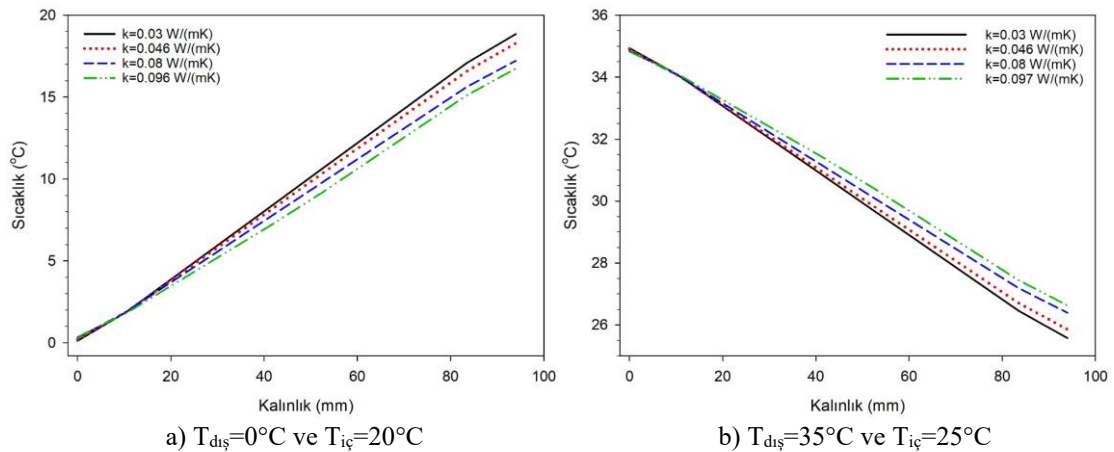
Şekil 8’de ise 50 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki ısı yükleri gösterilmiştir. Yan duvarda 50 mm kalınlık için yaz koşullarında ısı iletim katsayısı $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35°C olduğunda 600 W ’lık bir ısı yük oluşmaktadır. Sıcaklık farkı azaldığında bu yük 300 W ’a kadar düşmektedir.



Şekil 8. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında $t=50$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

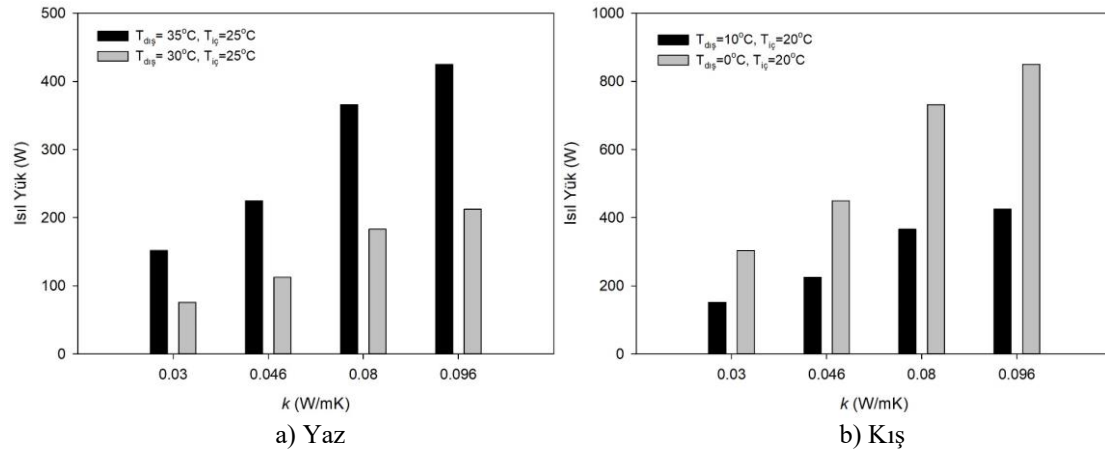
Aynı koşullarda ısı iletim katsayısı $k=0.03$ W/(mK) olan malzemenin kullanıldığı durumda 35°C için 250 W, 30°C için ise 100 W'a kadar düşmektedir. Kış koşulları incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0°C olduğu durumda $k=0.096$ W/(mK) olan malzeme 1300 W'lık bir ısı yüküne ihtiyaç duymaktadır. 10°C dış ortam sıcaklığına çıkıldığında ise bu talep 600 W'a düşmektedir. Isı iletim katsayısı $k=0.03$ W/(mK) olan malzemede ise 0°C için 500 W olan ısı yükü talebi 10°C dış ortam sıcaklığında 200 W'a düşmektedir. Yan duvarda kalınlık arttıkça yaz koşullarında dış ortam sıcaklığı 35°C iken $k=0.03$ W/(mK) ısı iletim katsayısına sahip malzeme için ısı yükü 100 W azalırken $k=0.096$ W/(mK) ısı iletim katsayısına sahip malzemede 200 W azaldığı görülmüştür. Dış ortam sıcaklığı 30°C olduğunda ise ısı yükü farkı daha az olmaktadır.

Şekil 9'da dikkate alınan malzemelerin ısı iletim katsayıları için 90 mm yalıtım malzemesi için sıcaklık değişimleri sunulmaktadır. Beklendiği üzere $k=0.03$ W/(mK) ile temsil edilen malzeme, iç ortam sıcaklığını hedef sıcaklığa yakın tutma konusunda $k=0.096$ W/(mK) olan malzemeden daha iyi performans göstermektedir. İletkenliği en yüksek olan malzeme ısıyı daha iyi iletmekte ve bu da sırasıyla kış ve yaz simülasyonlarında kabin içinde daha soğuk ve daha sıcak bir ortam oluşmasına neden olmaktadır. Altı çizilmesi gereken en önemli nokta kalınlığın etkisidir. Görüldüğü üzere dikkate alınan tüm yalıtım malzemeleri için kabin içi sıcaklıklar kullanılan yalıtım malzemesinin kalınlığına bağlı olarak değişim göstermektedir.



Şekil 9. 90 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 10'da, 90 mm kalınlıktaki yan duvara ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0.096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35°C 'de 430 W'lık bir ısı yükü oluşmaktadır.

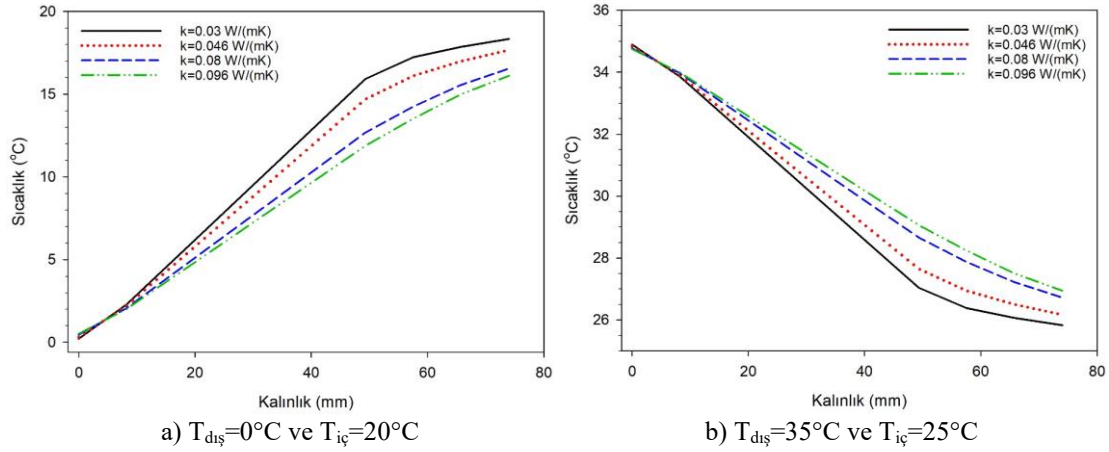


Şekil 10. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında $t=90$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

Dış ortam sıcaklığı 30°C 'ye düştüğünde yani iç ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yükü 200 W 'a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı $0,03\text{ W/mK}$ olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35°C 'de ısı yükü 150 W 'a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30°C olduğu durumda ise ısı yükü 70 W 'ın altına düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0°C olduğu durumda $0,096\text{ W/mK}$ ısı iletim katsayısına sahip malzeme 850 W değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10°C 'ye artırıldığı durumda ısı talep 400 W 'a düşmektedir. Isı iletim katsayısı $0,03\text{ W/mK}$ olan malzemede ise 0°C 'de 300 W 'lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10°C olduğu durumda 150 W 'a düşmektedir.

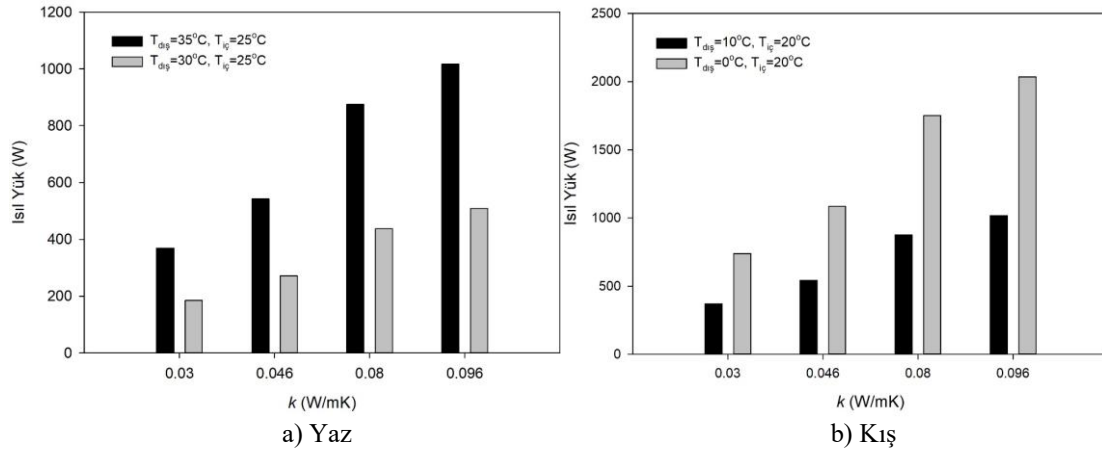
3.2. Taban için bulgular

Vagon geometrisinin bir diğer parçası olan taban duvarının 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı için dört farklı yalıtım malzemesine göre karşılaştırması Şekil 11'de gösterilmiştir. Taban duvarını diğer duvarlardan ayıran bir özellik iç kısımda kullanılan ve maruz kaldığı yükleri eşit olarak karkas yapıya ileten 18 mm kalınlığındaki tahtadır. Zemini rijitleştirerek yolcu konforunu arttıran zemin tahtası buna ek olarak grafiklerde de görüldüğü üzere ısı yalıtımında da fayda sağlamaktadır. Yan duvarlarda olduğu gibi taban duvarında da beklenildiği üzere iletkenlik arttıkça iç ortam sıcaklığının istenilen sıcaklıktan uzaklaştığı görülmektedir. Taban duvarında zemin tahtasının etkisi grafikte görüldüğü şekilde 50 mm 'den sonra net olarak görülmektedir. Tahtanın başlangıcı ile lineer azalış eğrisindeki değişiklik yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısına göre farklılaşmaktadır. Aynı parametrelerde yan duvar ile karşılaştırıldığında kabin içi sıcaklığın talep edilen sıcaklığa daha fazla yaklaştığı söylenebilmektedir. Tahtanın etkisi ısı iletim katsayısı düşük olan malzemede daha net görülürken ısı iletim katsayısı arttıkça etkinin incelenmesi zorlaşmaktadır. Yan duvarların analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında farklı malzemelerin 50 mm kalınlıkta aralarında gözle görülür bir fark oluşmaktadır. Isı iletim katsayısı düşük olan yani iyi yalıtkan olarak adlandırılan malzeme kabin içi sıcaklığın talep edilen sıcaklığa en yakın olduğu 26°C ye ulaşmaktadır. Isı iletim katsayısı $0,096\text{ W/(mK)}$ olan iyi iletken olarak tanımlanan malzeme ise 28°C ye yaklaşmaktadır.



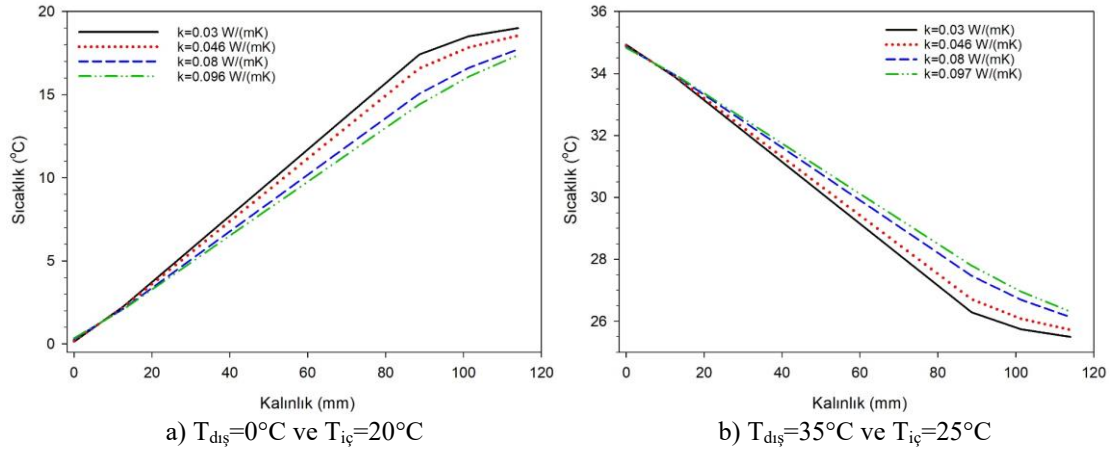
Şekil 11. 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 12’de görüldüğü üzere yan duvarlarda olduğu gibi taban duvarında da benzer farklar görülmektedir. Ek olarak zeminde kullanılan tahtanın etkisi 50 mm kalınlık için yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0.096 W/(mK) olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35°C’de 400 W ek ısı yükü oluşturmaktadır. 0.03 için fark 150 W’tır. Kış koşullarında $k=0.096$ W/(mK) olan malzemede 0°C için ısı talebi yan duvara göre 800 W artmaktadır. 0.03 için fark 200 W’tır. Dış ortam sıcaklığı istenilen iç ortam sıcaklığına yaklaştıkça yaz koşullarında ısı yükü, kış koşullarında ısı talebi azalmaktadır. Yan duvarlarda olduğu gibi taban içinde yalıtım malzemesi kalınlığı arttırıldığında yaz koşullarında ısı yükü, kış koşullarında ısı talebi azalmaktadır.



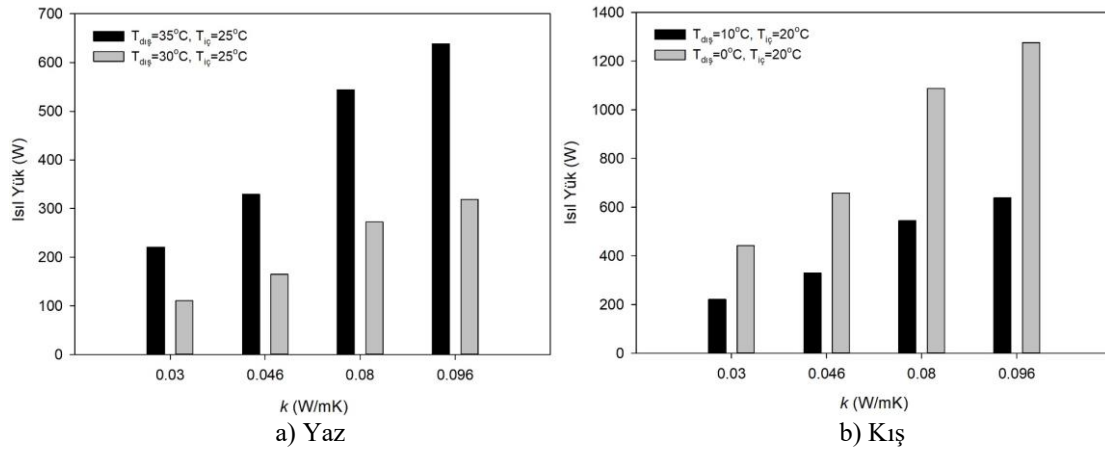
Şekil 12. Tabana ait yaz ve kış koşullarında $t=50$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

90 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan ve parametrik olarak 4 farklı yalıtım malzemesi ile analiz edilen taban duvarının karşılaştırması Şekil 13’de verilmiştir. Farklı kalınlıklarda eğrilerin birbirine benzemesine ek olarak sıcaklık değerlerinde belirgin bir fark görülmemektedir. Diğer kalınlıklarla karşılaştırıldığında iyi iletken ve iyi yalıtkan olarak tanımlanan malzemelerin aralarındaki fark kalınlığın artması ile azalmaktadır. Keskin geçişlere sahip eğrilerin 90 mm kalınlıkta normalleştiği gözlemlenmiştir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/(mK) olan malzemenin 26°C’de neredeyse sabit kaldığı, $k=0,096$ W/(mK) olan malzemenin ise 27°C’ye indiği görülmektedir. Bu durum talep edilen sıcaklığa yaklaştıkça ısı iletim katsayısının etkisinin azalması olarak değerlendirilebilir. Kalınlığın ısı iletimine olan etkisi analiz parametrelerinde kabul edilen kalınlıklarda incelendiğinde yok sayılacak kadar az olduğu görülmüştür.



Şekil 13. 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 14'te 90 mm kalınlıktaki taban duvarına ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C'de 650 W'lık bir ısı yükü oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C'ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yükü 300 W'a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C'de ısı yükü 200 W'a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yükü 80 W'a kadar düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 1300 W değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C'ye artırıldığı durumda ısı talep 600 W'a düşmektedir. ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede ise 0 °C'de 400 W'lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 200 W'a düşmektedir.

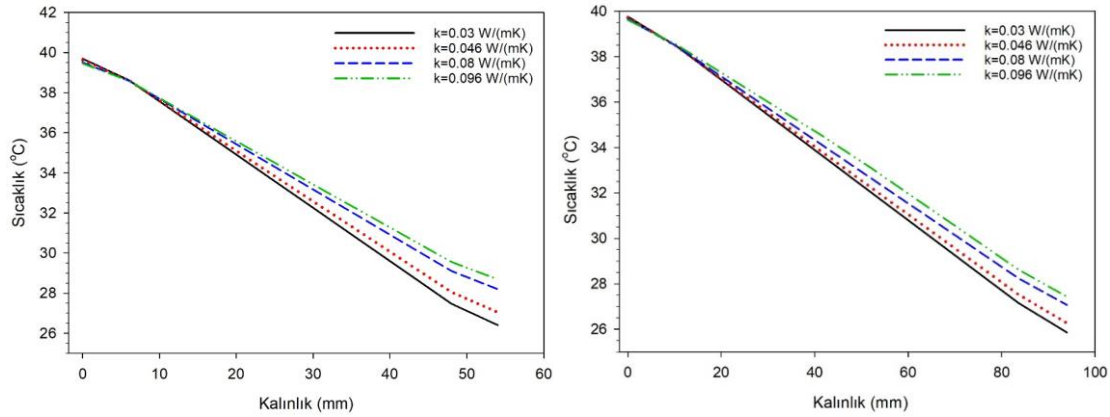


Şekil 14. Tabana ait yaz ve kış koşullarında t=90 mm kalınlıktaki ısı yükleri

3.3. Tavan için bulgular

Vagon geometrisinin bir diğer parçası olan tavan duvarının 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı için dört farklı yalıtım malzemesine göre yaz koşullarında karşılaştırılması Şekil 15.a'da sunulmuştur. Radyasyon yaz ve kış koşullarında kabin içinde sıcaklığı arttırmaktadır. Bu durum kış koşullarında olumlu, yaz koşullarında olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeple tavan duvarının yalnızca yaz koşullarında incelenmiştir. Diğer duvarlardan farklı olarak tavan duvarı analiz parametrelerine radyasyon etkisi eklenmiştir. Grafikler incelendiğinde tavan duvarında iç ve dış duvarların yan ve taban duvarından daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmektedir. Bu durum kabin içi sıcaklığın yaz koşullarında olması gereken 25 °C'nin üzerine çıkartmaktadır.

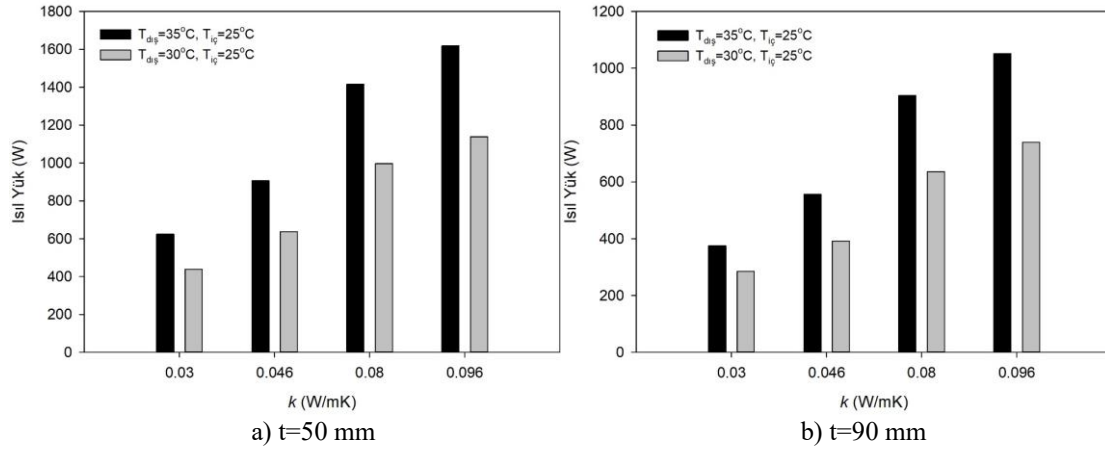
Beklenildiği üzere ısı iletim katsayısı $0,03 \text{ W/(mK)}$ 'ya sahip malzeme, iç ortamın istenilen sıcaklığa daha yakın bir değerde tutulmasını diğer malzemelerden daha iyi sağlamaktadır. Isı iletim katsayısı $0,03 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme 26°C 'ye yaklaşmakta ancak $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme 28°C 'nin üzerinde kalmaktadır. Farklı malzeme kullanımından kaynaklanan sıcaklık farkı 2°C 'nin üzerine çıkmaktadır. Radyasyon etkisi ile değerlendirildiğinde farklı ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin iletme olan etkisi tavan geometrisi incelendiğinde daha net olarak görülebilmektedir. Tavan duvarı için diğer bir yalıtım malzemesi kalınlığı olan 90 mm için analiz sonuçları Şekil 15.b'de verilmiştir.



Şekil 15. Yaz koşulunda ($T_{dış}=35^\circ\text{C}$, $T_{iç}=25^\circ\text{C}$) sıcaklık dağılımı a) $t=50 \text{ mm}$ b) $t=90 \text{ mm}$

Yan ve taban duvarlarında olduğu gibi ısı iletim katsayısının iç sıcaklığın korunmasındaki önemi grafiklerden anlaşılmaktadır. Daha önceki bulgularda olduğu gibi ısı iletim katsayısı $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ olan iyi yalıtkan malzeme, iç ortam sıcaklığını hedef sıcaklığa yakın tutma konusunda $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzemeden daha iyi performans göstermektedir. Isıyı daha iyi ileten ve yaz simülasyonlarında kabin içinde daha sıcak bir ortam oluşmasına neden olan malzeme $0,096 \text{ W/(mK)}$ ısı iletim katsayısına sahiptir. Isı iletim katsayıları kademeli olarak $0,03 \text{ W/(mK)}$ 'den $0,096 \text{ W/(mK)}$ 'e yükseldikçe, eğriler de kademeli olarak yükselmektedir. Grafikler benzer bir eğilimde olsalar da eğriler arasında gözle görülür bir ayrım vardır. Önemli olan bir diğer nokta, kalınlığın etkisidir.

Şekil 16'de ise belirtilen koşul altındaki ısı yüklerinin değeridir. Tavan için radyasyonun analize eklenmesi ısı yükü fazlasıyla arttırmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 35°C iken, ısı iletim katsayısı $0,096$ olan malzeme 1700 W ısı yükü oluştururken ısı iletim katsayısı $k=0,03 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme 600 W bir ısı yükü oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı azaldığında ısı yükü $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ için 400 W $0,03$ için 200 W azalmaktadır. Tavan için yalıtım malzemesi kalınlığının artırılması $k=0,096 \text{ W/(mK)}$ olan malzeme için 600 W , $0,03$ malzeme için 200 W azalmaya neden olmaktadır.

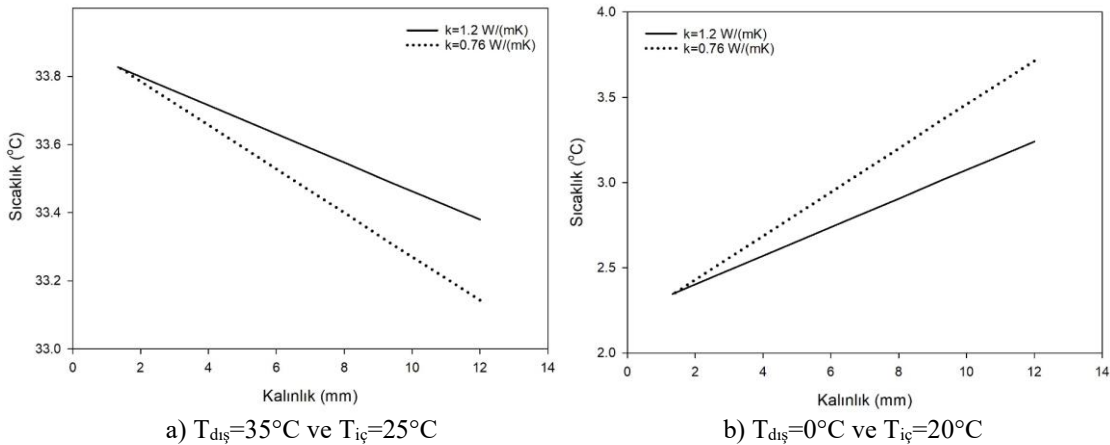


Şekil 16. Tavana ait yaz koşullarında farklı kalınlıktaki ısı yükleri

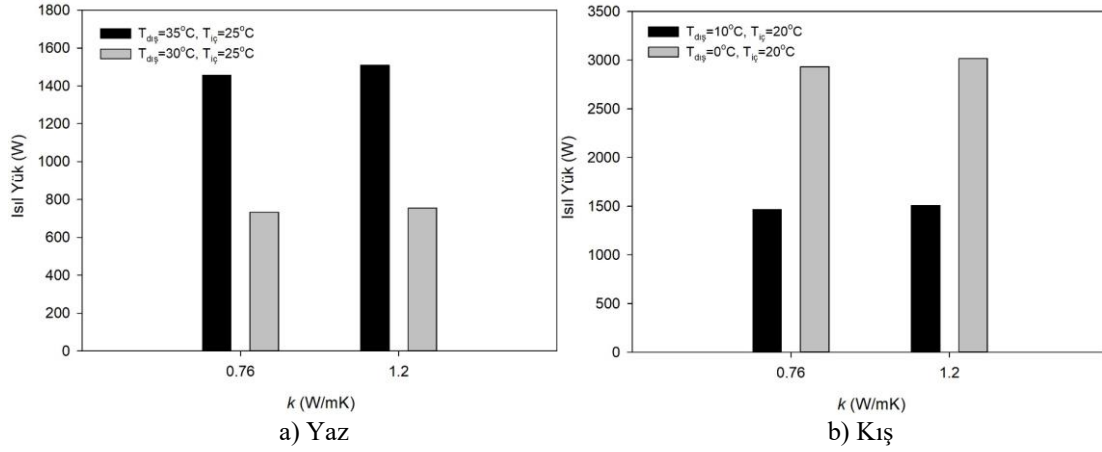
3.4. Pencere için bulgular

Bir diğer ayrı ve önemli bölüm olan pencerelerdeki ısı tepki Şekil 17’de gösterilmiştir. Diğer bölümlerde olduğu gibi, pencere özelinde de ısı kayıpları yaz ve kış koşulları için ayrı ayrı incelenmiştir. Burada, farklı kalınlıktaki camdan ziyade, farklı ve alternatif olarak kullanılan iki malzeme dolayısı ile iki farklı ısı iletim katsayısı incelenmiştir. Kullanılan iki malzemeden birisinin iletim katsayısı 1,2 W/(mK) iken diğerinin ısı iletim katsayısı 0,76 W/(mK)’dir. Isı iletim katsayısı daha yüksek olan camın (1,2 W/(mK)), direncinin daha düşük olması sebebiyle, cam iç yüzeyini istenilen ortam sıcaklığından kışın daha düşük değerlerde tutabildiği, yazın ise daha yüksek değerlerde tutabildiği görülmektedir. Daha yalıtkan olan malzemenin de tersine, cam iç yüzeyini, yazın daha düşük sıcaklarda tutabildiği tespit edilmiştir. Ancak her iki durumda da cam iç yüzey sıcaklıklarının hedef iç ortam sıcaklıklarında çok uzak oldukları hem yaz hem de kışın dış ortam sıcaklığından sadece 2-3°C farklı bir iç yüzey sıcaklığına sahip oldukları gözlenmiştir.

Yaz ve kış koşullarında aynı kalınlıkta farklı ısı iletim katsayılarına sahip camın ısı yüklerinin miktarı Şekil 18’de verilmiştir. Literatürde belirtilen 0,76 W/(mK) ve 1,2 W/(mK) ısı iletim katsayısına sahip camların ısı yüklerinin arasında ciddi bir fark olmadığı görülmüştür.



Şekil 17. Pencerenin yaz ve kış koşullarında farklı ısı iletim katsayıları için analiz sonuçları



Şekil 18. Pencereye ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri

4. Sonuç

Bu çalışmada tren zarfının detaylı incelenebilmesi için tren gövdesi 4 farklı bölüme ayrılmıştır. Tavan, taban, yan duvar ve pencere olarak ayrılan bölümler 50 mm, 70mm, 80 mm ve 90 mm yalıtım kalınlıkları dikkate alınarak modellenmiştir. Isı kaybına etkisi olan diğer bir parametre ise ısı iletim katsayısıdır ve bu çalışmada 4 farklı malzeme için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Tasarlanan modeller dört farklı çevre koşulu için modellenmiş ve analizler bu koşullar gözetilerek tamamlanmıştır. İç ve dış ortam sıcaklıkları için yaz ve kış koşullarında 4 farklı sıcaklık belirlenmiştir. Tavan geometrisinde iç ve dış ortam sıcaklıklarına ek olarak güneş yükü parametrelere dahil edilmiştir. Ticari bir yazılım olan ANSYS içerisindeki “sürekli rejim ısı (steady-state thermal) modülü” kullanılarak parametrik bir analiz yapılmıştır. Analizden elde edilen veriler değişkenlere göre karşılaştırılabilecek şekilde grafiklere dönüştürülmüştür. Çalışma yolcu vagonu zarfında kullanılan yalıtım malzemesi çeşidinin ve kalınlığının enerji tüketimini kayda değer bir şekilde azalttığını göstermektedir. Isı iletim katsayısı azaldıkça yani seçilen malzeme yalıtkan bir malzeme olduğunda beklenildiği şekilde vagon zarfının iç ortam sıcaklığını istenilen sıcaklığa daha yakın bir değerde tutabildiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ısı iletim katsayısı arttığında vagon zarfında iletilen ısı miktarı artmakta ve iç ortam sıcaklığı istenilen değerden uzaklaşmaktadır. Zarf yapısında kullanılan malzemenin ve kalınlığın değiştirilmesi ile yolcuların konfor şartlarını değiştirmeden tüketilen enerji azaltılabilmektedir. 0.03 W/m K’lik ısı iletim katsayısı ile poliüretan sert köpük istenilen yalıtımın sağlanmasında daha etkin olurken, 0.096 W/mK’lik ısı iletim değeri ile yalıtım malzemesi A’nın etkinliğinin düşük olduğu görülmüştür.

Kaynakça

- [1] A. Uğur, "Demiryolu sektöründe Dünya gelişme beklentileri ve Türkiye'nin durumunun araştırılması," *Alphanumeric Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 369-398, 2019, doi: 10.17093/alphanumeric.582290.
- [2] M. Aliahmadipour, M. Abdolzadeh, and K. Lari, "Air flow simulation of HVAC system in compartment of a passenger coach," *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 973-990, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.086.
- [3] C. Dullinger, W. Struckl, and M. Kozek, "A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 78, pp. 616-629, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.065.
- [4] J. P. Powell, A. González-Gil, and R. Palacin, "Experimental assessment of the energy consumption of urban rail vehicles during stabling hours: Influence of ambient temperature," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1-2, pp. 541-547, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.057.
- [5] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, and A. Palombo, "Enhancing trains envelope – heating, ventilation, and air conditioning systems: A new dynamic simulation approach for energy, economic,

- environmental impact and thermal comfort analyses," *Energy*, vol. 204, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117833.
- [6] R. N. Hofstadter, J. Amaya, and M. Kozek, "Energy optimal control of thermal comfort in trams," *Applied Thermal Engineering*, vol. 143, pp. 812-821, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.084.
- [7] N. Vetterli, U. P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, and G. Zweifel, "Energy efficiency of railway vehicles," in *Future Buildings and Districts – From Nano to Urban Scale, CISBAT 2015*, Lausanne, Switzerland, 9-11 September 2015, pp. 955-960.
- [8] H. Amri, R. N. Hofstadter, and M. Kozek, "Energy efficient design and simulation of a demand controlled heating and ventilation unit in a metro vehicle," in *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, Vienna, Austria, 29 June - 01 July 2011: IEEE, pp. 7-12, doi: 10.1109/fists.2011.5973605.
- [9] D. Marcos, F. J. Pino, C. Bordons, and J. J. Guerra, "The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1-2, pp. 646-656, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.054.
- [10] W. Liu, Q. Deng, W. Huang, and R. Liu, "Variation in cooling load of a moving air-conditioned train compartment under the effects of ambient conditions and body thermal storage," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 6-7, pp. 1150-1162, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.12.010.
- [11] M. Shravanth Vasisht, G. A. Vashista, J. Srinivasan, and S. K. Ramasesha, "Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study," *Energy*, vol. 118, pp. 684-691, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.10.103.
- [12] F. Ampofo, G. Maidment, and J. Missenden, "Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 5-6, pp. 633-645, 2004, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.10.018.
- [13] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer*, 4 ed. New York, ABD: McGraw-Hill Education, 2011.
- [14] ANSYS Fluent, *User's Guide, Release 14.0.1*, ANSYS Inc., Lebanon, NH.

Özgeçmiş



Mustafa DÖNMEZ

1995 Ankara doğumludur. Lisans derecesini Karabük Üniversitesi'nden 2018 yılında, Yüksek Lisans derecesini Eskişehir Teknik Üniversitesi'nden 2023 yılında almıştır. Halen Özben Savunma firmasında çalışmaktadır
E-Posta: mustafadonmezrse@gmail.com



Mehmet Mete ÖZTÜRK

1978 Eskişehir doğumludur. Lisans derecesini Dokuz Eylül Üniversitesi'nden 2001 yılında, doktora derecesini 2009 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nden almıştır. 2022 yılında doçent unvan almış olup halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır.
E-Posta: mete.ozturk@ogu.edu.tr

**Bahadır DOĞAN**

1985 Kahramanmaraş doğumludur. Doktorasını 2017 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde tamamlamıştır. 2022 yılında doçent unvan almış olup halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır.

E-Posta: bdogan@ogu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa DÖNMEZ: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama. Mehmet Mete ÖZTÜRK: Kavramsallaştırma, Gözden geçirme ve düzenleme, Kontrol. Bahadır DOĞAN: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol.

**Osmanlı-Rus Sınırında Son Rus Hamlesi: Kars-Sarıkamış Demiryolu'nun İnşası ve Lojistik Önemi**Resul TURAN^{id}*Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Tarih Bölümü, Rize, Türkiye**resul.turan@erdogan.edu.tr**(Alınış/Received: 26.06.2025, Kabul/Accepted: 17.07.2025, Yayınlama/Published: 23.07.2025)*

Öz: Bu çalışma, I. Dünya Savaşı arifesinde, 1913 yılında tamamlanan Kars-Sarıkamış demiryolunun inşaat sürecini, stratejik önemini ve askerî sonuçlarını arşiv belgeleri ve teknik raporlar ışığında analiz etmeyi amaçlamaktadır. Rus İmparatorluğu, 19. yüzyılın ikinci yarısında başlattığı ulaşım altyapısı seferberliği kapsamında özellikle Kafkasya gibi stratejik bölgelerde geniş çaplı demiryolu hatları inşa etmiştir. Bu çerçevede Önce Tiflis'i Rus merkezlerine bağlayan ana hatlar tamamlanmış, ardından Gümrü ve Kars gibi sınır şehirlerine uzanan ikincil hatlar inşa edilmiştir. Nihai aşamada ise Osmanlı sınırına yakın konumdaki Sarıkamış'a kadar uzanan son derece kritik bir demiryolu hattı faaliyete geçirilmiştir. Stratejik bir hamle olarak inşa edilen bu demiryolu, bölgedeki askerî-siyasi kontrolü güçlendirmiş, Osmanlı'nın ise lojistik altyapısının yetersizliğini daha görünür kılarak cephedeki dezavantajını derinleştirmiştir. Sarıkamış Harekâtı'nda Rus birlikleri demiryolu ağı sayesinde kış şartlarında dahi hızlı takviye alabilirken, Osmanlı ordusunun ulaşım altyapısındaki yetersizlikler nedeniyle ağır kayıplar vermesi, modern savaşlarda lojistiğin belirleyici rolünü açıkça ortaya koyan çarpıcı bir örnek teşkil etmiştir.

Anahtar kelimeler: Kars-Sarıkamış demiryolu, Askerî lojistik, Sarıkamış harekâtı, Kafkasya, Rusya

The Strategic Rail Offensive on the Ottoman Frontier: The Kars-Sarıkamış Railway and Russian Military Logistics

Abstract: This study aims to provide a comprehensive analysis of the construction process, strategic significance, and military consequences of the Kars-Sarıkamış railway, which was completed in 1913 on the eve of World War I, based on archival documents and technical reports. As part of the transportation infrastructure mobilization initiated by the Russian Empire in the second half of the 19th century, extensive railway lines were constructed, particularly in strategic regions such as the Caucasus. In this context, the primary lines connecting the administrative center of the region, Tiflis, to the Russian interior were completed first, followed by secondary lines extending to border cities such as Gyumri and Kars. In the final phase, a highly critical railway line was put into operation, extending as far as Sarıkamış, a location in close proximity to the Ottoman border. Constructed as a strategic move by the Russian Empire, this railway strengthened its military and political control over the region, while simultaneously exposing the inadequacy of the Ottoman Empire's logistical infrastructure and deepening its disadvantage on the battlefield. During the Battle of Sarıkamış, Russian forces were able to receive rapid reinforcements even under harsh winter conditions thanks to the railway network, whereas the Ottoman army, suffering from poor transportation infrastructure, incurred heavy losses-offering a striking example of the decisive role of logistics in modern warfare.

Keywords: Kars-Sarıkamış railway, Military logistics, Sarıkamış Campaign, Caucasus, Russia

1. Giriş

Demiryolu, 19. yüzyılda buharlı lokomotifin icadıyla hızla gelişerek ulaşımın temel taşlarından biri hâline gelmiştir. İlk demiryolları, taş ocakları ve kömür madenlerinde atların çektiği ilk el tahtadan raylar üzerindeki vagonlardan meydana gelirken, Endüstri Devrimi ile dökme demirden ray ve teker kullanımı yaygınlaştırmıştır [1, s.1]. 19. yüzyılda doğrudan doğruya demiryolunun geliştirilmesi, inşası ve sorunlarıyla ilgilenecek uzman yetiştirilmesi köklü değişimlerin kapısını

Atıf için/Cite as: R. Turan, "Osmanlı-Rus sınırında son Rus hamlesi: Kars-Sarıkamış Demiryolu'nun inşası ve lojistik önemi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 121-131, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1727644

aralamıştır. Bu güçlerden biri olan Rusya'da demiryolu mühendisliğinin gelişimi, 1830'lu yıllarda başlamıştır. Demiryolu Mühendisleri Birliği Enstitüsü'nün açılmasıyla bağımsız ve ulusal bir demiryolu mühendisliği okulu faaliyete geçmiş ve yabancı uzman ihtiyacı büyük ölçüde çözülmüştür [2, s. 161]. Rus İmparatorluğu, bu teknik birikimin bir sonucu olarak ele geçirdiği toprakları demiryolu ağıyla merkeze bağlayarak idarî ve askerî kontrolü sağlamaya çalışmıştır [3, s. 354].

Rusya'nın Kafkasya'da demiryolu ağı kurma çabalarında Kırım Savaşı (1853-1856) döneminde karşılaşılan ulaşım zafiyetleri etkili olmuştur. Ancak bu girişimler, dönemin küresel finans aktörlerinin stratejik kaygılarıyla karşılaşmıştır. Özellikle Rotschild ailesi, başlangıçta demiryolunun Rus ordusuna sağlayacağı lojistik avantajları göz önünde bulundurarak 1860'lı yılların başında Rus yatırımcılara finansman sağlamayı reddetmiştir [4, s. 2-3]. Bu sorunun öz kaynaklardan çözülmesinin ardından Karadeniz kıyısıyla Kafkasya'nın idari merkezi Tiflis'i bağlayan Poti-Tiflis (1872) demiryolu açılmıştır. Kısa süre sonra Karadeniz ile Hazar Denizi'ni bağlayarak Bakü petrollerinin dünya pazarlarına taşınmasını sağlayan Bakü-Tiflis-Batum (1883) hattı, ardından Tiflis-Gümrü [Aleksandrapol]-Kars (1899), Gümrü-Erivan (1902), Uluhanlı-Culfa (1908) hatları inşa edilmiştir. I. Dünya Savaşı arifesinde ise Kars-Sarıkamış (1913) demiryolu tamamlanmıştır [5, s. 432]. Böylelikle demiryolu ağı Osmanlı sınırlarına kadar genişlemiş; bu da askerî birlik ve cephane sevkiyatını kolaylaştırarak Rus ordusunun sınır bölgesindeki hareket kabiliyetini artırmıştır. Kars-Sarıkamış hattının devamı olan Sarıkamış-Erzurum (1916-1918) demiryolu, 750 mm'lik dar, dekovil hattı olarak inşa edilerek 1930'lara kadar kullanılmıştır. 1957 yılında Sarıkamış-Erzurum hattı normal bir hatta dönüştürülerek Erzurum-Sarıkamış-Kars arasındaki bağlantı sağlanmıştır [6, s. 63]. Bu toprakların Türkiye'ye katılmasıyla birlikte demiryollarının bakımı ve gerekli malzemelerin temini amacıyla Sovyetler Birliği ile ticari ilişkiler kurulmuş, 1936 yılında Reisicumhur [Mustafa] Kemal Atatürk'ün onayıyla Sovyet ülkelerinden Erzurum-Kars hattının güçlendirilmesi amacıyla on bin adet enjekte edilmiş ahşap travers satın alınarak Kars Gümrüğünden yurda sokulmasına izin verilmiştir [7].

Askerî lojistik, Rus demiryollarının temel kullanım alanlarının arasında yer almış ve demiryolu tarihindeki ilk asker sevkiyatı 1846 yılında yaklaşık 15 bin Rus askerinin günümüzdeki Çek Cumhuriyeti'nde yer alan Uherské Hradiště'den Kraków'a taşınmasıyla gerçekleşmiştir [8, s. 82]. Ardından Kırım Savaşı döneminde İngilizler tarafından Sivastopol kuşatmasına lojistik destek sağlamak amacıyla ilk askerî demiryolları inşa edilmiştir [9, s. 37]. Zira Rusya, İngiltere, Prusya, Fransa ordularındaki asker sayısının artışı ile top, tüfek gibi silah teknolojisinin gelişimi, bu iki bileşenin en kısa sürede cepheye sevk edilmesi ihtiyacı demiryoluna olan talebi artırmıştır [10, s.185]. Aynı zamanda devletlerarası rekabette önemli bir üstünlük aracı hâline gelmiştir. Bu süreç askerî ve ticari olmak üzere demiryolunun farklı fonksiyonlarının daha görünür hâle gelmesini sağlamıştır. Sarıkamış Harekâtı, genellikle askerî taktik, iklim şartları ve Osmanlı ordusunun harekât planları çerçevesinde ele alınmıştır. Ne var ki literatürde, harekâtın başarısızlığına etki eden lojistik etkenler ve özellikle demiryolu altyapısının Rus ordusuna sağladığı stratejik avantajlar üzerinde yeterince durulmamıştır. Bu çalışma, söz konusu eksikliği gidermek amacıyla, Sarıkamış bağlamına ulaşım altyapısı ve askerî lojistik temelli bir perspektifle yaklaşmakta ve bu yönüyle alana katkı sunmayı amaçlamaktadır.

2. Metot

Bu çalışmada, Kars-Sarıkamış demiryolunun inşası askerî, lojistik ve politik yönlerden incelenmiştir. Bu kapsamda özellikle birincil kaynak olarak Başkanlık Osmanlı Arşivi'ndeki (BOA, ATASE) konsolos raporları, Rus arşivlerindeki (Tsentralny Gosudarstvennyy İstoriçeskiy Arhiv-TsGİA, 1991 sonrası Gosudarstvennyy Arhiv Rossiyskoy Federatsii-GARF) demiryolunun yapımına dair resmî belgeler, teknik raporlar ve dönemin basınına yansıyan haberlerden yararlanılmıştır. Bu açıdan özellikle dönemin resmi raporları üzerinden hattın yapım sürecinin takibine özen gösterilmiştir. İkincil kaynak olarak ise dönemin yakın şahitlerinin anıları ve çağdaş

literatür kullanılmıştır. Bu temel kaynaklar ışığında, disiplinlerarası bir yaklaşımla, hattın inşaat süreci, maliyetler, mühendislik detayları ve I. Dünya Savaşı'ndaki lojistik rolü karşılaştırmalı olarak yansıtılmıştır. Teknik ve sayısal verilerin yer aldığı maliyet tabloları, teknik hesaplamalar gibi nicel veriler ile diplomatik yazışmalar, resmî raporlar, gazete haberleri türünden nitel veriler bütünleştirilerek Rus ordusunun ulaşım altyapısı yönünden Osmanlı ordusu karşısında elde ettiği avantajın Sarıkamış Harekâtı ve sonrasındaki gelişmelere etkisi ortaya konmuştur.

3. Kars-Sarıkamış demiryolu

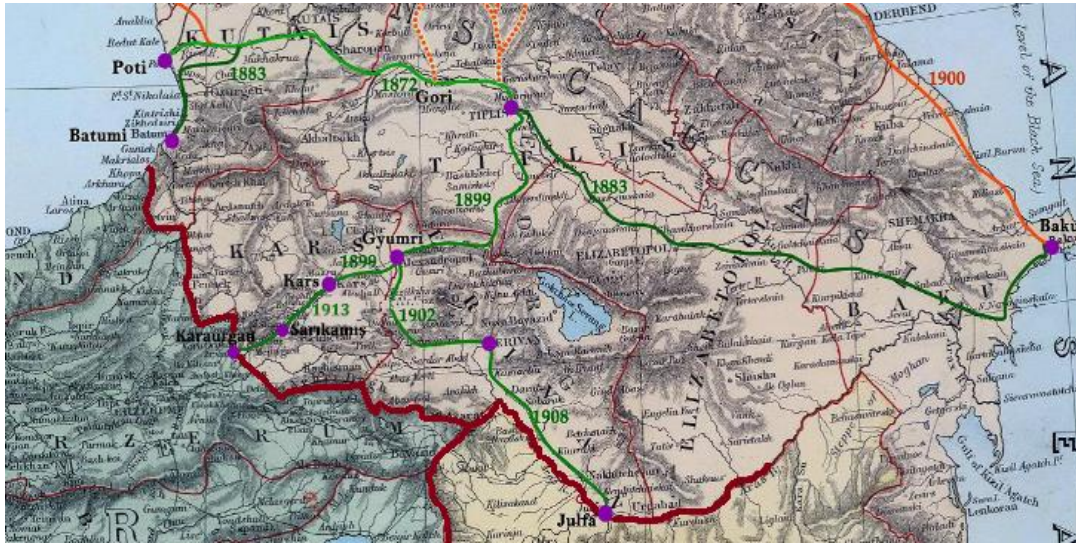
Kars, Osmanlı-Rus savaşlarında stratejik konumu nedeniyle Kafkasya yönünden Anadolu'nun savunmasında kritik bir rol oynamıştır. 1807, 1828-1829, 1854-1855 ve 1877-1878 savaşlarında Rus Kafkas ordusu birliklerinin işgaline uğramıştır. Zira Ruslar için Kars, Erzurum'a giden yolun anahtarı olmuştur. Karl Marx'ın ifadesiyle "Kars Erzurum'un anahtarı; Erzurum da İstanbul'un ve Anadolu'nun stratejik ve ticari hatlarının anahtarıdır" [11, s. 2]. 1877-1878 Osmanlı-Rus Savaşı neticesinde imzalanan Berlin Antlaşması ile Kars ve çevresinde yaklaşık kırk yıl Rus idaresinde kalmıştır. Kars Oblastı adı verilen bu idari birim 1881 yılı itibarıyla Kars, Ardahan, Kağızman ve Oltu sancaklarından oluşmuştur. Kars Sancağı ise Kars, Şuragel (merkezi Argino, günümüzde Demirkent köyü), Zaruşad (merkezi Arpaçay), Ağbaba (merkezi Büyük Tepecik/Amasya Köyü) ve Soğanlı (Taht, merkezi Sarıkamış) kazalarından oluşmuştur [12, s. 63]. Sarıkamış, Kafkasya'dan Osmanlı sınırına uzanan stratejik konumu nedeniyle Petersburg ve sınır hattındaki askerî uzmanların incelemeler yaptığı hareketli bir üs olmuştur. Örneğin, 1902 yılında Rus Genelkurmay Başkanlığı'nda görevli bir ferik (tümgeneral), Petersburg'tan gelerek Kars Hudut Livası Konstantin Lovmen ile Sarıkamış ile Karaorgan'a sınır hatlarında inceleme yapmaları planlanmıştır [13]. 1911 yılının yaz aylarında Osmanlı sınırına yakın mevkiilerde geniş çaplı askerî manevralar icra edilmiştir [14]. Bu manevralar ertesi yılın yaz aylarında da yaklaşık 40 bin kişilik Rus kuvvetinin katılımıyla Sarıkamış-Karaorgan arasında gerçekleşmiş, çoğunlukla Osmanlı sınırını ihlal girişimleri ve geceleri projektörlerle taciz kabilinden gelişmeler yaşanmıştır [15]. Osmanlı yetkililerinin kayıtları, Rusya'nın askerî hazırlıklarını sistematik biçimde artırdığını göstermektedir. Nitekim Erzurum Vilayeti Vali Vekili Cemal Bey'in 1914 yılına ait raporunda, Sarıkamış'ta konuşlandırılan yüz topun yanı sıra, stratejik öneme sahip Karaorgan mevkiine bir tam Kazak alayının sevk edildiği bilgisi dikkat çekmektedir [16]. Hudut bölgesine lojistik destek ve asker sevkıyatı için ulaşım olanaklarının geliştirilmesinin son aşaması Kars-Sarıkamış demiryolu projesi olmuştur.

3.1. Hattın inşa amacı

Kars-Sarıkamış demiryolunun yapım amacı, Rus resmî belgelerinde Yakın Doğu'daki siyasi durum nedeniyle Kafkasya sınırının Osmanlı Devleti'ne karşı güvenliğinin sağlanması olarak belirtilmiştir. Bu kapsamda Güney Kafkasya demiryolu ağının acilen geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, Tiflis-Kars hattının Sarıkamış üzerinden sınır boyunca uzatılması gerekli görülmüştür. Projenin en kısa sürede hayata geçirilebilmesi için 1909 yılında Kars-Sarıkamış güzergâhında detaylı teknik inceleme ve keşif çalışmaları yapılmış; zorlu coğrafi koşulları dikkate alınarak en uygun güzergâhın belirlenmesini amaçlamıştır [17, ss. 30-31]. Rus tarafının bu stratejik hamlesi, Osmanlı yetkililerinin dikkatinden kaçmamıştır. Dördüncü Ordu Müşiri İbrahim Paşa'nın 8 Temmuz 1909 tarihli telgrafıyla dikkat çekmesi üzerine, Petersburg Sefaretinden konuya dair ayrıntılı bilgi talep edilmiştir [18].

Rus yetkililerin ilk incelemelerinde Kars-Sarıkamış hattının yapımı ve ardından Osmanlı sınırına kadar uzatılması için en uygun güzergâhın Karaorgan yönünde olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer deyişle hattın Kars-Sarıkamış-Karaorgan şeklinde olması planlanmış ancak detaylı proje ve inşaat planları sadece Kars-Sarıkamış kısmı için hazırlanmıştır. Bu nedenle Bakanlık bu kısmın inşası için yetki talep etmekle yetinmiştir. 1 Haziran 1911 tarihli yasa gereğince Kars-Sarıkamış demiryolu inşaatı ve hattaki hareketli araçların maliyeti 3.638.645 ruble olarak belirlenerek hattın

inşasına başlanmıştır. Keşif çalışmaları, 1911 yılı sonbaharında gerçekleştirilmiş, demiryolu projesinin ve ana yapıların tasarımının hazırlanmasını içermiştir. Bu projeler ve ana yapılar, Demiryolu İnşaat İdaresi Komiteleri tarafından onaylanmıştır. Arazinin dağlık olması nedeniyle proje %2,2 eğimli olarak dört dingilli buharlı lokomotiflerin hareket edebilmesi için özel olarak tasarlanmıştır. Bununla birlikte en uzun 781 sajen [yaklaşık 1.665 km] olan toplam uzunluğu 1.437 sajen [yaklaşık 3.066 km] olan 6 tünel inşa edilmesi planlanmıştır. Kars-Sarıkamış hattının inşası için hazırlanacak platform, köprü ve diğer destek yapılarının maliyeti, 4 ray hattı için 9.038.000 ruble olarak belirlenmiştir. Hattın toplam uzunluğu ise 37,5 verst [yaklaşık 40 km], olarak hesaplanmıştır. Dönemin şartlarına göre oldukça yüksek olan maliyetin temel sebebi olarak çetin coğrafi ve jeolojik şartları gösterilmiştir. Kafkasya ve Osmanlı sınırına uzanan demiryolu güzergâhı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Rusya'nın Güney Kafkasya demiryolu ağı ve Kars-Sarıkamış-Karaugan uzantısı

Kars-Sarıkamış hattının Türk sınırındaki Karaugan'a kadar uzatılması planlanmıştır. Bu planda, yerel tüketim ve Osmanlı topraklarına yönelik Karaugan sınır kapısı üzerinden yapılacak özellikle kumaş, şeker ve petrol ürünleri ticareti ile Gümrük işlemlerinin yıllık cirosunun 3 milyon rubleye ulaşması önemli bir etken olmuştur. Rus hükümetinin, Sarıkamış-Osmanlı sınırı hattının acilen inşası gerekliliğine dair önerisi, ilgili kurumlardan destek görmüştür. Ulaştırma Bakanlığı'nın Devlet Duması'na sunduğu raporda, söz konusu hattın Osmanlı sınırına uzatılmasının önemi vurgulanmış ve en kısa sürede hayata geçirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bu kapsamda Ulaştırma Bakanlığı, 1911 yılında teknik hazırlıkların tamamlanmasını ve daha önce belirlendiği üzere sınır bölgesindeki en uygun güzergâh olan Karaugan yönünde detaylı keşfin yapılmasını gerekli görmüştür. Sarıkamış-Osmanlı sınırı arasındaki bölümün inşaa maliyetinin hesaplanmasına, 1912 yılında bütçeden fon ayrılarak inşaat çalışmalarına başlanmasına izin verilmiştir. Hattın inşaat maliyetinin (hareketli araçlar dâhil) 9.033.600 ruble olarak onaylanması ve bu tutarın, inşaatın ilerleyişine bağlı olarak ihtiyaç duyuldukça Bakanlık bütçesinden kademeli olarak tahsis edilmesi kararlaştırılmıştır [17, ss. 30-31]. Kars-Sarıkamış hattının inşaa çalışmaları Kars ve Sarıkamış tarafından olmak üzere eş zamanlı olarak başlamıştır [32, s. 54]. Aynı yıl demiryolu inşaa çalışmaları için devlet hazinesinden 500 bin ruble tahsis edilmesi belirtilmiştir [20, s. 1]. Nitekim Ağustos 1912 tarihli Kars Şehbenderi Cemaleddin Bey'in Petersburg Sefiri Turhan Paşa'ya gönderdiği raporunda demiryolunun Kars merkezden Sarıkamış'a kadar uzatıldığını bildirmiştir [21]. Kars-Sarıkamış demiryolu hattının hizmete açılması için 6 Aralık 1912 tarihinde bir başvuru yapılmıştır [22, s. 5].

Bu süreçte Karaugan hattı bir süre geri planda bırakılsa da 1912 yılında Sarıkamış hattının Karaugan'a kadar uzatılması kararı alınmıştır [23]. 1913 yılı bütçesinde Ulaştırma Bakanlığı

tarafından Rusya genelinde yeni demiryolu inşası için 110 milyon rublelik ödenek talep edilmiş, bu tutarın 2 milyon rublesi Kars-Sarıkamış hattının yapımına, 1,5 milyon rublesi ise hattın Karaorgan'a uzatılmasına ayrılmıştır [24, s. 3].

3.2. Hat güzergâhındaki kamulaştırmalar

Kars-Sarıkamış hattı; Kars, Kağızman ve Oltu ilçelerindeki köylere tahsis edilmiş, mülkiyeti devlete ait olan arazilerden geçmiştir. Kars, Erivan ve Culfa demiryolu hatlarının inşası sırasında yaşanan bedelsiz arazi kamulaştırma tartışmaları, bölgede adil bir çözüm arayışını zorunlu kılmıştır. Bu tecrübeyle, toprak sahiplerinin haklarını koruyan ve tazminat mekanizmalarını şeffaflaştıran bir uygulama hayata geçirilmiştir. Mevcut maliyet hesaplarına kamulaştırılan araziler için ek bir ödenek eklenmiştir. Kars-Sarıkamış arasındaki yaklaşık 40 kilometrelik güzergâh üzerinde arazi satın alımı, mevcut binaların yıkımı, geçici olarak kullanılan araziler için tazminat ödenmesi, hazine arazileri üzerindeki tarla, çayır ve ekili alan sahiplerinin zararının karşılanması gibi belli başlı hazırlık çalışmaları yürütülmüştür; bahçe, çayır, mera ve odunluk gibi alanlar kamulaştırılmıştır [17, ss. 33-35]. Bu kapsamda Kars Oblastı'nın Kars Okruğu'ndaki kamulaştırma yapılan ve bazı yerleşimleri kaldırılan köyler olmuştur. Bunlar arasında Novo-Estonka [Karacaören], Aleksandrovka [Yolaçan], Novo-Mihaylovka [Dikme], Benliahmet, Sunang-Azad, Aşağı Kotanlı, Kara-Çay, Ah-Pugar [Akpınar], Ali-Sofi [Alisofu], Dolbanlı [Dölbentli], Cavlah El-Geçmez [Cavlak] köyleri yer almıştır [25, s. 170].

Demiryolunun inşaat malzemeleri Rusya'nın farklı bölgeleri ve Karadeniz çevresinden temin edilerek Kars'a taşınmıştır. Demiryolu rayları yaklaşık 2.700 km uzaklıktaki Yekaterinoslav [Ukrayna-Dnipro]'dan, ray bağlantı plakaları 2.315 km uzaklıktaki Sulina [Romanya, Tuna Nehri ağzı]'dan, cıvata ve çiviler Rus demiryolları inşasında önemli bir tedarik merkezi olan 2.688 km uzaklıktaki Nijne-Dneprovsk'tan temin edilmiştir. Hat güzergâhında farklı amaçlar için sarf edilen çimento ise Poti'den demiryoluyla Kars'a sevk edilmiş ve at arabalarıyla güzergâh üzerine dağıtılmıştır [17, ss. 38-46]. İnşa edilen bir demiryolu, diğer bir hattın ihtiyacı olan malzemenin sevkinde kullanılmıştır.

3.3. Hattaki istasyonlar

Kars-Sarıkamış hattı Kars, Vladikars [Merkez Kümbetli köyü], Benliahmet, Selim, Çatah ve Sarıkamış istasyonlarından oluşmuştur [25, s. 334]. Bu istasyonların her birinde seferlerin ve istasyondaki hizmetlerin aksamadan yürütülmesi için gerekli olan alet, edevat ve diğer demirbaş temin edilmiştir. İlginç bir ayrıntı olarak brandalar Sarıkamış'ın sert kış şartlarına karşı yük ve ekipman koruması için hayati öneme sahip demirbaş malzemeler olarak ön plana çıkmıştır. Yangın ekipmanları ise buharlı lokomotiflerin sebep olabileceği kömür ateşi kaynaklı yangın riskine karşı zorunlu donanımlar olarak görülmüştür. İstasyonların ve buharlı trenlerin su ihtiyacı en yakın akarsu kaynağından temin edilmiştir. Örneğin, Kars ve Benliahmet istasyonlarının su ihtiyacı borularla Kars Çayı'ndan, Selim istasyonunun su ihtiyacı Sarıkamış Çayı'ndan ve Sarıkamış İstasyonunun su ihtiyacı Bayburt Çayı'ndan temin edilmiştir. Borularla istasyonlara ulaşan su, pompa tertibatı aracılığıyla su şebekesi üzerinden yolcu terminali, revir, nöbetçi odaları ve banyolara ulaştırılmıştır [25, ss. 320-324].

İstasyon binaları için dönemin standartlarına uygun mobilya ve donanımlar kullanılmıştır. Bu kapsamda kenar süslemeli Viyana tarzı kumaş kaplı sandalyeler, mermer tezgâhlı büfeler ve çeşitli ölçülerde aynalar istasyon salonlarına yerleştirilmiştir. Yolcu bekleme alanları için demir ayaklı banklar, idari işler için akçaağaçtan iki arşın uzunluğunda yazı masaları tedarik edilmiştir. Ayrıca istasyon görevlilerinin kullanımına yönelik şikâyet defterli masalar, evrak dolapları ve hatta mürekkep hokkaları demirbaş listesinde yer almıştır. Bu mobilya ve malzemeler, dönemin Rus demiryolu standartlarına uygun olarak, dayanıklılık ve estetik kaygılar göz önünde

bulundurularak seçilmiştir. İlginç bir ayrıntı olarak, istasyonlardaki büfelere yolculara servis amacıyla iki kollu emaye semaver ve demir tepsiler zimmetlenmiştir [25, s. 338].

3.4. Menfez, köprü, platform inşası

Demiryolu güzergâhında yağmur, dere ve sel sularının hattın altından geçerek raylara zarar vermesini önlemek ve altyapıyı sağlamlaştırmak için menfezler yapılmıştır. Bunun için ilk aşamada yol platformunun altına taştan künkler koyulmuş, ardından temel inşa edilerek üzeri taşla kaplanmış ve sulama sularının geçişini sağlamak amacıyla zemin altına yerleştirilmiştir. Menfezlerin bir kısmı çimento harcı kullanılarak örülmüş, diğerleri ise geleneksel kuru duvar (harçsız örme) yöntemiyle yapılmıştır. Tüm bu çalışmalar, hattın uzun vadeli dayanıklılığını artırmak ve su yönetimini optimize etmek amacıyla hayata geçirilmiştir. Bunun yanında yol boyunca gerekli yerlere taş kemer köprüler inşa edilmiştir [25, s. 214]. Hat üzerinde, 20 adedi 1 sajen ve 2 adedi 2 sajen genişliğinde olmak üzere toplam 22 köprü inşa edilmiştir [17, s. 39].

Hattın askerî öneminin en önemli göstergesi birliklerin hızlı sevkiyatı amacıyla Sarıkamış, İskender-Çay ve Karaorgan istasyonlarında yapılması planlanan ayrıntılı altyapı çalışmalarıdır. Bu çerçevede Sarıkamış İstasyonu'na iki adet, İskender-Çay ile Karaorgan istasyonlarına ise birer adet olmak üzere toplam dört adet büyük platform inşa edilmesi kararlaştırılmıştır. Yaklaşık uzunlukları 300 metre, genişlikleri 15 metre olan taş döşemeli platformlar birliklerin toplu iniş ve binişlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Ayrıca Sarıkamış'ta yaklaşık 11 metre, Karaorgan'da ise 8.5 metre genişliğinde açık yükleme platformlarının yapımı projelendirilmiştir. Bu platformların askerî operasyonların daha etkili hale getirilmesi ve askerî trenlerin güvenli manevra yapabilmesi için özel olarak tasarlanmış ekipmanla donatılarak buna uygun rayların döşenmesi, tampon sistemleri ile durdurma mekanizmalarının entegre edilmesi planlanmıştır [17, s. 60]. Nitekim çalışmaların temel amacı muhtemel bir askerî harekâta Rusya'nın bölgedeki lojistik kapasitesini artırmak ve savaş durumunda birliklerin hızlı intikalini sağlamak olmuştur.

Hattın askerî ve stratejik önemi, güvenlik önemlerinin alınmasını zorunlu hâle getirmiştir. Bu görev için jandarma birlikleri vazifelendirilmiştir. Bunların görev yerlerine ulaşımı ve barınma ihtiyaçları demiryolu bütçesinden karşılanmıştır. Ayrıca güvenlik önlemleri kapsamında 3 adet iki katlı muhafız evi, 4 tam kışla ve 4 yarı-kışla binasının inşası planlanmıştır. Bu yapıların tamamı, taş veya betonarme malzemeden Uluhanlı-Culfa (1908) demiryolundaki yapılar örnek alınarak yaklaşık 3 metre yüksekliğindeki duvarlarla çevrili ve üst düzey güvenlik önlemlerine sahip olacak şekilde planlanmıştır [17, ss. 57-59]. Bu durum, hattın Güney Kafkasya demiryollarının doğal bir uzantısı ve dönemin en son mühendislik gelişmelerinin bir ürünü olarak inşa edildiğini göstermektedir. Bu çalışmalar dâhil olmak üzere projenin tüm maliyeti Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Demiryolu Projesinin Maliyet Analizi [12, ss. 65-66]

Bölüm	Harcama Kalemi	Maliyet (Ruble)	Verst [1.067 metre] Başına Maliyet (Ruble)
I	Kamulaştırma giderleri	64,295	1,718
II	Zemin dolgusu ve hazırlık çalışmaları	2,047,581	54,558
III	Mühendislik yapıları (köprü, menfez)	3,956,010	105,402
IV	Üst yapı (ray ve travers)	659,658	17,577
V	Yol aksesuarları	23,414	624
VI	Telgraf hattı	21,465	572
VII	Güvenlik yapıları (karakol, kışla)	81,375	2,165
VIII	İstasyon binaları	328,405	8,75
IX	İstasyon su temini	44,1	1,175

X	İstasyon ekipmanları	68,2	1,817
XI	Genel giderler	606,705	16,166
XII	Diğer kurum masrafları	58,129	1,549
XIII	Askeriye talepli özel çalışmalar	430,52	12,004
A Grubu Toplam		8,409,882	224,088
I	Tren setleri (lokomotif + vagon)	517,484	13,789
II	Test, teslimat ve yedek parçalar	49,989	1,382
B Grubu Toplam		567,473	15,121
I	İşletme fonu	56,295	1,5
C Grubu Toplam		56,295	1,5
Genel Toplam		9,033,650	240,703

Tablo 1’deki maliyet hesaplamalarına göre Zemin dolgusu ve hazırlık çalışmaları ile Mühendislik yapıları (köprü, menfez) giderleri toplam maliyetin % 66’sını oluşturmuştur. Askerî temelli genel talep giderleri de ayrı bir kalem olarak hesaplanmıştır. Genel kamulaştırma giderlerinin oldukça düşük bir maliyetle yapıldığı, Güvenlik yapıları (karakol, kışla) için sarf edilen giderden daha az olduğu görülmektedir. Bu durum hat güzergâhındaki mülk sahiplerine ödenen miktarın oldukça sembolik bir meblağ olduğu göstermektedir.

Rus yetkililer, hattın inşasında çoğunlukla Ermeni, Gürcü ve Rum işçileri istihdam etmiştir. Bunlar arasında yetersiz beslenmeden kaynaklı hastalıklar, iş kazaları ve çalışma şartlarından kaynaklı psikolojik rahatsızlıklar görülmüştür [25, s. 368]. Ayakta tedavi gören hastaların mesleki durumlarına göre dağılımı idari personel (büro çalışanları, muhasebeciler ve denetçiler), teknik ekipler (bölge şefleri, teknisyenler ve ustabaşılar), taşeron firmaların çalışanları, genel işçiler (hamallar, bekçiler ve kazıcılar), zanaatkârlar (marangozlar, duvarcılar ve sıvacılar), tünel işçileri (keson çalışanları ve patlayıcı uzmanları), metal işçileri (demirciler ve tesisatçılar), tren bakım ekipleri, trafik kontrol personeli, sağlık çalışanları, güvenlik görevlileri (jandarma ve polis), çalışanların aile üyeleri ve inşaat sahasındaki diğer misafirler şeklinde olmuştur [25, s. 375].

3.5. Hattın hizmete girişi

Kars-Sarıkamış demiryolu deneme seferlerine 1913 yılının sonlarına doğru açılmış, Aralık ayında ise düzenli seferlere başlanması planlanmıştır. Düzenli seferler öncesinde uzun mesafeli rayların döşenmesi tamamlanmış olmakla birlikte semafor ve sinyalizasyon sistemlerinin kurulumu sürmüştür, üçüncü ve ikinci sınıf vagonlarla yapılan deneme seferlerinde herhangi bir kaza kaydı bulunmamakla beraber işletme yetkilileri yolcu güvenliğine ilişkin resmî sorumluluk üstlenmemiştir. Ayrıca kondüktörlerin yolculara karşı sert tutum sergilediği ve tarifiedeki 60 kopek yerine özellikle üçüncü sınıf yolculardan keyfi olarak bir ruble veya daha fazla ücret talep ettiği gözlemlenmiştir. Yaklaşık 50 verstlik (53 km) mesafenin kat edilmesinde gözlemlenen belirgin düzensizlikler ve bazen 9 saate varan yolculuk süreleri, hattın henüz düzenli seferler için hazır olmadığını göstermiştir [37, s. 3]. Hattın hizmete açılmasıyla birlikte bazı kısımlarındaki eksikliklerin tamamlanmasına yönelik çalışmalar sonraki yıllarda sürmüştür [25, ss. 156-157].

Kars-Sarıkamış hattının Karaorgan’a kadar, yani Osmanlı sınırına oldukça yakın bir noktaya kadar uzatılması için çalışmalar devam etmiştir. Özellikle sınıra oldukça yakın bir mesafeye ulaşan demiryoluna dair bir İngiliz yetkili şu ifadelerde bulunmuştur [26, s. 4]:

“Rus Hükümeti’nin Kars’tan başlayan demiryolu, 1913 sonundan itibaren sınırın yaklaşık 35 kilometre uzağındaki Sarıkamış’a ve Erzurum şehrinin yaklaşık 120 kilometre uzağına kadar faaliyet göstermektedir. Şimdilerde bu hat sınıra doğru ilerletilmektedir, ancak henüz ticaret üzerinde gözle görülür bir etkisi olmamıştır.”

İngiliz yetkilinin dikkat çektiği Sarıkamış-Karaorgan hattını inşası 1914 yılının başlarında başlamış ve 1917 yılında tamamlanabilmiştir. Bu süreç Osmanlı Hariciye Nezareti'nin bölgedeki temsilciliklerle yazışmalarına yansımıştır. Tebriz şebhenderliğinden bildirildiğine göre Rusların Sarıkamış-Karaorgan hattındaki demiryolu inşa faaliyetleriyle birlikte Azerbaycan ordusunu takviye ederek bölgeye 40 bine yakın asker yığmışlardır [27]. Bu gelişmeler karşısında Osmanlı makamlarının bölgedeki demiryolu hatlarına özel bir ilgi gösterdiği anlaşılmaktadır. Zira Kars şebhenderliği tarafından Kars-Sarıkamış hattı dâhil olmak üzere bütün Kafkasya tren istasyonlarının isimleri ile birbirlerine olan mesafelerini içeren derleme bilgilerin merkeze gönderilmesi istenmiştir [28].

3.6. I. dünya savaşı ve Sarıkamış

Rus İmparatorluğu'nun I. Dünya Savaşı'na resmen katılımı 20 Temmuz 1914 tarihinde gerçekleşmiş, 20 Ekim'de de Osmanlı Devleti'ne savaş ilan etmiştir. Rus Çarı II. Nikolay, savaş bölgelerini gezmiş ve orduları teftiş etmiştir. Bu çerçevede Kafkasya'daki şehirleri gezen Çar, 30 Kasım Pazar günü Kars tren garına gelerek resmî törenle karşılanmış, ardından Kars Kalesi'ni, tabyaları ve yaralı askerleri teftiş etmiştir [29, s. 452]. Sembolik bir anlam taşıması bakımından imparatorun treni 1 Aralık sabah 9.00'da, kısa süre önce tamamlanmış olan Sarıkamış İstasyonu'na, yani Osmanlı sınırına en yakın bölgeye varmıştır. İmparator, General-Feldmareşal Prens Baryatinski'nin adını taşıyan ve fahri komutanı olduğu 80. Kabarday Alayı'nın üniformasını giymiştir. Daha sonra, bayrağıyla birlikte hazır bekleyen Kabarday Alayı'nın onur muhafızlarına yaklaşarak onları selamlamış, muhafız birliğini teftiş etmiş ve üç St. George Haçı ile süslenmiş bayraktarın önünde durmuştur. Sarıkamış'taki Garnizon Kilisesi'nde Çar'ın katılımıyla kısa ayin düzenlenmiştir. Ardından Çar, Rus sınır hattı ve Türk sınırına yaklaşık 1.6. km mesafede bulunan Micingirt'teki ileri mevzileri ziyaret etmiştir [30, ss. 74-88]. Bu ziyaretin ardından Rus ordusunun bölgedeki askerî hareketliliği ve stratejik planları daha net şekilde ortaya çıkmıştır.

Rus ordusunun büyük kuvvetlerle Osmanlı topraklarına ilerleyebilmesi için doğuda üç farklı güzergâh mevcuttur. Bunlar Ardahan-Oltu-Erzurum (Ardahan yönü), Kars-Sarıkamış-Erzurum (Kars yönü), Erivan-Diyadin-Erzurum (Erivan yönü). Bunlar arasında en önemli ve kısa olanı, yaklaşık 270 km uzunluğundaki Kars yönüdür. Bu hat, tarihsel olarak Türk ve Rus ordularının ana sefer güzergâhı olarak hizmet etmiştir. Hattın avantajı, Kars platosu boyunca iyi yollar ve şoselerle kesişmesi, ardından Erzurum tahkimatlarına kadar ulaşan vadilerden geçmesi ve Gümrü-Kars-Sarıkamış demiryolu üzerinde ilerlemesi olmuştur [31, s. 10]. Sarıkamış Harekâtı, bu hattın Türk ve Rus orduları açısından ne denli stratejik bir merkez olduğunu ortaya koymuştur. Zira harekâtın hedefi Rusya için mühim bir merkez olan ve cepheye lojistik destek sağlayan Tiflis-Kars-Sarıkamış tren yolu olmuştur. Harekâtın başarılı olması durumunda Rus ordusu ikmal yolunu ve mühim bir askerî üssünü kaybedecek ve cephe gerisindeki gücü kırılmış olacaktır. Enver Paşa harekâtın başarılı olması için birliklerin bir kısmını Kars-Sarıkamış demiryolunun bağlantısını koparmak için görevlendirmiştir [32, s. 252]. Zira Enver Paşa'nın savaşın kazanılacağına dair inancı, ilk Türk birliklerinin 26 Aralık 1914-1 Ocak 1915 tarihleri arasında Sarıkamış'a ulaşmasıyla neticelenmiştir. Bir süre Rus birlikleri zor duruma düşse de lojistik üstünlük sayesinde 2 Ocak 1915'te Sarıkamış'ta galip gelebilmişlerdir [33, s. 1].

Tiflis-Gümrü-Kars-Sarıkamış demiryolu Rus ordusuna Sarıkamış'ta büyük bir avantaj sağlamış, demiryolu ile cephe hattı arasındaki bağlantı ise şose yollar aracılığıyla kurulmuştur. Tüm birlikler, cephe ve erzakın sevkiyatı Sarıkamış hattı ve ardından şose yollar, bir kısmı motorlu araçlar üzerinden gerçekleşmiştir. Diğer yandan bu cephedeki Osmanlı ordusuna en yakın demiryolu olan Sivas-Ulukışla istasyonu 600 km batıda yer almıştır. Türk ordusuna ait malzeme nakliyatı ilkel vasıtalarla yapılırken, Rus tarafında her bir vagonu 9-20 ton kapasiteli katarlarla yapılmıştır [34, ss. 765-794]. Zira Osmanlı birlikleri Sivas Ulukışla'ya kadar trenle, ardından yaya şekilde yaklaşık iki üç ayda cepheye ulaşabilmişlerdir [35, s. 243]. Diğer yandan Osmanlı

sınırlarındaki demiryolu yapımında üstlenici ülkenin ekonomik ve askerî çıkarları ön planda olmuş; İngilizler Ege’de, Almanlar Bağdat Demiryolu Projesi ile Akdeniz ve Basra Körfezi’nde etkinliklerini artırmışlardır [36, s. 497-500].

Kars-Sarıkamış demiryolu, askerî ve siyasi amaçlar için demiryolu altyapısının nasıl stratejik bir araç olarak kullanılabildiğinin net göstergesidir. Bu anlamda Rusya, Kafkasya gibi sınır bölgelerinde demiryolu hatlarını yalnızca ulaştırma değil, hızlı askerî müdahale ve bölgesel hâkimiyet aracı olarak kullanmıştır. Bu politika, Prusya ve İngiltere gibi diğer büyük güçlerle benzerlik göstermiştir. Osmanlı Devleti’nde ise demiryolu inşası genellikle dış finansman ve teknik destekle yürütülmüş, projelerin çoğu Alman (Bağdat Demiryolu) veya İngiliz (İzmir-Aydın Demiryolu) sermayesine dayalı olmuş; bu durum demiryolu politikasının askerî ihtiyaçlardan ziyade, ekonomik ve siyasi çıkarlar çerçevesinde şekillenmesine neden olmuştur. Buna karşılık Rusya, Kars-Sarıkamış hattında olduğu gibi, doğrudan kendi teknik personeli ve devlet bütçesiyle bu altyapıyı kurmuş ve kontrolü tamamen kendi elinde tutmuştur.

4. Sonuç

Bu çalışma, Kars-Sarıkamış demiryolu projesinin Rus İmparatorluğu’nun Kafkasya politikalarındaki merkezî rolünü kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. 1913’te tamamlanan bu stratejik hat, sadece bölgesel ulaşım ağının bir parçası olmakla kalmamış, aynı zamanda Osmanlı-Rus sınırındaki askeri ve siyasi dengeleri kökten değiştiren bir unsur haline gelmiştir. Projenin teknik zorlukları ve yüksek maliyetine rağmen sağladığı askeri avantajlar, özellikle I. Dünya Savaşı’nın ilk yıllarında kendini açıkça göstermiştir. Demiryolunun Rus ordusuna sağladığı lojistik üstünlük, Sarıkamış Harekâtı’nın kaderini belirleyen temel faktörlerden biri olmuştur. Rus birlikleri, demiryolu ağı sayesinde en zorlu kış şartlarında dahi hızla takviye alabilirken, Osmanlı ordusunun ulaşım altyapısındaki yetersizlikler, askeri operasyonların başarısızlığa uğramasında kritik bir rol oynamıştır. Bu durum, modern harp tarihinde lojistiğin belirleyici önemini açıkça ortaya koyan önemli bir örnektir.

Projenin sosyal ve ekonomik boyutları da dikkat çekicidir. İnşaat sürecinde yaşanan kamulaştırmalar, yöre halkının yaşamında önemli değişikliklere yol açmakla birlikte halkın Rusya’nın farklı bölgelerine seyahatini de mümkün kılmıştır. İşçi sağlığı ve güvenliği konusundaki eksiklikler, dönemin çalışma koşulları hakkında önemli ipuçları sunmaktadır. İmparator II. Nikolay’ın Sarıkamış’ı ziyareti ise projenin sadece askeri değil, aynı zamanda sembolik ve psikolojik boyutlarını gözler önüne sermektedir. Zira İmparatorun Rus demiryollarıyla doğrudan Osmanlı sınırına kadar ulaşabilmesi aynı zamanda ulaşım alanındaki gövde gösterisidir. Bu açıdan Kars-Sarıkamış demiryolu örneği, altyapı yatırımlarının ulusal güvenlik stratejilerindeki önemini açıkça göstermektedir. Öte yandan, Osmanlı Devleti’nin demiryolu ağını genişletmedeki yetersizliği, savaş sırasında ciddi bir lojistik dezavantaja dönüşmüştür. Bu durum, günümüzde bile geçerliliğini koruyan önemli bir ders niteliğindedir: bir ülkenin savunma kapasitesi, büyük ölçüde ulaşım altyapısının gelişmişliği ile doğrudan ilişkilidir. Sonuç olarak, bu çalışma sadece tarihsel bir olayı belgelemekle kalmamakta aynı zamanda altyapı yatırımlarının stratejik önemi konusunda günümüz için de geçerli olan önemli çıkarımlar sunmaktadır. Türkiye’nin bölgesel ulaşım ağlarındaki merkezi konumu, bu tarihsel deneyimler ışığında daha etkin bir lojistik diplomasi geliştirmesini gerektirmektedir. Gelecekte yapılacak araştırmalar için bu tür projelerin ekonomik, sosyal ve askeri etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Osmanlı ve Rus arşivlerinin daha detaylı incelenmesi, savaş ve lojistik tarihi çalışmaları için yeni perspektifler sunma potansiyeli taşımaktadır.

Kaynakça

- [1] C. F. Bonnet, *Practical railway engineering*, 2nd ed. India: World Scientific, 2021.
- [2] S. Hurinchuk, "The development of railway transport engineering in the russian empire in the second half of the nineteenth century," *Hist. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 2(15), ss. 160–174, 2019, doi: 10.32703/2415-7422-2019-9-2(15)-160-174.
- [3] V. Çernişev, "Ekonomičeskaya politika pravitelstva po otnoşeniyu k jelez. Dorogam," *Jelednorodnoe Delo*, ss. 351-354, 1914.
- [4] T. Akaki, *The Transportation of oil by sea*. Bloomington, IN, USA: iUniverse, Inc., 2011, ss. 2-3.
- [5] "Zakavkazskaya jeleznyaya dorogi," *Voennaya Entsiklopediya*, c. X. Peterburg, s. 432, 1912.
- [6] M. Arslan Çinko ve Z. Eres, "Yeni demiryolu projeleri bağlamında kars demiryolu mirasının değerlendirilmesi," *Mimarlık*, sy 407, ss. 62-69, 2019.
- [7] Devlet Arşivleri Başkanlığı Cumhuriyet Arşivi, 30-18-1-2 62/14/20, 15-30 (22.02.1936).
- [8] M. van Creveld, *Supplying war: Logistics from wallenstein to patton*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997, s. 82.
- [9] E. J. Hess, *Civil war logistics: A study of military transportation*. Baton Rouge, LA, USA: Louisiana State Univ. Press, 2017, s. 37.
- [10] J. A. Lynn, Ed., *Feeding mars: Logistics in western warfare from the middle ages to the present*. London, U.K. and New York, NY, USA: Routledge, 1993, s. 185.
- [11] H. Saygılı, "Osmanlı-rus karkas cephesinde kars savunması (1828-1878)", *Atlas Sos. Bilim. Derg.*, C. 1, sy 9, ss. 1-25.
- [12] C. Badem, *Çarlık yönetiminde kars, ardahan, artvin (1878-1918)*. İstanbul, Türkiye: Aras Yayıncılık, 2021.
- [13] Başkanlık Osmanlı Arşivi, (BOA), HR.TH., 268/97 (22.02.1902).
- [14] Başkanlık Osmanlı Arşivi (BOA), HR.SFR.1., 160/76 (05.09.1911).
- [15] Başkanlık Osmanlı Arşivi (BOA), BEO, 4074/305503 (24.07.1912).
- [16] Başkanlık Osmanlı Arşivi (BOA), DH.EUM.5.Şb, 1/28 (17.08.1914).
- [17] Tsentralny Gosudarstvenny İstoricheskiy Arhiv (TsGİA), Fond, 1276, Op. 8, delo. 265.
- [18] Başkanlık Osmanlı Arşivi (BOA), HR.SFR.1., 152/30 (23.09.1909).
- [19] M. Çınar, "1878 – 1950 yılları kars'ta demiryolu (dekovil hattı) çalışmaları," Yüksek Lisans Tezi, Tarih Anabilim Dalı, Kafkas Üniv., Kars, 2021.
- [20] M. Akimov, "Ofitsialnaya Çast," *Kavkaz*, Tiflis, s. 1, Oktaybr 1911.
- [21] Başkanlık Osmanlı Arşivi, (BOA), HR.SFR.1, 165/51 (06.08.1912).
- [22] "Hronika," *Kavkaz*, s. 5, Dekabr 1912.
- [23] Başkanlık Osmanlı Arşivi (BOA), HR.SFR.1, 171/47 (11.11.1912).
- [24] "Po Kavkazu," *Kavkaz*, s. 3, Sentyabr 1912.
- [25] *Otçet po postroyke jeleznoy dorogi kars-sarıkamış: 1912-1913*, Tipografiya Kantseleri Namestnika Yego İmperatorskago Veliçestva na Kavkaze, Tiflis, 1915.
- [26] Great Britain Foreign Office and Board of Trade, *Report for the year 1913 on the trade of the consular district of erzeroum*. London, UK: Harrison and Sons, Diplomatic and Consular Reports, Annual Series, no. 5370, 1914.
- [27] Başkanlık Osmanlı Arşivi, (BOA), DH, ŞFR, 39/195 (10.02.1914).
- [28] Başkanlık Osmanlı Arşivi, (BOA), HR.SFR.1, 172/53 (04.03.1914).
- [29] H. Necefoğlu, "Birinci dünya savaşı sırasında n.nikolay'ın karkas seferi," *XVII. Türk Tarih Kongresi*, Ankara: TTK, 2018, ss. 447-460.
- [30] G. Dobenskiy, *Yego imperatorskoe veliçestva gosudar imperator nikolay aleksandroviç, noyabr-dekabr 1914 g.* Petrograd, Russia: Tip. Ministerstva Putei Soobşşeniya, 1915.
- [31] N. G. Korsun, *Sarıkamışskaya operatsiya: Na kavkazskom fronte mirovoy voynı v 1914-1915 godu*. Moskva, SSSR: Voenizdat, 1937.
- [32] W. E. D. Allen and P. Murattof, *Karkas harekatı*. Ankara, Türkiye: Gen.Kur Basımevi., 1966.
- [33] "Dva Goda Voynı Na Kavkazskom Fronte," *Kavkaz*, Oktaybr 1916.
- [34] T. Öğün, "Karkas cephesinde rus ruleti: Sarıkamış harekatı," *Yeni Türkiye*, vol. 73, pp. 765-794, 2015.
- [35] İ. H. Sunata, *Gelibolu'dan karkaslara birinci dünya savaşı anıları*. İstanbul, Türkiye: İş Bankası Kültür Yay.
- [36] S. Tamçelik, "Osmanlı dönemi demiryollarının tarihi gelişimi içerisinde siyasî, iktisadî ve sosyal etkiler," *Erdem*, vol. 12, no. 35, ss. 483-535, 2000.
- [37] L. N., "Kars," *Kavkaz*, s. 3, Oktaybr 1913.

Özgeçmiş**Resul TURAN**

1986 yılında doğdu. 2010 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Tarih Bölümü'nden mezun oldu. Yüksek lisansını 2013 yılında Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi'nde tamamladı. Doktora eğitimini 2019'da İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü'nde Çarlık Rusyası Döneminde Batum Vilayeti (1878-1914) adlı tezle tamamladı. Rusya ve Gürcistan başta olmak üzere birçok farklı ülkede araştırma yaptı. Hâlihazırda, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Tarih Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Rusya, Kafkasya ve Karadeniz tarihine dair çalışmaları bulunmaktadır.

E-Posta: resul.turan@erdogan.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

**Atık Tuğla, Atık Mermer ve PP Lif İçeren Sürdürülebilir ECC'lerin Travers ve Balastsız Üstyapı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi**Fatih YILDIZHAN^{*1}, Hasan Erhan YÜCEL², Mustafa GÜNAL¹¹ Gaziantep Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye² Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Mimarlık Fak., Mimarlık Bölümü, 31060, Hatay, Türkiye

*fyildizhan@gantep.edu.tr

(Alınış/Received: 29.06.2025, Kabul/Accepted: 22.07.2025, Yayınlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Günümüzdeki zorlu işletim koşulları göz önüne alındığında, traversler ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzemelerin kullanımı önemli bir araştırma konusudur. Yüksek deformasyon kapasitesi ve üstün mekanik özelliklere sahip Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (Engineered Cementitious Composites, ECC), bu alanda potansiyel bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışmada, ilk kez Atık Tuğla (AT), Atık Mermer (AM) ve farklı uzunluklarda hibritlenmiş Polipropilen (PP) liflerin ECC üretiminde kullanımı araştırılmıştır. Sürdürülebilir ECC üretimi amacıyla, çimento yerine AT, kum yerine AM ve PVA lif yerine 6 ve 12 mm uzunluğundaki hibrit PP lifler kullanılmıştır. Üretilen ECC numuneleri üzerinde mini-slump, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, orta nokta sehim ve ultrasonik dalga hızı (UDH) testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, AT ve PP kullanımının mekanik özellikleri azalttığını, buna karşın AM katkısının mekanik özellikleri artırdığını göstermiştir. AT sünekliği artırırken, AM ve PP kullanımının sünekliği azalttığı belirlenmiştir. UDH sonuçları mekanik özelliklerle pozitif korelasyon göstermiştir. Elde edilen bulgular, AT, AM ve PP katkılı ECC'nin sürdürülebilir üretimi mümkün kıldığını ve bu malzemenin travers ve balastsız üstyapı uygulamaları için potansiyel bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Travers, Balastsız üstyapı, ECC, Atık malzeme, Polipropilen lif, Sürdürülebilirlik

Evaluation of the Use of Sustainable ECCs Containing Waste Brick, Waste Marble and PP Fiber as Sleepers and Slab Track

Abstract: In light of today's challenging operating conditions, the use of new-generation composite materials in sleepers and slab track superstructure systems is a key area of research. Engineered Cementitious Composites (ECC), with their high deformation capacity and superior mechanical properties, could be a potential solution to this problem. This study investigated the use of Waste Brick (AT), Waste Marble (AM) and hybridized polypropylene (PP) fibers of different lengths in the production of ECC for the first time. For the purpose of sustainable ECC production, AT was used instead of cement, AM was used instead of sand and hybrid PP fibers with a length of 6 and 12 mm were used instead of PVA fiber. Mini-slump, compressive strength, flexural strength, mid-span beam deflection and ultrasonic pulse velocity (UPV) tests were performed on the produced ECC samples. The results showed that the use of AT and PP decreased the mechanical properties, whereas AM additive increased the mechanical properties. It was determined that the use of AM and PP decreased ductility, while AT increased ductility. UPV results showed positive correlation with mechanical properties. The findings revealed that the addition of AT, AM and PP to ECC enables sustainable production, making this material a potential alternative for sleeper and slab track applications.

Keywords: Sleeper, Slab track, ECC, Waste material, Polypropylene fiber, Sustainability

1. Giriş

Günümüzde beton sudan sonra en fazla kullanılan malzemedir [1]. Bu nedenle beton, demiryolu üstyapılarında da yaygın olarak tercih edilen bir yapı malzemesidir. Örneğin, yıllık çimento üretim miktarı 2010 da 3,3 milyar ton iken, 2022 de 4,1 milyar tona ulaşmıştır [2]. Beton sıkça

Atıf için/Cite as: F. Yıldızhan, H. E. Yücel, M. Günel, "Atık tuğla, atık mermer ve PP lif içeren sürdürülebilir ECC'lerin travers ve balastsız üstyapı olarak kullanımının değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 132-146, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1729747

tercih edilen, yüksek basınç dayanımı, uygun maliyet ve yüksek dayanıklılığa sahip bir malzemedir [3]. Demiryolu üstyapısında travers ve balastsız üstyapıda beton kullanılmaktadır.

Travers, rayların sabit kalmasını sağlayan ve raylardan gelen yükleri balast tabakasına ileten elemandır [4]. Günümüzde işletim koşulları göz önüne alındığında traverslerin servis süresi tasarım süresinden (40-50 yıl) kısa olmaktadır [5]. Bu yüzden, yeni nesil kompozit traverslerle ilgili çalışmalar yapılması gerektiği literatürde vurgulanmıştır [6,7]. Traverslerin performans özellikleri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır [8,9]. Çeçen ve Aktaş [10] traverslerin performanslarını artırmak için, polipropilen (PP) lif kullanmış ve performans özellikleri artmıştır. Benzer şekilde traverste yerli karbon lif kullanılmış ve olumlu kazanımlar elde edilmiştir [5]. Köroğlu ve Erkendirci [11] ise traverslerde cam elyaf, mamul dokuma kumaş ve keçe kumaş kullanımını incelemiş, ancak istenilen performans kriterleri sağlanamamıştır. En yüksek verim cam elyaftan alınmıştır. Literatürde yalnızca performans özellikleri değil, aynı zamanda çimento üretiminden kaynaklanan yüksek karbon emisyonları da dikkate alınmaktadır. Çeçen ve Aktaş [11] travers üretimi için ise düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento kullanımı incelemiştir ve karbon emisyonunun %50 oranında azaldığını tespit etmiştir. Bunlara ek olarak geri dönüştürülmüş atık malzemelerin çevresel endişelerle traverslerde kullanımı son yıllarda birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir [8,9,12,13]. Fakat bu çalışmalara ek yeni nesil kompozit malzemelerle ilgili daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği de bu çalışmalarda ortak vurgulanan noktalardandır [6,7,14].

Balastlı üstyapıda traversden gelen yükler elastik bir malzeme olan balasta aktarılırken, balastsız üst yapıda ise beton gibi daha rijit malzemeler kullanılmaktadır [15]. Literatürde balastsız üstyapı için kısıtlı çalışmalar bulunmaktadır. Balastsız üstyapı için ulusal literatürde yapılan çalışmada ondülasyon bakım maliyeti hesaplanmıştır [16]. Uluslararası literatürde ise 2030-2050 demiryolu için Avrupa gereklilikleri, artan talep, yüksek hız ve ekolojik ihtiyaçlar değerlendirildiğinde, minimum maliyetli ve yüksek performanslı balastlı üstyapının üretilmesi gerektiği ifade edilmiştir [17]. Literatürden elde edilen bilgiler ışığında hem travers hem de balastsız üstyapı için sürdürülebilir çimento esaslı kompozitlerin üretiminin oldukça önemli olduğu söylenebilir. Bu bağlamda Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (Engineered Cementitious Composites, ECC) sahip olduğu üstün özelliklerle dikkate alınması gereken yüksek potansiyelli bir alternatiftir.

ECC, şekil değiştirme sertleşmesine ve yüksek deformasyon kapasitesine sahip kırılma mekaniği ve mikromekanik prensipler kullanılarak tasarlanmış, yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin özel bir türüdür [18,19]. ECC, çimento, uçucu kül, silis kumu, polivinilalkol (PVA) lif veya farklı lifler (polietilen, polipropilen (PP), polyester, naylon, çelik ve volastonit mikro elyafları gibi), su ve süper akışkanlaştırıcıdan oluşur [20,21]. ECC, ilk çatlamadan sonra bir gerinim sertleşmesi davranışı gösterir [22] ve geleneksel betondan yaklaşık 300-500 kat daha yüksek olan çekme gerilme kapasitesine sahiptir [19,21,23]. Ayrıca, yüksek bir nihai çekme dayanımına (5-10 MPa), kopma modülüne (8-25 MPa), kırılma tokluğuna (25-30 kJ/m²) ve basınç dayanımına (80 MPa'ya kadar) sahiptir [24]. ECC ayrıca liflerin köprüleme etkisinden dolayı çoklu çatlak oluşumuna ve yüksek sünekliliğe sahiptir [25]. Ayrıca ECC çatlak oluşumundan sonra kendiliğinden iyileşme özelliği sayesinde bu çatlakları kapatabilmektedir [21]. Bu üstün özellikler, ECC'ye onarım/yenileme malzemesi ve dayanıklı yapı malzemesi olarak geniş uygulanabilirlik alanı kazandırmaktadır [25,26].

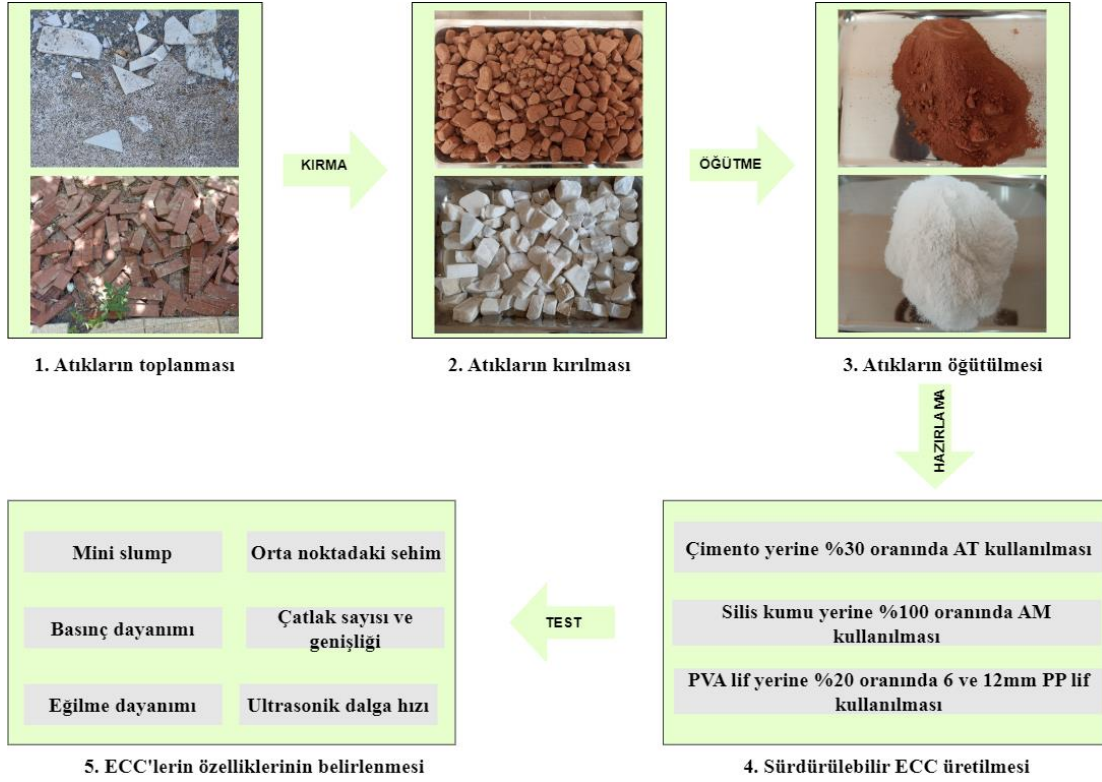
ECC'nin sahip olduğu bu üstün özelliklere rağmen; yüksek çimento miktarı, sınırlı silis kumu rezervleri ve PVA lifin yüksek maliyeti, çözülmesi gereken başlıca sorunlar arasında yer almaktadır [27]. Son yıllarda sürdürülebilirlik endişeleriyle çimento yerine doğada dönüşüm problemi olan atık malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerden biri de dönüşüm problemi olan atık tuğladır (AT). Tuğla, betondan sonra en yaygın kullanılan ikinci yapı malzemesidir. İnşaat ve yıkım faaliyetleri sonrasında yüksek miktarda atık tuğla (AT) oluşmaktadır. Örneğin

Çin'de, son yıllarda artan yapım faaliyetleriyle yılda yaklaşık 0,4 milyar ton atık tuğla ortaya çıkmaktadır [53]. AT'nin çimento esaslı kompozitlerde kum ve çimento yerine kullanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır [53]. Literatürde çimento yerine AT kullanımı harçların işlenebilirliğini azaltmış [28,29] ve mekanik özellikler için %10-15'lik oranlar önerilmiştir [28-29]. Daha yüksek oranlarda AT kullanımında ise basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir [28-30]. ECC'de çimento yerine AT kullanımında ise, %20 oranında kullanım mekanik özellikleri artırmıştır. [31]. Ayrıca hidrasyon ürünlerinde bir düşüş gösterdiği, mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği ve sünekliğin arttığı gözlemlenmiştir [32]. Bazı araştırmalarda, atık beton, atık harç, atık çimento harcı ve AT 'nin performansı karşılaştırılmıştır ve AT en iyi performansı göstermiştir [33-36]. Literatürden elde edilen sonuçlar, çimento yerine AT kullanımının ECC'nin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği fakat sünekliği ise olumlu etkilediğini göstermiştir.

Çimentoya benzer şekilde silis kumu yerine de atık malzemelerin kullanımı son yıllarda birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir. Mermerin kesme ve işleme kısmında çok yüksek miktarda atık mermer (AM) ortaya çıkarmaktadır. Örneğin Hindistan'da, yılda yaklaşık 5-6 milyon ton AM oluşmaktadır [54]. Doğada dönüşüm problemi ve AM'nin sahip olduğu filler etkisi göz önüne alındığında silis kumuna alternatif olarak AM ön plana çıkmaktadır [37]. Ayrıca AM çimento yerine de kullanılabilir [37]. AM'nin kum yerine kullanıldığı çalışmalarda %50 ve üzeri kullanım oranı aralığı önerilmiştir [38]. Ayrıca, ultrasonik titreşim hızı (UDH) testleri sonucuna göre %100 oranında AM tavsiye edilmiştir [39]. ECC'de AM kullanımında ise silis kum yerine kullanımının, basınç ve eğilme dayanımını %20'ye kadar arttırdığı ifade edilmiştir [40]. Daha yüksek oranlar ise ECC için denenmemiştir.

ECC'de PVA yerine birçok alternatif lif kullanılmıştır [41]. Bu lifler arasında uygun maliyeti, kolay bulunabilirliği ve yerli üretim imkanı ile PP lif ön plana çıkmaktadır [41]. PP lifinin kullanıldığı çalışmalarda, basınç dayanımında, eğilme dayanımında, süneklikte ve işlenebilirlikte azalma gözlemlenmiştir [42-44]. Fakat buna rağmen PP lifli ECC'ler genel olarak yapısal gereksinimleri karşılamış ve PVA'ya potansiyel bir alternatif olarak kabul edilmiştir [41]. Ayrıca lif uzunlukları ECC üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yapılan çalışmalarda PVA lifinin uzunlukları birçok performans özelliklerini değiştirmiştir [45,46]. Fakat ECC'de farklı PP liflerin beraber kullanılarak hibritlendiği bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın iki temel amacı bulunmaktadır. İlk olarak, ECC'de çimento yerine AT, kum yerine AM ve PVA lif yerine farklı uzunluklardaki PP liflerin hibrit kullanımıyla literatürdeki mevcut boşluğu doldurmak hedeflenmiştir. İkinci olarak ise, üretilen bu sürdürülebilir ECC'lerin demiryolu traversleri ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzeme olarak kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde AT ve AM'nin travers üretiminde kullanımına yönelik herhangi bir çalışmanın bulunmaması, çalışmanın özgün yönlerinden birini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında, ECC karışımlarında çimento yerine %30 AT, kum yerine %100 AM ve PVA lif yerine %20 oranında 6 ve 12 mm uzunluklarındaki hibrit PP lifler kullanılmıştır. AT, AM ve PP liflerin birlikte kullanıldığı bu çalışma, literatürde bir ilk olma özelliği taşımaktadır. Deneysel süreç, Şekil 1'de verilen akış şemasına uygun olarak yürütülmüş olup; taze karışım özellikleri, basınç dayanımı, eğilme performansı, orta noktadaki sehim ve ultrasonik dalga hızı (UDH) parametreleri detaylıca incelenmiştir. Elde edilen bulguların, sürdürülebilir ECC üretimine önemli bir katkı sağlamasının yanı sıra, demiryolu traversleri ve balastsız üstyapılar için yüksek performanslı bir alternatif malzeme sunması beklenmektedir.

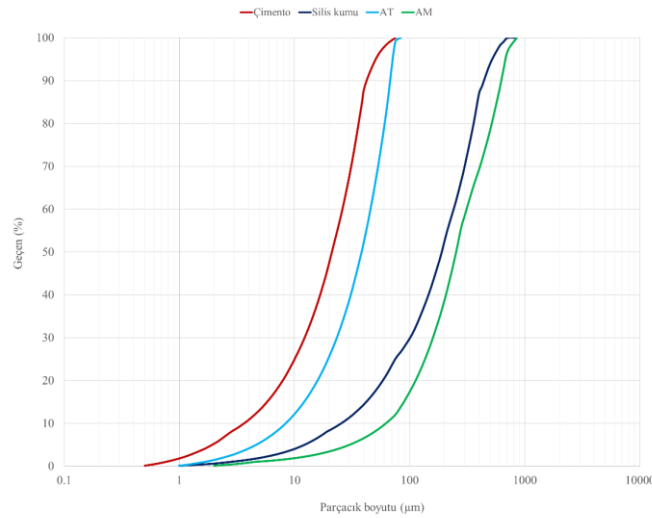


Şekil 1. Deneysel prosedürün akış şeması

2. Materyal ve Metod

2.1. Malzemeler

Çimento, silis kumu, AT ve AM için tane boyut dağılımı Şekil 2’de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan AT ve AM, öncelikle inşaat molozlarından toplanmıştır. Toplanan bu malzemeler, mekanik bir kırma işleminden geçirilmiştir ve iri agrega boyutuna getirilmiştir. Daha sonra, çimento ve kuma benzer parçacık boyutuna ulaşmaları amacıyla bilyalı değirmende öğütülmüştür. Böylece, AT ve AM’nin ECC özellikleri üzerindeki etkisinin daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi mümkün hale gelmiştir.



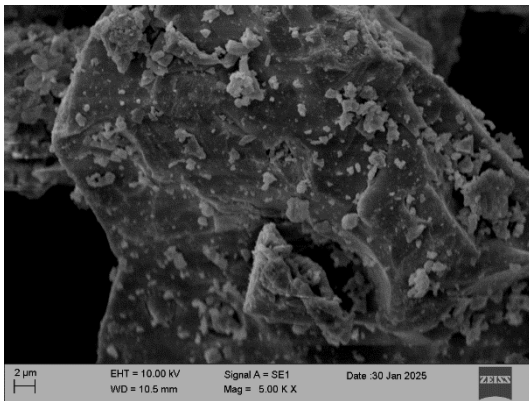
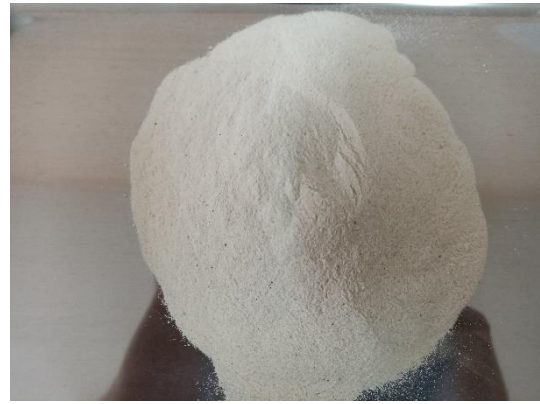
Şekil 2. Çimento, silis kumu, AT ve AM’nin tane boyut dağılımları

Tüm karışımlarda F tipi uçucu kül (UK) ve CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Silis kumu 0-400 µm boyut aralığında kullanılmıştır. Tablo 1’de, X-ışını floresansı (XRF) testi ile belirlenen UK, çimento, silika kumu, AT ve AM'nin kimyasal bileşimi verilmektedir. AT'de kalsiyum, silika ve alüminyumun varlığı, bu malzemenin çimentoya alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir. AT'deki yüksek silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) konsantrasyonları, puzolanik potansiyelinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır [35].

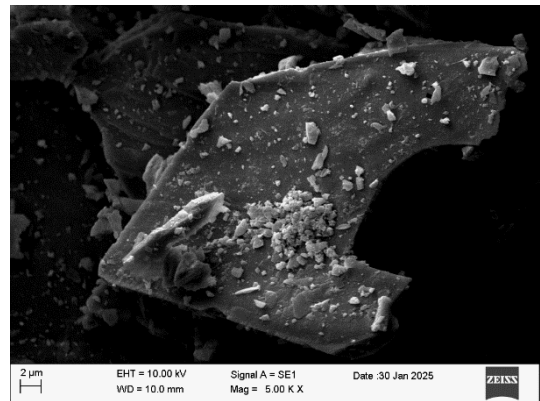
Tablo 1. Malzemelerin kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler	UK	Çimento	Kum	AT	AM
SiO_2	53,45	18,85	95,80	60,68	0,45
CaO	4,68	58,42	0,58	4,05	59,40
Al_2O_3	21,80	6,29	0,36	13,27	-
Fe_2O_3	6,11	4,88	0,81	12,15	0,15
K_2O	4,19	1,07	0,34	2,10	-
TiO_2	2,03	-	-	2,26	-
Kızdırma kaybı	3,08	3,05	-	1,25	39,80

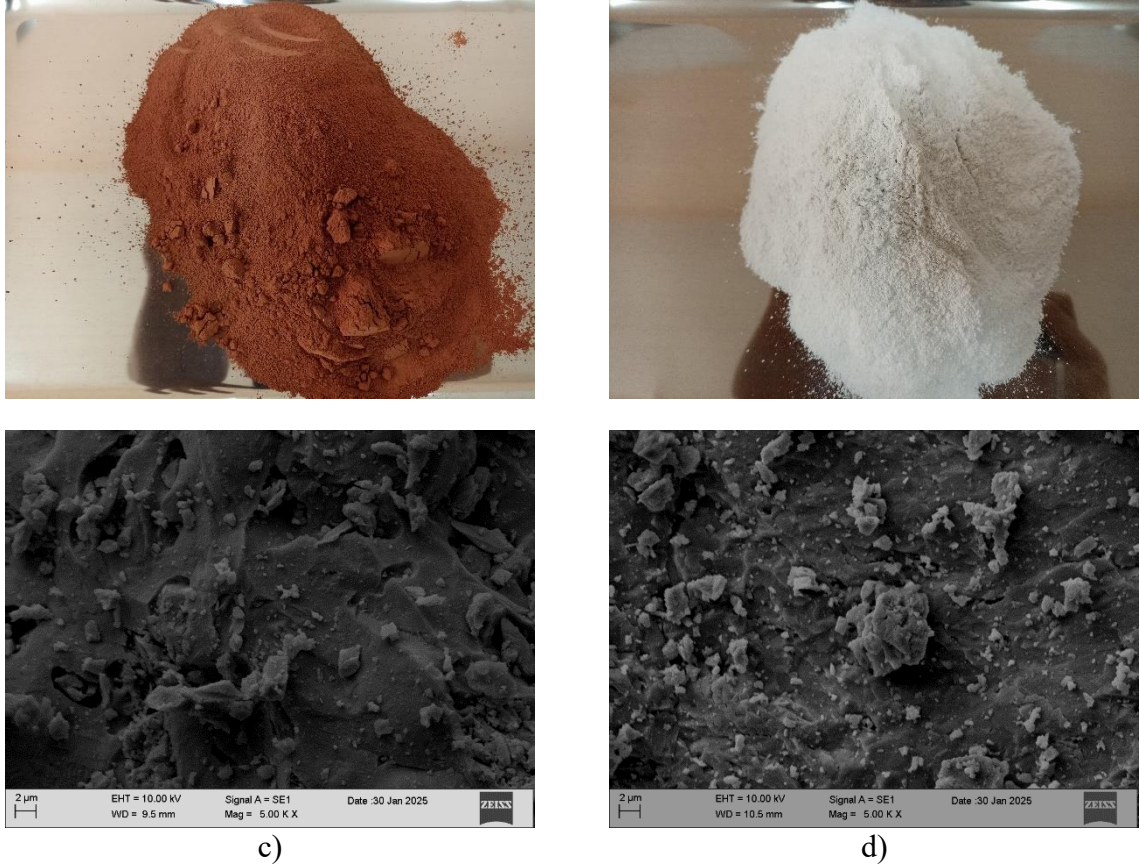
Şekil 3'de çimento, kum, AT ve AM'nin görünümü ve SEM görüntüleri verilmiştir. AT'nin mikro yapısının düzensiz bir formda olduğu ve büyük parçacıkların genellikle daha küçük parçacıklarla çevrelediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, AM'nin SEM görüntüsü, kenar ve yüzey dokusunun doğal kumdan belirgin şekilde farklı olduğunu ortaya koymuştur. ECC karışımlarında lif olarak PVA ve farklı uzunlukta PP lifi kullanılmış olup liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.



a)



b)



Şekil 3. Dış görünüm ve SEM görüntüleri a) çimento b) kum c) AT d) AM

Tablo 2. Liflerin özellikleri

Lif çeşidi	Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül ağırlık (kg/ m ³)
PVA	8	39	1620	42,8	1300
PP(6mm)	6	18	700	3,5	910
PP(12mm)	12	18	700	3,5	910

2.2. ECC karışım oranları

Çalışma kapsamında üretilen ECC'lerin karışım oranları Tablo 3'te sunulmuştur. AT, çimento yerine kütlece %30 oranında kullanılmıştır. Bu oran, literatürde elde edilen optimum değer olması nedeniyle tercih edilmiştir [33]. %30 AT'nin çimento yerine kullanıldığı karışımlar "AT30" olarak adlandırılmıştır. AM ise kum yerine %100 oranında ikame edilmiştir. Bu oran da literatürde tavsiye edilen bir değer olarak ifade edilmektedir [37]. %100 AM'nin kum yerine kullanıldığı karışımlar ise "AM100" şeklinde adlandırılmıştır.

Tüm karışımlarda toplam lif oranı hacimce toplam %2 olarak hesaplanmıştır. PP lif, PVA lifi yerine hacimce %20 oranında kullanılmıştır. Bu değişim kapsamında, 6 mm uzunluğundaki PP lif %10 ve 12 mm uzunluğundaki PP lif %10 olacak şekilde hibrit biçimde kullanılmıştır. Bu karışımlar "PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)" olarak adlandırılmıştır. Bu oranın düşük tutulmasının nedeni, PVA'nın PP'ye kıyasla sahip olduğu üstün mekanik özelliklerdir.

Çalışmada dört farklı karışım tasarımı uygulanmıştır: Kontrol, PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30, PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 ve PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30-AM100. Tüm karışım tasarımlarında, her deney için 7 ve 28 günlük testler yapılmıştır. Her bir yaş (7 ve 28 gün) için üçer adet numune üretilerek toplam altı numune hazırlanmıştır. Numuneler, 23 ± 2 °C sıcaklıkta, nemli plastik torbalar içinde 7 ve 28 gün süreyle kürlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı (SA) miktarı, karışımlar arasında benzer işlenebilirliğin sağlanması amacıyla değiştirilmiştir.

Tablo 3. ECC karışım oranları (kg/m³)

Karışım	UK	Çimento	Kum	AT	AM	Su	SA	PVA	6 mm PP	12mm PP
Kontrol	677,7	564,4	451,1	-	-	329,9	6,8	2	-	-
PP0.1(6mm)- PP0.1(12mm)- AT30	677,7	395,1	451,1	169,3	451,1	329,9	6,8	1,8	0,1	0,1
PP0.1(6mm)- PP0.1(12mm)- AM100	677,7	564,4	-	-	451,1	329,9	7,7	1,8	0,1	0,1
PP0.1(6mm)- PP0.1(12mm)- AT30-AM100	677,7	395,1	-	169,3	451,1	329,9	7,7	1,8	0,1	0,1

2.3. Deneysel çalışmalar

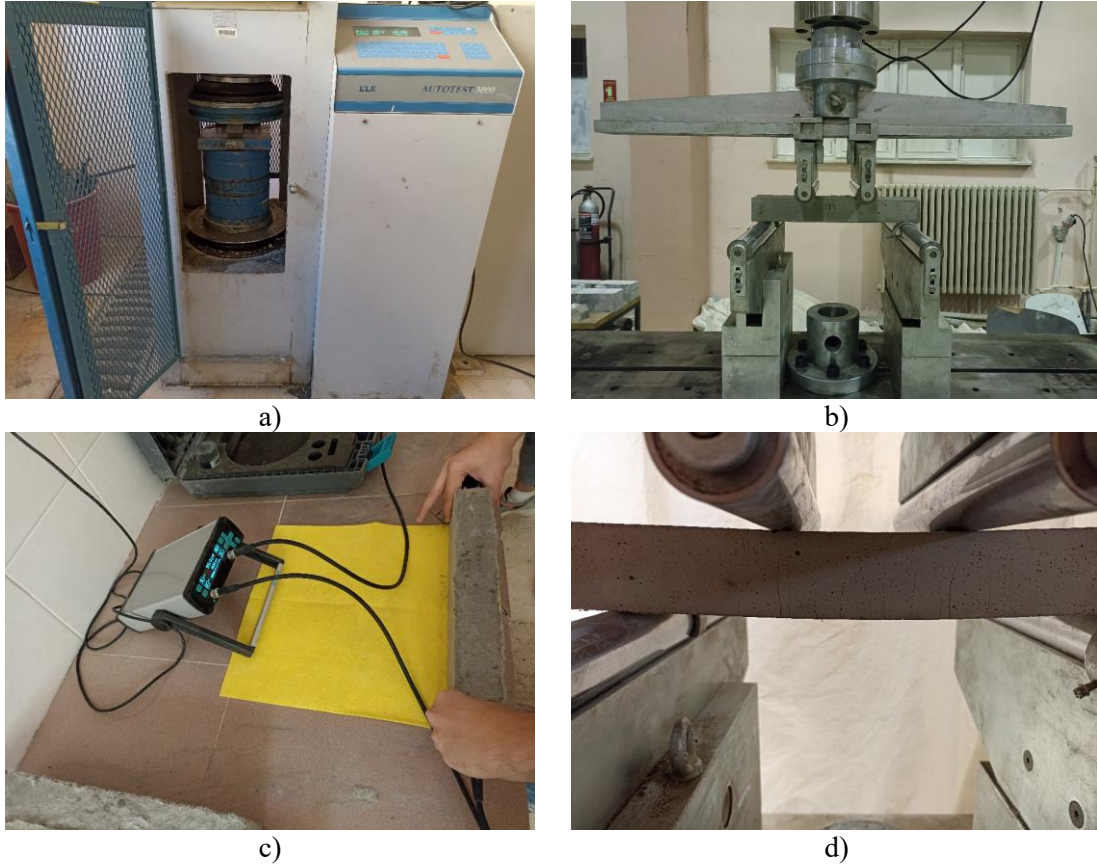
ECC üretimi için 20 lt kapasiteli mikser kullanılmıştır. İlk olarak katı malzemeler 100 rpm’de bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkılı su, mikserdeki karışıma eklenerek 150 rpm’de bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında, karışım 300 rpm’de iki dakika daha karıştırılarak homojen karışım elde edilmiş ve lifler karışıma eklenmiştir. Son olarak, lifler eklendikten sonra 150 rpm’de ilave 3 dakikalık karıştırılarak taze ECC karışımları hazırlanmıştır.

Çalışma kapsamında mini-slump, basınç, eğilme performansı ve ultrasonik dalga hızı (UDH) testleri yapılmıştır. Basınç, eğilme, UDH ve çoklu mikro çatlak oluşumuna ait görseller Şekil 4’te verilmiştir. İlk olarak ECC karışımlarının taze özelliklerini belirlemek için mini slump testi kullanılmıştır. Taze haldeki ECC numunesi, üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm ve yüksekliği 60 mm olan bir koniye dökülmüştür. Ardından koni, düz ve pürüzsüz bir yüzey üzerinde yavaşça kaldırılmış; elde edilen yayılmanın birbirine dik iki çapı ölçülmüştür. Bu iki ölçümün ortalaması alınarak mini slump değeri belirlenmiştir.

Basınç dayanımı testleri, ASTM C109 [47] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 0,9 kN/s yükleme hızıyla, 50 mm × 50 mm × 50 mm boyutlarındaki kübik numuneler üzerinde test uygulanmıştır. Her bir karışım için, 7. ve 28. günlerde üçer numune test edilmiştir.

ECC karışımlarının eğilme performansı, 360 mm × 75 mm × 50 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde değerlendirilmiştir. Testler sonucunda, karışımların eğilme dayanımları ve orta noktadaki sehim değerleri belirlenmiştir. Eğilme testleri, 0,003 mm/s deformasyon hızı ile çalışan kapalı devre elektromekanik bir test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, testlerin ardından numunelerin yüzeyindeki çatlakların sayısı ve genişlikleri, el mikroskobu yardımıyla ölçülerek analiz edilmiştir.

UDH testi, ultrasonik dalgaların bir numunenin bir tarafından diğer tarafına geçiş süresine dayalı hasarsız bir test yöntemidir. Bu test ile numunelerin yoğunluğu, boşluk içeriği ve olası mikroçatlaklar hakkında bilgi elde edilmektedir. UDH testi, ASTM C597 (2016) [48] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Testler, 360 mm × 75 mm × 50 mm boyutlarındaki üç prizmatik numune üzerinde, 7. ve 28. günlerde yapılmıştır.

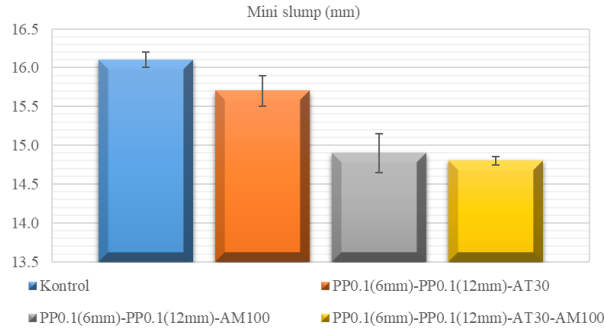


Şekil 4. Uygulanan testler a) basınç b) eğilme c) UDH d) çoklu mikro çatlak oluşumu

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mini-slump testi

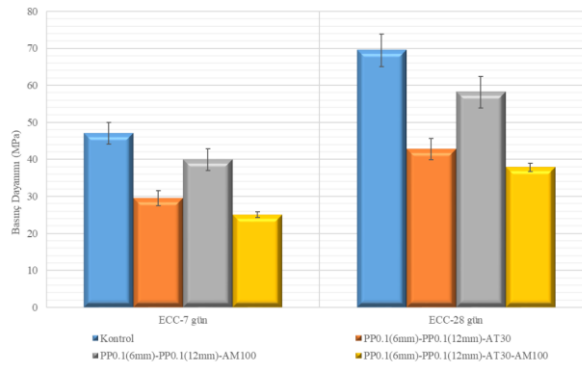
ECC karışımlarının mini-slump değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Benzer işlenebilirlik için süper akışkanlaştırıcı miktarı ayarlanmış ve mini slump değerleri ($15,45 \pm 0,65$) belirli bir aralıkta tutulmuştur. AT, AM ve PP lif kullanımıyla mini slump değerleri azalmıştır. AT kullanımında slump değerinin azalması Şekil 3'de görülen düzensiz parçacık şekline atfedilebilir. Literatürde de ECC için AT kullanımıyla slump değeri azalmıştır [28]. AM kullanımında mini slump değerindeki azalma ise AM'nin Şekil 3'de görülen pürüzlü tanecik yapısına bağlanabilir. Literatürdeki sonuçlar da, bu çalışmada AM için elde edilen bulguları desteklemektedir [40]. PP kullanımında işlenebilirliği azaltması ise PP lifinin hidrofobisitesi sebebiyle olabilir [49]. Benzer bulgular literatürde de elde edilmiştir [49]. Çalışmadan elde edilen mini-slump testi sonuçları AT, AM ve PP lif kullanımının ECC'de işlenebilirliği azalttığını göstermektedir.



Şekil 5. ECC karışımlarının mini-slump değerleri

3.2. Basınç testi

Şekil 6, ECC karışımlarının basınç dayanımlarını göstermektedir. AT, AM ve PP lif kullanımı basınç dayanımını azaltmıştır. Basınç dayanımının, AT kullanımıyla azalma göstermesi matris dayanımının azalmasından kaynaklanabilir [34]. Bu bulgu literatürden elde edilen sonuçlarla da uyumludur [33,35]. AM kullanımı ise AT kullanımına göre basınç dayanımında daha iyi sonuç vermiştir. Literatürde de AM kullanımının basınç dayanımını artırdığı belirtilmiştir [39]. Bu artışın sebebi AM nin filler etkisine bağlanabilir [39]. PP kullanımının ise PVA life göre daha düşük basınç dayanımı değerine sebep olması PP lifin PVA life göre düşük elastisite modülüne sahip olmasına atfedilebilir [50]. Bu bulgu literatürle uyumludur [50]. AT ve AM nin kullanıldığı PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30-AM100 karışımı ise AT ve AM nin tek kullanıldığı karışımlara göre daha düşük basınç dayanımı elde edilmesine sebep olmuştur. Bu bulgu AT ve AM nin beraber kullanımında basınç dayanımının daha fazla olumsuz etkilediğini göstermektedir. TS EN 13230-1 (2016) [51] standartında minimum basınç dayanımı travers için C45/55 MPa'dır. Balastsız üstyapı için ise C35/45 MPa'dır [15]. Bu yüzden çalışma kapsamında kontrol karışımı ve üretilen sürdürülebilir ECC'lerden PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımı travers ve balastsız üstyapı için standarta uygundur. PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30 karışımı ise balastsız üstyapı için minimum koşula oldukça yakındır. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, ECC'nin demiryolu üstyapısı için potansiyel bir alternatif olabileceği söylenebilir.



Şekil 6. ECC karışımlarının basınç dayanımı

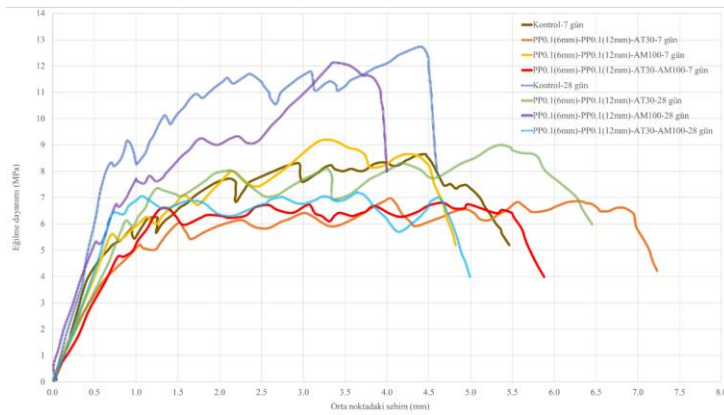
3.3. Eğilme performansı testi

Şekil 7, ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim grafiklerini sunmaktadır. AT kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde azalma gözlemlenmiştir. AT kullanımının eğilme dayanımını azalttığı literatür tarafından da desteklenmektedir [33,35]. AT kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi WB'nin düzensiz şekli sayesinde artan lif-matris köprüleme

gerilimiyle açılanabilir [32]. Literatürde benzer şekilde AT kullanımının sünekliği artırdığı belirtilmiştir [32,34].

AM kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde artış gözlemlenmiştir. AM kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre azalma gözlemlenmiştir. Süneklikte azalma olmasına rağmen geleneksel betona göre oldukça sünek davranış göstermiştir.

AT ve AM beraber kullanıldığında eğilme dayanımı değeri tek kullanıma göre daha çok azalmıştır. Bu gözlem basınç testinde de tespit edilmiştir. Süneklikse kontrol karışımına göre artmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular PP, AT ve AM kullanılarak üretilen sürdürülebilir ECC'nin standart ECC'ye yakın eğilme dayanımı (PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımı) veya daha fazla süneklikle üretilebileceğini göstermektedir. Sürdürülebilir ECC'nin demiryolunda travers ve balastsız üstyapı içinde farklı üstün performans özellikleri sunabileceği söylenebilir.



Şekil 7. ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim grafikleri

Eğilme testi sonrası el mikroskobuyla çatlak sayısı ve genişlikleride ölçülmüş ve Tablo 4'te verilmiştir. Çatlak sayısının PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30 karışımında maksimum iken, PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımında minimumdur. Literatürde de süneklikle çatlak sayısının ilişkili olduğu belirtilmiştir [52]. Çatlak genişliği ise süneklik azaldıkça artmıştır.

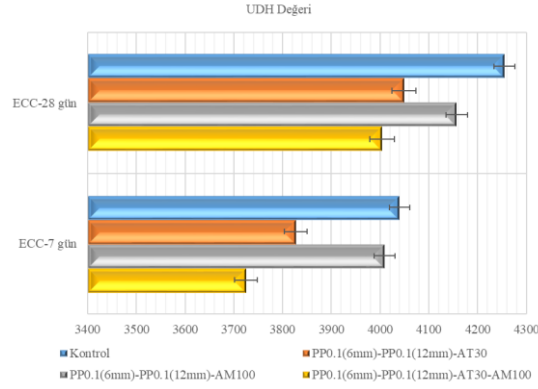
Tablo 4. ECC çatlak sayısı ve genişliği

Karışımlar	Çatlak Sayısı		Çatlak Genişliği (μm)	
	7. Gün	28. Gün	7. Gün	28. Gün
Kontrol	18	8	59	88
PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30	24	15	35	49
PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100	10	7	86	93
PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AT30-AM100	19	10	48	66

3.4. Ultrasonik dalga hızı testi

Şekil 8, ECC karışımlarının UDH değerlerini göstermektedir. AT, AM ve PP lif kullanımı UDH değerlerini azaltmıştır. Elde edilen bulgular, UDH değerlerinin basınç ve eğilme dayanımı ile yüksek oranda korelasyonlu olduğunu ortaya koymuştur. AT kullanımıyla UDH değeri düşüşü

Şekil 3’deki düzensiz yapısı sebebiyle artan boşuk oranıyla açıklanabilir. AM ise AT ye göre daha iyi sonuçların elde edilmesine neden olmuştur. AM nin filler etkisi bunun sebebi olabilir [37]. Ayrıca, AT ve AM nin beraber kullanımında basınç dayanımına benzer şekilde UDH değeri daha da azalmıştır. Sonuç olarak, UDH testinin basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçlarıyla tutarlı sonuçlar verdiği ve AT, AM ve PP lif kullanımının UDH değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür.



Şekil 8. ECC karışımlarının UDH değerleri

Çalışma kapsamında üretilen ECC’lerin sürdürülebilirlik açısından değerlendirmesi şu şekildedir: Bu çalışmada, çimento yerine AT, silis kumu yerine ise AM kullanılmıştır. AT ve çimentonun enerji tüketimi, karbon emisyonu ve maliyeti sırasıyla 5.500 ve 0.600 (Mj/kg), 0.930 ve 0.167 (kg/kg), 600 ve 170 (RMB/ton) olarak belirtilmiştir [31]. AM ve silis kumunun karşılık gelen değerleri ise sırasıyla 0.226 ve 0.460 (Mj/kg), 0.033 ve 0.082 (kg/kg), 208 ve 128 (RMB/ton)’dur [55,56]. Bu veriler ışığında, çimento yerine AT kullanımının enerji tüketimi, karbon emisyonu ve maliyet açısından önemli avantajlar sağladığı görülmektedir. AM’nin kum yerine kullanımının ise yalnızca maliyet açısından avantaj sunduğu düşünülmektedir. Ancak, AM’nin atık bir malzeme olarak çevreye verebileceği zararları önleme potansiyeli ve mermer üretimindeki yüksek enerji ve emisyon değerleri dikkate alındığında, AM kullanımı da çevresel ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlayabilir.

4. Sonuç

Bu çalışma günümüzdeki zorlu işletim koşullarını dikkate alarak, travers ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzemelerin üretilmesi problemini ele almıştır. Bu sebeple, ECC’de çimento yerine AT, kum yerine AM ve PVA lif yerine farklı uzunluklardaki PP lifler hibritlenerek kullanılmıştır. Üretilen bu sürdürülebilir ECC’lerin demiryolu traversleri ve balastsız üstyapı sistemlerinde yeni nesil kompozit malzeme olarak kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular şu şekildedir:

AT, AM ve PP lif kullanımıyla mini slump değerleri azalmıştır. AT, AM ve PP lif kullanımı basınç dayanımını azaltmıştır. AT ve AM nin kullanıldığı karışımda AT ve AM nin tek kullanıldığı karışıma göre daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir. Fakat kontrol ve PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm)-AM100 karışımı travers ve balastsız üstyapı için basınç dayanımı standartını sağlamaktadır. AT kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde azalma gözlemlenmiştir. AT kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre artış gözlemlenmiştir. AM kullanılan karışımların eğilme dayanımında basınç dayanımına benzer şekilde artış gözlemlenmiştir. AM kullanılan karışımlarda süneklikte kontrol karışımına göre azalma gözlemlenmiştir. AT ve AM beraber kullanıldığında eğilme dayanımı değeri tek kullanıma göre daha çok azalmıştır. Bu gözlem basınç testinde de tespit edilmiştir. Süneklikse kontrol karışımına göre artmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular PP, AT ve AM kullanılarak

üretilebilir ECC'nin standart ECC'ye yakın eğilme dayanımı (PP0.1(6mm)-PP0.1(12mm) -AM100 karışımı) veya daha fazla süneklikle üretilebileceğini göstermektedir. UDH değerlerinin basınç ve eğilme dayanımı ile yüksek oranda korelasyonlu olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, standart ECC ve çalışma kapsamında üretilen sürdürülebilir ECC'lerin demiryolunda travers ve balastsız üstyapı içinde farklı üstün performans özellikleri sunabileceği ve ECC'nin demiryolu üstyapısı için potansiyelli alternatif olduğu söylenebilir.

Gelecek çalışmalarda, bu malzemelerin yüksek hızlı tekrarlı darbe, servis yükleri altındaki dayanım, uzun vadeli durabilite ve sıcaklık-nem etkisi gibi parametrelerle test edilmesi ve gerçek travers prototipleri üzerinde saha veya laboratuvar deneyleri yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu yayın Fatih Yıldızhan'ın doktora tez çalışmasından hazırlanmıştır.

Kaynakça

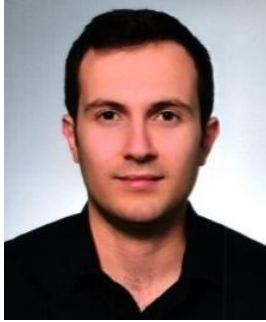
- [1] Silva, R. Nogueira, M. G. Gomes, ve J. A. Bogas, "Carbon utilization during concrete production: reasons for the low CO₂ uptake", *Journal of Building Engineering*, c. 107, s. 112766, Ağu. 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.112766.
- [2] E. Khalil ve M. AbouZeid, "Framework for Cement Plants Assessment Through Cement Production Improvement Measures for Reduction of CO₂ Emissions Towards Net Zero Emissions", *Construction Materials 2025, Vol. 5, Page 20*, c. 5, sy 2, s. 20, Nis. 2025, doi: 10.3390/CONSTRMATER5020020
- [3] T. Y. Erdoğan, *Beton*. Ankara, Turkey: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, 2007.
- [4] M. Kozak, B. Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü, A. Alınış, A. Kelimeler Travers, ve B. travers, "Kalker ve Bazalt Agregaları ile Beton Travers Üretimi", *Teknik Bilimler Dergisi*, c. 10, sy 2, ss. 19-25, Tem. 2020, doi: 10.35354/TBED.679346
- [5] F. Çeçen vd., "Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi", *Railway Engineering*, sy 15, ss. 97-110, Oca. 2022, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.1028740
- [6] O. Yazıcı, "Yeni Nesil Çevreci Kompozit Traversler", *Railway Engineering*, sy 12, ss. 13-21, Tem. 2020, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.687880.
- [7] W. Ferdous, A. Manalo, G. Van Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, ve A. Remennikov, "Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects", *Compos Struct*, c. 134, ss. 158-168, Ara. 2015, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.08.058.
- [8] M. E. Arafat ve F. Imam, "Suitability of recycled materials as a composite sleeper: A scoping review", *Mater Today Proc*, c. 65, ss. 1599-1607, Oca. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.04.599.
- [9] M. H. Esmaili, H. Norouzi, ve F. Niazi, "Evaluation of mechanical and performance characteristics of a new composite railway sleeper made from recycled plastics, mineral fillers and industrial wastes", *Compos B Eng*, c. 254, s. 110581, Nis. 2023, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2023.110581.
- [10] F. Çeçen ve B. Aktaş, "B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının DeneySEL İncelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy 15, ss. 158-169, Oca. 2022, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.990316.
- [11] F. Çeçen ve B. Aktaş, "Yeni Yeşil-Travers Modelinin B70 Tipi Öngerilmeli Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy 17, ss. 1-13, Oca. 2023, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.1107683.
- [12] A. A. Khalil, "Mechanical Testing of Innovated Composite Polymer Material for using in Manufacture of Railway Sleepers", *J Polym Environ*, c. 26, sy 1, ss. 263-274, Oca. 2018, doi: 10.1007/S10924-017-0940-6/TABLES/4.
- [13] J. J. Yee, S. C. Khong, J. Che, K. F. Tee, ve S. C. Chin, "Sustainable Materials in Concrete Railway Sleepers: A Review of Current Developments and Future Prospects", *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, c. 10, sy 1, ss. 1-16, Haz. 2024, doi: 10.15282/JCEIB.V10I1.10292.
- [14] F. Çeçen ve B. Aktaş, "Yeni LCR Tipi Traverslerin Demiryolu Hat Rijitliğine Etkisinin Araştırılması", *Demiryolu Mühendisliği*, c. 0, sy 16, ss. 36-50, Tem. 2022, doi: 10.47072/DEMIRYOLU.1105999.

- [15] C. Ceylan, “Demiryolu Hatlarında Balastsız Üstyapı Kullanılması”, *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 6, ss. 34–36, Aralık 2017.
- [16] M. N. Demirdağ ve Z. Öztürk, “Balastsız Üstyapılarda Ondülasyon Bakım Maliyetinin Üstyapı Bakım Maliyeti İçindeki Oranının Örnek Hatta İncelenmesi”, *ECJSE*, c. 4, sy. 3, ss. 509–517, 2017, doi: 10.31202/ecjse.331656.
- [17] S. R. Matias ve P. A. Ferreira, “Railway slab track systems: review and research potentials”, *Structure and Infrastructure Engineering*, c. 16, sy 12, ss. 1635-1653, Ara. 2020, doi: 10.1080/15732479.2020.1719167.
- [18] S. Demirhan, “Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Eğilme Özellikleri”, *Politeknik Dergisi*, c. 27, sy. 4, ss. 1365–1374, 2024, doi: 10.2339/politeknik.1224004.
- [19] F. B. P. da Costa, D. P. Righi, A. G. Graeff, ve L. C. P. da Silva Filho, “Experimental study of some durability properties of ECC with a more environmentally sustainable rice husk ash and high tenacity polypropylene fibers”, *Constr Build Mater*, c. 213, ss. 505-513, Tem. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.092.
- [20] H. E. Yücel, H. Ö. Öz, M. Güneş, ve Y. Kaya, “Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibrils with two different high aspect ratios”, *Constr Build Mater*, c. 306, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124921.
- [21] H. E. Yücel, M. Dutkiewicz, ve F. Yıldızhan, “Application of ECC as a Repair/Retrofit and Pavement/Bridge Deck Material for Sustainable Structures: A Review”, *Materials 2022, Vol. 15, Page 8752*, c. 15, sy 24, s. 8752, Ara. 2022, doi: 10.3390/MA15248752.
- [22] Y. Wang, Z. Zhang, J. Yu, J. Xiao, ve Q. Xu, “Using Green Supplementary Materials to Achieve More Ductile ECC”, *Materials 2019, Vol. 12, Page 858*, c. 12, sy 6, s. 858, Mar. 2019, doi: 10.3390/MA12060858.
- [23] Y. Yang, E. H. Yang, ve V. C. Li, “Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age”, *Cem Concr Res*, c. 41, sy 2, ss. 176-183, Şub. 2011, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2010.11.002.
- [24] T. Kamada ve V. C. Li, “The effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system”, *Cem Concr Compos*, c. 22, sy 6, ss. 423-431, Ara. 2000, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00042-1.
- [25] Y. Zhou, H. Fu, P. Li, D. Zhao, L. Sui, ve L. Li, “Bond behavior between steel bar and engineered cementitious composite (ECC) considering lateral FRP confinement: Test and modeling”, *Compos Struct*, c. 226, s. 111206, Eki. 2019, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111206.
- [26] S. Gao ve P. Xie, “Effect of Temperatures and Moisture Content on the Fracture Properties of Engineered Cementitious Composites (ECC)”, *Materials 2022, Vol. 15, Page 2604*, c. 15, sy 7, s. 2604, Nis. 2022, doi: 10.3390/MA15072604.
- [27] D. Shoji, Z. He, D. Zhang, ve V. C. Li, “The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review”, *Constr Build Mater*, c. 327, s. 126701, Nis. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126701.
- [28] H. Wu vd., “Properties of Cementitious Materials with Recycled Aggregate and Powder Both from Clay Brick Waste”, *Buildings 2021, Vol. 11, Page 119*, c. 11, sy 3, s. 119, Mar. 2021, doi: 10.3390/BUILDINGS11030119.
- [29] Z. Ma, Q. Tang, H. Wu, J. Xu, ve C. Liang, “Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste”, *Cem Concr Compos*, c. 114, s. 103758, Kas. 2020, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103758.
- [30] H. Wu, C. Liang, C. Wang, ve Z. Ma, “Properties of green mortar blended with waste concrete-brick powder at various components, replacement ratios and particle sizes”, *Constr Build Mater*, c. 342, s. 128050, Ağu. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128050.
- [31] J. D. Wu, L. P. Guo, ve Y. Y. Qin, “Preparation and characterization of ultra-high-strength and ultra-high-ductility cementitious composites incorporating waste clay brick powder”, *J Clean Prod*, c. 312, s. 127813, Ağu. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127813.
- [32] W. Wang, H. Wu, Z. Ma, ve R. Wu, “Using Eco-Friendly Recycled Powder from CDW to Prepare Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) and Properties Determination”, *Materials 2020, Vol. 13, Page 1143*, c. 13, sy 5, s. 1143, Mar. 2020, doi: 10.3390/MA13051143.
- [33] P. Yao, D. Yang, C. Wang, ve Z. Ma, “Upcycling of construction waste powder for sustainable ultra-high performance engineered cementitious composites: Effects of waste powder source and content”, *Constr Build Mater*, c. 349, s. 128789, Eyl. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128789.

- [34] C. Liang, Y. Zhang, R. Wu, D. Yang, ve Z. Ma, “The utilization of active recycled powder from various construction wastes in preparing ductile fiber-reinforced cementitious composites: A case study”, *Case Studies in Construction Materials*, c. 15, s. e00650, Ara. 2021, doi: 10.1016/J.CSCM.2021.E00650.
- [35] Z. Zhang, X. Liu, R. Hu, C. Liang, Y. Zhang, ve Z. Ma, “Mechanical behavior of sustainable engineered cementitious composites with construction waste powder as binder and sand replacement”, *Constr Build Mater*, c. 404, s. 133185, Kas. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133185.
- [36] R. Wu, T. Zhao, P. Zhang, D. Yang, M. Liu, ve Z. Ma, “Tensile Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) Containing Reactive Recycled Powder from Various C&D Waste”, *J Renew Mater*, c. 9, sy 4, ss. 743-765, Şub. 2021, doi: 10.32604/JRM.2021.013669.
- [37] E. Tugrul Tunc, “Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste”, *J Environ Manage*, c. 231, ss. 86-97, Şub. 2019, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2018.10.034.
- [38] F. Gameiro, J. De Brito, ve D. Correia da Silva, “Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry”, *Eng Struct*, c. 59, ss. 654-662, Şub. 2014, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2013.11.026.
- [39] B. Demirel, “The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete”, *International Journal of the Physical Sciences*, c. 5, sy 9, ss. 1372-1380, 2010, Erişim: 04 Mart 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.academicjournals.org/IJPS>
- [40] K. A. Helal, A. M. Tahwia, ve O. Youssf, “Assessment of the efficiency of hybrid basalt fibre sustainable ECC incorporating industrial waste materials”, *Constr Build Mater*, c. 461, s. 139933, Oca. 2025, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.139933.
- [41] D. Zhang, J. Yu, H. Wu, B. Jaworska, B. R. Ellis, ve V. C. Li, “Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC)”, *Compos B Eng*, c. 184, s. 107741, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2020.107741.
- [42] A. Saljoughian, H. Bahmani, Z. Ansari, N. Jafari, ve D. Mostofinejad, “An eco-friendly ECC with high slag and polypropylene fiber content for high-tensile strain applications”, *Journal of Building Engineering*, c. 91, s. 109726, Ağu. 2024, doi: 10.1016/J.JOBE.2024.109726.
- [43] S. R. Abid, M. S. Shamkhi, N. S. Mahdi, ve Y. H. Daek, “Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers”, *Constr Build Mater*, c. 187, ss. 168-177, Eki. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.07.194.
- [44] W. Zhang, C. Yin, F. Ma, ve Z. Huang, “Mechanical Properties and Carbonation Durability of Engineered Cementitious Composites Reinforced by Polypropylene and Hydrophilic Polyvinyl Alcohol Fibers”, *Materials 2018, Vol. 11, Page 1147*, c. 11, sy 7, s. 1147, Tem. 2018, doi: 10.3390/MA11071147.
- [45] C. Ding, L. Guo, ve B. Chen, “An optimum polyvinyl alcohol fiber length for reinforced high ductility cementitious composites based on theoretical and experimental analyses”, *Constr Build Mater*, c. 259, s. 119824, Eki. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119824.
- [46] S. H. Said, H. A. Razak, ve I. Othman, “Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers”, *Constr Build Mater*, c. 75, ss. 176-188, Oca. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.10.036.
- [47] “Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”, Oca. 2020, doi: 10.1520/C0109_C0109M-20.
- [48] “Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, Nis. 2016, doi: 10.1520/C0597-16.
- [49] M. Hou ve V. C. Li, “Tailoring crack width control of LC3-based engineered cementitious composites (ECC) via fiber hybridization: From micromechanics design to macro investigation”, *Mater Des*, c. 235, s. 112433, Kas. 2023, doi: 10.1016/J.MATDES.2023.112433.
- [50] J. X. Lin vd., “Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers”, *Journal of Building Engineering*, c. 29, s. 101097, May. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2019.101097.
- [51] “Test Method for Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 1: General requirements”, Ara.. 2016.
- [52] E. Özbay, M. Şahmaran, M. Lachemi, ve H. E. Yücel, “Self-Healing of Microcracks in High-Volume Fly-Ash- Incorporated Engineered Cementitious Composites”, *Materials Journal*, c. 110, sy 1, ss. 33-44, Oca. 2013, doi: 10.14359/51684371.
- [53] C. L. Wong, K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, ve T. C. Ling, “Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review”, *J Clean Prod*, c. 195, ss. 226-239, Eyl. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.193.

- [54] B. Prakash, T. J. Saravanan, K. I. S. A. Kabeer, ve K. Bisht, “Exploring the potential of waste marble powder as a sustainable substitute to cement in cement-based composites: A review”, *Constr Build Mater*, c. 401, s. 132887, Eki. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132887.
- [55] D. Zhang, B. Jaworska, H. Zhu, K. Dahlquist, ve V. C. Li, “Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3)”, *Cem Concr Compos*, c. 114, s. 103766, Kas. 2020, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103766.
- [56] N. Bheel vd., “Effect of calcined clay and marble dust powder as cementitious material on the mechanical properties and embodied carbon of high strength concrete by using RSM-based modelling”, *Heliyon*, c. 9, sy 4, s. e15029, Nis. 2023, doi: 10.1016/J.HELİYON.2023.E15029/ASSET/81C8A489-3DA8-412C-993F-BCC287FE0DBF/MAIN.ASSETS/GR8_LRG.JPG.

Özgeçmiş



Fatih YILDIZHAN

Lisans eğitimini 2017 yılında Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde, yüksek lisans eğitimini 2020 yılında 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, raylı sistem ve kompozit malzemelerdir.

E-Posta: fyildizhan@gantep.edu.tr



Hasan Erhan YÜCEL

Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. Aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı'nda 2007 yılında yüksek lisans, 2013 yılında doktora eğitimini tamamladı. Bu süreçte Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2013-2020 yıllarında Yardımcı Doçent, 2020-2024 yıllarında Doçent olarak görev yaptı. 2024 yılından beri Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nde Doçent olarak çalışmaktadır.

E-Posta: hasanerhan.yucel@mku.edu.tr



Mustafa GÜNAL

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1989 yılında mezun oldu. Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini UMIST and The Victoria University of Manchester'da tamamladı. 2012 yılından beri Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak çalışmaktadır.

E-Posta: gunal@gantep.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Fatih YILDIZHAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Görselleştirme, Kaynaklar. Hasan Erhan YÜCEL: Kontrol, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme. Mustafa GÜNAL: Kontrol, Doğrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme.

**Mini Drone ile Demiryollarında Engel ve Kurp Algılaması için Görüntü İşlemede Doğrusal Hough Dönüşümü Yaklaşımı**

Seçkin ULUSKAN

*Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Raylı Sistemler Elektrik Elektronik Programı, Eskişehir, Türkiye***seckinuluskan@eskisehir.edu.tr**(Alınış/Received: 01.07.2025, Kabul/Accepted: 17.07.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)*

Öz: Bu çalışma, demiryolları üzerinde uçarak görüntü alan mini drone'lar için Hough dönüşümüne dayalı bir engel ve kurp algılama sistemi tanıtmaktadır. Drone'lar daha önce, demiryolu altyapısını izlemek ve ray boyunca olası bir arızayı tespit etmek için kullanılmıştır. Diğer taraftan, yapay zeka raylı sistemlerde hem engel hem de ray kusurlarını tespit amacıyla kullanılmıştır. Bu teknolojiler henüz geliştirmeye açıktır. Bu sebeple, güvenilirlik açısından, ve destek veya yedek sistem olarak insanlarca geliştirilmiş, görüntü işlemeye dayalı engel tanıma algoritmalarının geliştirilmesi önemini korumaktadır. Çalışma, rayların ufuk noktası sinüzoidi boyunca Hough dönüşümünün kesitinin izlenerek ray üzerindeki engellerin tespit edilmesini önermektedir. Bu sayede, iki boyutlu Hough dönüşüm bilgisi, Hough tepelerinin tamamının aynı anda gözlemlenebileceği tek boyutlu bir bilgiye indirgenmiş olur. Bu yaklaşım, mini drone'lar için daha az karmaşık bir algoritma ortaya koyacaktır. Yine, kurp algılaması için görüntü daha küçük yatay parçalara ayrılarak yine Hough tepelerinin hareketleri incelenmektedir. Önerilen çözümün performansını test etmek amacıyla, drone'ların demiryolu üzerinde uçarken video kaydı yaptığı gerçek senaryoların simüle edildiği demiryolu animasyon videoları oluşturulmuştur. Yapılan testlerde, önerilen çözümün raylar üzerindeki engellerin tespitinde başarılı olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, Görüntü işleme, Sinyal işleme, Demiryolu engel algılama, Kurp algılama

Railway Obstacle and Curve Detection via Straight Line Hough Transform for Image Processing by Mini Drones

Abstract: This study introduces an obstacle and curve detection system based on the Hough Transform, specifically designed for small drones that capture imagery while flying over railway tracks. Drones have previously been utilized for monitoring railway infrastructure and detecting potential faults along the track. On the other hand, artificial intelligence has been applied in railway systems for detecting both obstacles and rail defects. However, these technologies are still open to development. Therefore, to enhance reliability and provide a supportive or redundant mechanism, it remains important to develop obstacle detection algorithms based on image processing, independently of AI-based systems. The proposed approach suggests monitoring the section of the Hough transform along the sinusoid of the track's vanishing point to detect of obstacles located on the rails. By this way, the two-dimensional Hough transform information is reduced to a one-dimensional representation, in which all Hough peaks can be observed simultaneously. This reduction leads to a less complex algorithm suitable for implementation on small drones. For curve detection, the image is divided into smaller horizontal segments, and the movement of Hough peaks is analyzed accordingly. To evaluate the performance of the proposed solution, railway animation videos simulating real scenarios where drones record video while flying over tracks have been generated. Test results demonstrate that the proposed method effectively detects obstacles on the railway tracks.

Keywords: Rail systems, Image processing, Signal processing, Railway obstacle detection, Rail curve detection

Atıf için/Cite as: S. Uluskan, "Mini drone ile demiryollarında engel ve kurp algılaması için görüntü işlemede doğrusal hough dönüşümü yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 147-158, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1731563

1. Giriş

Demiryolları, insanlara güvenli ve konforlu bir ulaşım yolu sunduğundan, demiryolu taşımacılığının önemi ve popülerliği dünya genelinde artmaktadır. Bu durum, ileri düzey demiryolu teknolojileri geliştirmeyi amaçlayan demiryolu araştırmalarını da hızlandırmaktadır. Demiryolu güvenliği, bu araştırmaların başlıca konularından biridir. Demiryolu güvenliği alanında önemli bir konu olan hemzemin geçit kazaları, trenin diğer araçlara, yayalara ya da rayların üzerinde veya yakınında geçici olarak bulunan diğer nesnelere çarpmasıyla meydana gelen kazalar olarak tanımlanır [1]. Hemzemin geçit kazaları, tüm demiryolu kazalarının büyük bir bölümünü (%26) oluşturmaktadır [1].

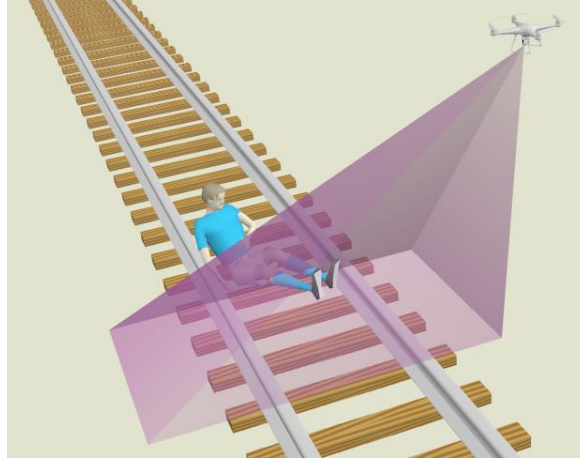
Hemzemin geçit kazalarının önüne geçmek ya da trenlerin seyirleri sırasında ray üzerindeki nesnelere çarpmasını önlemek için daha önce bazı otomatik engel algılama sistemleri önerilmiştir. Raylardaki engelleri tespit etmek için iki farklı strateji uygulanabilir. Birinci strateji; endüktif döngüler, magnetometreler, pnömatik tüpler, piezoelektrik kablolar gibi sabit sensörlerin ray boyunca yerleştirilmesini içerir. Bu çözümde kullanılan malzemeler ucuz olsa da, kurulum ve bakım maliyetleri oldukça yüksek olmaktadır [2]. İkinci strateji ise, engelleri tespit edebilmek için sensörlerin doğrudan tren üzerine monte edilmesini içerir. Bu sensörler; termal kameralar, lazerler, radarlar, ultrasonik sensörler ve video kameralar olabilir [2]. Bu sensörler genellikle edinme açısından daha pahalıdır, fakat sadece tren üzerine yerleştirildiklerinden çok az sayıda sensöre ihtiyaç duyulur. Bu noktada, pahalı sensörlerin ray boyunca taşınmasını sağlayabilecek insansız hava araçları (drone'lar), birleşik bir çözüm sunabilir. Bu sensörleri taşıyan drone'lar, rayları periyodik ve yerel olarak denetleyebilir. Bu çalışma, Şekil 1'de gösterildiği gibi, drone'lar aracılığıyla görüntü tabanlı bir engel algılama sistemi önermektedir.

Geçmişte, özellikle demiryolları için bazı görüntü tabanlı engel algılama sistemleri önerilmiştir. Bu konuda yapılan önceki çalışmalarda, otomatik trenler için ray üzerindeki engelleri algılamak amacıyla çeşitli görüntü işleme yöntemleri tanıtılmıştır [3]. Bu yöntemler arasında ray boşlukları, kenar öğeleri, gri seviye varyansı ve ray boyunca korelasyon gibi teknikler yer almaktadır. Başka bir çalışmada [4], trenin önüne yerleştirilen görüntü sensörleri ile gerçek zamanlı bir engel algılama sistemi elde edilmiştir. Bahsedilen çalışmada ray sürekliliği ve ray yüzeyi parlaklığı gibi yöntemler önerilmiştir. Stereo kamera sistemleri, otomatik trenler için 3 boyutlu görüşe dayalı engel algılaması sağlamak amacıyla da kullanılmıştır [5]. Son olarak, Hough dönüşümü, demiryollarında engel algılama için temel araçlardan biri olarak kullanılmıştır [6].

Drone'lar, son dönemde oldukça popüler hale gelmiş ve çok çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sonucunda, demiryolu teknolojileri de birçok farklı ihtiyacı karşılamak amacıyla drone'ları kullanmaya başlamıştır. Drone'lar çoğunlukla, demiryolu altyapısını izlemek ve ray boyunca olası bir arızayı tespit etmek ya da erken uyarı vermek için kullanılmaktadır [7]. Diğer taraftan, yapay zeka teknolojisinin gelişmesi sonucu, yapay zeka raylı sistemlerde hem engel [8, 9] hem de ray kusurlarını [10] tespit amacıyla kullanılmaktadır. Yapay zeka teknolojileri henüz geliştirmeye açıktır. Bu sebeple, güvenilirlik açısından ve destek veya yedek sistem olarak insanlarca geliştirilmiş, görüntü işlemeye dayalı engel tanıma algoritmalarının geliştirilmesi önemini korumaktadır.

Bu çalışma, demiryolları için Hough dönüşümüne dayalı bir engel ve kurp algılama sistemi tanıtmaktadır. Çalışma, rayların ufuk noktası sinüzoidi boyunca Hough dönüşümünün kesitinin izlenerek ray üzerindeki engellerin tespit edilmesini önermektedir. Bu sayede, iki boyutlu Hough dönüşüm bilgisi, Hough tepelerinin tamamının aynı anda gözlemlenebileceği tek boyutlu bir bilgiye indirgenmiş olur. Bu yaklaşım, mini drone'lar için daha az karmaşık bir algoritma ortaya koyacaktır. Yine, kurp algılaması için görüntü daha küçük yatay parçalara ayrılarak yine

Hough tepelerinin hareketleri incelenmektedir. Önerilen çözümün performansını test etmek amacıyla, drone'ların demiryolu üzerinde uçarken video kaydı yaptığı gerçek senaryoların simüle edildiği demiryolu animasyon videoları oluşturulmuştur. Yapılan testlerde, önerilen çözümün raylar üzerindeki engellerin tespitinde başarılı olduğu gösterilmiştir.



Şekil 1. Mini drone aracılığıyla elde edilen görüntülerle demiryollarında engel tespiti simülasyonu

2. Metodoloji

Bu kısımda, engel ve kurp algılama sistemine temel oluşturan Hough dönüşümü ve onun demiryolu görüntülerinde kullanımı aktarılacaktır.

2.1. Demiryolları için doğrusal hough dönüşümü

Bu çalışma, drone'lar tarafından kaydedilen görüntüler kullanılarak raylar üzerindeki engellerin tespiti amacıyla Hough dönüşümüne dayalı bir çözüm önermektedir. Hough dönüşümü uygulanmadan önce, görüntülere kenar algılama işlemi uygulanır; bu süreç Şekil 2.a ve 2.b'de gösterilmektedir. Şekil 2.a'da, rayların havadan çekilmiş bir görüntüsü yer alırken; Şekil 2.b, bu görüntünün kenar tespiti sonrası halini göstermektedir. Kenar tespiti uygulanmış görüntüdeki herhangi bir doğru, kutupsal koordinatlar kullanılarak ifade edilebilir [11]:

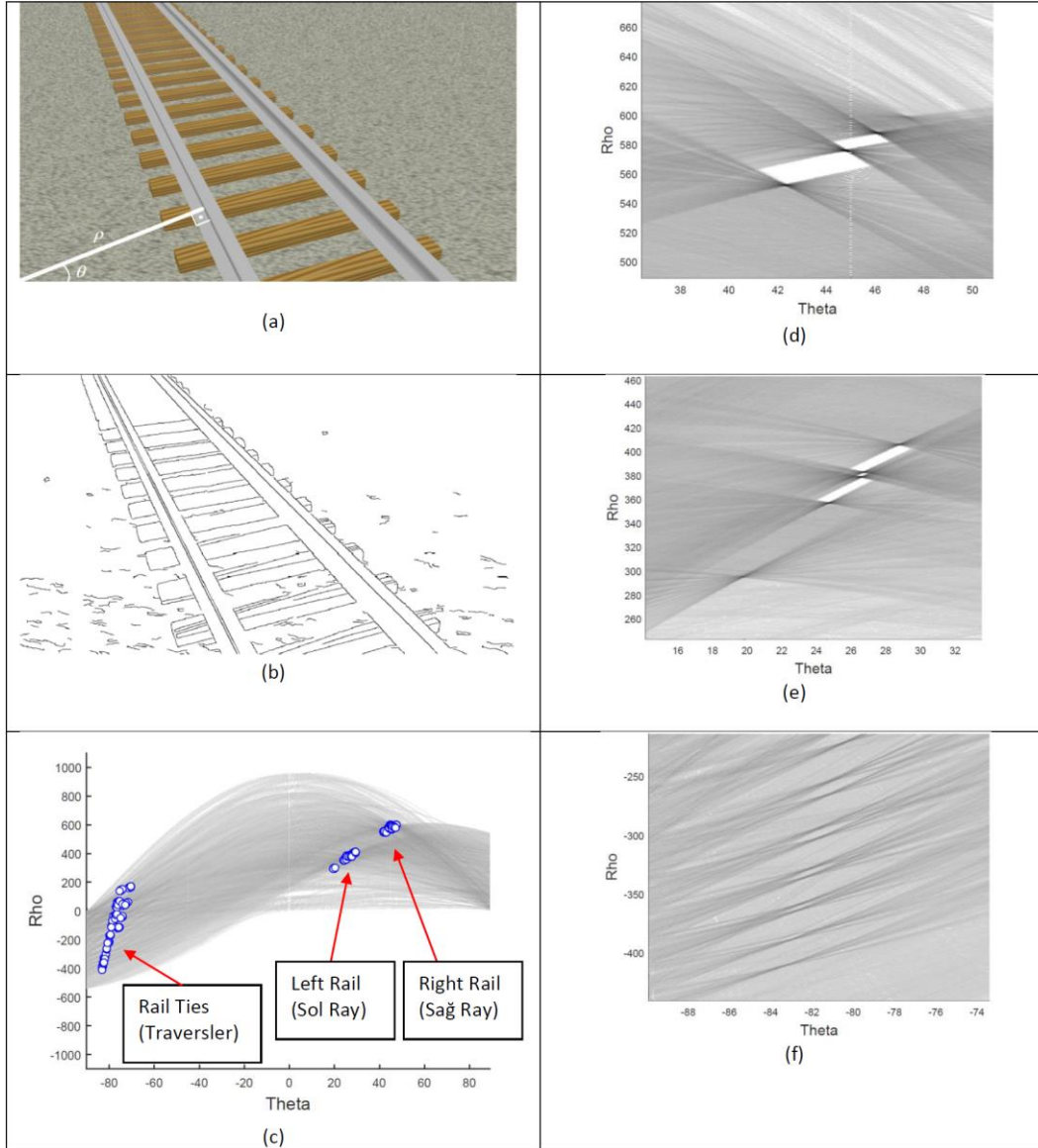
$$\cos(\theta) \cdot x + \sin(\theta) \cdot y = \rho \quad (1)$$

Burada, ρ doğrunun orijine olan uzaklığı, θ ise açısal koordinattır ve Şekil 2.a'da gösterildiği gibidir. Hough dönüşümünün temel fikri, kenar tespiti yapılmış görüntüdeki herhangi bir noktanın, bu noktadan geçen tüm doğrularla temsil edilebileceğidir:

$$\rho(\theta) = \cos(\theta) \cdot x_a + \sin(\theta) \cdot y_a \quad (2)$$

Burada, (x_a, y_a) kenar tespitli görüntüdeki bir noktanın konumudur. $\rho(\theta)$ fonksiyonu, ρ ile θ arasındaki ilişkiyi verir ve aslında bu ifade sinüzoidal bir eğridir [12]. Bu nedenle denklem (2), şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\rho(\theta) = d \cos(\theta - \alpha) \quad (3)$$



Şekil 2. a) Demiryolunun drone ile çekilmiş renkli görüntüsü (simülasyon), (b) Hough Dönüşüm uygulanabilmesi için kenar algılama gerçekleştirilmesi, (c) Kenar algılama sonrası Hough Dönüşüm, (d) Sağ raya, (e) Sol raya ve (f) Traverslere karışıklık gelen Hough tepelerinin yakınlştırılmış görüntüleri

Burada d ve α parametreleri şu şekilde tanımlanır:

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{x_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}}\right) \text{ ve } d = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \quad (4)$$

Sonuç olarak, Hough dönüşümü, kenar tespitli bir görüntüdeki tüm noktaların sinüzoidlerinin bir birleşimidir. Şekil 2.b'nin Hough dönüşümü, Şekil 2.c'de görülebilir. Kenar tespiti yapılmış görüntüde belirli bir doğruya ait noktaların sinüzoidleri, bu doğrunun kutupsal parametreleri etrafında çakışır ve üst üste biner. Bu nedenle, kenar tespiti yapılmış bir görüntüdeki bir doğru, Hough dönüşümünde bir tepe yani Hough tepesi oluşturur.

Raylara ait Hough tepeleri, Şekil 2.c'de bir mavi noktacıklar ile gösterilmiştir. Bu Hough tepelerini daha iyi gözlemlemek için yakınlştırma yapılabilir. Şekil 2.d, 2.e ve 2.fde sırasıyla sağ raya, sol raya ve traverslere karışıklık gelen Hough tepelerinin yakınlştırılmış görüntüleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, her bir bölgede birden fazla Hough tepesi bulunabilmektedir.

Raylara ait Hough tepeleri sonraki bölümlerde k-ortalamalar yöntemi ile iki ayrı gruba ayrılacaktır. $25 < \theta < 35$ aralığında oluşan Hough tepeleri rayın sol kısmına, $42 < \theta < 47$ aralığında oluşanlar ise rayın sağ kısmına karşılık gelmektedir.

Bu çalışmanın temel fikri, raylar üzerindeki herhangi bir engelin bu Hough tepelerinin gücünü azaltacağı yönündedir. Raylar üzerindeki bir engel, hava görüntüsünde bir bozulma yaratır ve bu sayede rayın sol ya da sağ kısmını örtebilir. Sonuç olarak, Hough tepeleri zayıflayabilir hatta tamamen kaybolabilir. Bu nedenle, raylardaki engelleri tespit edebilmek için bu Hough tepelerinin izlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma, tüm Hough tepelerini aynı anda gözlemlemenin pratik bir yolunu, ufuk noktası üzerinden sunmaktadır. Hough dönüşümüne ait iki boyutlu bilgi, tüm Hough tepelerinin aynı anda izlenebileceği tek boyutlu bir bilgiye indirgenmektedir.

2.2. Ufuk noktasının sinüzoidi boyunca hough kesiti

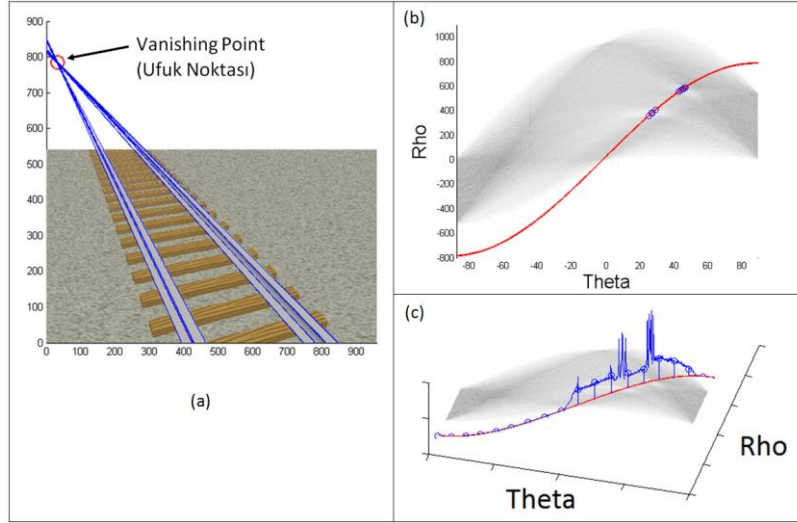
İçinde bulunduğumuz üç boyutlu bir uzayın iki boyutlu bir görüntüsünde, bu üç boyutlu uzaydaki paralel çizgiler belirli bir noktada kesişiyormuş gibi görünür. Bu belirli noktaya, bu çizgilerin ufuk noktası adı verilir [13]. Bu nedenle, demiryolunun sol ve sağ bölümleriyle ilişkili olan tüm çizgiler tek bir ufuk noktasından geçmelidir, çünkü bu çizgilerin hepsi birbirine paraleldir. Şekil 3.a, Şekil 2.a'da gösterilen demiryolu görüntüsü için rayların ufuk noktasını göstermektedir. Ufuk noktası, Şekil 3.a'da da görüldüğü üzere, görüntünün sınırları içinde veya dışında yer alabilir. Bu çalışma, demiryoluna ait tüm Hough tepelerini aynı anda izleyebilmek için, rayların ufuk noktasına ait sinüzoid yapıdan faydalanacaktır.

Ufuk noktaları, Hough dönüşümü kullanılarak hesaplanabilir. İlk olarak, Hough tepelerinden geçen en iyi sinüzoid eğri (Şekil 3.b) tahmin edilmelidir [14]. Bu çalışmada, ufuk noktasının sinüzoidinin parametrelerini doğru şekilde bulmak için doğrusal olmayan en küçük kareler tahmini kullanılmaktadır:

$$(\hat{d}, \hat{\alpha}) = \underset{(d, \alpha)}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N (\rho_i - d \cdot \cos(\theta_i - \alpha))^2 \quad (5)$$

Burada (ρ_i, θ_i) , i 'inci Hough tepesinin konumunu; N ise tüm Hough tepelerinin toplam sayısını ifade etmektedir. Bu en uygun sinüzoid, orijinal görüntüde karşılık gelen noktaya dönüştürüldüğünde, ufuk noktası elde edilir:

$$x_{ufuk} = \hat{d} \cdot \cos(\hat{\alpha}) \text{ ve } y_{ufuk} = \hat{d} \cdot \sin(\hat{\alpha}) \quad (6)$$



Şekil 3. (a) Demiryolu hattı için ufuk noktası, (b) Ufuk noktasının Hough Dönüşüm üzerinde sinüzoidde karşılık gelmesi ve doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi ile tespiti, (c) Ufuk çizgisinin sinüzoidi boyunca elde edilen Hough kesitinin 3 boyutlu grafikte gösterimi

Bu çalışmadaki simülasyonlarda, demiryolu üzerinde uçan drone, demiryoluna ait Hough tepe seviyelerinde herhangi bir değişiklik olup olmadığını inceleyecektir. Her görüntü için iki boyutlu Hough dönüşümünün tamamını incelemek verimsiz bir algoritma olur; çünkü Hough dönüşümünün büyük bir kısmı bu görevle ilgisizdir. Bu çalışma, Hough dönüşümüne ait iki boyutlu bilgiyi tek boyutlu bilgiye indirgemektedir. Hough tepelerinin tamamının, ufuk noktasına ait sinüzoid boyunca konumlandığı bilinmektedir. Hough dönüşümü üç boyutlu grafikte bir yüzey olarak düşünülürse, bu yüzeyin sinüzoid boyunca bir kesiti (kesit düzlemi) alınabilir (bkz. Şekil 3.c). Şekil 3.c’de de görüldüğü gibi, bu kesit, Hough tepelerine ilişkin tüm bilgiyi içermektedir. Sonuç olarak, bu kesiti izlemek, demiryolu üzerindeki engelleri tespit etmek için etkili ve pratik bir yöntem olacaktır.

3. Düz Demiryolu Hatlarında Hough Dönüşüm ile Engel Tespiti

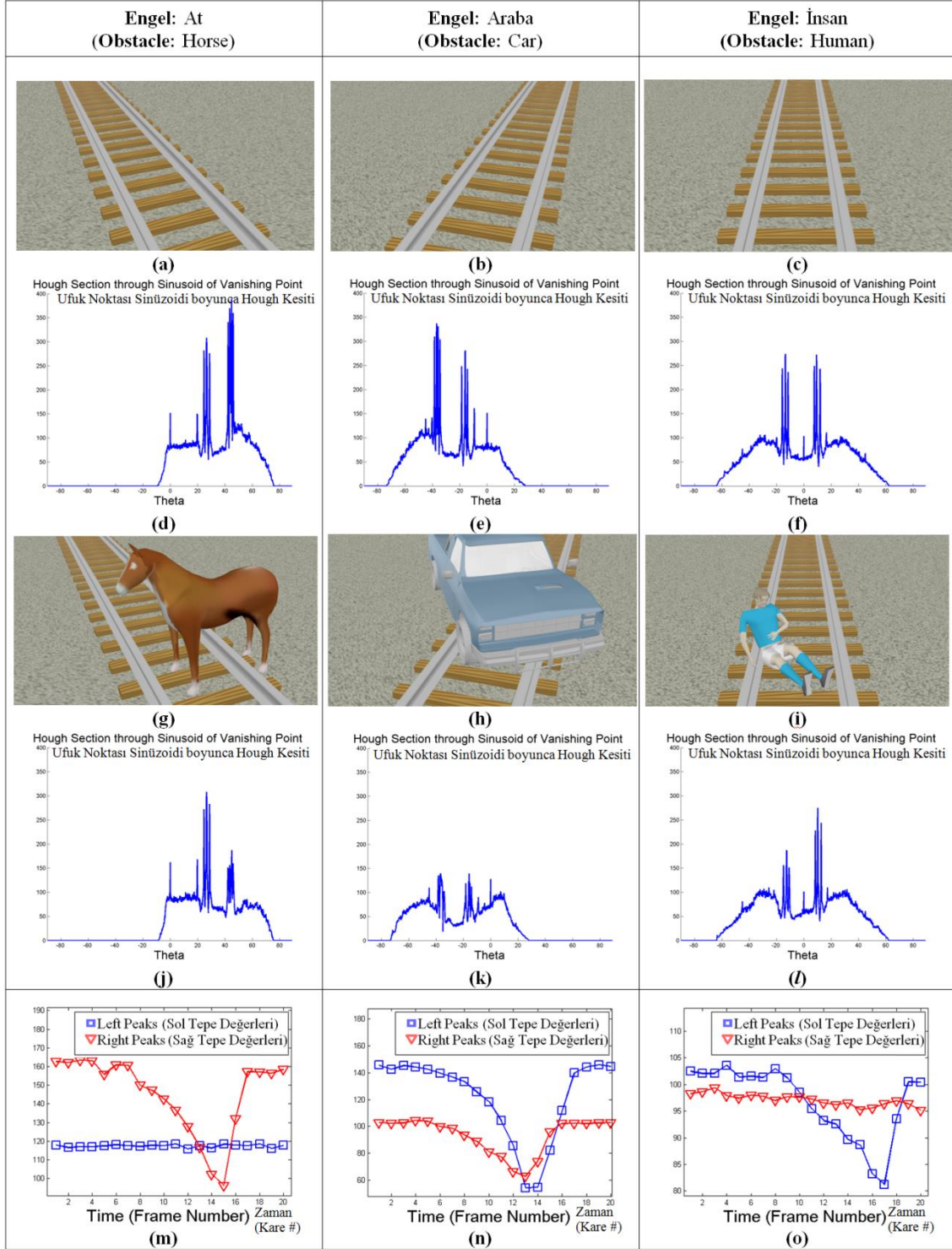
Bu bölümde, yalnızca çizgisel (doğrusal) demiryolu içeren demiryolu animasyon videoları aracılığıyla engel tespit sistemi test edilecektir. Hough dönüşümüne dayalı engel tespit sistemi test edilmeden önce, demiryolu üzerinde hareket eden drone’lar tarafından kaydedilen gerçek videoların simülasyonunu yapmak üzere birkaç animasyon videosu oluşturulmuştur. Drone’un demiryolu boyunca uçtuğu ve videolar kaydettiği varsayılmaktadır (Bkz. Şekil 1).

Drone, demiryolu üzerinde herhangi bir engelin olup olmadığını tespit etmek amacıyla, kaydettiği ilk görüntü karesine Hough dönüşümü uygular. Bu ilk kare için, Hough tepelerinin konumlarını belirler ve ufuk noktasına ait sinüzoidin parametrelerini (Denklemler 5’te gösterildiği gibi) tahmin eder. Ardından, ufuk noktası sinüzoidi boyunca Hough kesitini elde eder (Bkz. Şekil 3.c). Drone, demiryolu boyunca uçarken sabit bir bakış açısını korur; bu da demiryoluna göre sabit bir perspektife sahip olması anlamına gelir.

Sabit görüş açısı, sonraki karelerde her seferinde ufuk noktası sinüzoidinin parametrelerini tekrar hesaplamaya gerek kalmadan, görüntüye Hough dönüşümü uygulandıktan sonra doğrudan sinüzoid boyunca Hough kesitinin çıkarılmasına olanak tanır. Ancak drone, görüş açısını değiştirdiğinde, sinüzoid parametrelerini yeniden hesaplaması gerekir.

Bir görüntü karesine ait Hough kesiti, yerel maksimumlardan oluşur ve demiryolunun sağ ve sol kısmına karşılık gelen iki gruba ayrılabilen birkaç tepe içerir. Şekil 4.a’da, demiryolunun sağ

kısmı görüntü içinde sol kısmına göre daha uzun görünmektedir; bu da Şekil 4.d’de görüldüğü gibi sağ gruptaki Hough tepelerinin daha yüksek olmasına neden olur. Şekil 4.g’de görüldüğü gibi kareye bir engel girdiğinde, Şekil 4.j’de görüldüğü üzere sağ taraftaki Hough tepeleri azalırken, sol taraftaki tepelerde bir değişiklik olmaz. Bunun nedeni, engelin yalnızca demiryolunun sağ kısmını maskeleyesidir.



Şekil 4. Üç farklı engel (at, araba ve insan) ve farklı drone görüntü açıları için üç farklı simülasyon ve sonuçları

Şekil 4.b'de farklı bir bakış açısından dolayı, bu kez demiryolunun sol kısmı daha uzun görünmektedir; bu da Şekil 4.e'de görüldüğü gibi sol gruptaki Hough tepelerinin daha yüksek olmasına neden olur. Şekil 4.h'de sahneye büyük bir engel (örneğin bir araba) girdiğinde, hem sağ hem de sol taraftaki Hough tepelerinde düşüş görülür (Şekil 4.k). Çünkü bu büyük engel her iki tarafı da maskelemektedir.

Şekil 4.c'de, drone raylara ortadan baktığında her iki taraf da görüntüde eşit uzunlukta görünür ve bu da Şekil 4.f'de görüldüğü üzere sol ve sağ gruplardaki Hough tepelerinin eşit seviyelerde olmasına neden olur. Şekil 4.i'de sahneye giren engel, yalnızca sol tarafı maskelediği için, Şekil 4.l'de sol taraftaki Hough tepeleri azalırken sağ taraftakiler sabit kalır.

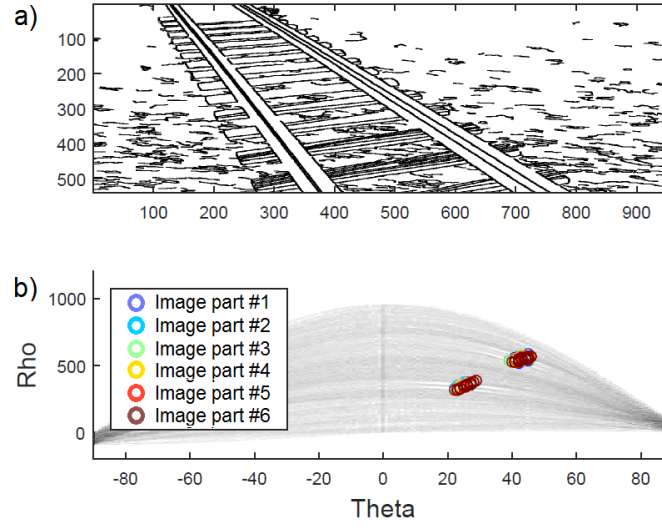
Eğer her bir görüntü karesi için sağ ve sol Hough tepe gruplarının ortalamaları ayrı ayrı alınırsa, bir video için iki ayrı grafik elde edilebilir. Şekil 4.m'de görüldüğü üzere, sağ ray grafiği önce bir düşüş sonra önceki seviyeye geri dönüş gösterirken; sol taraf sabit kalmaktadır. Bu durum, demiryolunun sağ kısmında bir engel olduğunu işaret eder. Şekil 4.n'de hem sağ hem de sol taraf grafiklerinin aynı anda düşüp yükselmesi, her iki tarafta da engel bulunduğunu gösterir. Son olarak, Şekil 4.o'da sol ray grafiği düşüş gösterir; çünkü demiryolunun sol tarafında bir insan bulunmaktadır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, yüksek kare/saniye oranı nedeniyle engel sahneye kademeli olarak girmektedir. Yani başlangıçta atın bacakları sahneye girer, ardından sırasıyla gövdesi ve kafası görüntünün üst kısmında görünür. Bu durum, grafikte yavaş bir düşüş eğilimi oluşturur. Ancak minimum seviyeye ulaşıktan sonra grafik keskin bir şekilde yükselir. Bunun nedeni, engel görüntüye üst kısımdan yavaşça girerken, drone engelin üzerinden geçtiği anda görüntünün alt kısmından hızla çıkmasıdır. Grafikler üzerindeki herhangi bir dalgalanma, olası engellerin tespiti açısından rahatlıkla takip edilebilir. Elbette, yalnızca bir düşüşün ardından gelen bir artış, demiryolu üzerinde bir engel olduğunu gösterir. Eğer her iki grafikte de kalıcı bir düşüş meydana gelirse, bu büyük ihtimalle drone'un bakış açısını kaybettiğini ve ufuk noktasını yeniden hesaplaması gerektiğini gösterir.

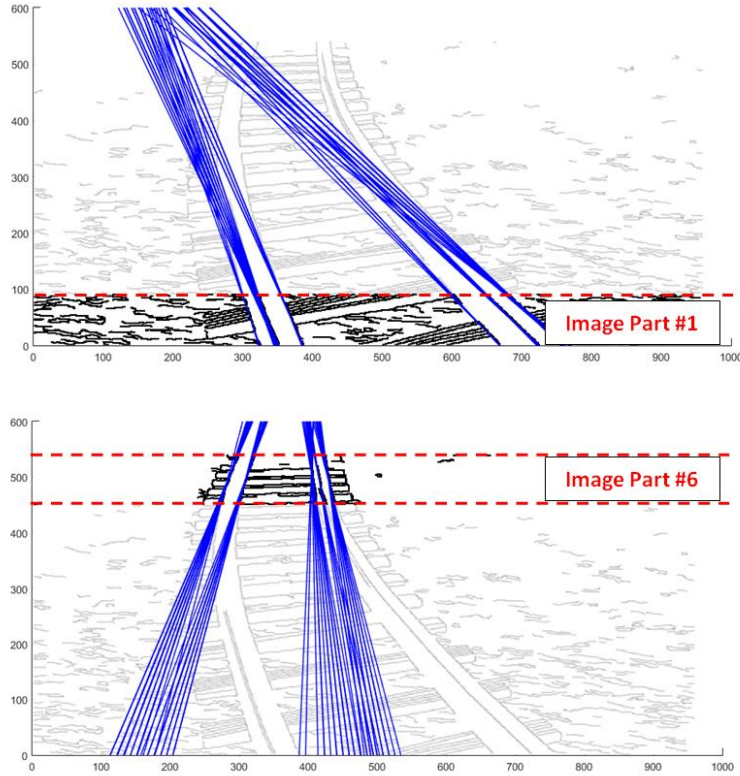
4. Demiryolu Hatlarında Hough Dönüşüm ile Kurp ve Engel Tespiti

Demiryolu üzerinde bir kurp (kavis) olup olmadığını tespit edebilmek için, demiryolunu içeren görüntü düşey eksen boyunca 6 yatay alt görüntüye bölünmektedir. Eğer demiryolunda herhangi bir kurp yoksa, yani görüntüde görülen demiryolu her yerde doğrusal ise, (Şekil 5.a), bu alt görüntülere ait Hough tepeleri büyük ölçüde üst üste çakışır (Şekil 5.b). Bu durum, her bir alt görüntüdeki demiryolu doğrultularının değişmemesinden kaynaklanır. Dolayısıyla, elde edilen Hough tepeleri neredeyse aynı konumda oluşur.

Öte yandan, görüntüde görünen demiryolu bir kurp içeriyorsa, her bir alt görüntüdeki demiryolu doğrultusu farklılık gösterir. Şekil 6, kurp içeren bir demiryolu örneğini göstermektedir. Görüldüğü üzere, görüntü altı yatay parçaya bölündüğünde, Görüntü Parçası #1 ile Görüntü Parçası #6'da demiryolu doğrultusu birbirinden oldukça farklıdır. Ayrıca, doğrusal olmayan yapıdan dolayı, Hough tepeleri yalnızca demiryoluna teğet olan doğrular için oluşabilir. Bu nedenle, bu teğet doğruların yönleri, aynı alt görüntü içinde hafifçe değişmektedir.

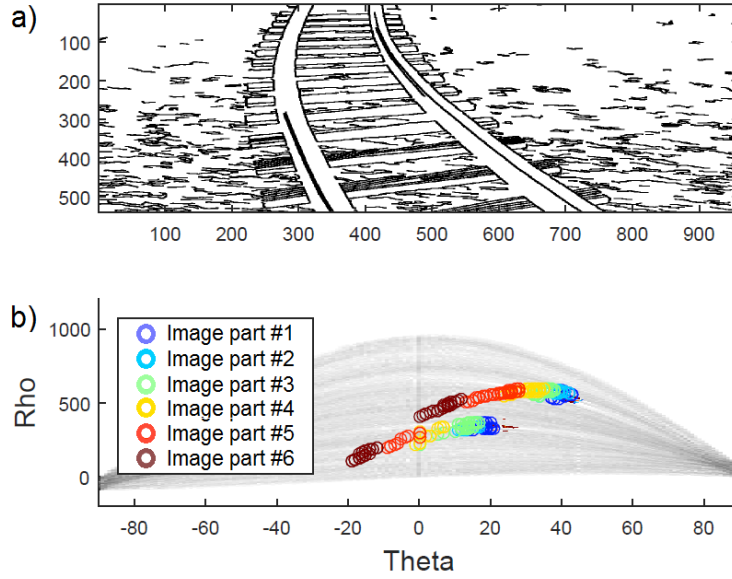


Şekil 5. (a) Görüntü içinde bütün olarak doğrusal görünen demiryolu, (b) doğrusal görünen demiryolu hattının 6 yatay parçası için Hough tepeleri

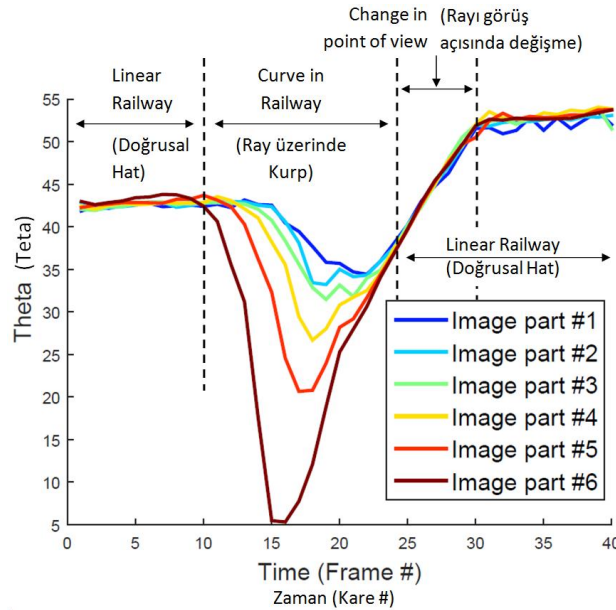


Şekil 6. Karp içeren bir demiryolu için yatay görüntü parçalarında demiryolunun doğrultusu ve demiryoluna teğet doğrular

Karp içeren görüntülerde, teğet doğrulara karşılık gelen Hough tepeleri, tek bir alt görüntü içinde dahi hafif kaymalar göstermektedir. Karp içeren bir görüntüye ait alt görüntülerin Hough tepelerinin konumları Şekil 7.b’de gözlemlenebilir. Görüldüğü gibi, her alt görüntüye ait Hough tepeleri farklı konumlarda yer almakta ve aynı alt görüntü içinde bile Hough tepeleri soldan sağa hafifçe kaymaktadır. Bu çalışmada, Hough tepelerinin böyle dağınık bir desen göstermesinin, demiryolu üzerinde bir karp bulunduğuna işaret ettiği önerilmektedir. Bu özellik, demiryolu üzerindeki kurpların tespitinde kullanılabilir.



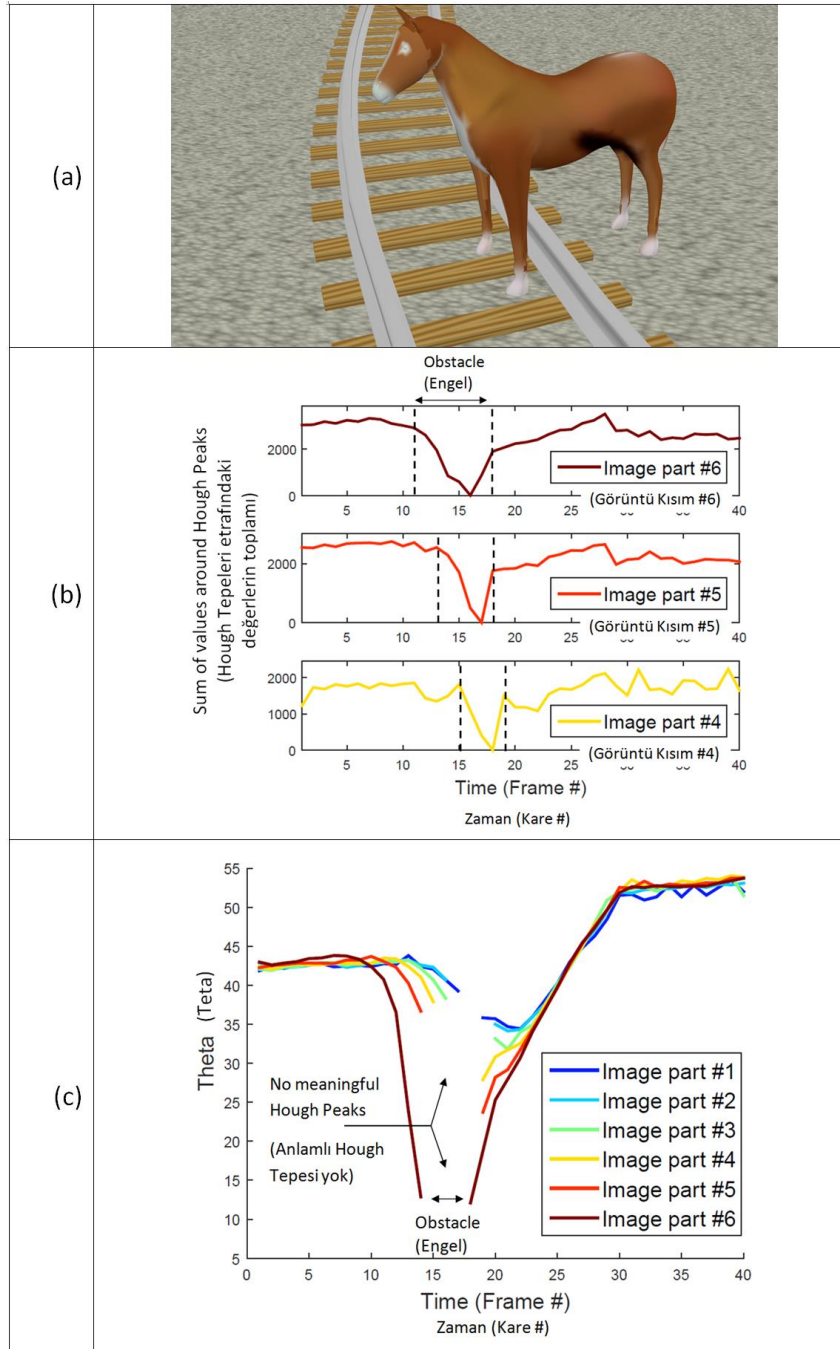
Şekil 7. (a) Kurp içeren demiryolu görüntüsü, (b) Kurp içeren demiryolu görüntüsünün 6 yatay parçası için Hough tepeleri



Şekil 8. Demiryolunun sağ rayı için Hough tepelerinin açı değerlerinin zamana göre değişimi

Demiryolunun sağ kısmına ait Hough tepelerinin zamanla değişimi, Şekil 8’de sunulmuştur. Farklı renklerdeki grafikler, Şekil 6 ve 7’de tanımlanan farklı alt görüntülere aittir. Bu grafikler, Şekil 7.b’de gösterilen sağ ve sol demiryolu kısımlarına ait Hough tepelerinin k-ortalamalar yöntemi (ρ ve θ uzayında iki merkezli) ile merkezlerinin (centroid) bulunması yoluyla elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, doğrusal bir demiryolu durumunda bu grafikler yatay doğrular biçimindedir ve birbirlerine çok yakındır. Ancak demiryolunda bir kurp ortaya çıktığında, bu alt görüntülere ait grafikler dağılma göstermektedir (bkz. Şekil 8). Kurp sona erdiğinde bu çizimler yeniden üst üste binmektedir. Eğer grafik yatay değil de eğimli ise, bu durum drone’un bakış açısını değiştirdiğini (yani ufuk noktasının değiştiğini) gösterir. Drone’un bakış açısı yeniden sabitlendiğinde, grafikler yine yatay ve çakışmış hâle gelir. Son olarak, Şekil 9.a’da gösterildiği gibi, kurp üzerinde engel varsa, alt görüntülerin Hough tepe değerleri azalır ve hatta

sıfırlanabilir (Şekil 9.b). Böylelikle Şekil 9.c'de gösterildiği üzere hem kurp hem de engelin varlığına dair tespit yapılabilir.



Şekil 9. (a) Engel ve kurp içeren bir demiryolu görüntüsü, (b) Sağ ray için yatay görüntü parçalarında hesaplanan Hough tepe değerlerinin zamanla değişimi, (c) Sağ ray için yatay görüntü parçalarında Hough tepelerinin açı değerlerinin zamanla değişimi

4. Sonuç

Drone'lar, demiryollarını periyodik ve yerel olarak denetleyerek engel tespiti konusunda büyük bir potansiyele sahip olabilir. Bu çalışma, drone'lar aracılığıyla gerçekleştirilen görüntü işleme tabanlı bir engel tespit sistemi önermektedir. Mini drone'lar tarafından gerçek zamanlı

uygulamalarda kullanılabilir, Hough dönüşümüne dayalı pratik bir çözüm sunulmuştur. Gerçek senaryoları simüle eden animasyon videolarla yapılan deneyler, önerilen çözümün demiryolu üzerindeki engellerin tespitinde başarılı olduğunu göstermiştir. Gelecek çalışmalar, simülasyonlara ek olarak, gerçek görüntülere dayalı sistem tasarımı gerçekleştirilebilir. Ayrıca, mevcut sistem, traverslere ait Hough tepe noktalarını da içerecek şekilde daha ileriye taşınabilir.

Kaynakça

- [1] European Union Agency for Railways, Railway Safety Performance in the European Union, (2016), Available: <https://era.il.era.europa.eu/documents/SPR.pdf>
- [2] Puneekar, N. S., & Raut, A. A., "Improving Railway Safety with Obstacle Detection and Tracking System using GPS-GSM Model", International Journal of Science & Engineering Research, vol. 4, no.8, pp. 288-292, 2013.
- [3] Ruder, M., Mohler, N., & Ahmed, F. (2003). "An obstacle detection system for automated trains", In IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 180-185, 2003
- [4] Ukai, M., Nassu, B., T., Nagamine, N., Watanabe, M., Inaba, T., "Obstacle Detection on Railway Track by Fusing Radar and Image Sensor", in World congress on railway research. 2008.
- [5] Weichselbaum, J., Zinner, C., Gebauer, O., & Pree, W., "Accurate 3D-vision-based obstacle detection for an autonomous train", Computers in Industry, vol. 64, no. 9, pp. 1209-1220, 2013.
- [6] Rodriguez, L. F., Uribe, J. A., Bonilla, J. V., "Obstacle detection over rails using hough transform". Image, Signal Processing, Artificial Vision Sympos., pp. 317-322, 2012.
- [7] Flammini, F., Pragliola, C., & Smarra, G. "Railway infrastructure monitoring by drones". in International Conference on ESARS-ITEC , November, 2016.
- [8] Yan, F., Gu, Y., & Sun, Y. (2025). "Deep Learning-Based Train Obstacle Detection Technology: Application and Testing in Metros", Electronics, 2079-9292, vol. 14 no. 7.
- [9] Chen, C., et al. (2025). "Real-Time Railway Obstacle Detection Based on Multitask Perception Learning", IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol. 25, no. 5, pp. 7142 - 7155.
- [10] Kırat, S. S., & Aydın, İ. (2023). "Açıklanabilir yapay zekâ tabanlı denetimsiz öğrenme ile ray kusur tespiti". Demiryolu Mühendisliği, vol. 18, pp. 1-13.
- [11] Illingworth, J., & Kittler, J., "A survey of the Hough transform", Computer vision, graphics, and image processing, vol. 44, no.1, pp. 87-116, 1988
- [12] Saleh, B. "Introduction to subsurface imaging". Cambridge University Press. New York, 2011.
- [13] Chen, X., Jia, R., Ren, H., & Zhang, Y., "A new vanishing point detection algorithm based on Hough transform", Conference on Computational Science and Optimization (CSO), 2010, pp. 440-443.
- [14] Papusha, I., & Ho, M. (2010), Hough Transform for Directional Orientation, Online resource, Available: http://www.ivanpapusha.com/pdf/hough_directional.pdf

Özgeçmiş



Seçkin ULUSKAN

Lisans eğitimini Boğaziçi Üniversitesi, yüksek lisans eğitimini The University of Texas at Dallas, doktora eğitimini Anadolu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Raylı Sistemler Elektrik Elektronik programında çalışmaktadır.
E-Posta: seckinuluskan@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.