

## DEMİRYOLU HAT OTURMASININ MATEMATİKSEL MODELLERİ VE HAT OTURMASINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Murat Vergi TACİROĞLU\*

Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Ulaştırma ve Trafik Hizmetleri Bölümü, Mersin, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Demiryolu hattı  
Hat oturması  
Matematiksel modeller

### Özet

Bir demiryolu hattında tren trafiğinin oluşturduğu yüklemelerden dolayı zamanla oturmalar meydana gelir. Demiryolu hattının oturması, hattın yatay ve düşey pozisyonunun bozulmasıdır. Bu oturmalar nedeniyle demiryolu hattı gereken işletme koşullarını sağlayamayacak duruma gelir ve bakım çalışmalarına ihtiyaç duyar. Demiryolu hatlarında yapılan bakım çalışmalarının etkin ve uygun maliyetli olması için de hat oturmalarının nerde, ne zaman, hangi koşullarda ve ne miktarda meydana geleceğini belirleyebilmek önemlidir. Bu ihtiyaçlardan dolayı, dünyanın çeşitli yerlerinde farklı araştırmacılar, üzerine çalıştıkları demiryolu işletmelerinin ihtiyaçlarını ve işletme karakteristiklerini göz önüne alarak çeşitli hat oturması modelleri geliştirmişlerdir. Bu çalışmada demiryolu hat oturmalarının matematiksel olarak modellendiği araştırmalar incelenmiş ve bu modellere bağlı kalarak oturmalara neden olan faktörler belirlenmiştir.

## MATHEMATICAL MODELS OF RAILWAY TRACK SETTLEMENT AND INVESTIGATION OF THE PARAMETERS AFFECTING TRACK SETTLEMENT

### Keywords

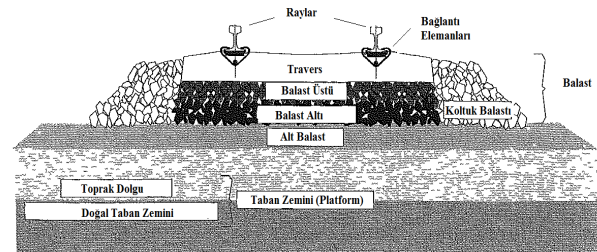
Railway track  
Track settlement  
Mathematical models

### Abstract

As a result of the loadings generated by train traffic, settlements occur at a railway track in time. Railway track settlement is the deterioration of alignment and level of track. Due to these settlements railway track becomes insufficient to provide track condition requirements and maintenance activities become necessary. It is important to be able to determine where, when, in which conditions and in how much amounts the track settlements occur in order to the track maintenance activities be efficient and cost effective. As a result of these requirements, researchers from different countries develop different track settlement models by considering requirements of the related railway organizations and operational conditions. In this paper, studies in which railway track settlements were modeled mathematically were investigated and being related to these models, factors causing the settlements were determined.

### 1. Giriş

Balastlı bir demiryolu hattı yapısal olarak altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısma ayrılır. Üstyapı, raylar, traversler, bağlantı malzemeleri, balast tabakası ve alt balast tabakasından oluşurken altyapı ise sıkıştırılmış taban zemini ve formasyon tabakasından oluşur. (Arlı,2015) (Şekil 1).



Şekil 1. Demiryolu hat yapısı ve bileşenleri (Selig ve Waters,1994)

\* İlgili yazar / Corresponding author: mtaciroglu@mersin.edu.tr, +90-532-588-1651

## 1.1. Demiryolu Üstyapısı

Demiryolu üstyapısının temel görevi tren yüklerini yayarak altyapıya zarar vermeyecek düzeye indirmektir. Demiryolu üstyapısının en üstünde bulunan raylar, demiryolu araçlarının tekerleri için az direnimsi gösteren bir yuvarlanma yüzey sağlayarak tekerleklere kılavuzluk ederler. Ayrıca dingillerden aktarılan yükleri traversler aracılığı ile alt tabakalara iletirler (Evren, 1998). Demiryolu üstyapılarında ihtiyaca göre farklı profil tiplerinde (oluklu, çift mantarlı, tek mantarlı) ve farklı kesit özelliklerinde (ağırlık/birim uzunluk (kg/m), atalet momenti) raylar kullanılmaktadır.

Bağlantı malzemeleri; rayları, raylara ve traverslere bağlayarak stabilitesi yüksek bir çerçeve oluşturan, raylar ve ray ile travers arasında kuvvet aktarımını sağlayan, rayların şekil ve yer değiştirmelerini önleyen, üst yapıya gelen etkileri elastik şekil değiştirmelerle azaltan malzemelerdir (Ektaş, 2002).

Traversler ise demiryolu yük aktarımı modeline uygun şekilde; raydan kendisine etkiyen kuvvetleri daha geniş bir yüzeyde karşılayıp yayarak balast tabakasına aktaran, yolun açıklığını saptayıp koruyan ve yolu yan etkilere karşı ekseninde tutan, raylara dik yönde belirli aralıklarla döşenmiş elemanlardır (Ektaş, 2002). Traversler, demiryolu hattını yatay ve düşey geometrisinin düzgün tutabilmek için balast tabakasına sıkıca sıkıştırılarak gömülmüştür (Dahlberg, 2001).

Balast tabakası, traversler tarafından iletilen tüm etkileri kalıcı çökmelere uğramadan ve daneleri arasındaki sürtünme ile yayarak platforma ileten ve yol çerçevesine elastik bir yatak oluşturan; 15-80 mm arasında kırma taştan oluşan tabakadır (Ektaş, 2002). Balast tabakasının standart derinliği 0.3 m olmakla beraber yatay stabiliteyi sağlamak için traverslerin sonunda bu derinlik, traverslerin etrafını saracak şekilde 0.5 m'ye kadar çıkmaktadır. Balast tabakasının önemli fonksiyonları vardır. Bu tabaka, trenlerin ürettiği yatay, düşey ve boyuna yönlerdeki kuvvetlerin etkisi altında olan traverslerin yapacağı hareketleri kısıtlar. Traverslerden gelen yükleri dağıtarak taban zeminini yüksek gerilmelerden korur ve böylece demiryolunda kalıcı deformasyonların kısıtlı olmasına yardımcı olur. Ayrıca dinamik yüklerden dolayı oluşan şokları absorbe edebilmek için gereken direnci sağlarlar. Bunlardan başka balast tabakasının demiryolu yapısı için su drenajı sağlamak, buzlanmayı azaltmak, yol yüzeyinde bitkilerin büyümesini geciktirmek ve yüzeye yerleşen malzemelerin kirlenme etkilerine karşı koymak gibi fonksiyonları da vardır. (Dahlberg, T., 2001).

Alt balast, üstteki iyi kaliteli iri parçalı balast tabakası ile alttaki iyi derecelenmiş taban zeminini arasında bir geçiş tabakasıdır. Bu tabaka balast tabakası ve taban zemininin birbirine karışmasını engellemek ve don

derinliğini düşürmek için tasarlanmıştır. Bu tabakada uygun filtreleme şartlarını sağladıktan sonra her tür kum ve çakıl malzeme bu tabakada kullanılabilir (Dahlberg, T., 2001).

## 1.2. Demiryolu Altyapısı

Demiryolu altyapısı hattan beklenen kalite ve işletme güvenliğinin sağlanması için oldukça önemlidir. Demiryolu altyapısının temel görevi üstyapıdan aktarılan tren yüklerini taşımaktadır. Altyapı yalnızca sıkıştırılmış taban zemininden oluşabileceği gibi gerekli durumlarda taban zeminini üzerine formasyon tabakası inşa edilerek de oluşturulabilir.

Taban zeminini balast ve alt balast tabakasının altındaki malzeme tabakasıdır. Bu tabaka yol arızaları ve düşük yol kalitesine sebep olabileceği için en önemli tabakalardan biridir (Li ve Selig, 1995). Taban zeminini balast ve alt balast tabakaları için stabil bir temel oluşturur. Üst yapının dayanımını destekler ve teker yükü altındaki raylarda meydana gelen deformasyonların elastik özellikte olmasına büyük katkı sağlar (Selig ve Waters, 1994).

Formasyon tabakası ise taban zeminin yetersiz olduğu durumlarda, zemin ile üstyapı arasına serilen tabakadır. Bu tabakada kullanılan malzemenin dağılımı homojen ve yoğunluğu yüksek olmalıdır. Formasyon tabakasının görevleri; taban zeminini taşıma gücü yetersizse ona destek olmak, taban zeminini don derinliğinin düşük olduğu durumlarda yalıtım sağlamak, taban zeminindeki ince malzemenin balast ile karışmasını engellemek, suya karşı hassas zeminleri sudan korumak ve üstyapının inşası için düzgün bir yüzey oluşturmak olarak sıralanabilir (Arlı,2015).

## 2. Demiryolu Hattının Oturması

Tren geçişlerinin oluşturduğu yüklemeler altında demiryolu hattının balast tabakasında ve taban zemininde elastik olmayan deformasyonlar oluşur. Hat üzerinden geçen bir trenin oluşturduğu yüklemelerden dolayı hatta meydana gelen elastik deformasyonun çok küçük bir kısmı tren geçişi tamamlandıktan kalıcı deformasyona dönüşür. Tekrarlı tren geçişleri sonunda bu küçük deformasyonlar birbirine eklenerek demiryolu hattının farklı kesimlerinin farklı pozisyonlar almasına neden olur. Yani demiryolu hattının yatay ve düşey pozisyonu zamanla değişir ve düzensiz bir hal alır. Bu fenomen diferansiyel hat oturması olarak isimlendirilir. Oluşan bu oturmalar hat üzerinde dalgalar halinde ve metre birimindeki uzunluklardan kilometre birimindeki uzunluklara kadar çeşitli büyüklüklerde oluşabilirler.

Tekrarlı trafik yükleri sonucu oluşan oturmalar balast,

alt balast ve taban zemini tabakalarının kalitesine ve davranışlarına bağlıdır. Balastlı hatların oturması genelde iki ana aşamada meydana gelir. İlk aşama hattın yatay ve düşey pozisyonunu düzeltmek için yapılan buraj çalışmalarından (buraj, traverslerin altının balastla doldurulup sıkıştırılmasıdır) hemen sonra balast parçacıkları arasındaki mesafe azalınca kadar veya balast tabakası konsolide oluncaya kadar devam eder ve bu aşamada hızlı oturmalar meydana gelir. İkinci aşama da ise oturma hızı yavaştır ve oturma ile zaman (veya yük) arasında lineere yakın bir ilişki vardır.

Oturmanın ikinci aşamasına balast ve taban zemini davranışının birkaç temel mekanizması neden olur.:

1. İlk aşamadan sonra tekrarlı yük altında parçacıkların sıkışmasıyla balast tabakası ve taban zemininde hacimsel azalma başka bir deyişle yoğunlaşma devam eder.
2. Altbalast veya taban zemini parçacıkları balast tabakası içindeki boşluklara nüfuz etmeye başlar. Böylece balast parçacıkları altbalast ve taban zemini içerisine gömülür.
3. Tren yükleri veya çevresel koşullar altında balast parçalarının kırılmasıyla (iki veya daha fazla parçaya) hacimsel azalma oluşur.
4. Balast parçacıklarının temas noktalarında meydana gelen kazınma(abrasif) aşınması nedeniyle hacimsel azalma meydana gelir. Bu tip aşınma gerçekleşirken köşeli balast parçaları daha yuvarlak şekil alır
5. Uygulanan yükün kalkmasından sonra elastik olmayan toparlanma meydana gelir. Yük altında balast parçacıkları arasında meydana gelen mikro kayma sonucunda kalıcı deformasyonlar oluşur. Kalıcı deformasyon yükleme geçmişi ve yükleme durumunun fonksiyonudur.
6. Balast ve taban zemini parçalarının traversler altından uzaklaşması. Bu olay traverslerin balast ve taban zeminine gömülmesine neden olur.
7. Traverslerin yanıl ve boyuna hareketleri, traverslerin altında bulunan balast parçalarının itilmesine neden olur ve böylece traversler balast tabakasının daha derinlerine gömülür(Dahlberg, T., 2001).

Yukarıda sayılan ilk dört madde balast ve taban zemini yoğunluğu ile ilgilidir. Diğer üç madde ise balast ve taban zemini malzemelerinin elastik olmayan davranışı ile ilgilidir (Dahlberg, T., 2001).

Tekrarlı tren yükleri balast parçacıklarının yer değiştirmesine ve buna bağlı olarak hacimsel azalma veya yoğunlaşmaya neden olur. Tren yükleri bir yandan da karşıt etki üretir. Elastik temel yapısından dolayı, tren yükü, yükleme noktasının (rayların ve traverslerin) arkasında ve önünde hattın yükselmesine neden olmakta ve böylece balastın üzerinde rayların ve traverslerin neden olduğu ön yükleme azalması (ölü yük) oluşmaktadır. Aynı zamanda tren-yol etkileşiminden dolayı oluşan dinamik kuvvetler teker-ray temas yüzeyinden balast

veya taban zeminine veya yol yapısına doğru dalgalar halinde yayılır. (Dahlberg, T., 2001).

Sonuç olarak yol oturmaları iki aşamada karakterize edilmektedir. İlk aşama başlangıç oturma aşamasıdır ve bu aşamada oturmalar hızlıca meydana gelir. Bu aşamada balast yüksek yoğunlukta sıkışır (balast parçacıkları arasındaki aralık küçülür).İkinci aşamada oturma yavaş meydana gelir ve oturma ve zaman (yük) arasında aşağı yukarı doğrusala yakın bir ilişki vardır.

### 3. Demiryolu Hat Oturmasının Matematiksel Modelleri

Sürüş güvenliği ve yolculuk kalitesinin düşmesine neden olan hat oturmaları demiryolu organizasyonları için büyük bir işletme problemidir. Sürekli ortaya çıkan bu durumun mekanizmasını anlayıp çözümler üretebilmek için dünyanın farklı yerlerinde araştırmacılar bu konuda çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada hat oturmasını temsil eden matematiksel modeller incelenmiştir. Yapılan çalışmada demiryolunun uzun dönem davranışını gösteren hat oturması modelleri arasında genel bir kabul olmadığı görülmüştür.

#### 3.1. Yükleme Döngüsünü Temel Parametre Olarak Dikkate Alan Modeller

Bu tür matematiksel modellerde hat oturmasına etki eden temel parametre hatta etki eden yük sayısıdır.

Almanyalı araştırmacı Dietrich (1977) yaptığı çalışmada N yük döngüsünden sonraki oturmayı aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

$$u_N = u_1 f(N) \quad (1)$$

Burada  $u_1$  ilk yüklemeden sonraki oturmadır.

Holzlohner (1978), ise 2 yükleme periyoduna bölünmüş bir oturma kanunu önermiştir. Buna göre ön yükleme periyodu ilk yükleme döngüsünü ( $N_a$ ) kapsarken, ikinci periyot ise devamında gelen yüklemeleri kapsamaktadır. İkinci periyottaki oturma  $y$  ise aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$y = R \ln\left(\frac{N}{N_a} + 1\right) \quad (2)$$

Burada  $N$  önyükleme periyodundaki  $N_a$  yüklemesinden sonraki yük sayısı ve  $R$  ise logaritmik oturma oranıdır.

Henn (1978) ortaya attığı ve Demharter (1982) tarafından yeniden incelenen oturma modeli balast-travers basıncına ( $p$ ) ve yük döngüsü sayısına bağlı olarak ( $N$ ) ve  $N > 10^4$  için aşağıdaki formüldeki gibi verilmiştir:

$$y = c_1 + c_2 p + c_3 p^{1.21} \ln N \quad (3)$$

Burada  $c_1$  ve  $c_3$  sabit sayılardır. İlk iki terim  $N < 10^4$  için başlangıç aşamasını temsil eder, üçüncü terim ise  $N > 10^4$  için konsolidasyon aşamasını temsil etmektedir.

Alva-Hurtado ve Selig (1981) balast parçalarının hareketleri sonucu oluşan balast yoğunlaşması varsayımı ile demiryolu hatlarındaki kalıcı deformasyonu hesaplamak için bir yöntem geliştirmişlerdir. Varsayımlarına göre balast deformasyonu balastın sıkışmamış halinden başlar ve aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 [1 + C \log(N)] \quad (4)$$

Burada  $\varepsilon$  toplam kalıcı şekil değiştirme,  $\varepsilon_1$  ilk yüklemmeden sonraki kalıcı şekil değiştirme,  $C$  ise deformasyonun büyüme oranını temsil eden boyutsuz sabit ve  $N$  ise özdeş yük döngülerinin sayısıdır.

Hettler (1984) Dietrich'in  $f(N)$  fonksiyonunu logaritmik formda aşağıdaki şekilde önermiştir:

$$u_N = u_1 [1 + c \ln(N)] \quad (5)$$

Burada  $c$  faktörü 0.25 ile 0.55 arasında bir değer almaktadır (ortalama  $c=0.43$ ). Görüldüğü gibi bu model Alva-Hurtado ve Selig modeline oldukça yakın olmakla birlikte Alva-Hurtado ve Selig modelinde oturma plastik şekil değiştirme ile ifade edilirken bu modelde deplasman cinsinden ifade edilmektedir.

Eşitlik 5'deki  $u_1$  başlangıç oturması yüklemenin (F) nonlineer fonksiyonu olarak  $u_1 = u_1 f(N)$  şeklinde ifade edilebilir. Hettler'in 1/3 ölçekli travers yol modelinde yaptığı ölçümlerde  $u_1$  aşağıdaki formülle tahmin edileye çalışılmıştır.

$$u_1 = s F^{1.6} \quad (6)$$

Burada  $s$  ölçek faktörüdür ( $s=0.00095$  mm/kN<sup>1.6</sup>). Bu formüle göre çok sayıda yüklemmeden sonraki oturmanın ilk yüklemmeden sonra ortaya çıkan oturmaya bağlı olduğu görülmektedir.

Fransız araştırmacı Guérin (1996), geniş kapsamlı araştırmasında balast ve taban zemini oturmasını araştırmak için 1/3 ölçekli bir model kullanmıştır. Bu modelde de oturma iki aşamaya bölünmüştür. İlk aşamada göreceli olarak büyük balast oturmalarda meydana geldiği balastın sıkışması görülürken ikinci aşamada daha kararlı ve yavaş oturmalar meydana gelmektedir. İlk aşamanın uzunluğu ise sıkıştırmanın kalitesine bağlı olarak değişmektedir. İkinci aşamada ise her yüklem döngüsü ( $N$ ) için oluşan  $\tau$  oturması, balast ve taban zemini numunesinin yüklem döngüsü süresince oluşan maksimum elastik defleksiyonunun (d) fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\frac{d\tau}{dN} = \alpha d^\beta \quad (7)$$

Burada  $\alpha$  ve  $\beta$  malzeme parametreleridir. Oluşturulan ölçekli modelde kullanılan malzemeye göre bu parametreler  $\alpha = 0.48 \cdot 10^{-6}$  ve  $\beta = 2.51$  olarak elde edilmiştir.

### 3.2. Yükleme ve Yapısal Özellikleri Dikkate Alan Modeller

Bu tür oturma modellerinde demiryolunun üstyapı ve altyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin özellikleri ağırlıklı parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır.

İngiliz araştırmacı Shenton (1984) çalışmasında, yol oturmasını yol bozulmasının ana kontrol faktörü olarak göz önüne almıştır. Çalışmada bu oturmanın nedensel faktörleri olarak da travers tipi ve boyutları, balast tipi, balast ve taban zemini şartları, buraj makinesi ile yapılan yükseltme, eşdeğer dingil yükü, ve yük döngüsü göz önüne alınmış ve aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

$$S = K_s \frac{A_e}{20} ((10.64 + 0.028L)N^{0.2} + 2.7 \cdot 10^{-6}N) \quad (8)$$

Burada;  $S$  yol oturması (mm),  $A_e$  eşdeğer dingil yükü,  $L$  burajla yapılan yükseltme,  $N$  toplam geçen dingil sayısı,  $K_s$  travers tipi ve boyutu, balast tipi ve altyapıya bağlı katsayıdır. Shenton'a göre dingil yükü muhtemelen yol oturmasına etki eden en büyük etmendir. Shenton'a göre makul bir yaklaşımla düşük tren hızlarında oturma ve dingil yükü arasında lineer bir ilişki vardır.

Chrismer (1994) tarafından yapılan çalışmada ise hat bozulması demiryolu hattının toplam oturma miktarı olarak balast tabakasının, alt balast tabakasının ve taban zemininin toplam plastik şekil değiştirmesi olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$S = \varepsilon_B(\%) \cdot h_B + \varepsilon_{SB}(\%) \cdot h_{SB} + \varepsilon_{SG}(\%) \cdot h_{SG} \quad (9)$$

Burada;  $S$  demiryolu hattının oturma miktarı (mm),  $\varepsilon_B(\%)$  balast tabakasının % plastik şekil değiştirmesi,  $h_B$  balast tabakasının yüksekliği (mm),  $\varepsilon_{SB}(\%)$  alt balast tabakasının % plastik şekil değiştirmesi,  $h_{SB}$  alt balast tabakasının yüksekliği (mm.),  $\varepsilon_{SG}(\%)$  taban zemininin % plastik şekil değiştirmesi,  $h_{SG}$  taban zemininin üst yapıya etki eden derinliğidir (mm). Eşitlik 7'deki terimlerin açıklamalarından da görüldüğü gibi her tabakanın kendine göre bir oturma değeri vardır ve her bir tabakadaki oturma miktarını hesaplamak için bir dizi hesap yapmak gerekir.

Balast tabakasının plastik şekil değiştirmesi, balast tabakasına yeniden yapım veya burajdan sonra yapılan ilk yüklem değerine ve uygulanan dingil yükü tekrar sayısına göre aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_N(\%) = \varepsilon_1(\%)N^b \quad (10)$$

Yukarıdaki formülde;  $\varepsilon_N(\%)$  balastın N yük tekrarı sonunda % plastik şekil değiştirmesi,  $\varepsilon_1(\%)$  ilk yükün etkimesinden sonra balastın % şekil değiştirmesi, N tekrarlı yük sayısı, b sabit (0.21) değerdir. Yapılan çalışmalarda ilk yükleme sonucu oluşan plastik şekil değiştirmenin ( $\varepsilon_1(\%)$ ) balast malzemesinin aşınma özelliklerine, kirlilik durumuna, yapılan yüklemeye, balast tabakasında oluşan gerilmeye ve yol modülüne bağlı olarak değiştiği gözlenmişti ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir(Chrismer, 1994)..

$$\varepsilon_1(\%) = \varepsilon_{1(NOM)}(K_{Wi}, K_{An}, K_{Fi}, K_{\sigma}, K_u) \quad (11)$$

Buna göre;  $\varepsilon_{1(NOM)}(\%)$  ilk yükün etkimesinden sonra balastın % şekil değiştirmesi (%0.22),  $K_{Wi}$  teker yüküne bağlı katsayı,  $K_{An}$  balastın aşınma sayısına bağlı katsayı,  $K_{Fi}$  balast kirlenmesine bağlı katsayı,  $K_u$  yol modülüne bağlı katsayı, K teker yükü altında balast tabakasında oluşan gerilmeye bağlı katsayıdır.  $\varepsilon_{1(NOM)}$  parametresi ise farklı travers özelliğine (ahşap ve betonarme) sahip yollar için yapılan ölçümler sonucunda  $\varepsilon_{1(NOM)}(\%)$  değerinin nominal şartlar altında (Fi=0, An=45, Teker yükü=150 kN, kurak hava koşulları) % 0.22 olduğu hesaplanmıştır (Chrismer, 1994).

Alt balast tabakasının plastik şekil değiştirme davranışının belirlenebilmesi için toplam tekrarlı yük geçişi değerinden faydalanılmakta ve aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Chrismer, 1994).

$$\varepsilon_{SB}(\%) = 0.017 T^{0.16} \quad (12)$$

Burada;  $\varepsilon_{SB}(\%)$  alt balastın plastik şekil değiştirme yüzdesi, T milyon gros ton (MGT) cinsinden trafik yüküdür.

Demiryolu taban zemininin plastik şekil değiştirmesi, taban zeminini oluşturan malzemeye ve burada oluşan gerilmeye bağlı olarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır (Chrismer, 1994).

$$\varepsilon_{SG}(\%) = c(\sigma_{ds}/\sigma_s)^m N^d = c\beta^m N^d \quad (13)$$

Burada;  $\varepsilon_{SG}(\%)$  Taban zeminin % plastik şekil değiştirmesi,  $\sigma_{ds}$  taban zemininde oluşan deviatör gerilme,  $\sigma_s$  serbest taban zemini mukavemeti, N tekrarlı yük sayısı ve c, m, d katsayıları ise zemin cinsine göre değişmekle beraber aşağıdaki Tablo 1'den okunmaktadır.

Tablo 1. Taban zemini plastik şekil değiştirme parametreleri(Chrismer,1994).

Model Parametreleri	Taban zemini sınıflandırması			
	ML	MH	CL	CH
d	0,1	0,13	0,16	0,18
c	0,64	0,84	1,1	1,2
m	1,7	2	2	2,4

Japon araştırmacı Sato (1995), buraj yapılmış hattın tren geçişleriyle oluşan tekrarlı yük altında oturduğunu belirtmiş aşağıdaki eşitliği önermiştir:

$$y = \gamma(1 - e^{-\alpha x}) + \beta \quad (14)$$

Burada, y oturma, x yük tekrar sayısını veya hat tarafından taşınan tonaj değeri  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  ise sabit değerlerdir. Eşitliğin ilk kısmı burajdan sonra balast parçalarının konsolide olmasından dolayı oluşan hızlı başlangıç oturmasını temsil ederken ikinci kısmı ise başlangıç oturmasından sonra traversler altındaki balast parçalarının yanal hareketlerinden dolayı oluşan lineer oturmayı temsil etmektedir (Sato,1995).

Bu formülü kullanarak farklı büyüklüklerde yükleme döngüleri arasında ayırım yapılamamaktadır. Bu nedenden dolayı bu formül aynı döngü sayısındaki farklı büyüklükteki yükler için aynı oturmayı vermektedir. Eşitlik 1'deki  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  sabitleri kısa vadeli ve uzun vadeli oturma davranışını gösteren parametrelerdir. Eşitliğin ilk kısmı  $\gamma(1-e^{-\alpha x})$  burajdan hemen sonra meydana gelen kısa vadeli oturmayı temsil etmektedir. Faktör  $\gamma$  oturmanın büyüklüğünü gösterirken faktör  $\alpha$  oturmanın başlangıç kısmının nasıl azaldığını gösterir. Eşitlik 1' de uzun vadeli oturma ise  $\beta x$  terimi ile ifade edilmiştir. Görüleceği gibi bu aşamada oturma x yüklemesi ile doğru orantılı olarak meydana gelmektedir. Oturmanın büyüklüğü ise  $\beta$  parametresine bağlıdır. Verilen x yüklemesi için yol oturmasını düşük değerde tutmak için  $\beta$  parametresi küçük değerde olmalıdır. Bundan dolayı hangi faktörlerin  $\beta$  parametresi üzerine etkisi olduğunu bilmek bu modelde önemli bir yer teşkil etmektedir (Dahlberg, T., 2001).

Sato modelinde  $\beta$  katsayısı balast parçacıklarının yanal hareketini temsil etmektedir ve araştırmacı bu katsayı için aşağıdaki önerilerde bulunmuştur.

1. Kırılmış taşların,  $\beta$  değeri çakılların  $\beta$  değerinin 1/6-1/7'si kadardır.
2.  $\beta$  tekrarlı yükün hızının karesi ile doğru orantılı olarak artar.
3. Balastın toprakla kirlenmesi oturmayı kuruyken iyi yönde etkilerken ışlakken oturmanın daha da kötü bir hal almasına neden olmaktadır.
4.  $\beta$  travers basıncı ile doğru orantılıdır.
5.  $\beta$  balastın düşey hızlanması ile doğru orantılıdır (Sato,1995).

Sato (1995) aynı zamanda iki yıllık hat geometrisi ölçüm verilerine dayanan 100 gün içinde yol bozulmasının büyümesi ile ilgili bir model önermiştir. Bu model 5 faktörü dikkate almaktadır ve aşağıdaki gibidir.

$$S = 2.09x10^{-3}T^{0.31}V^{0.98}M^{1.10}L^{0.21}P^{0.26} \quad (15)$$

Burada;  $S$  dikkate alınan hat kesiminde yol bozulmasının büyümesi (mm/100gün),  $T$  geçen tonaj (milyon ton/yıl),  $V$  ortalama işletme hızı (km/st),  $M$  yapı faktörü,  $L$  ray bağlantı faktörü (contalı ray için "10" ve uzun kaynaklı raylar için "1"),  $P$  altyapı etki faktörü (iyi "1", kötü "10") olarak sıralanmıştır. Yapı faktörü aşağıdaki eşitlikle elde edilir:

$$M = \frac{P_b\sqrt{k_1}}{\sqrt{mEIK}} \quad (16)$$

Bu eşitlikte ise;  $P_b$  maksimum travers basıncı,  $k_1$  ray pedi sertliği,  $m$  traversin etkin kütlesini içeren orta kütle,  $EI$  rayın eğilme rijitliği,  $K$  araç faktörüdür (araç tipine göre). Ve araç faktörü ise aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanır

$$K = \frac{1}{1-\xi\eta} \quad (17)$$

$\xi$ = Süspansiyon karakteristiklerini ifade eden sabit (Yük arabaları için "0.5", düzgün elektrikli araç için "0.9")

$$\eta = \frac{M}{m} \quad (18)$$

$M$  yaylanmayan kütle ve  $m$  yaylanan kütle, şeklinde verilerek yol bozulması tahmin edilmeye çalışılmıştır (Sato,1995).

Bu modelde açıkça görüldüğü gibi yol bozulması direkt olarak ortalama hız  $V$  ile doğru orantılı ve hattan geçen tonaj  $T$ 'nin üçüncü kökü ile orantılıdır. Yapı faktörü  $M$  yarı-statik balast basıncı, ray hızlanması ve ray özelliklerine bağlı darbe faktörü ile doğru orantılıdır. Ölçümlerden elde edilen bazı sonuçlara göre kötü taban zemini üzerindeki kötüleşme iyi taban zemini üzerindeki nazaran 2 kat fazla olmakta ve 60 kg/m'lik raylardaki bozulma 50 kg/m'lik raylardaki bozulmanın %70'ine denk gelmektedir.

### 3.3. Hat Geometrisini Dikkate Alan Modeller

Bing ve Gross (1983) çalışmalarında yol bozulması için yaptıkları 460 gözlem sonucunda 15 önemli nedensel faktör tanımlamışlar ve bir çoklu regresyon modeli önermişlerdir. Bu yaklaşımda yol geometrisi kalite indeksi (TQI) ana bozulma kriteri olarak tanımlanmıştır. Sonuçta ortaya çıkan model, yolun geçerli olan geometrik şartlarını, hız, rayların yaşı, balast indeksi ve son bakım çalışmasının üstünden

geçen zamanı kapsamaktadır. Bu çalışmada tüm yol yatağı şartları balast malzemesinin agrega indeksinden türetilen balast indeksi ile belirtilmiştir. Agrega indeksi ise malzemenin "Los Angeles Aşınma" ve "Değirmen Aşınma" testleri sonucunda hesaplanmış bir değerdir. Balast indeksi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$BI = AI(BC + 1)^{1/3} + DF \quad (19)$$

Burada;  $BI$  balast indeksi (çok iyi "40", çok zayıf "120"),  $AI$  agrega indeksi (granit için "40", kireçtaşı için "65"),  $BC$  balast şartları (Çok iyi "0", Kötü "3"),  $DF$  drenaj faktörüdür (iyi "10", kötü "20").

Ve yapılan ölçümlerden faydalanarak aşağıdaki çok regresyon modeli oluşturulmuştur:

$$TQI_2/TQI_1 = 1.25 \left( \frac{TQI_1}{TQI_1'} \right)^{-0.58} \left( \frac{V_E}{V_E^*} \right)^{-0.18} \left( \frac{RA}{RA^*} \right)^{-0.11} \left( \frac{BI}{BI^*} \right)^{1.04} (1 + FS)^{-0.44} \quad (20)$$

Burada;  $TQI_1$  başlangıç yol kalite indeksi (inç),  $TQI_2$  son durumda yol kalite indeksi (inç),  $V_E$  eşdeğer tren hızı (km/st),  $BI$  balast indeksi,  $RA$  ray yaşı,  $FS$  cilalanmış yol kesimi oranı,  $V_E^*$  ve  $RA^*$  her iki parametre için seçilen keyfi değerlerdir (Sadeghi, 2010).

### 3.4. Demiryolu Trafiğinin Etkilerini Dikkate Alan Modeller

Uluslararası Demiryolu Birliği'nin(UIC) Araştırma ve Deneyim Ofisi (ORE) Avrupa genelinde yıllarca süren çalışmalar sonunda yol bozulmasını ( $e$ ) tahmin etmek için model önerisinde bulunmuştur (Hecke, A.,1998). Bu modele göre yol bozulması iki kısımda meydana gelmektedir. Modelin ilk kısmı burajdan sonra meydana gelen bozulmayı ( $e_0$ ) ve ikinci kısmı da trafik hacmi  $T$ , dinamik dingil yükü  $2Q$  ve hıza  $V$  bağlı olarak meydana gelen bozulmayı göstermektedir. Buna göre;

$$e = e_0 + hT^\alpha(2Q)^\beta V^\gamma \quad (21)$$

Burada  $h$  sabit ve parametreler  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  gözlemsel veriden elde edilen değerlerdir. ORE  $\alpha=1$  ve  $\beta=3$  olarak önermektedir. Bu modelde hızın etkisi ihmal edilebilir. Ayrıca bu model hiçbir yol parametresini göz önüne almamaktadır.

### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada dünya genelinde en çok kullanılan demiryolu hat bozulma modelleri incelenmiştir. Bu incelemenin ana amacı ise var olan hat bozulması modellerinden yola çıkarak demiryollarında hat oturmasına neden olan parametreleri belirlemektir. Buna göre matematiksel modeller dikkate alınarak hat oturmasına etki eden parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Matematiksel modele göre hat oturmasına etki eden parametreler

Matematiksel Modeli Geliştiren	Hat Oturması Parametresi
Dietrich (1977)	Yükleme döngüsü
Holzlohner (1978)	Yükleme döngüsü
Henn(1978)	Yükleme döngüsü
Alva-Hurtado ve Selig (1981)	Yükleme döngüsü
Bing ve Gross (1983)	Yol geometrisi kalite indeksi, balast özellikleri, ray özellikleri, işletme hızı, drenajın etkileri
Demharter (1982)	Yükleme döngüsü
Hettler (1984)	Yükleme döngüsü
Shenton (1984)	Travers zellikleri, balast özellikleri, balast ve taban zemini Şartları, buraj makinesi ile yapılan yükseltme, eşdeğer dingil yükü, yükleme döngüsü
Chrismer (1994)	Balast zellikleri, altbalast özellikleri, taban zemini özellikleri, yükleme döngüsü
Sato (1995) 1	Yükleme döngüsü, balast özellikleri, travers basıncı
Sato (1995) 2	Trafik miktarı, ortalama işletme hızı, üstyapının etkisi, ray bağlantısının tipi, altyapının etkisi, araç tipi
Guérin (1996)	Yükleme döngüsü ve malzeme parametreleri
Hecke (1998)	Trafik hacmi, dingil yükü, işletme hızı

Tablo 2'ye göre bütün modellerin hat oturmasında ana etken olarak yükleme döngüsü göz önüne aldığı açıkça görülmektedir. Burada yükleme döngüsü tren trafığını temsil etmektedir. Diğer bir önemli nokta ise genel olarak hat oturması modellerinin oturmayı iki aşamaya ayırıp incelemiş olmalarıdır. ilk aşamada hızlı oturmalar meydana gelmektedir. Bu aşamadaki oturmalar yapılan bakım çalışmalarına, yol alt ve üst yapısındaki malzemelerini kalitesine, ilk oturmaya neden olan yükün büyüklüğüne, yol kesiminin zemin özelliklerine, çevresel nedenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. İlk aşamadaki oturmanın büyüklüğü yolun yeniden yapım veya bakım çalışmaları sonrasında yapılan sıkıştırılmasına büyük oranda bağlıdır. Sıkıştırmanın amacı balast malzemeleri arasındaki boşlukları ortadan kaldırmak ve hattı kararlı bir konuma getirmektir. Bundan dolayı yapım ve bakım sonrası yapılan hat stabilizasyon çalışmaları, demiryolu hatlarının oturma miktarı üzerinde etken bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

İlk oturma aşaması, hatta lineer olarak kararlı bir şekilde oturmanın başladığı ikinci aşamaya kadar

devam eder. İkinci aşamada demiryolu hattında meydana gelen oturmalar ağırlıklı olarak balast tabakasındaki malzemelerin yük altında aşınarak boyutlarının küçülmesiyle, balast malzemesinin yer değiştirmesiyle, taban zemininde tekrarlı yük altında oturmaların oluşmasıyla, kirlenme etkisiyle balastın kendisinden beklenen işlevi yerine getirememesiyle oluşur. Balastın kirlenmesinin balast tabakasının özellikleri üzerine olan etkisinde en önemli faktör olarak iklim koşulları çıkmaktadır. Çünkü bu konuda yapılan araştırmalara göre kirlenmiş balast tabakasının yük altındaki davranışında önemli olan bu tabakanın o anda sahip olduğu su muhtevasıdır. Su içeren kirli balast tabakası ile kirli fakat kuru olan bir balast tabakasının özellikleri karşılaştırıldığında kuru olan tabakanın daha iyi mühendislik özellikler gösterdiği, su içeren kirli balast tabakasının yük altında daha fazla oturma yaptığı gözlenmiştir.

### Conflict of Interest / çıkar atışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar atışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynaklar

- Alva-Hurtado, J. E. and Selig, E. T., 1981. Permanent Strain Behavior of Railroad Ballast. In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 543-546 (A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands).
- Arlı, V., 2015. Demiryolu Mhensiliği, Birsen Yayınevi, 444 s, İstanbul
- Bing, A.J. and Gross, A., 1983. Development of Railway Track Degradation Models, Transportation Research Record, 939, 27-31.
- Chrismer, S. M., 1994. Mechanics-based Model to Predict Ballast-Related Maintenance Timing and Costs, University of Massachusetts, Doktora Tezi, 227, Massachusetts, Amherst.
- Dahlberg, T., 2001. Some Railroad Settlement Models- A Critical Review, Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol 215, Part F, 289-299
- Demharter, K., 1982. Setzungsverhalten des Gleisrostes unter vertikaler Lasteinwirkung. Mitteilungen des Prfamttes fr Bau von Landverkehrswegen, Technischen Universitat München, Part 36.
- Dietrich, T., 1977. Experimental Study of Flexible Piles in Sand Displaced at Low Frequency. In Proceedings of International Symposium on Testing in situ of Concrete Structures, Budapest, pp. 233-244 (RILEM).
- Ektaş, M., 2002. Anadolu Üniversitesi Porsuk Meslek Yksekokulu Raylı Sistemler Teknolojisi Blm

- Üstyapı Tekniği ve Bakımı Ders Notları. 114s., Eskişehir.
- Evren, 1998. Demiryolu. Birsen Yayınevi, 214s, İstanbul.
- Guérin, N., 1996. Approche expérimental et numérique du comportement du ballast des voies ferrées. PhD thesis, Ecole Nationale des Pont et Chaussées, Paris.
- Hecke, A. , 1998. Effects of Future Mixed Traffic on Track Deterioration. Report TRITA-FKT 1998:30, Railway Technology, Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Henn, W. , 1978. Auswirkung von Oberbauform und Betriebsbelastung auf die Veränderung der Gleishöhhenlage. Mitteilungen des Prüffamtes für Bau von Landverkehrswegen, Technischen Universitaıt Muınchen, Part 30.
- Hettler, A., 1984. Bleibende Setzungen des Schotteroberbaus. Eisenbahn-technische Rundschau (ETR), 33(11), 847-853.
- Holzłöhner, U., 1978. Bleibende Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last. Die Bautechnik, 5, 150-158.
- Li, D. and Selig, E. T. , 1995. Evaluation of Railway Subgrade Problems. Transpn Res. Record, TRB, 1489, 17-25.
- Sadeghi, J., 2010. Development of Railway Track Geometry Indexes Based on Statistical Distribution of Geometry Data, Journal of Transportation Engineering, ASCE, August 2010, 693-700.
- Sato, Y., 1995. Japanese Studies on Deterioration of Ballasted Track. Veh. System Dynamics, 24(Suppl.), 197-208.
- Selig, E.,T., Waters, J.M., 1994. Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford, 449s, Derby
- Shenton, M. J., 1985. Ballast Deformation and track Deterioration. In Proceedings of a Conference on Track Technology, University of Nottingham, 11-13 July 1984, pp. 253-265 (Thomas Telford Limited, London).