

Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi

Halil İbrahim FEDAKAR*¹ ORCID 0000-0002-7561-5363

¹Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Kayseri

Geliş tarihi: 23.01.2022

Kabul tarihi: 21.03.2022

Atf şekli/ How to cite: FEDAKAR, H.İ., (2022). Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1), 79-91.

Öz

Hareket eden tekerlek yükünden dolayı balastlı demiryolu hatlarında meydana gelen düşey deformasyonlar özellikle yüksek tren hızlarında ve zayıf taban zemini koşullarında hat düzensizliklerine sebep olmaktadır. Bu durum ise hat güvenliğini ve inşaat sonrası maliyeti olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada farklı miktarlarda poliüretan ile güçlendirilmiş balast tabakasının (70 kg/m³, 140 kg/m³ ve 210 kg/m³), zayıf taban zemini koşulunda ve farklı tren hızlarındaki (100 km/h, 200 km/h ve 300 km/h) düşey deformasyon davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda geliştirilen iki boyutlu nümerik modellerde statik ve hareket eden tekerlek yükleri uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre poliüretan kullanımı, zayıf zemine oturan balastlı demiryolu hattında meydana gelen düşey deformasyonu önemli oranda iyileştirmektedir (>%87). Öte yandan düşük hızlarda düşük poliüretan miktarları kullanılabilirken, balast agregaları arasında oluşan daha güçlü poliüretan yapıdan dolayı artan tren hızlarında yüksek poliüretan miktarları tercih edilmelidir. Ayrıca poliüretan ile güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş bir demiryolu hattının analizinde statik tekerlek yükünün yerine hareket eden tekerlek yükü kullanılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Poliüretan, Balast, Hareket eden tekerlek yükü, PLAXIS, Balastlı demiryolu hattı

Numerical Investigation of Deformation Behavior of Ballast Reinforced with Polyurethane Under a Moving Wheel Load

Abstract

The vertical deformation in ballasted railway tracks due to moving wheel loads causes track irregularities, particularly at high train speeds and under poor subgrade conditions. This adversely affects track safety and post-construction cost. In this study, the vertical deformation behavior of ballast reinforced with polyurethane in different amounts (70 kg/m³, 140 kg/m³ ve 210 kg/m³) under poor subgrade condition and at different train speeds (100 km/h, 200 km/h, and 300 km/h) was numerically investigated. In this context, static and moving wheel loads were applied in the developed two-

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Halil İbrahim FEDAKAR, halilibrahim.fedakar@agu.edu.tr

dimensional numerical models. According to the results, the use of polyurethane significantly improves the vertical deformation in the ballasted railway track resting on poor subgrade soil (>87%). On the other hand, while low amounts of polyurethane can be used in tracks with low train speeds, high amounts of polyurethane should be preferred in tracks with high train speeds due to stronger polyurethane bonding between ballast particles. Moreover, instead of static wheel load, a moving wheel load should be taken into consideration in the analysis of a railway track with and without polyurethane.

Keywords: Polyurethane, Ballast, Moving wheel load, PLAXIS, Ballasted railway track

1. GİRİŞ

Demiryolu hatları balastlı ve balastsız üstyapı olarak inşa edilmektedir. Hareket eden teker yükünden dolayı demiryolu hattında meydana gelecek kalıcı düşey deformasyonları ve hattın inşaat sonrası bakım maliyetini azaltmak için balastsız üstyapı sistemi kullanılsa da dünyadaki demiryolu hatlarının büyük bir kısmı düşük inşaat maliyeti ve bakım kolaylığı gibi nedenlerden dolayı balastlı üstyapı olarak inşa edilmiştir. Özellikle şehirlerarası yüksek hızlı tren ve konvansiyonel hatların büyük bir bölümü balastlı üstyapı olarak inşa edilmektedir. Ayrıca balastsız üstyapı ile kıyaslandığında, balastlı üstyapı daha elastik bir davranış sergilemektedir. Ancak bu elastik yapısından dolayı balastlı üstyapı sistemini kullanan demiryolu hatlarında taban zeminleri hareket eden teker yükünden dolayı daha fazla basınca (gerilmeye) maruz kalmaktadır. Bu durum ise artan tren hızlarında ve zayıf taban zemin koşullarında demiryolu hattında daha fazla düşey kalıcı deformasyonlara ve hatta düzensizliklerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle hattın güvenliğini sağlamak ve inşaat sonrası bakım maliyetlerini azaltmak için balastlı üstyapının ve taban zeminin güçlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Hareket eden teker yükünden dolayı balast malzemesinde meydana gelen kırılma ve aşınma olayları balast tabakasında meydana gelen kalıcı düşey deformasyonların en önemli nedenlerindedir. Ayrıca balast malzemesinde meydana gelen aşınmadan dolayı balast tabakasının dayanımı azalmakta ve balast tabakasının elastik davranışı da olumsuz etkilenmektedir. Bu durum ise hatta meydana gelen düşey kalıcı deformasyonları artırmaktadır. Balast malzemesinde meydana gelen aşınmayı

azaltmak ve balast tabakasının taşıma gücünü artırmak için farklı güçlendirme malzemeleri kullanılmaktadır (geogrid, kauçuk yastık ve poliüretan) [1-23]. Balastın geogrid ile güçlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda, geogrid kullanımının balastın degradasyonunu (aşınma ve kırılma) ve hattın oturma davranışını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca zayıf taban zemini durumlarında balastın geogrid ile güçlendirilmesi tren hattında daha üniform bir gerilme dağılımının elde edilmesini de sağlamaktadır [24]. Geogrid malzemesinin yanı sıra kauçuk yastıklar da demiryolu hatlarında meydana gelecek düşey deformasyonları azaltmak ve tren geçişinden kaynaklanan titreşimleri sönmölemek için travers altında ve balast tabakasının altında kullanılmaktadır [18,25-26]. Geogrid ve kauçuk yastıklar demiryolu hattında ayrı ayrı kullanılacağı gibi balastın darbe yükü altındaki degradasyon davranışını iyileştirmek için birlikte de kullanılabilir [17]. Ancak kauçuk yastık/balast ve geogrid/balast noktalarından uzaklaştıkça bu malzemelerin balastın güçlenmesine (degradasyon) etkisi de azalmaktadır. Bu malzemelerin yerine balast tabakasını bir bütün halinde tutmak ve stabiliteyi artırmak için poliüretan kullanılmaktadır.

Poliüretan ile güçlendirmenin balastın degradasyon ve deformasyon davranışına etkisi büyük ölçekli laboratuvar deneyleri (üç eksenli, kesme kutusu, kutu model, vb.) ve saha ölçümleri ile araştırılmıştır [1,3-4,6,14,22-23]. Yapılan bu araştırmalarda, poliüretan kullanımının balastın aşınma, kırılma ve deformasyon performanslarını önemli oranda iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca poliüretan ile güçlendirilmiş balast agregasında uygulanan yükten dolayı kırılma meydana gelse bile elde edilen üç boyutlu yapının taşıma kapasitesinde kayda değer bir azalma meydana gelmemektedir.

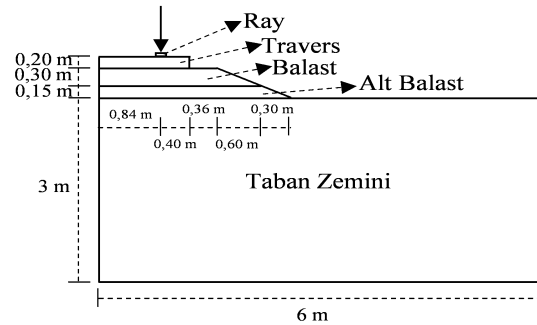
Aksine kırılan balast agregaları üç boyutlu yapının içerisinde birbirlerine poliüretan ile yapışmış olarak yük almaya devam etmektedir. Böylelikle balast tabakasının her bölgesinde balastın degradasyon ve deformasyon davranışı iyileşmektedir. Bu nedenle hattın stabilitesini artırmak, balastın degradasyon davranışını iyileştirmek ve bakım sonrası maliyeti azaltmak için mevcut ve yeni yapılan demiryolu hatlarında poliüretan ile balast iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Poliüretan ile güçlendirilmiş balastın yük altındaki davranışının nümerik olarak incelenmesi, laboratuvar ve saha deneylerine kıyasla daha ekonomik ve uygun bir yöntemdir. Bundan dolayı literatürde poliüretan ile güçlendirilmiş balastın dinamik yük altındaki davranışı nümerik olarak da çalışılmıştır [23,27]. Fakat bu çalışmalarda, farklı miktarlarda poliüretan ile iyileştirilmiş balastlı demiryolu hattının hareket eden tekerlek yükü altındaki deformasyon davranışı araştırılmamıştır. Bu çalışma ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesine katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada zayıf taban zemini üzerine inşa edilmiş bir balastlı tren hattında hareket eden tekerlek yükünden dolayı meydana gelecek oturmanın farklı miktarlarda (70, 140 ve 210 kg/m³) poliüretan kullanılarak iyileştirilmesi iki boyutlu nümerik modeller ile araştırılmıştır. Ayrıca geliştirilen nümerik modellerde uygulanan hareket eden teker yükü ile poliüretan ile güçlendirilmiş balastın farklı tren hızlarındaki (100, 200 ve 300 km/h) oturma performansları da incelenmiştir. Daha sonra hareketli yükün etkisini incelemek için, hareket eden teker yüküne ve statik teker yüküne maruz kalan poliüretan ile güçlendirilmiş balastın oturma davranışları da karşılaştırılmıştır.

2. NÜMERİK ANALİZ

Sonlu elemanlar yönteminin demiryolu hatlarının yük altındaki davranışını analiz etmedeki etkinliği literatürde kanıtlanmıştır [24]. Demiryolu hatlarının davranışı geoteknik mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılan PLAXIS sonlu elemanlar programı ile iki ve üç boyutlu olarak araştırılmıştır [24, 28-31]. İki boyutlu analizler ile kıyaslandığında, üç boyutlu analizler daha fazla hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır. Diğer bir

ifade ile bir geoteknik problemin iki boyutlu olarak modellenmesi ile problem daha basit hale gelmekte ve daha hızlı bir şekilde analiz sonuçları elde edilmektedir [32]. Bundan dolayı bu çalışmada, balastlı üstü yapı olarak inşa edilmiş bir demiryolu hattı iki boyutlu olarak ele alınmış ve bu problemin nümerik modelinin oluşturulmasında ve nümerik analizlerin gerçekleştirilmesinde PLAXIS 2D (Versiyon 21) sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen nümerik modelin geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu nümerik modelin geometrisi oluşturulurken (balast kalınlığı, alt balast kalınlığı, taban zemini (3m x 6m), şev eğimi (1/2), ray açıklığı ve ray (0,16m x 0,05m (Genişlik x Yükseklik))) Jiang ve Nimbalkar [24] tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki ölçüler referans alınmıştır. Ayrıca taban zemininin geometrik ölçülerinin sınır koşullar açısından yeterli olduğu yapılan analizlerde görülmüştür. Öte yandan dikdörtgen rayın ölçüleri Jiang ve Nimbalkar [24] tarafından Avusturya'da kullanılan 60 kg/m rayın eşdeğeri olarak belirlenmiştir. Demiryolu hattının nümerik modeli düzlem birim deformasyon koşullarına göre ve yer altı suyu olmayacak şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca orta sıklıktaki sonlu elemanlar ağı modelde kullanılmıştır.



Şekil 1. Geliştirilen nümerik modelin geometrisi ve boyutları

Önceki çalışmalara uygun olarak, ray ve traversin modellenmesinde lineer elastik (LE) model kullanırken taban zemini ve alt balastın davranışının modellenmesinde Mohr-Coulomb (MC) model kullanılmıştır [24, 28]. Ray, travers, alt balast ve taban zeminin malzeme özellikleri ise Jiang ve Nimbalkar [24] tarafından gerçekleştirilen

Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi

çalışmadan alınmıştır. Öte yandan 0, 70, 140 ve 240 kg/m³ poliüretan içeren balastın (sırasıyla PU0, PU70, PU140 ve PU210) malzeme özellikleri ise Lee ve arkadaşları [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınmıştır. Balast tabakasının deformasyon davranışı açısından en kötü durumu ele almak ve analizlerde güvenli tarafta kalmak için balastın dilatasyon açısı bu çalışmada sıfır olarak alınmıştır ($\psi=0^\circ$) (Çizelge 1). Poliüretan ile güçlendirilmiş balast, balast agregaları arasında oluşan poliüretan bağlarından dolayı yük altında daha çok elastik davranmaktadır. Diğer yandan balastın davranışının modellenmesinde literatürde pekleşen zemin (hardening soil) ve Mohr-Coulomb modelleri kullanılmaktadır. Ancak Lee ve arkadaşları [14] tarafından gerçekleştirilen

çalışmadan balastın (PU0) sadece Mohr-Coulomb model parametreleri elde edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, balastın modellenmesinde Mohr-Coulomb modeli kullanılırken, poliüretan ile güçlendirilmiş balastın (PU70, PU140 ve PU210) yük altındaki davranışının modellenmesinde ise lineer elastik model kullanılmıştır. Bu çalışmada poisson oranı (ν) olarak, PU70, PU140 ve PU210 için 0,15 ve PU0 için ise 0,2 kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen balastlı demiryolu hattının nümerik modelinin analizleri Çizelge 2’de verilen plana göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Malzeme özellikleri

Parametreler	Ray	Travers	PU0	PU70	PU140	PU210	Alt balast	Taban zemini
Model	LE	LE	MC	LE	LE	LE	MC	MC
Tip	NP	NP	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
E (kPa)	21x10 ⁶	10x10 ⁶	12,5x10 ³	42,2x10 ³	72x10 ³	101,8x10 ³	80x10 ³	12,5x10 ³
γ (kN/m ³)	78	24	14,6	15,6	15,6	15,7	16,67	16
ν	0,15	0,15	0,2	0,15	0,15	0,15	0,35	0,4
c (kPa)	-	-	5	-	-	-	0	15
ϕ (°)	-	-	45	-	-	-	35	12
ψ (°)	-	-	0	-	-	-	0	0

Not: LE: Lineer elastik, MC: Mohr-Coulomb, NP: Non-porous, E: Elastisite modülü, γ : Birim hacim ağırlığı, ν : Poisson oranı, c: Kohezyon, ϕ : İçsel sürtünme açısı ve ψ : Dilatasyon açısı

Çizelge 2. Analiz planı

No	PU Miktarı (kg/m ³)	Hız (km/h)	Yükleme
1	0	-	Statik (42,5 kN)
2	0	100	HTY
3	0	200	HTY
4	0	300	HTY
5	70	-	Statik (42,5 kN)
6	70	100	HTY
7	70	200	HTY
8	70	300	HTY
9	140	-	Statik (42,5 kN)
10	140	100	HTY
11	140	200	HTY
12	140	300	HTY
13	210	-	Statik (42,5 kN)
14	210	100	HTY
15	210	200	HTY
16	210	300	HTY

Not: HTY: Hareket eden teker yükü

Çizelge 2'deki her bir analiz üç aşamadan oluşmaktadır: 1) Başlangıç aşaması, 2) inşaat aşaması ve 3) yükleme aşaması. Başlangıç aşamasında sadece taban zemini aktif durumda iken, inşaat aşamasında alt balast, balast, travers ve ray aktif hale getirilmiştir. Yükleme aşamasında ise, nümerik modele statik ve hareket eden tekerlek yükleri uygulanmıştır. Yükleme türünün ve tren hızının etkisini incelemek için başlangıç ve inşaat aşamalarında modelde meydana gelen deplasmanlar yükleme aşamasında hesaba dahil edilmemiştir. Hesaplama türü olarak statik yük için plastik ve hareket eden teker yükü için ise dinamik tercih edilmiştir. Statik ve hareket eden tekerlek yükleri için Avrupa'da kullanılmakta olan Thalys hızlı treninin ölçüleri ve dingil yükleri bu çalışmada kullanılmıştır. Thalys yüksek hızlı treni toplamda 26 dingile sahiptir. Lokomotif kısmında bulunan dingillerin her birinin yükü yaklaşık 170 kN, uç bojilerdeki dingil yükleri yaklaşık 120 kN ve bar vagonlarındaki dingil yükleri de yaklaşık 155 kN'dir. Ayrıca lokomotifteki tekerleklerin çapları 920 mm iken diğer tekerleklerin çapları 910 mm'dir. Thalys yüksek hızlı tren hakkında daha fazla bilgiye Correia ve arkadaşları [30] ve Mezeh ve arkadaşları [33] tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan ulaşılabilir.

Tekerlek yükünün %40 ile %60'ı tekerin altındaki traverse aktarılırken, yükün kalan kısmı diğer yakındaki traverslere aktarılmaktadır [30]. AREMA [34] yük dağılımını belirlerken traverslerin merkezleri arasındaki uzaklığı referans almaktadır. Bu çalışmada travers aralığı (merkezden merkeze) 60 cm olarak ele alınmıştır. AREMA'ya [34] göre 60 cm travers aralığında yük dağılımı yaklaşık olarak %50 olmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada yük dağılımı olarak %50 kabul edilmiştir. Diğer bir ifade ile, teker yükünün yarısı tekerin altındaki traverse ve kalan kısmı da diğer yakındaki traverslere aktarılmaktadır. Çizelge 2'de de görüldüğü üzere, nümerik modellerin analizinde statik ve hareket eden tekerlek yükleri uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan statik tekerlek yükü, Thalys yüksek hızlı trenin sahip olduğu maksimum tekerlek yükü

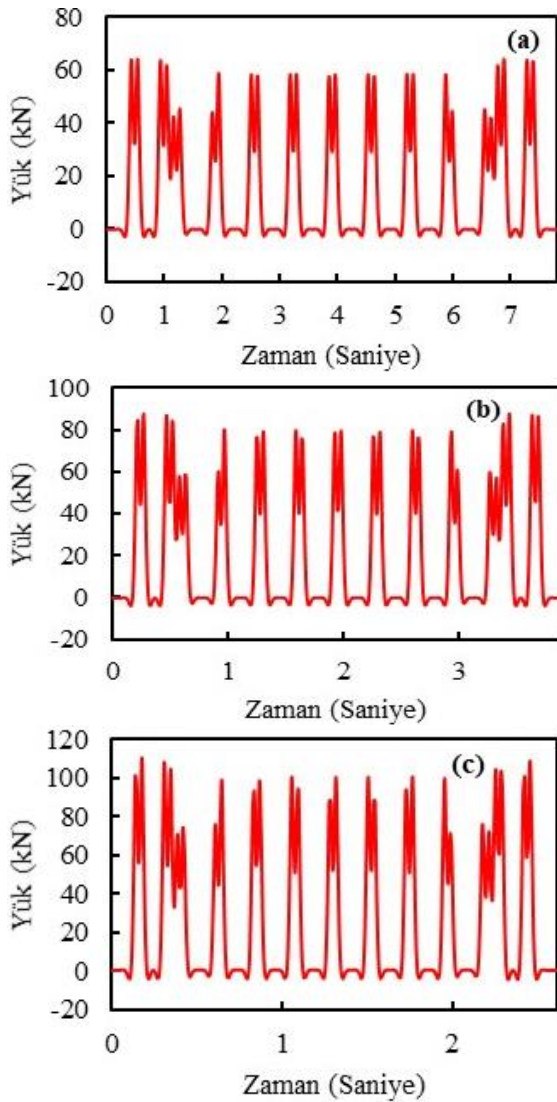
($170/2=85$ kN) ve %50 yük dağılımına göre belirlenmiştir. Şöyle ki; maksimum tekerlek yükünün 0,5 ile çarpılması ile tekerin altındaki traverse aktarılan statik teker yükü hesaplanmıştır ($85 \times 0,5=42,5$ kN) (Çizelge 2). Dinamik yüklemede ise eşdeğer dinamik teker yükü, statik teker yükü ile dinamik etki katsayısının çarpılması ile elde edilmiştir [24]. Bu çalışmada dinamik etki katsayısı (ϕ), AREA [35] tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Bu eşitlikteki V (km/h) ve D (mm) sırasıyla tren hızını ve teker çapını ifade etmektedir. Statik tekerlek yükü hesabında olduğu gibi hareket eden tekerlek yükü hesabında da %50 yük dağılımı kullanılmıştır. Diğer yandan farklı tren hızları için (100, 200 ve 300 km/h) farklı etki katsayıları Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır ($\phi=1,57$ (100 km/h), $\phi=2,15$ (200 km/h) ve $\phi=2,72$ (300 km/h)). Teker çapı olarak ise, bu çalışmada minimum teker çapı olan 910 mm kullanılmıştır. Bir trenin geçişi esnasında meydana gelen hareket eden tekerlek yükünün yükleme izi ise Winkler giriş yöntemi (Eşitlik 2 ve 3) ile oluşturulmuştur. Eşitlik 2'deki s, L, x ve t sırasıyla hareketli referans noktasını, karakteristik uzunluğu, statik referans noktasını ve zamanı ifade etmektedir. Eşitlik 3'teki F_e ve $F(s)$ ise sırasıyla dinamik dingil yükünü ve her bir dingilden gelen dinamik dingil yüklerinin dağılımını ifade etmektedir. Dinamik etki katsayılarının farklı hızlar için hesaplanmasından sonra ilk olarak karakteristik uzunluk (L) hesaplanmıştır. Bunun için $s=0$ (Eşitlik 2-3) olarak kabul edilmiş olup, %50 yük dağılımı için Eşitlik 3 kullanılarak L değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Thalys yüksek hızlı treninde 1. dingil ile 26. dingil (son dingil) arasındaki mesafe 193,14 m'dir. Eşitlik 2'deki x'in hesabında, ilk dingilden önceki 20 traverslik mesafe (12 m) trenin yaklaşma mesafesi olarak hesaba dahil edilmiştir. Bu nedenle ilk ve son dingilin referans noktasına (x) olan uzaklıkları sırasıyla 12 ve 205,14 m'dir. Son dingilden sonra ise yine yaklaşık 20 traverslik mesafe rahatlama mesafesi olarak yük dağılımında göz önüne alınmıştır. Farklı hız değerleri (100, 200 ve 300 km/h) için, bu çalışmada kullanılan bir trenin

geçiş esnasında oluşan yükleme izleri Şekil 2’de verilmiştir.

$$\phi=1+5,21V/D \quad (1)$$

$$s=\frac{1}{L}(x-Vt) \quad (2)$$

$$F(s)=\frac{F_e}{2L}e^{-\frac{|s|}{L}}\left(\cos\left|\frac{s}{L}\right|+\sin\left|\frac{s}{L}\right|\right) \quad (3)$$



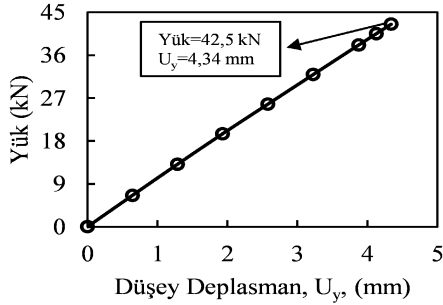
Şekil 2. Bir trenin geçişi esnasında oluşan yükleme izleri: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yukarıda da bahsedildiği üzere, bu çalışmada farklı miktarlarda poliüretan (0, 70, 140 ve 210 kg/m³) ile iyileştirilmiş balastlı demiryolu hattında statik ve hareket eden teker yüklerinden dolayı meydana gelen düşey deformasyonlar (oturma) PLAXIS 2D programı kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca farklı tren hızlarının (100, 200 ve 300 km/h)’da etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, düşey deplasmanların (U_y) gösteriminde aşağı yön (↓) pozitif ve yukarı yön (↑) negatif olarak kabul edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, elde edilen nümerik analiz sonuçları sunulmuştur.

3.1. Poliüretansız Balastlı Hatta Yükleme Tipinin Etkisi

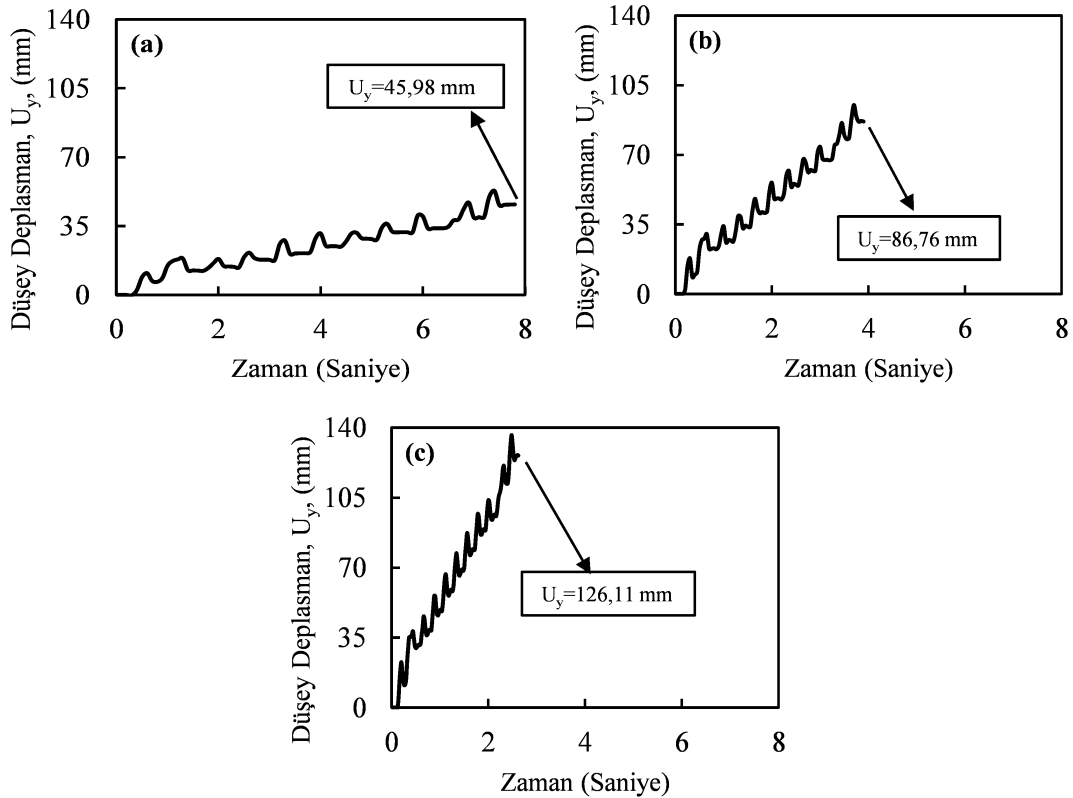
Bu alt başlıkta, poliüretan ile güçlendirilmemiş balastın bir demiryolu hattında kullanılması durumunda farklı yükleme tiplerinden dolayı hatta meydana gelen düşey deplasmanlar incelenmiştir. Statik teker yükü altında hatta meydana gelen düşey deplasman Şekil 3’te gösterilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere, statik teker yükü belirlenirken maksimum dingil yükü (170 kN) ve %50 yük dağılımı göz önüne alınmıştır. Öte yandan dinamik etki katsayısı statik teker yükünün hesabına dahil edilmemiştir. Bu sebeple statik teker yükü olarak 42,5 kN analizde uygulanmıştır. Şekil 3’te görüldüğü üzere 42,5 kN’luk yükün tamamı bu modelde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yapılan bu statik teker yükü analizinden kalıcı düşey deplasman olarak 4,34 mm elde edilmiştir. Ulusal Demiryolu İdaresi’ne (National Railway Administration) [36] göre 250 km/h işletme hızına sahip balastlı yüksek hızlı demiryolunda kritik oturma değeri 100 mm’dir. Diğer yandan Zhou ve arkadaşları [37] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise 300 km/h işletme hızına sahip balastlı demiryolu hattında kritik oturma değeri olarak 50 mm seçilmiştir. Bu iki kritik oturma kriterine göre statik teker yükünden dolayı meydana gelen düşey deplasman (4,34 mm), kabul edilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.



Şekil 3. Polüüretan ile güçlendirilmemiş balastlı demiryolu hattında statik teker yükü ve düşey deplasman ilişkisi

Farklı hızlarda hareket eden trenin bir geçişi esnasında hareket eden tekerlek yükünden dolayı hatta meydana gelen oturma Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4'e göre yüksek hızlı trenler için düşük olarak kabul edilebilecek 100 km/h hızda bile hatta meydana gelen oturma değeri

(45,98 mm) statik teker yükünün oturma değerinin yaklaşık olarak 10,6 katıdır. Diğer yandan bu durum artan hızlarda daha da artmaktadır. Şöyle ki; 200 km/h hızda 20 kat ve 300 km/h hızda 29 kat daha fazla oturma elde edilmiştir. Ayrıca 100 km/h ve 200 km/h hızda meydana gelen oturma değerleri kabul edilen sınırlar içerisinde kalırken (<100 mm), 300 km/h hız için kabul edilen oturma değerinden daha fazla oturma meydana gelmektedir (126,11 mm > 50 mm). Öte yandan Şekil 4'teki oturma değerindeki artış trendine bakıldığında, artan tren geçiş sayıları ile bu oturma miktarlarının daha da artabileceği sonucu çıkarılabilmektedir. Sonuç olarak Şekil 3 ve Şekil 4'teki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, statik teker yükünün yerine tren hızlarının etkisini de içeren hareket eden tekerlek yükü balastlı demiryolu hattının tasarımında göz önüne alınmalıdır.

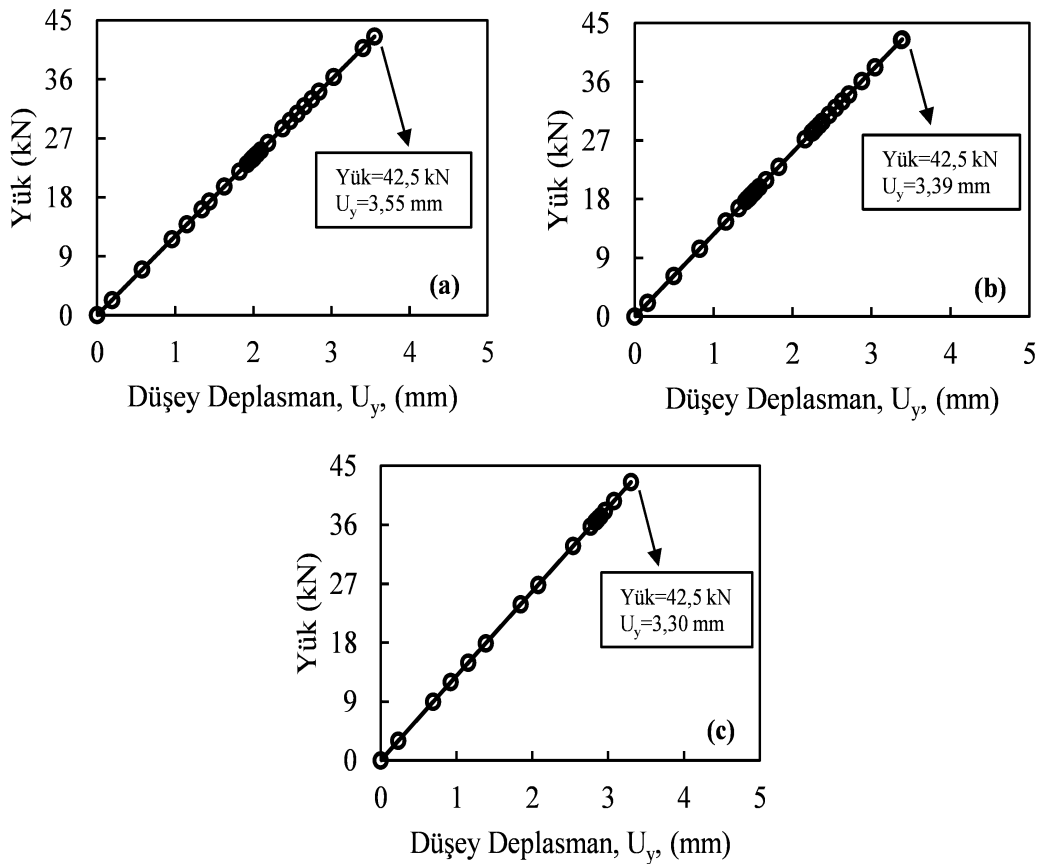


Şekil 4. Polüüretan ile güçlendirilmemiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

3.2. Poliüretan Miktarı ve Yükleme Tipinin Etkisi

Farklı miktarlarda poliüretan (70, 140 ve 210 kg/m³) ile güçlendirilmiş balastın demiryolu hattında kullanılması durumunda, statik teker yükü ve tren hızının etkisini hesaba katan hareket eden tekerlek yüklerinden dolayı hatta meydana gelen düşey deplasmanlar bu alt bölümde sunulmuştur. Statik teker yükünden dolayı poliüretan ile güçlendirilmiş hattın kalıcı düşey deplasman analiz sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'e göre 42,5 kN'luk statik teker yükü nümerik modelde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Poliüretansız durum ile kıyaslandığında, poliüretan kullanımı ile statik teker yükünden dolayı demiryolu hattında

meydana gelen oturmada kısmen bir iyileşme meydana gelmektedir (4,34 mm'den 3,30 mm'ye) (Şekil 3 ve Şekil 5). Meydana gelen bu iyileşmenin miktarı ise artan poliüretan oranı ile artmaktadır. Bu durum ise poliüretandan dolayı balastın elastisite modülündeki artış ile açıklanabilir. Ancak poliüretanın, hattın oturma davranışına olan kısmi etkisi statik teker yükünden kaynaklanabilir. Şöyle ki; bir önceki alt başlıkta da görüldüğü üzere (Şekil 3 ve Şekil 4), hareket eden tekerlek yükü altında meydana gelen oturma statik teker yükünden dolayı meydana gelen oturmanın yaklaşık 29 katıdır. Bu nedenle poliüretan kullanımının balastlı demiryolu hattının oturma davranışına etkisinin hareket eden tekerlek yükü altında incelenmesi gerekmektedir.

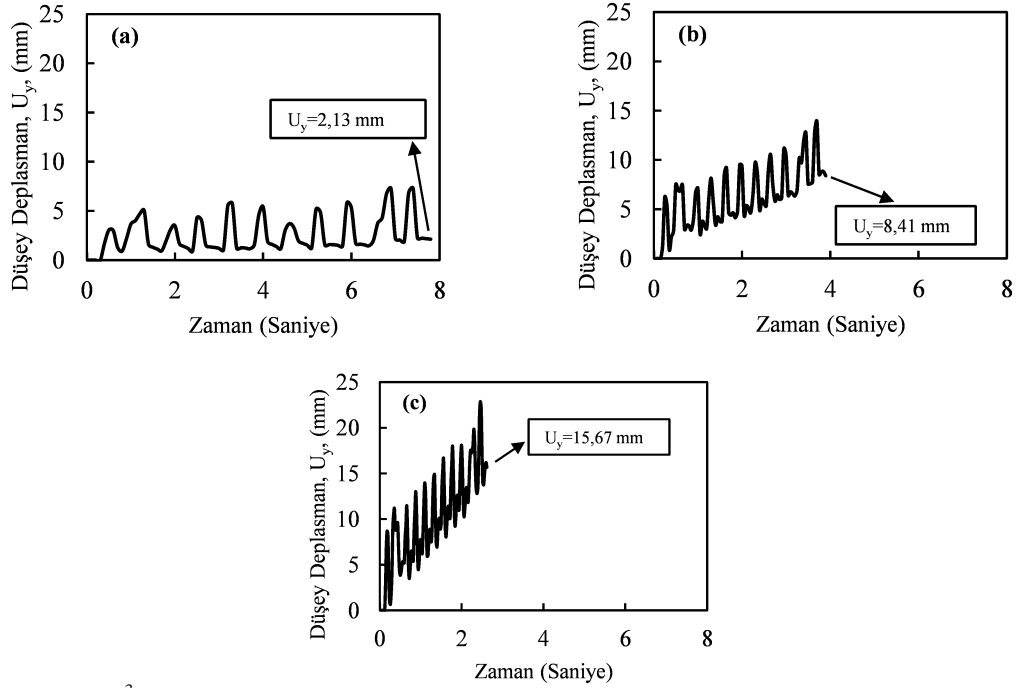


Şekil 5. Poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında statik teker yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

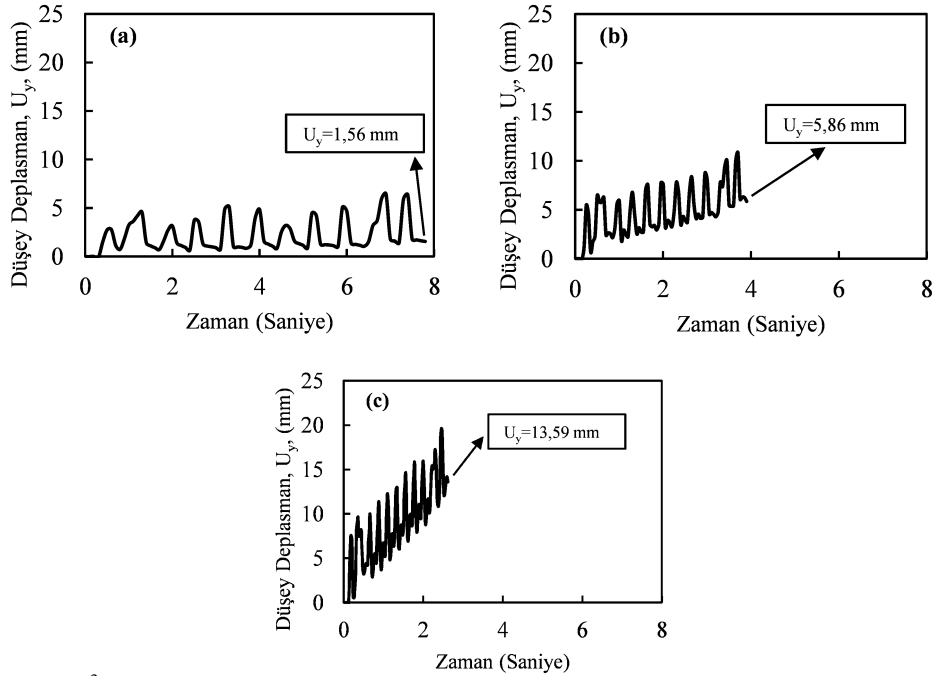
70, 140 ve 210 kg/m³ poliüretan kullanılarak iyileştirilmiş balastlı demiryolu hattının hareket eden tekerlek yükü altındaki oturma sonuçları sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre balastlı demiryolu hattının poliüretan ile güçlendirilmesi durumunda 100 km/h hıza sahip bir trenin tam bir geçişinden sonra hatta meydana gelen oturma miktarı poliüretan miktarına bağlı olarak %97,2'ye kadar iyileşmektedir (45,98 mm'den 1,28 mm'ye). Farklı miktarlarda (70 ,140 ve 210 kg/m³) poliüretanlar için bu iyileşme oranları sırasıyla %95, %96,6 ve %97,2 olarak hesaplanmıştır. Bu iyileşme oranları, 100 km/h tren hızı için bu çalışmada kullanılan poliüretan miktarlarının birbirine yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Öte yandan poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında 100 km/h hızla hareket eden tekerlek yükünden dolayı meydana gelen oturma miktarı ise statik teker yükünden dolayı meydana gelen oturma miktarından daha az olmaktadır (70 kg/m³ için: 2,13 mm<3,55 mm, 140 kg/m³ için: 1,56 mm<3,39 mm ve 210 kg/m³ için: 1,28 mm<3,30 mm). Bu durum ise poliüretan ile güçlendirmiş balastın hareket eden tekerlek yükü altında daha çok elastik davranmasından ve sistemin daha az kalıcı deformasyon üretmesinden kaynaklanmaktadır. Şöyle ki; Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'deki sonuçlar incelendiğinde, en son dingilden dolayı meydana gelen oturma miktarının büyük kısmını esnek oturma oluşturmaktadır. Diğer bir ifade ile yükün kalkmasından sonra oturma miktarının büyük oranda esnek bir davranış gösterdiği görülmektedir. Esnek davranışın sebebi ise balast agregaları arasında oluşan elastik poliüretan yapısıdır. Dinamik etki katsayısının hız artışı ile artmasından dolayı (Eşitlik 1), hattın maruz

kaldığı dinamik teker yükü de artmaktadır. Bu durum ise hatta meydana gelen oturma miktarının artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle artan tren hızı ile elde edilen oturma miktarları artmakta (70 kg/m³ için: 2,13 mm'den 15,67 mm'ye, 140 kg/m³ için: 1,56 mm'den 13,59 mm'ye ve 210 kg/m³ için: 1,28 mm'den 11,10 mm'ye) ve poliüretan kullanımından dolayı elde edilen oturma iyileşme oranları da azalmaktadır (70 kg/m³ için: %95'ten %87,6'ya, 140 kg/m³ için: %96,6'dan %89'a ve 210 kg/m³ için: %97,2'den %91'e). Ayrıca 100 km/h tren hızının aksine 200 km/h ve 300 km/h tren hızlarında hareket eden tekerlek yükünden dolayı meydana gelen oturma miktarları statik teker yükünden daha fazla olmaktadır. Bu bulgulara dayanarak, poliüretan ile yapılacak güçlendirme çalışmalarında kullanılacak poliüretan miktarlarının yanı sıra hattı kullanacak trenlerin hızları da göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle poliüretan ile güçlendirilmiş demiryolu hattının performansının analizinde statik teker yükünün yerine hareket eden tekerlek yükü göz önüne alınmalıdır. Ayrıca 200 km/h ve 300 km/h tren hızlarından dolayı daha fazla kalıcı deplasman gelişmesi ve bu düşey deplasmanların gelişimindeki lineer artış trendine dayanarak yüksek hızlarda yüksek poliüretan miktarlarının kullanılması gerektiği sonucuna varılmaktadır (Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8). Öte yandan bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre hareket eden tekerlek yükü altında poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında bir trenin tam geçişinden dolayı meydana gelen oturmalar tüm poliüretan miktarları için Ulusal Demiryolu İdaresi [36] ve Zhou ve arkadaşları [37] tarafından önerilen kabul edilen oturma limitleri içinde kalmaktadır (<50 mm).

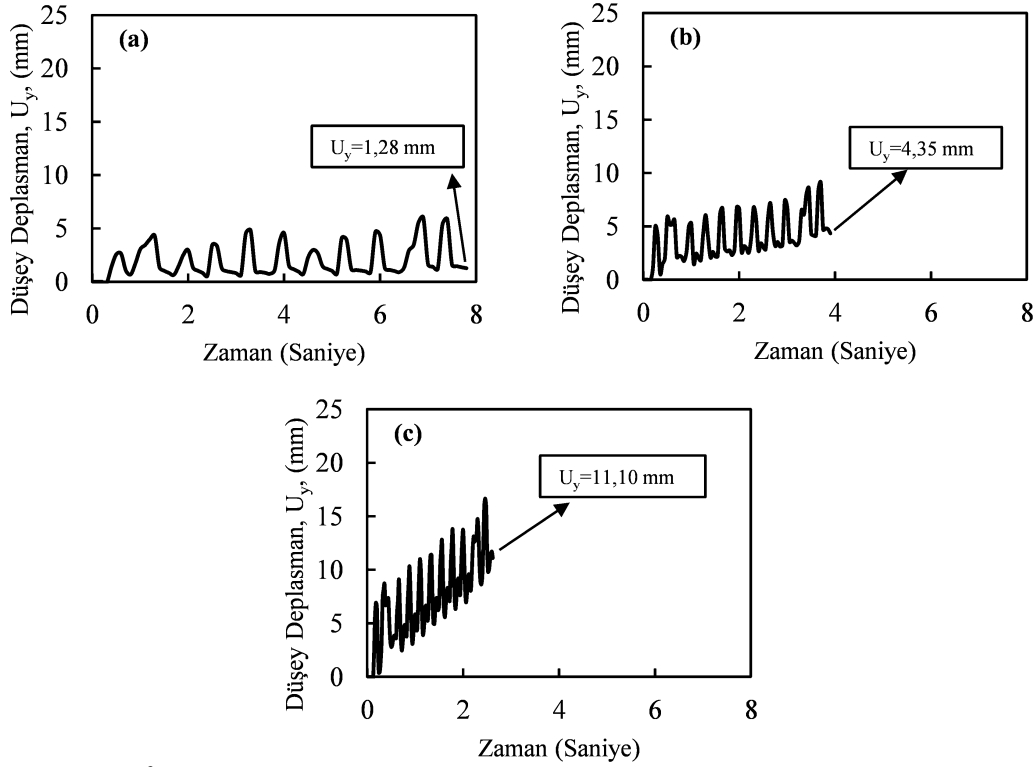
Poliüretan ile Güçlendirilmiş Balastın Hareket Eden Tekerlek Yükü Altındaki Deformasyon Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi



Şekil 6. 70 kg/m^3 poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h



Şekil 7. 140 kg/m^3 poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h



Şekil 8. 210 kg/m³ poliüretan ile güçlendirilmiş balastlı demiryolu hattında farklı hızlar için hareket eden tekerlek yükü ve düşey deplasman ilişkisi: a) 100 km/h, b) 200 km/h ve c) 300 km/h

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı miktarlarda poliüretan ile güçlendirilmiş (0, 70, 140 ve 210 kg/m³) balastlı demiryolu hattının statik tekerlek yükü ve hareket eden tekerlek yükü altındaki oturma performansları PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile sayısal olarak araştırılmıştır. Hareket eden tekerlek yükleri için yükleme izlerinin oluşturulmasında Winkler kiriş yöntemi kullanılmış ve farklı tren hızlarının (100, 200 ve 300 km/h) etkileri de göz alınmıştır. Bu çalışmadan çıkarılan başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) Balastlı demiryolu hattının geoteknik tasarımında trenin hızı da göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle geliştirilen nümerik modelin analizinde statik tekerlek yükünün yerine hareket eden tekerlek yükü uygulanmalıdır.

- 2) Poliüretan ile balastın güçlendirilmesi durumunda hareket eden tekerlek yükünden dolayı hatta meydana gelen kalıcı deformasyon miktarı önemli oranda iyileşmektedir (>%87). Diğer yandan balast agregaları arasında oluşan esnek poliüretan yapıdan dolayı hatta daha çok elastik deplasmanlar meydana gelmektedir.
- 3) Bu çalışmada kullanılan poliüretan miktarları (70, 140 ve 210 kg/m³) ile düşük tren hızında (100 km/h) benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak artan poliüretan miktarları ile balast agregaları arasında daha güçlü bir bağ oluşmaktadır. Bundan dolayı artan tren hızlarında yüksek poliüretan miktarları daha iyi performans sergilemektedir.
- 4) Bir demiryolu hattının farklı bölgelerindeki kritik durumlardan dolayı poliüretan kullanımı tercih edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmadan elde edilen bulguların sahadaki mühendislere ve uygulayıcılara da fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Boler, H., 2012. On the Shear Strength of Polyurethane Coated Railroad Ballast. Yüksek Lisans Tezi, University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, 81.
2. Brown, S.F., Kwan, J., Thom, N.H., 2007. Identifying the Key Parameters That Influence Geogrid Reinforcement of Railway Ballast. Geotext. Geomembr., 25, 362-335.
3. Dersch, M.S., Tutumluer, E., Peeler, C.T., Bower, D.K., 2010. Polyurethane Coating of Railroad Ballast Aggregate for Improved Performance. 2010 Joint Rail Conference (JRC2010), 27-29 Nisan 2010, Urbana, IL, ABD.
4. Du Plooy, R.F., Gräbe, P.J., 2017. Characterisation of Rigid Polyurethane Foam-Reinforced Ballast Through Cyclic Loading Box Tests. J. South Afr. Inst. Civ. Eng., 59(2), 2-10.
5. Esmaili, M., Zakeri, J.A., Babaei, M., 2017. Laboratory and Field Investigation of the Effect of Geogrid Reinforced Ballast on Railway Track Lateral Resistance. Geotext. Geomembr., 45, 23-33.
6. Halefom, B., 2017. Performance Evaluation of ELASTOTRACK Polyurethane Stabilized Railroad Ballasts. Yüksek Lisans Tezi, Addis Ababa University, Etiyopya, 65.
7. Hussaini, S.K.K., Indraratna, B., Vinod, J.S., 2015. Performance Assessment of Geogrid-Reinforced Railroad Ballast During Cyclic Loading. Transp. Geotech., 2, 99-107.
8. Indraratna, B., Ngo, N.T., Rujikiatkamjorn, C., 2011. Behavior of Geogrid-Reinforced Ballast Under Various Levels of Fouling. Geotext. Geomembr., 29, 313-322.
9. Indraratna, B., Nimbalkar, S., 2013. Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 139, 684-700.
10. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Christie, D., Rujikiatkamjorn, C., Vinod, J.S., 2010. Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 136, 907-917.
11. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Neville, T., 2014. Performance Assessment of Reinforced Ballasted Rail Track. Ground Improv., 167, 24-34.
12. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Ngo, N.T., Neville, T., 2016. Performance Improvement of Rail Track Substructure Using Artificial Inclusions-Experimental and Numerical Studies. Transp. Geotech., 8, 69-85.
13. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Rujikiatkamjorn, C., 2014. From Theory to Practice in Track Geomechanics-Australian Perspective for Synthetic Inclusions. Transp. Geotech., 1, 171-187.
14. Lee, S.H., Lee, S.J., Park, J.G., Choi, Y.T., 2017. An Experimental Study on the Characteristics of Polyurethane-mixed Coarse Aggregates by Large-Scale Triaxial Test. Constr. Build. Mater., 145, 117-125.
15. Navaratnarajah, S.K., Indraratna, B., 2017. Use of Rubber Mats to Improve the Deformation and Degradation Behaviour of Rail Ballast Under Cyclic Loading. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 143(6), 04017015.
16. Ngo, N.T., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., 2016. Modelling Geogrid-Reinforced Railway Ballast Using the Discrete Element Method. Transp. Geotech., 8, 86-102.
17. Nimbalkar, S., Indraratna, B., 2016. Improved Performance of Ballasted Rail Track Using Geosynthetics and Rubber Shockmat. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 142(8), 04016031.
18. Nimbalkar, S., Indraratna, B., Dash, S.K., Christie, D., 2012. Improved Performance of Railway Ballast Under Impact Loads Using Shock Mats. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 138, 281-294.
19. Qian, Y., Mishra, D., Tutumluer, E., Kazmee, H.A., 2015. Characterization of Geogrid Reinforced Ballast Behavior at Different Levels of Degradation Through Triaxial Shear Strength Test and Discrete Element Modeling. Geotext. Geomembr., 43(5), 393-402.
20. Raymond, G.P., 2002. Reinforced Ballast Behaviour Subjected to Repeated Load. Geotext. Geomembr., 20(1), 39-61.
21. Sweta, K., Hussaini, S.K.K., 2018. Effect of Shearing Rate on the Behavior of Geogrid-Reinforced Railroad Ballast Under Direct Shear Conditions. Geotext. Geomembr., 46, 251-256.

22. Woodward, P.K., El Kacimi, A., Laghrouche, O., Medero, G., Banimahd, M., 2012. Application of Polyurethane Geocomposites to Help Maintain Track Geometry for High-speed Ballasted Railway Tracks. *J. Zhejiang Univ., Sci. A (Appl. Phys. Eng.)*, 13(11), 836-849.
23. Woodward, P.K., Medero, G., Griffiths, D.V., 2009. Reducing Track Faults Using Polymer Geocomposite Technology. The 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 29 Haziran-2 Temmuz, Champaign, 1273-1282.
24. Jiang, Y., Nimbalkar, S., 2019. Finite Element Modeling of Ballasted Rail Track Capturing Effects of Geosynthetic Inclusions. *Front. Built Environ.*, 5(69), 1-11.
25. Auersch, L., 2006. Dynamic Axle Loads on Tracks with and Without Ballast Mats: Numerical Results of Three-Dimensional Vehicle-track-soil Models. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail and Rapid Transp.*, 220(2), 169-183.
26. Anastasopoulos, I., Alfi, S., Gazetas, G., Bruni, S., Leuven, A.V., 2009. Numerical and Experimental Assessment of Advanced Concepts to Reduce Noise and Vibration on Urban Railway Turnouts. *J. Transp. Eng.*, 135(5), 279-287.
27. Keene, A., Edil, T., Fratta, D., Tinjum, J., 2013. Modeling the Effect of Polyurethane Stabilization of Rail Track Response. *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, 3-7 Mart, San Diego, Kaliforniya, 1410-1419.
28. Punetha, P., Maharjan, K., Nimbalkar, S., 2021. Modeling of the Dynamic Response of Critical Zones in a Ballasted Railway Track. *Front. Built Environ.*, 7, 660292.
29. Kalliainen, A., Kolisoja, P., Nurmikolu, A., 2016. 3D Finite Element Model as a Tool for Analyzing the Structural Behavior of a Railway Track. *Procedia Eng. (Advances in Transportation Geotechnics 3: The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics 2016)*, 143, 820-827.
30. Correia, A.G., Cunha, J., Marcelino, J., Caldeira, L., Varandas, J., Dimitrovová, Z., Antão, A., Gonçalves da Silva, M., 2007. Dynamic Analysis of Rail Track for High Speed Trains: 2D Approach. 5th International Workshop on Application of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering, 1-4 Nisan, Portekiz.
31. Khan, S.N., 2018. Numerical Analysis of Deformation and Stability in the Formation for Railway Track. *Yüksek Lisans Tezi, Bauhaus-universität Weimar, Weimar*, 79.
32. Faizan, A.A., Kirtel, O., Çelebi, E., Zülfikar, A.C., Göktepe, F., 2022. Experimental Validation of a Simplified Numerical Model to Predict Train-induced Ground Vibrations. *Computer. Geotech.*, 141, 104547.
33. Mezeh, R., Mroueh, H., Hosseingholian, M., Sadek, M., 2019. New Approach for the Assessment of Train/Track/Foundation Dynamics Using in-situ Measurements of High-speed Induced Vibrations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 116, 50-59.
34. AREMA, 2010. Manual for Railway Engineering. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Lanham, 1312.
35. AREA, 1974. Manual for Recommended Practice. American Railway Engineering Association, Washington, DC, 848.
36. National Railway Administration, 2014. Code for Design of High Speed Railway (TB10621-2014). China Railway Press, Beijing.
37. Zhou, S., Wang, B., Shan, Y., 2020. Review of Research on High-speed Railway Subgrade Settlement in Soft Soil Area. *Railw. Eng. Sci.*, 28, 129-145.

