



BİR DEMİRYOLU HATTININ BİRİM ESNEME DİRENCİ ÜZERİNDE ETKİSİ OLAN MEKANİK VE GEOMETRİK NİTELİKLERİN İNCELENMESİ

Erdem BALCI^{1*}, Ertan YALÇIN², Tunay Uzbay YELCE², Niyazi Özgür BEZGİN²

¹ Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Zonguldak, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Hat Esneme Direnci,
Hat Modülü,
Yatak Modülü,
Hat Üstyapısı,
Araç-Hat Etkileşimi.*

Öz

Bir demiryolu hattının esneme direnci, hat tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametrelerden biridir. Bu değer optimum değerinden düşük olması hattaki oturmaları artırırken, yüksek olması zaman içerisinde hat elemanlarında yıpranmalara neden olur. Bununla birlikte, hat esneme direncinin hat boyunca değişmesiyle dinamik darbe kuvvetleri artarak hattın bozulma sürecini hızlandırır. Hat esneme direnci; hattı oluşturan malzeme özelliklerine, zemin tabakasındaki yerel farklılıklara, hattaki bazı özel durumlara ve hat bileşenlerinin geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Aynı zamanda araç-hat etkileşimi de hattın teker kuvvetine karşı gösterdiği tepkiyi etkilemektedir. Bu çalışma, demiryolu hat tasarımlarında esas alınacak olan hat esneme direncini tartışan temel bir kaynak olmayı hedeflemektedir. Bu anlamda yapı-zemin etkileşimini inceleyerek, taşıyıcı zeminin yanı sıra hat üstyapısına ait mekanik ve geometrik özelliklerin, hat ve zeminin bir bütün olarak düşey yükler altındaki tepkisini etkilediğini elastisite teorisine dayalı modeller üzerinden göstermektedir. Daha sonra, araç-hat etkileşimi ele alınmış ve hatta ait tüm parametreler aynı kalsa dahi sadece dingil mesafesindeki değişim nedeniyle hat tepkisinin değiştiği gösterilmiştir. Son olarak, hatta ait mekanik ve geometrik niteliklerin eşdeğer hat esneme direnci üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND GEOMETRIC PROPERTIES AFFECTING THE RAILWAY TRACK STIFFNESS

Keywords

*Track Stiffness,
Track Modulus,
Subgrade Reaction,
Track Superstructure,
Train-Track Interaction.*

Abstract

Track stiffness is one of the most important parameters to be considered in track design. While track stiffness is lower than an optimum value, excessive track displacement occurs, and while it is higher than the optimum, it can cause the deterioration of the track and the components of the track in time. Variation of the track stiffness can increase dynamic impact forces and thus, accelerates the track deterioration. Track stiffness depends on the material properties that constitute track, the local differences in the soil layer, some special conditions, and the geometry of the track components. Also, the track-train interaction affects the reaction of the track against the wheel force. This study aims to be a fundamental resource discussing the track stiffness that will be taken as a basis in railway track design. In this sense, the study shows that the mechanical and geometric properties of the track superstructure affect the common response of the track and soil under the wheel forces by examining soil-structure interaction through elasticity theory-based models. Later, the train-track interaction is discussed and it is shown that even if all parameters of the track remain the same, the track response can change with the axle spacing. Finally, the effects of the mechanical and geometric properties of the track on the equivalent track stiffness are explained.

Alıntı / Cite

Balci, E., Yalçın E., Yelce, T.U., Bezgin, N.Ö., (2021). Bir Demiryolu Hattının Birim Esneme Direnci Üzerinde Etkisi Olan Mekanik ve Geometrik Niteliklerin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(4), 1408-1423.

* İlgili yazar / Corresponding author: erdembalci@outlook.com, +90-531-202-7692

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
E. Balcı, 0000-0003-1759-1946	Başvuru Tarihi / Submission Date	29.05.2021
E. Yalçın, 0000-0001-5925-3131	Revizyon Tarihi / Revision Date	05.08.2021
T.U. Yelce, 0000-0001-9965-4271	Kabul Tarihi / Accepted Date	06.08.2021
N.Ö. Bezgın, 0000-0002-6518-0378	Yayın Tarihi / Published Date	20.12.2021

1. Giriş (Introduction)

Bir demiryolu hattında raylar, zemin üzerinde yer alan üstyapı tarafından taşınır. Tren tarafından raya etkileyen düşey teker kuvvetleri önce traverslere, daha sonra balast, altbalast ve nihayetinde zemin tabakasına kadar aktarılır. Bu nedenle hat üstyapısı ve taşıyıcı zemin bir etkileşim halindedir ve üzerlerine etki eden statik ve dinamik yüklere karşı birlikte tepki gösterirler (Kuasel, 2010). Yapı ile zemin arasındaki ilişkiyi açıklamak için çeşitli teoriler geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi, yapı-zemin ikilisi arasındaki bağıntıyı nispeten daha basit bir şekilde ifade edebilen ve taşıyıcı elemanların statik tepkisini anlamak için günümüzde hala büyük bir pratiklik sağlayan Winkler Modeli'dir. Özünde, "esnek taşıyıcı zemin tarafından desteklenmiş kiriş" yaklaşımını içeren modelde taşıyıcı elemanlar yaylarla temsil edilmiş ve ortak deformasyon davranışını anlamak için "yatak modülü" kavramı tanıtılmıştır. Bu modül, zeminin deformasyon karakterine bağlı olduğu gibi yükleme koşullarına ve yüklenen alana bağlı olarak da değişmektedir. Demiryolu mühendisliğindeki karşılığı ise "hat modülü" dür. Demiryolu hatlarında Winkler modelinin demiryolu hatlarına uygulanmasının mümkün olduğu, Arthur Newell Talbot'un 1914' te başlattığı ve önderlik ettiği grubun çalışmaları ile gösterilmiştir. Hat üstyapısının en son bileşeni olan raylar ile rayları destekleyen diğer üst yapı unsurları ile altyapı unsurlarının oluşturduğu yapı-zemin birlikteliğinin, "esnek altyapı üzerinde yer alan kiriş yaklaşımı" ile tasvir edilebilmiştir. Bu tasvir sonucu türetilen "hat esneme direnci" ray rijitliğini ve hat modülünü içeren ve hattın, üzerinde bir noktaya uygulanan yük altında göstereceği sehim değerini tahmin etmemize yardımcı olan bir değerdir.

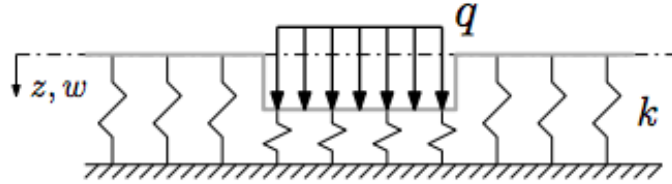
Hat esneme direncinin hat boyunca değişiklik göstermesinin yanı sıra belirli bir optimum değerden çok düşük veya çok yüksek olması, hat performansında azalmaya ve ilerleyen boyutlarda güvenliği tehdit edebilecek durumlara yol açabilir. Hat esneme direnci; hattaki deformasyonları, basıncı, dinamik darbe kuvvetlerini, enerji ve yük dağıtımını, momentleri ve kesme kuvvetlerini etkileyen bir parametredir. Hat üstyapısında bulunan malzeme özellikleri, elemanlardaki yorulmalar, balast koşulları (Berggren, 2009) hat tipi (Michas, 2012), zemindeki yerel değişimler (Wehbi vd., 2013), ped kullanımı (Witt, 2008) ve asılı traversler (Lundqvist, 2005) gibi durumlar hattın esneme direnci üzerinde etkilidir. Bunun yanı sıra, ray bitiş noktaları (Zhu vd., 2017) ve makaslar (Xu vd., 2016) gibi ray üst noktasında geometrik değişimlerin yaşandığı yerler de hat esneme direncinin değişmesine neden olur. Bunun yanı sıra, hat esneme direnci sadece hat üstyapısı ile zemine ait ortak mekanik ve geometrik özelliklerin bir sonucu değil, aynı zamanda hat üzerinden geçen araç ile hattın etkileşiminin de bir sonucudur. Tüm hat ve zemin parametreleri aynı olsa dahi, tren bojisindeki tekerler arasındaki dingil mesafesi değiştiğinde bojinin deneyimlediği hat esneme direnci değişir. Yapı-zemin etkileşimine hat-arac etkileşiminin de dahil edilmesiyle hat tepkisini temsil etmek için "etkin hat esneme direnci" kavramı ortaya konmuştur (Balcı, Bezgın ve Wehbi, 2021).

Bu çalışmada önce yapı-zemin etkileşimi açıklanarak taşıyıcı zemin üzerinde yer alan bir yapıya etki eden yüklerin taşınmasında sadece zemin parametrelerinin değil, aynı zamanda üstyapıya ait mekanik ve geometrik niteliklerin de etkili olduğu gösterilmiştir. Daha sonra, demiryolu hatlarının analizi için kullanılan modeller, hat modülü ve hat esneme direnci kavramları açıklanmıştır. Bunun yanı sıra, yapı-zemin etkileşimine ek olarak araç-hat etkileşiminin de hat tasarımına dahil edilmesini sağlayan "etkin esneme direnci" kavramına yer verilmiştir. Son olarak, hat esneme direncine etki eden zemin ve hatta ait geometrik ve mekanik parametreler incelenmiştir.

2. Yapı-Zemin Etkileşimi (Soil-Structure Interaction)

Yapı ile zeminin iç içe bulunduğu derin temeller veya yapının doğrudan zemin üzerinde yer aldığı karayolu ve demiryolu hatları gibi uygulamalarda, yapı ve zemin yüklere karşı ortak bir etkileşim içerisinde tepki verir. Bir diğer deyişle, yüke karşı tepkileri birbirine bağlıdır ve mekanik ve geometrik özellikleri de bu tepkiye etkiler. Yapı-zemin etkileşimine ait ortak deformasyon karakteri, malzeme üzerindeki gerilme ve birim şekil değiştirme arasındaki oranı gösteren elastisite modülüne benzer bir şekilde "yatak modülü" kavramıyla ifade edilebilir. Bu kavram ilk olarak zeminin, birbirine çok yakın konumlandırılmış, ayrık, bağımsız, elastik ve lineer yaylarla idealize edildiği Winkler (1867) modeli ile tanıtılmıştır. Yatak modülü, son derece önemli bir yapı-zemin etkileşim değeridir. Her ne kadar, altyapıya yük aktaran üst yapı rijitliğinden bağımsız bir değer olarak düşünülse de özünde, üst yapı rijitliği ile birlikte etkileşim içinde bulunarak ortaya çıkan bir altyapı tepki değeridir. Bir başka deyişle, aynı zemin üzerine serili farklı eğilme rijitlik değerlerine sahip üst yapı kirişlerinin etkisi altında, altyapının "yatak modülü" değerleri de farklı olacaktır.

Düsey ve yatay zemin tepkisi için geliştirilen teoriler, zeminin tamamen elastik olduğunu ve dolayısıyla Hooke yasasına göre davrandığını kabul etmiştir. Winkler teorisine (Winkler, 1867; Winkler, 1875) göre, zemin yüzeyi üzerinde yer alan merkezi yüklenmiş rijit bir plaka tabanındaki yatak modülü, tabana ait her noktada sabittir. Buna göre, zeminin herhangi bir noktasına etki eden basınç (p) ile o noktada meydana gelen deformasyon (w) doğrudan orantılıdır ve bu oran yatak modülünü (n_v) verir. Modelin kısıtlı yönü ise deformasyonun sadece yüklü alan altında meydana geldiğini, yüklü alan dışında deformasyon olmadığını ve yüklenen alanın her yerinde eşit deformasyon olduğunu varsaymasıdır. Ayrıca zemini temsil eden yaylar lineerdir. Gerçekte ise zemin, düşeyde doğrusal olmayan bir şekilde değişebilmektedir. Bu teorideki varsayım gerçekte tamamen doğru olmasa da yapı-zemin etkileşiminin anlaşılabilmesi için sade bir çözüm sunar. Mütemedi veya kazıklı temellerdeki gerilmelerin pratik bir şekilde hesaplanması açısından yaklaşık bir sonuç sunabilir. Daha gerçekçi sonuçlar için yatak modülü, zeminin deformasyon davranışına göre belirlenmelidir.

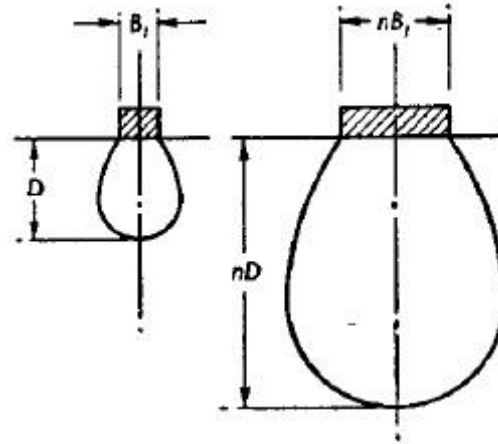


Şekil 1. Zeminin Winkler Modeli ile temsili (Representation of the soil with the Winkler Model) (Skar vd., 2019)

$$n_v = -\frac{p(x)}{w(x)} \quad (1)$$

Denklem 1’de belirtilen yatak modülü, taşıyıcı katmanların birim esneme direncinin, taşıyıcı katmanlar tarafından desteklenen yapı üzerindeki kısmi etkisinin bir ölçüsüdür. Bir zemine ait yatak modülü, sahada yapılan plaka yükleme deneyiyle belirlenir. Bu durumda yatak modülü; plaka boyutlarına, plaka şekline, plakanın gömülü derinliğine ve yükleme koşullarına bağlı olarak elde edilir. Plaka yükleme deneyinin kısıtlaması, oldukça sığ bir alandaki zemin etkilerini ölçebilmesidir. Bu nedenle bu yöntem homojen zeminler için iyi sonuç verebilirken belirli bir derinlikte yer alabilecek olası bir zayıf zemin tabakasının etkileri bu deney modeliyle görülemez. Ayrıca bu yöntem ile plakanın temsil edeceği geometride ve rijitlikte üst yapı unsurları için yatak modülü tahmin edilebilmektedir.

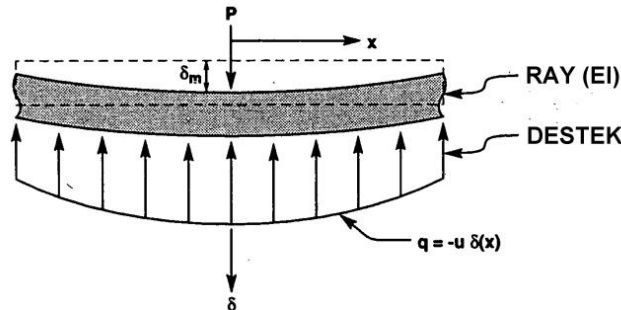
Bir yapı-zemin etkileşimi örneği olan demiryolu hatlarının tasarımı için de taşıyıcı granüler tabakalar ile hat üst yapısı arasındaki etkileşimin iyi analiz edilmesi gerekir. Demiryolu hattında trenin aktardığı yükler, plaka deneyine oranla çok daha derin zemin tabakalarına kadar yayılabilmektedir. Aynı zemin koşullarına sahip iki hat üzerinde eşit eğilme direncine sahip fakat farklı boyutlarda olan iki plaka kullanılarak plaka yükleme deneyi yapıldığını varsayalım. Bu iki plakaya etkileyen yükün kapsayabildiği basınç alanı; taşıyıcı katmandaki normal düşey gerilmelerin, yükün etki ettiği yüzeydeki normal basıncın dörtte birinden daha fazla olduğu alan olarak tanımlanır. Kabul edilebilir derecede homojen bir taşıyıcı zemin üzerinde yer alan yüklü plakanın neden olduğu oturumların büyük bir kısmı, bu basınç alanındaki zeminde meydana gelen basınç ve deformasyon nedeniyledir. Aynı zemin koşullarına sahip iki hat üzerinde yer alan iki eşdeğer plakaya etki eden basınçlar eşit dahi olsa, alanı büyük olan plaka altındaki gerilmeler daha derin katmanlara ulaşabilir. Şekil 2’de, genişliği “B” olan dar bir plaka ile “n” kat daha geniş bir plaka altında oluşan basınç alanları gösterilmiştir. Dar plaka altındaki basınç alanının derinliği “D” kadarken, geniş plaka altındaki basınç “n.D” derinliğine ulaşabilmektedir. Daha büyük taşıma alanına sahip olan plaka altında, bu gerilim alanındaki artış nedeniyle daha fazla deformasyon gerçekleşir. Her iki plaka üzerindeki basınç eşit olmasına rağmen yükleme alanındaki farklılık nedeniyle deformasyonlar farklıdır. Dolayısıyla bu iki plaka ile yapılan deneylerde elde edilen yatak modülü değerleri de farklıdır. Diğer yandan, bu iki planın boyutları aynı kalsa ancak mekanik özellikleri farklı olsa, yine elde edilen yatak modülü değerleri farklı olabilir. Aynı zemin üzerinde yer alan eşit alanlı iki plaka olduğunu varsayalım. Bunlardan bir tanesinin düşey esneme direnci değeri diğerine göre daha yüksek olsun. Bu durumda, esneme direnci fazla olan plaka üzerine gelen gerilmeler daha küçük bir alana odaklı bir şekilde dağıtılırken, düşük esneme direncine sahip olan plaka altındaki gerilmeler daha uniform bir şekilde dağıtılır. Bu nedenle, zemin tarafından desteklenen bir yapıdan aktarılan gerilmelerin genişliği ve derinliği yalnızca zemin tabakasının mekanik özelliklerine bağlı değil, aynı zamanda zeminin desteklediği üst yapı tabakasının geometrik ve mekanik niteliklerine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2. Farklı alanlara sahip iki plaka altındaki basınç alanları
(Pressure areas under two plates with different base areas) (Terzaghi, 1955)

3. Hat Modülü (Track Modulus)

Demiryolu hatlarının analizi için, Winkler'in elastisite ve dayanım teorisini esas alan ve rayların sürekli destekli kirişler olarak varsayan bir model Zimmermann (1888) tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde raylar, belirli aralıklarla traversler tarafından kısıtlanan birbirine paralel iki sürekli kiriş olarak modellenmiştir. Demiryolu hattında taşınan eleman raylar, taşıyıcı elemanlar ise rayın bağlı olduğu traversler veya beton döşeme ve bu iki taşıyıcı eleman altında yer alan taşıyıcı tabakalardır. Hetenyi, "Beam on Elastic Foundations" adlı kitabında düşey tekerlek yükleri altındaki hat tepkisini temsil etmek amacıyla çeşitli sınır koşullar için teorik denklemler geliştirmiştir. Bu modelde hat, iki boyutlu bir yapı olarak temsil edilmektedir. Hattın tamamı, iki ray üzerinde yer alan bir bojiye bağlı iki tekerin yükünü taşımaktadır. Bu nedenle bir ray üzerindeki yük, hat genişliğinin yarısı tarafından taşınır. Modelin yatay uzunluğu, tekerlek yükleri altındaki yarı hat genişliği boyunca birim uzunluk başına düşen düşey hat tepkisini ifade eder. Düşey derinlik teker yükü altında hatta oluşan deformasyon, moment, basınç ve kesme gibi tepkileri göstermektedir. Şekil 3'te gösterilen zemin üzerindeki plaka betimlemesi, hattın yarısı tarafından taşınan tek bir rayı göstermek için kullanılabilir.

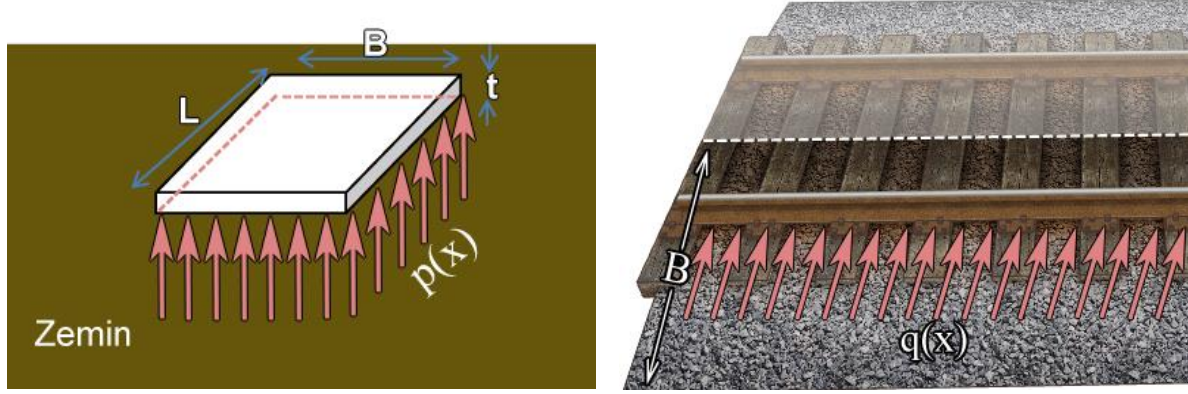


Şekil 3. Taşıyıcı zemin üzerinde yer alan ve konsantre bir düşey yük altındaki dikdörtgen plaka
(Rectangle plate on the supporting floor that is under a concentrated vertical load) (Selig vd., 1994)

Denklem 1 ile formülü verilen yatak katsayısı, "L" uzunluğunda ve "B" genişliğindeki bir plakaya "Q" yükü etki ettiğinde oluşan $q(x)$ basıncı ile, yüklenen alan altındaki deformasyonun oranıdır. Bu değer, taşıyıcı elemanların birim esneme direncini temsil eden bir ölçüdür. Birimi kuvvet/uzunluk³ şeklindedir. Diğer yandan, demiryolu hatlarında taşıyıcı elemanların birim esneme direncini temsil etmek için kullanılan temel mekanik parametre hat modülüdür. Denklem 2'de "q", plaka yükleme deneyinde kullanılan dikdörtgen plakanın birim uzunluğu başına düşen kuvvet ve "y", bu kuvvet altında meydana gelen deformasyon olmak üzere hat modülünün (u) formülü verilmiştir. Hat modülünün birimi kuvvet/uzunluk²'dir. Tek bir raya etki eden birim kuvvet, plaka yükleme deneyinde zemine aktarılan basınç (p) ile hat genişliğinin yarısının (B) çarpımıyla bulunabilir. Şekil 4(a)'da bir plaka yükleme deneyinde ve Şekil 4(b)'de bir demiryolu hattında yükleme altında oluşan "p" ve "q" gerilmeleri gösterilmiştir.

$$u = -\frac{q(x)}{y(x)} = -\frac{p(x) \cdot B}{y(x)} \quad (2)$$

$$u = n_v \cdot B \quad (3)$$



Şekil 4. a) Plaka yükleme deneyinde ve b) demiryolu hattında yükleme altında oluşan gerilmelerin gösterimi
(Representation of stresses occurring in a) plate loading test and b) railway track under loading)

Birim uzunluk başına düşen kuvvet ile deformasyonlar arasındaki bağıntı sayesinde geri hesaplamalar yapılarak yapısal tepkiye ait diğer parametreler bulunabilir. Elastik eğilme teorisine göre eğilme momenti de aşağıdaki diferansiyel denklem ile ifade edilir.

$$M(x) = EI \frac{d^2y(x)}{dx^2} \quad (4)$$

Bir yapı boyunca etki eden kesme kuvvetleri, o yapıdaki eğilme momentlerinin değişimidir.

$$\frac{dM(x)}{dx} = V(x) \quad (5)$$

Bu nedenle kesme kuvveti şu şekilde ifade edilebilir:

$$V(x) = EI \frac{d^3y(x)}{dx^3} \quad (6)$$

Kesme kuvvetinin türevi ise birim uzunluk başına düşen kuvveti verir. Denklem 7, hattın eğilme rijitliği ve hat boyunca meydana gelen deformasyon değişiminin dördüncü dereceden türevi ile hat modülünü ilişkilendirmektedir.

$$\frac{dV(x)}{dx} = q(x) = -u \cdot y(x) \quad (7)$$

Bu bakımdan hat modülü, rayı destekleyen taşıyıcı elemanların esneme direncinin bir temsilidir.

4. Hat Esneme Direnci (Track Stiffness)

Hat modülü ve hat esneme direnci parametreleri, hat performansı üzerinde etkilidir. Çünkü hat üzerinden araç geçişi sırasında meydana gelen basınç, deformasyon, moment, kesme ve gerilmeler hattın esneme direnci ile yakından ilgilidir. Ayrıca dinamik darbe kuvvetlerinin şiddetinde (Bezgin, 2017) ve teker yüklerinin hatta aktarılış biçimi üzerinde de etkili bir parametredir. Hat esneme direnci deformasyonların büyüklüğünü belirlediği gibi, hat uzunluğu boyunca hat esneme direncinin değişiklik göstermesi durumunda farklı oturmalar da söz konusu hale gelir. Bölüm 6'da incelenecek olan mekanik niteliklerin hat uzunluğu boyunca değişkenlik göstermesi veya Bölüm 7'de yer alan geometrik düzensizliklerin varlığı hat esneme direncinde değişikliklere yol açabilir. Bunun yanı sıra hat esneme direnci değerinin çok düşük olması; raydaki eğilmenin artması, büyük deformasyonlar oluşması ve ani geometrik kayıplar gibi sorunlara neden olabilir. Hat esneme direncinin çok yüksek olması ise ray bağlantı elemanlarında hasar, ray yüzeyinde aşınma ve balast parçacıklarında kırılmalar gibi olumsuz etkiler doğurabilir (Berggren, 2009). Hat esneme direncinin önemi ve hattın performansı üzerindeki etkileri başka bir çalışmada daha detaylı bir şekilde incelenmiştir (Balcı ve Bezgin, 2020).

Hat modülü birim ray uzunluğu başına düşen kuvvetin birim deformasyona oranıyken, hat esneme direnci birim deformasyon başına düşen toplam hat direncini ifade eder. Hat esneme direnci, bir raya etki eden "Q" teker kuvvetinin, hatta meydana gelen maksimum deformasyona oranıdır. Maksimum deformasyon $y_{max}=y(0)$, teker kuvvetinin hemen altındaki $x=0$ noktasında meydana gelir.

$$k = \frac{Q}{y_{\max}} \quad (8)$$

Teker yükünün etki ettiği noktaya herhangi bir “x” mesafesinde meydana gelen deformasyonlar (y); teker yükü “Q”, hat modülü “u” ve karakteristik hat uzunluğu “L” nin tersi olan karakteristik bir parametre “β” cinsinden şu formül ile ifade edilebilir:

$$y(x) = \frac{Q\beta}{2u} \cdot e^{-\beta x} \cdot [\cos\beta x + \sin\beta x] \quad (9)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \quad (10)$$

Maksimum deformasyon x=0 noktasında meydana geleceğinden, Denklem 9 şu şekilde düzenlenebilir:

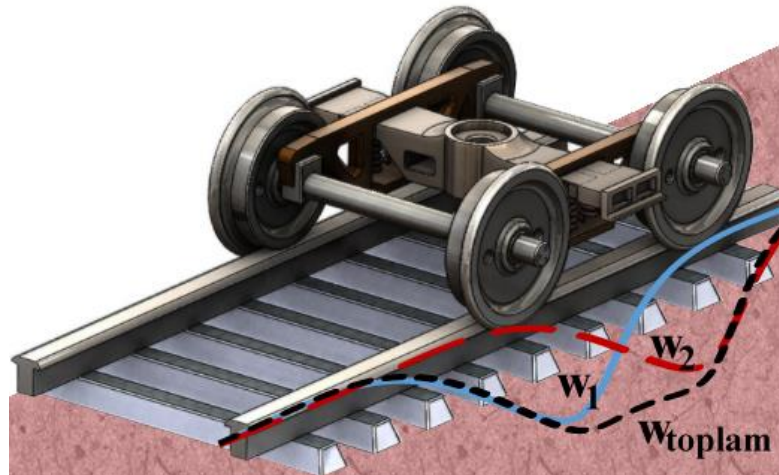
$$y(0) = y_{\max} = \frac{Q\beta}{2u} \quad (11)$$

Denklem 8 ve Denklem 11 bir araya getirildiğinde hatta ait esneme direnci (k) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$k = \frac{2u}{\beta} = \sqrt[4]{64 \cdot E \cdot I \cdot u^3} \quad (12)$$

5. Araç-Hat Etkileşimi ve Etkin Hat Esneme Direnci (Train-Track Interaction and Efficient Track Stiffness)

Hat esneme direnci sadece hat üstyapısına ve zemine ait mekanik özellikleri içeren bir zemin-yapı etkileşimi parametresi değil, aynı zamanda dingil mesafesine bağlı olarak hattın sınır koşullarındaki ve dolayısıyla hat tepkisindeki değişimi yansıtan bir hat-araç etkileşimi parametresidir. Bir önceki bölümde bahsedilen hat esneme direnci değeri, ray üzerinde “Q” yüküne sahip tek bir teker bulunduğu varsayılarak hesaplanmaktadır. Ancak günümüz trenlerinde, tekerlerin bir arada bulunduğu bojilerde iki veya üç dingil bir arada bulunabilmektedir. Ray üzerinde birbirine yakın bir konumda etki eden iki teker kuvvetinin hatta oluşturdukları deformasyon eğrileri birbiriyle kesişir. Bu durumda tek bir teker altında meydana gelen maksimum deformasyon değeri, komşu tekerin etkisi nedeniyle artar veya azalır. Komşu tekerlerin etkileşimi sonucunda ortaya çıkan yeni etkin hat tepkisini hesaplamak için “etkin esneme direnci (k*)” kavramı ortaya konmuştur (Balci, Bezgin ve Wehbi, 2021). İki tekere ait deformasyonların birbirleriyle ne derecede kesişeceği dingiller arasındaki mesafe ile ilgilidir. Şekil 5’te aynı bojiye bağlı iki dingil altında meydana gelen w₁ ve w₂ deformasyonlarının kesişimi sonucunda daha büyük bir w_{toplam} deformasyonunun meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5. Komşu tekerlere ait deformasyon eğrilerinin girişimi (Interference of deformation bowls of adjacent wheels)

Tek bir “Q” teker yükü altındaki hat esneme direncini ifade eden formül Denklem 8 ile verilmiştir. Eğer aynı boji içerisinde komşu tekerler birbirlerinden oldukça uzak bir mesafedeyse, tek bir teker altındaki maksimum deformasyon komşu tekere ait deformasyon eğrisinden etkilenmez. Bu durumda teker yükü “Q” ve meydana gelen maksimum deformasyon “w_{max}” olmak üzere, bir teker altındaki etkin hat esneme direnci k* = Q/w_{max} = k’dır. Boji içerisinde iki teker olduğundan, toplam teker yükü “2Q” ve boji altındaki maksimum deformasyon yine w_{max}’tır. Bu durumda boji tarafından deneyimlenen etkin hat esneme direnci 2Q / w_{max} = 2k* = 2k’dır. Diğer yandan, dingil mesafesinin 0 olduğu ve bu iki tekerin hat üzerinde aynı noktaya etki ettiği varsayılsaydı, bojideki toplam teker yükü “2Q” ancak maksimum deformasyon 2w_{max} kadardır. Bu durumda bojinin deneyimlediği etkin esneme

direnci $k^* = 2Q / 2w_{\max} = k'$ dir. Görüldüğü üzere, teker yükü de dahil olmak üzere hiçbir parametre değişmediği halde, sadece dingil mesafesinin değişmesi nedeniyle hattın tepkisi değişmektedir. Belirli bir dingil mesafesi, (tek teker altındaki) hat esneme direnci ve ray tipi için deneyimlenen etkin esneme direnci değeri Balcı-Bezgin Fonksiyonları ile elde edilebilmektedir (Balcı, Bezgin ve Wehbi, 2021).

6. Hat Esneme Direncine Etki Eden Mekanik Faktörler (Mechanical Factors Affecting the Track Stiffness)

Demiryolu yapıları uzun kilometreler boyunca inşa edilmiş bir ulaştırma yapısı olduğu için, hatta ait esneme direnci değeri çeşitli nedenlerle hat boyunca değişebilmektedir. Örneğin hattın üzerinden geçtiği zemin tabakalarındaki değişimler, zemindeki yerel boşluklar veya balast koşullarının değişmesi gibi unsurlar hat esneme direncini değiştirmektedir. Hattın balastlı veya balastsız olması, toprak destekli olması veya tünel içinden veya köprü üzerinden geçen bir hat olması gibi faktörler hattın eşdeğer birim direnci üzerinde etkilidir. Ayrıca, özellikle kurba geçişlerinde, yalıtım derzlerinde, traverslerin asılı olduğu yerlerde ve makaslarda birim esneme direnci çok hızlı değişebilir. Hat boyunca gerçekleşen bu değişimler, hatta aktarılan dinamik darbe kuvvetlerini artırır (Bezgin ve Wehbi, 2019). Hat esneme direnci değişimine neden olan mekanik özellikler bu bölümde incelenecektir.

6.1. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

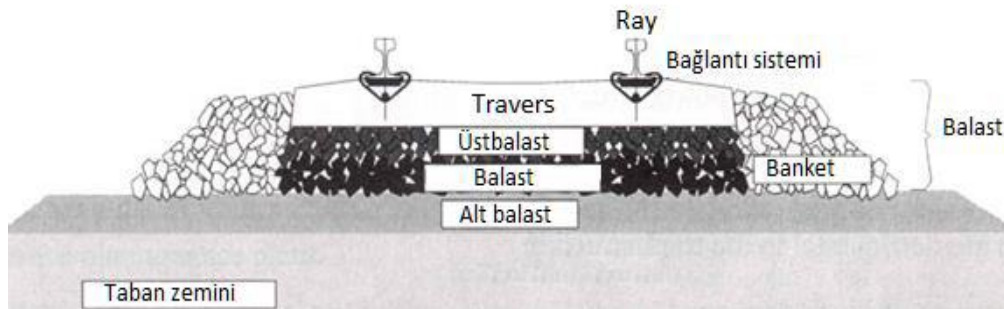
Balast yapımında kullanılan malzemelerin boyutunun ve sıkıştırılabilirlik oranının hattın esneme direnci üzerinde etkisi vardır. Poisson oranı yüklemeye yönüne zıt yöndeki deformasyonun yüklemeye yönündeki deformasyona oranının mutlak değeridir. Demiryolu yapımında kullanılan malzemelerin poisson oranı elastisite modülü üzerinde, dolayısıyla da o katmana ait esneme direnci değeri üzerinde etkilidir. Demiryolu hattında kullanılan malzemelerin poisson oranı mutlak değerleri küçüldükçe eşdeğer hat esneme direnci artar (Burrow vd., 2009).

6.2. Malzemelerin Tekrarlanan Yükler Altındaki Performansı (The Performance of Material Under the Repeated Loads)

Demiryolu yapımında kullanılan malzemelerin tekrarlı yükler altındaki dayanıklılığı ve yapacağı deformasyonlar hat esneme direnci üzerinde etkilidir. Demiryolu yapımında kullanılan malzemeler, kullanılmadan önce laboratuvar ortamında analitik bir tasarım sürecinden geçerek farklı sıcaklıklar altında uygulanan tekrarlı yükler karşısında performansı ölçülür. Demiryolu hattı için uygun standartlardaki malzemelerin üstünde dayanıma sahip malzeme kullanılırsa hat esneme direnci artar. Maksimum performansla uzun ömürlü bir şekilde hattı kullanabilmek için en uygun performanslı malzeme seçilmelidir.

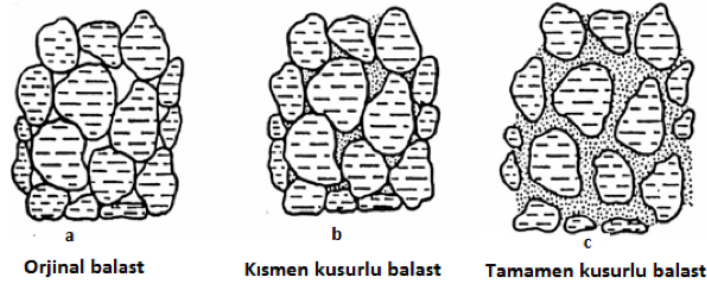
6.3. Balast Koşulları (Ballast Conditions)

Demiryolu hattının güvenli bir şekilde faydalı ömrü boyunca çalışmasında balast tabakası çok önemlidir. Genel görevi üzerine gelen yükleri zemine ileterek deformasyonları minimize etmek ve ray üst kotunu sabit tutmak ve ray ile traversi taşımak olan balast tabakası aynı zamanda yağmur sularını uzaklaştırmak için iyi bir drenaj özelliğine sahip olmalıdır.

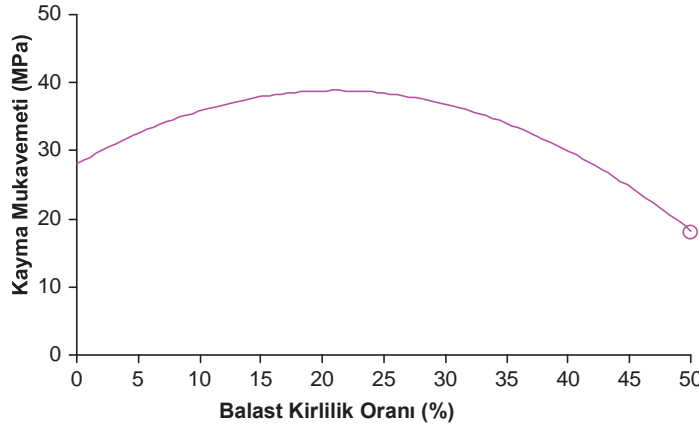


Şekil 6. Balastlı demiryolu kesiti (Ballasted track section) (Selig ve Waters, 1994)

Balast tabakasında büyük çaplı agregalar bulunmaktadır. Büyük agregaların içerisine zamanla çeşitli etkilerle ince parçalı atıklar dolmasıyla balast kirliliği oluşur. Demiryolu hattının güvenli bir şekilde hizmet verebilmesi için balastın hesaplanmış tasarım kapasitesinde olması durumu dışında balastın ana görevlerini yerine getirebilmesi için temiz olması da çok önemlidir. Balastın kirliliği doğrudan kirliliği olan bölgelerdeki birim hat esneme direnci üzerinde etkilidir.



Şekil 7. Balast tabakasında kirlilik kusuru oluşum mekanizması
(The mechanism of ballast fouling formation in the ballast layer) (Yılmaz, 2015)



Şekil 8. Balast kirliliği ile balastın kayma mukavemeti değişimi
(Variation of ballast shear strength with ballast contamination) (Anbazhagan vd., 2010)

Balast kirliliğiyle oluşan diğer sebep ise balastın kayma mukavemet değerinin düşmesi ile hattın ilgili bölgesindeki birim esneme direncinin düşmesine sebebiyet verebilir (Anbazhagan vd., 2010).

Oluşan balast kirliliği ile birlikte balast tabakası temel görevleri olan yükü zemine aktarıp hattı güvenle taşıma ve drenaj özelliklerini yitirebilir. Temel işlevlerini bir balast tabakasında, trenin neden olduğu tekrarlı yükler nedeniyle aşınma ve ufaklanma ile ortaya çıkan ince parçaların balasta doğru ilerlemesi ardından ıslak noktaların oluşması, ray destek sisteminin sertliğinde bir azalmaya ve dolayısıyla ray geometrisinde bir kayba yol açabilir. Bu da temiz olmayan kısımlarında hattın esneme direncinin hat dizayn edilirken uygun görülen esneme direnci aralığından daha aşağıya düşmesine sebep olabilir. Sonucunda hattın esneme direnci düşük olan kısmında deformasyonlar ve deplasmanlar oluşabilir ve tekerleğin raydan çıkmasına varan sonuçları olabilir (Burrow vd., 2009).

6.4. Zemindeki Değişim (Variation in the Subgrade)

Dikkatli tasarım ve yapım prosedürlerine rağmen, bir demiryolu hattı üst yapısı nadiren homojen bir alt yapı üzerine inşa edilir ve bu da kısa mesafelerde hat esneme direncinde önemli değişikliklere yol açar.

Demiryolu hattını taşımak için inşa edilecek zemin tabakası her ne kadar planlı ve hesaplı bir şekilde yapılsa da zamanla hattın zemin kısımlarında çeşitli sebeplerle kalıcı oturmaların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bununla beraber hattın üzerine oturduğu zemin yapısında bulunan farklı katmanlara ait tabaka kalınlıklarının hat boyunca değişmesi de hattın farklı noktalarda farklı tepki göstermesine neden olur. Zemin yapısındaki en ufak bir değişim bile hattın ilgili bölümündeki birim esneme direnci üzerine etkilidir. Zemin yapısında meydana gelen farklılık sonucunda hat üzerine etkileyen gerilmelerin efektif bir şekilde dağıtılamaması hattın ilgili bölümündeki birim esneme direncini düşürür (Moderon, 2010).

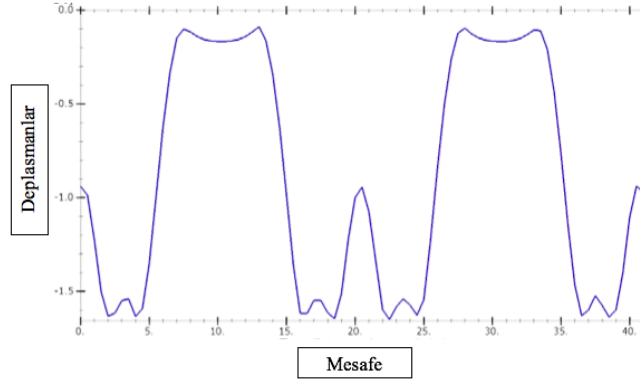
6.5. Üstyapı Tipi (Type of the Superstructure)

Balast tabakası, tren tarafından raya aktarılan gerilmeyi yayarak temele aktaran tabakadır. Kum, çakıl gibi tane boyutlarından ve farklı özelliklerdeki malzemelerden meydana gelen balast tabakasının inşası pratik ve az maliyetlidir. Ancak balast tabakası periyodik bir bakım süreci gerektirdiğinden yüksek işletme maliyetine neden olur. Bu yüksek maliyetli sisteme alternatif olarak balastsız üstyapı tipi geliştirilmiştir. Balastsız üstyapı; zemin

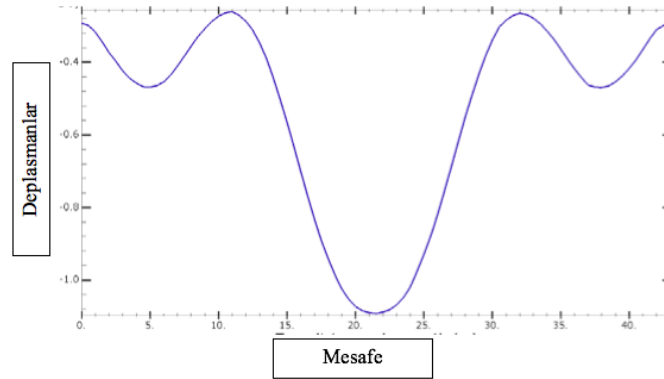
(elastik yatak) üzerine oturmuş betonarme plak, ray ve elastik altlıktan (selet) meydana gelen rijit bir sistemdir (Moderen, 2010). Bu bölümde balastlı ve balastsız sistemler arasındaki birim esneme direnci farkından bahsedilecektir.

Kullanım amaçlarına ve kullanım yerlerine göre birbirlerine avantajları ve dezavantajları olan bu iki üst yapı tipi, demiryolu hattının birim esneme direnci üzerine doğrudan etki etmektedir. Genellikle köprü, tünel ve hızlı tren hatları için kullanılan balastsız taşıyıcı üstyapı tipinin yüksek kalitede betondan yapılması ile son derece rijit olması demiryolu hattının birim esneme direncini balastlı hatta göre daha yüksek yapar (Michas, 2012).

Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla balastlı ve balastsız demiryolundaki yol boyunca deplasman mesafeleri analiz ölçümleri verilmiştir. Sonuç olarak, balastsız beton kullanılarak yapılan üst yapı sisteminin rijitliğinden ötürü oturmalar az, balastlı yapının esnek olmasından dolayı oturmaları çok olmuştur. Bu da balastsız yapıdaki hat esneme direncinin balastlı yapıya göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Balastlı yol boyunca deplasmanlar (Displacements along the ballasted track) (Michas, 2012)

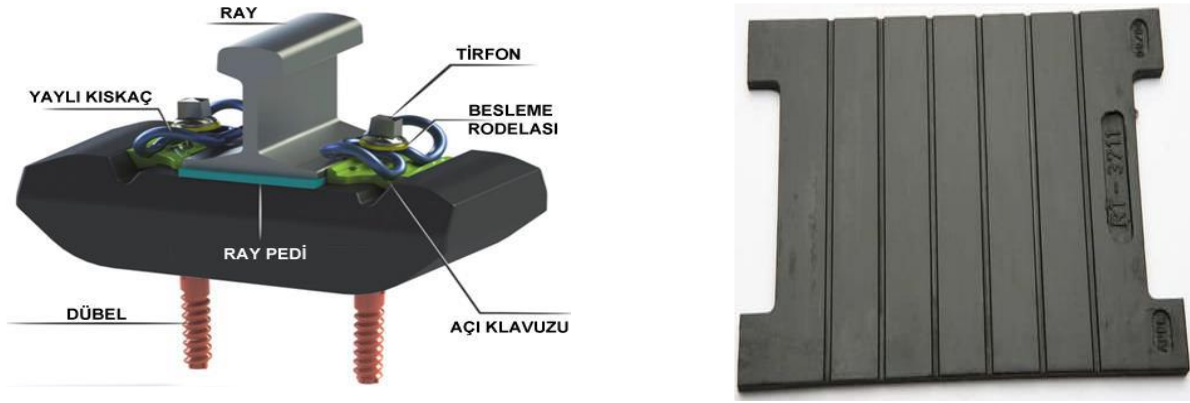


Şekil 10. Balastsız yol boyunca deplasmanlar (Displacements along the ballastless track) (Michas, 2012)

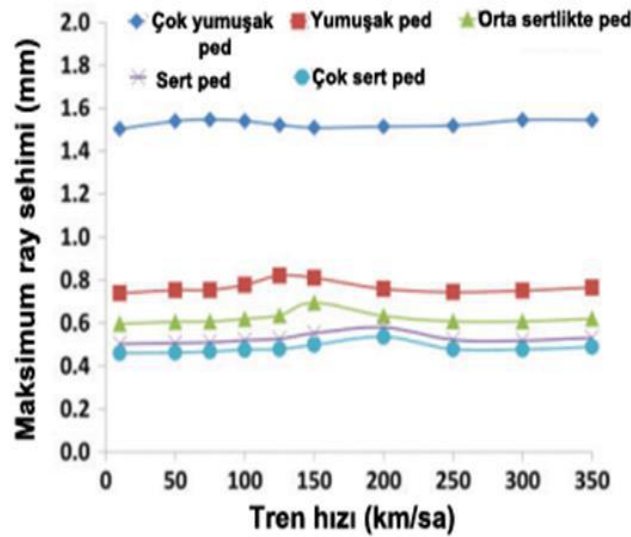
6.6. Ray Pedleri ve Travers Altı Pedlerinin Kullanımı (Use of Rail Pads and Under Sleeper Pads)

Demiryolu hatlarında hem tekerleklerin traverslerle temasını yumuşatmak hem de traversin ve tekerliğin kullanım ömrünü uzatmak ile demiryolu hattında oluşabilecek ondülasyonları engellemek için ray pedleri kullanılır. Travers altı pedler ise traverslerle balast tabakası arasındaki aşınmayı azaltarak gerilme aktarımını optimum hale getirmek için kullanılır. Hatta uygulanabilecek farklı sertliklerde pedler vardır. Yumuşak ped kullanımı hatta daha eşit bir yük dağılımı sağlarken bir diğer yandan da hat sehimlerini artırır. Bu nedenle, kullanılan pedlerin, maksimum hat performansını sağlayacak şekilde optimum esneme direncine sahip olması gerekir (Balci, 2021).

Ray pedi, teker/ray etkileşiminden gelen yüklerin yapı üzerindeki tahribatını azaltmak amacıyla ray tabanı ile travers arasına yerleştirilir. Metro ve bazı diğer ulaştırma sistemlerinde raylar doğrudan hatta tespitlenir. Bu durumda teker/ray etkileşiminden doğan titreşimler ray pedi ile sönmülmeye çalışıldığı için ray pedi sistemin oldukça önemli bir parçasıdır. Ray pedi esneme direncindeki değişimler balastsız hattın mekanik tepkileri üzerinde önemli bir rol oynar (Song vd., 2020). Şekil 11(a)'da ray pedinin, W21 ray bağlantı sistemi içerisinde kullanımı ve Şekil 11(b)'de kauçuk bir ray pedi örneği gösterilmiştir.



Yumuşak ray pedleri kullanmak teker ile ray teması sırasında teker üzerinden trene aktarılan yükleri sönümleyerek raya yükleri etkili bir şekilde yaydığı için tekerin ve rayın birbirleri üzerindeki tahrip edici etkisini azaltarak kullanım ömürlerini uzatmıştır (Song vd., 2020). Yapılan nümerik analizde ray pedinin teker/ray temas kuvvetlerini etkileyen en önemli parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Song vd., 2020). Ayrıca yumuşak ray pedi kullanımı, eşdeğer hat esneme direncini azaltarak ray sehımlerinin artmasına neden olur. Khajehdezfuly'nin (2019) balastsız bir hat üzerindeki çalışmasından farklı sertlikteki pedler için elde edilen ray sehımleri Şekil 12'deki gibidir.

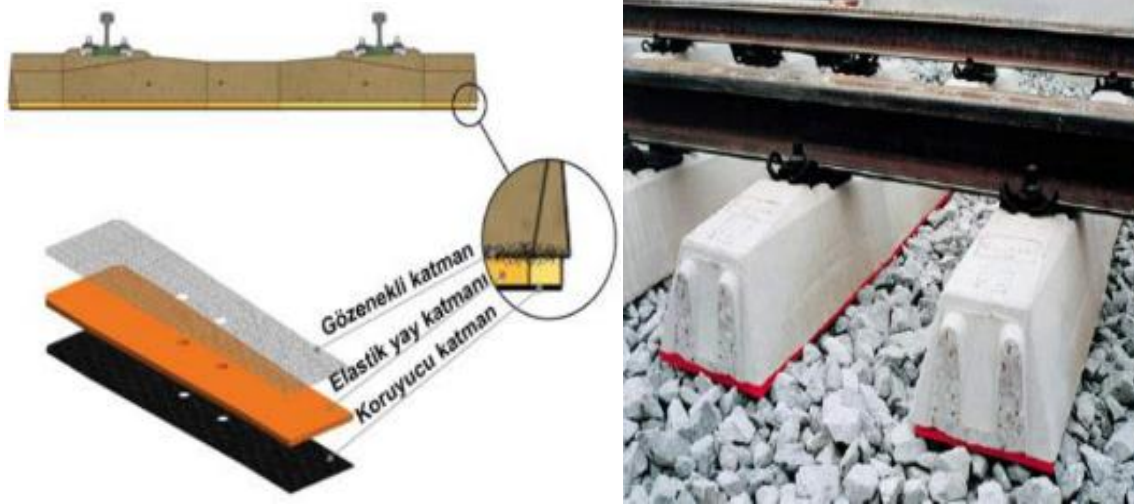


Şekil 12. Farklı tren hızları için çeşitli pedlerin kullanımında oluşan ray sehımleri (Rail deflections while using various pads for different train speeds) (Khajehdezfuly, 2019)

Bunlarla birlikte yumuşak ray pedi kullanmak tekerden gelen yükleri balasta homojen olarak dağıtır. Böylelikle balastın ve alt balastın servis ömrü uzamış olur. Ancak optimum değerlere bakmadan çok yumuşak ray pedi kullanımı farklı sehımlere yol açabilir.

Sert ray pedi kullanımında ise tekerden gelen yükler homojen olarak balast tabakasına dağıtılamaz bu durumda balastın aşınmasına ve optimum kullanım ömrüne ulaşmadan göçmesine sebep olabilir. Ancak sert ray pedi kullanımı demiryolunun kullanılan bölgesindeki birim esneme direncini yükseltir.

Travers altı pedler ise hattın düşey elastisitesini artırmak ve ray ve traversler aracılığıyla balast, alt balast ve zemine aktarılan kuvvetleri en düzgün şekilde yaymak amacıyla travers tabanına yerleştirilen elastik pedlerdir. Hat bileşenlerinin servis ömrünü artırmak ve titreşimleri azaltmak için 1980'lerden beri kullanılmaktadır. Özellikle hat geometrik kalitesini artırmak amacıyla makas bölgelerinde kullanımı yaygındır. Travers altı pedler genellikle 2 veya 3 katmandan oluşur: Traverse yerleştirilen sönümleme özelliğine sahip gözenekli katman, elastik yay katmanı ve opsiyonel olarak kullanılan koruyucu tabaka. Travers altı pedi kalınlığı, 10 mm ile 20 mm arasında değişir ve genellikle 1 m uzunluktadır. Şekil 13(a)'da ped katmanları ve Şekil 13(b)'de saha uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 13. a) Travers altı ped katmanları (Lakusic vd., 2010), b) Saha uygulaması (Loy, 2008)
(a) Under-sleeper pad layers, b) Field application)

Travers altı pedlerin de farklı sertlikte üretimleri mevcuttur. Sert travers altı ped kullanımı hattın birim esneme direncini artırır. Ped kullanılan kısımda hattın birim esneme direnci artar ve o bölgede sehimin azalmasına sağlar fakat tekerin traverse raya rayında traverse aktardığı gerilmeleri homojen bir şekilde balasta yaymadan hemen altındaki balasta aktarır. Bu durumun sonucunda da sert travers altı ped kullanılan kısmın balast tabakasında hasarlar olmasına sebebiyet verebilir. Yumuşak travers altı ped kullanımında ise traversten balasta aktarılan gerilmeler homojen yayılır, böylelikle balast tabakasından maksimum yarar sağlanabilir fakat kullanılan ped yumuşak olduğu için hat birim esneme direnci düşer. Düşen hat birim esneme direnci de bu bölgelerde hesaplanan optimum deformasyonun üstünde bir deformasyon oluşmasına sebebiyet verebilir (Balci, 2021).

Sonuç olarak, ray altı pedlerin ve travers altı pedlerin farklı sertlik ve kalınlıkta üretimleri mevcuttur. Yumuşak ve ince pedlerin hattın birim esneme direncini düşürdüğü sert ve kalın pedlerin ise hattın birim esneme direncini yükselttiği görülmüştür. Kullanılan pedler ince ve yumuşak ise hat esneme direncini düşürerek tekerlikten hatta gelen gerilmeyi etkin bir şekilde dağıtarak hatta ve tekerlikte oluşacak deformasyonu azaltır ama fazlası hattın bu bölgede sehim yapmasına sebep olabilir. Aynı şekilde kullanılan pedler kalın ve sert olursa hatta oluşacak birim esneme direnci artar ve o bölgede sehim minimumuna iner fakat bu bölgedeki tekerlikten hatta gelen gerilmelerin etkin bir şekilde yayılmayacağı için balast tabakasına zarar verebilir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında hat yapısına ve hattın hangi bölgesine ped uygulanacağına tüm parametreler hesaba katılarak karar verilmelidir.

6.7. Asılı Traversler (Hanging Sleepers)

Askıda veya boşta traversler, çoğunlukla balast sertliğindeki değişiklikler ve değişen malzeme yerleşimi nedeniyle meydana gelir. Bu, balast tabakasıyla temas halinde olması gereken traverslerin tam desteklenememesi ve belirli bir alanda yüzey temasının yitirilmesine neden olur. Bu bölümde demiryolu hattının asılı travers olan bölümlerinde olan değişimlerin hat birim esneme direnci üzerine etkisinden bahsedilmiştir.

Yapılan deformasyon deneylerinde asılı traverslerin meydana geldiği yerlerde traversle bağlantısı kesilen balast tabakasına yük aktarımının çift taraflı olarak efektif bir şekilde dağıtılamadığı, tek taraflı yük bindiği ve bu bölgelerde düşey deplasmanın diğer bölgelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Hat esneme direnci, asılı travers bölgelerinde oldukça azalır ve bu da yüksek tren/ray etkileşim kuvvetlerine neden olur. Bunun sonucu olarak uzun vadede ray oturmaları artar. Traverslerin görevlerinden bir tanesi, trenin hatta aktardığı yükleri balast katmanı üzerinde dağıtmaktır. Ancak, balast ile teması azalmış olan asılı traversler, üzerlerine gelen yükü etkin bir şekilde dağıtmadığından bu yük genellikle komşu traversler tarafından dağıtılır. Kendi üzerine gelen yüke ek bir yük aktaran komşu traversler altındaki balast, aşırı gerilmeler sonucu zorlanabilir ve bu da asılı travers bulunan hatlarda farklı oturmaların oluşmasına neden olabilir (Witt, 2008).

Dalhberg'in (2010) yaptığı çalışmada demiryolu hattında esneme direnci ölçümleri yapılmıştır ve 3 asılı traversin bulunduğu bölgede esneme dirençlerinin 200-240 kN/mm'den 140-160 kN/mm'lere düştüğü gözlenmiştir. Benzer şekilde köprü, tünel ve bazı kurp noktalarında travers ile teması azalan/kesilen balast tabakasının olduğu bölümlerde hattın birim esneme direncinin düştüğü gözlemlenmiştir. Farklı bir durum olarak ise balast

tabakasındaki hasar veya deformasyonlar sonrası balast takasının düzeyde deformasyon yapmasıyla ortaya çıkan asılı travers durumunda hattın birim esneme direncinin düştüğü görülmüştür (Dahlberg, 2010).

Sonuç olarak hattın birim esneme direncine etki eden pek çok farklı mekanik etmen vardır. Demiryolu hattının güvenli bir şekilde servis ömrünü sağlaması ve servis ömrü boyunca hattan maksimum verimin alınması için hattın birim esneme direncine etki eden mekanik etmenler dikkatlice incelenmelidir ve bu doğrultuda hattın güvenle, ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde işletilebilmesi için doğru kararlar alınmalıdır.

7. Hat Esneme Direncine Etki Eden Geometrik Faktörler (Geometric Factors Affecting the Track Stiffness)

Hattın birim esneme direnci, sadece içerisinde yer alan bileşenler mekanik özelliklerinden kaynaklı olarak değil, aynı zamanda hat geometrisinden de etkilenmektedir. Belirli bir hat mesafesi boyunca ray üst profilinde gerçekleşen geometrik düzensizlikler hattın esneme direncini değiştirir. Bu da dinamik darbe kuvvetlerini artırarak bileşenlerin hasar görmesine neden olur. Ray bitiş noktaları ve makaslar, geometrik düzensizliklerin yaşandığı kısımlara örnek olarak verilebilir.

7.1. Ray Uçları (Rail Ends)

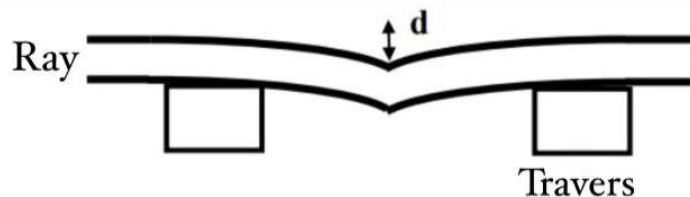
Ray uçlarında geometrik olarak düzensizlik bulunmaktadır. Hat boyunca konforu ve güvenli bir araç geçişini sağlamak için pürüzsüz bir ray yüzeyi elde edilmelidir. Bu yüzden ray uçları yatay ve dikey olarak birbirleri ile doğru bir şekilde hizalanmalıdır (Kerr ve Cox, 1999). Birleşim noktalarında esneme direnci farklılıkları bulunmaktadır ve bu farklılığın olabildiğince azaltılması gerekmektedir.

Kaynaklanmamış raylar, bağlantı noktalarında ray gövdesine oturan ve özel olarak şekil verilmiş levhalar (cebire) ve civatalar ile birbirlerine bağlanmaktadır. Cebirelerin boyutlarının küçük olmaması ve civataların sıkı bağlanması ihtiyacı bulunmaktadır. Fakat civataların aşırı sıkı sıkılması da ısı etkileri altında gerçekleşen genleşmelerden ve büzülmelerden kaynaklı gerilmelere bağlı olarak sorunlar yaratabilmektedir (Kerr ve Cox, 1999). Bu iki olay içinde uygun olacak bir ölçü belirlenmelidir.



Şekil 14. Cebireli birleşim noktası (Fished joint)

Cebirelerin esneme direnci ve atalet momentleri ile rayların esneme direnci ve atalet moment değerleri birbirlerinden farklıdır. Raylar daha büyük esneme direnci ve atalet değerlerine sahiptir. AREMA Manual'e göre Rayların atalet momenti 3658.67 cm^4 iken cebirelerin 1344.42 cm^4 'tür (Kerr ve Cox, 1999). Ayrıca Japonya demiryollarının kullandıkları ray ile birleşim noktalarının ataletleri arasında da 3 kat fark bulunmaktadır (Steffen vd., 2005). Birleşim noktalarındaki esneme direnci farkı ve ray uçlarındaki geometrik düzensizlik nedeniyle ray profilinde ideal yuvarlanma yüzeyinden kalıcı olarak geometrik sapmalar meydana gelebilir. Bu durumda raylara etkiyen eğilme sonucu ray profilinde çukurda kalan bir kesim (dipped rail joint) meydana gelir. Bu çukurlu hat kesiminde birinci ray üzerinden geçen teker, belirli bir mesafe boyunca geçici olarak ray mantarı ile temasını kaybeder ve daha sonra ikinci ray üzerine düşer. Bu da P_1 ve P_2 dinamik kuvvetlerinin hatta aktarılmasına ve bu bölgedeki titreşimlerin artmasına neden olur.



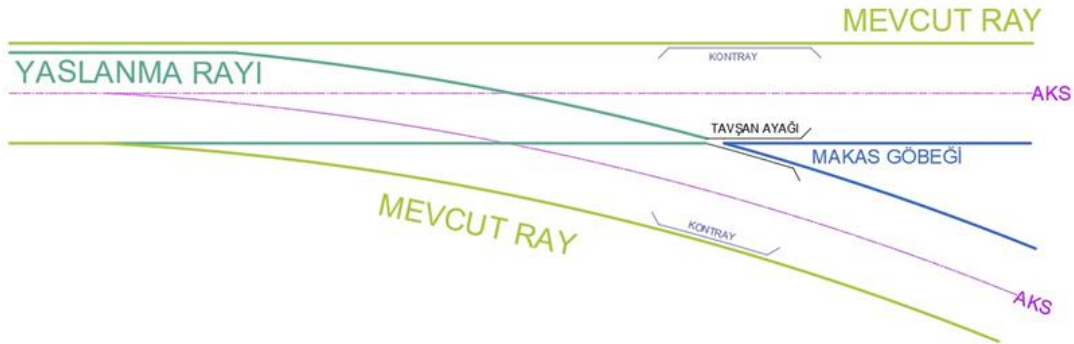
Şekil 15. Eğilmiş birleşim noktası (Bent junction) (Steffens vd., 2005)

Birleşim noktalarında oluşan dinamik darbe kuvvetleri ve titreşimlerin artması sonucu temelde bozulmalar ve ray mantarında hasarlar meydana gelebilmektedir. Hatta meydana gelen bu hasarlar, ray bitiş noktasındaki çukurun daha kısa bir mesafede daha derin bir şekilde meydana gelmesine neden olur ve bu da ortaya çıkan dinamik kuvvetleri daha da artırır. Dinamik tekerlek kuvveti, ray boşluğundan önceki rayda, ray uç noktasına yaklaştıkça artmaktadır. Ray boşluğunun merkezi ve civarında azalma gösterir ve bir sonraki raya geçildiğinde tekrar artar. Ray bitiş merkezinden uzaklaşırken düşük hızlarda dinamik darbe kuvvetleri artar (Koro vd., 2004).

Suzuki ve diğerlerinin (2005) yaptığı çalışmaya göre, iki ray arasındaki boşluğun mesafesi de önemlidir. Ancak 11 mm gibi bir ray boşluğunun etkisi, raydaki eğilme nedeniyle oluşan çukur bölgenin (dipped joint) neden olduğu zararlı etkiden daha düşüktür (Suzuki vd., 2005). Çalışmada ele alınan boşluklar 3, 9 ve 11 mm'dir. 0-50 km/h arasında 9 ve 11 mm boşluklar yaklaşık olarak 2 katlık bir dinamik kuvvete yol açar. Yüksek hızlara çıkıldıklarında ise yavaş yavaş azalır. Fakat ciddi azalışlar görülmez. Fakat 9 veya 11 mm'lik raylar arası boşluğa ek olarak ray uç noktalarında çukur bölge oluştuğunda, hız arttıkça dinamik darbe faktörü 4 seviyelerine çıkmaktadır. Bu dinamik darbe faktörünün artışların sonucunda, raylara etki eden kuvvetler artmaktadır. Kuvvetlerin artması ise ray bitiş noktalarında oluşan deformasyon değerlerinin, rayın diğer bölgelerinde oluşan deformasyon değerlerine göre daha fazla olmasına neden olur. Ayrıca bu bölgelerde hattaki bozulmalar hızlanmakta, balast katmanında normalde olması gerekenden daha fazla oturmalar meydana gelmekte, rayda aşınmalar oluşabilmekte ve ray bağlantı bileşenlerinde bozulmalar oluşmaktadır. Hatta meydana gelen bu hasarlar, ray uç noktalarında gerçekleşen çukurun derinliğinin artmasına neden olabilmektedir. Bu da ray uç noktalarının hassas noktalar olduğunu gösterir (Koro vd., 2004). Bu sebeple bu bölgeler demiryolu hatlarında en çok bakım ve parça değişimleri gerektiren bölgelerdir.

7.2. Makaslar (Turnouts)

Bir demiryolu güzergahında birden fazla hat olabilir. Bir hattan diğer bir hatta geçmek için bu hatların belirli bir açı ile kesişmesi gerekmektedir. Kesişen bölgelerde bulunan makaslar, trene rehberlik edip trenin hangi hattan devam edeceğine karar veren mekanik sistemlerdir. Makaslarda birçok bileşen bulunmaktadır. Bunlar mevcut ray (stock rail), yaslanma rayı (switch rail), kontray (check rail), tavşan ayağı (wing rail) ve makas göbeği (crossing nose). Mevcut ray, hareketsiz olan hattın dış tarafında bulunan raylardır. Yaslanma rayı gelen trenin hangi hattan devam edeceğine göre hareket edebilen raylardır. Tren hangi hattan devam ederse etsin makas göbeklerinin karşısında, mevcut rayın yanında kontraylar bulunmaktadır. Kontrayların amacı treni rayların üzerinde tutmaktır. Tavşan ayağı denilen kısım yaslanma rayı ile makas göbeği arasındaki geçiş raylarıdır. Makas göbekleri ise, tavşan ayaklarından sonra bulunan ufak bir boşluktan sonra tren tekerleklerinin devam ettiği kısma denir.



Şekil 16. Makas ve ray değişim bölgesi temsili (Representation of the switch and rail change zone)

Demiryolunda bulunan makaslar hat arızalanmalarının en çok olduğu bölgelerdir. Rapor edilen hat arızalanmalarının büyük bir kısmı makaslarda meydana gelir (Grossoni vd., 2020). Bunun nedeni ise bu bölgelerde raylar arasında farklılıklar olmasıdır. Bu bölgelerde bulunan çeşitli rayların birim esneme dirençleri ve atalet momentleri birbirinden farklıdır. Ayrıca tavşan ayağı ile makas göbeği arasında bulunan boşluk, rayda süreksizliğe neden olmaktadır. Bu bölgedeki sorunların geneli makas göbeği etrafında şekillenmektedir. Makas göbeklerinde etrafındaki raylara göre daha büyük esneme direncine sahiptir ve kütleleri diğer bölgelere göre daha fazladır (Burrow vd., 2009). Ayrıca mevcut ray ile yaslanma rayı arasında da esneme direnci farklılıkları bulunmaktadır (Burrow vd. 2009, Zhu, 2005). Bu farklılıklar dolayısıyla buralarda ani birim esneme direnci farkları oluşmaktadır. Bu da bu bölgelerde normalden fazla sehim olmasına ve hattın geometrisinin bozulmasına neden olur.

Zhu'nun (2004) yaptığı çalışmaya göre hat üzerinde hareket halinde bulunan tren makas göbeğine geçerken ciddi hasarlar vermektedir (Zhu, 2005). Bunun nedeni, burada bulunan ray süreksizliğinden dolayı tren tekerlerinin bu bölgeden geçerken yüksek dinamik darbe etkilerine neden olmasıdır. Dinamik kuvvetlerin artması sonucunda oluşan titreşimler, makas göbeğinde aşınma ve çatlamaya, deformasyonların normalden daha fazla olmasına neden olabilmektedir.



Şekil 17. Zamanla zarar görmüş makas göbeği (Turnout damaged over time) (Markine ve Shevtsov, 2012)

Bu sebeple bu bölgelerde sürüş konforunu azalmasının ve bakım maliyetlerini artmasının yanı sıra, gerekli önlemler alınmazsa ilerleyen boyutlarda sürüş güvenliği açısından da risk barındırır. Buradaki esneme direnci farklarını ortadan kaldırmak için ray altlarına elastomer pedler konulabilir. Bu pedler sürüş güvenliğini ve konforunu artırır. Ayrıca bakım maliyetlerini de önemli ölçüde azaltır. Fakat tekerin farklı raylar arasındaki geçişinden dolayı oluşan zararlar ancak düzenli bakımlar ile giderilebilmektedir.

8. Sonuç (Result)

Zemin üzerinde yer alan bir yapıda, yapı üzerinden aktarılan gerilme alanının genişliği ve derinliği zeminin özelliklerine bağlı olduğu gibi aynı zamanda üstyapıya ait mekanik ve geometrik niteliklerin de bir sonucudur. Zemin üzerine yerleştirilen plakanın yüklenmesiyle elde edilen ve zemin davranışının plaka kesiminde yarattığı etkiyi temsil eden yatak modülüne benzer bir şekilde, demiryolu hatlarında da hat üstyapısı ve zeminin rayları destekleyen taşıyıcı elemanlar olarak modellenmesiyle üstyapı-zemin ortak etkileşiminin bir temsili olan hat modülü kavramından bahsedilebilir. Hat modülü, ray desteğinin birim esneme direncinin bir ölçüsüdür.

Bir demiryolu hattında oluşan deformasyon, ray altı basınç, moment, dinamik darbe kuvveti ve kesme kuvveti değerlerinin belirli bir eşik değerinin altında tutulması ve aynı zamanda etkin bir enerji ve yük dağıtımı sağlanması için hat tasarımında düşey esneme direnci değeri göz önünde bulundurulmalıdır. Hat esneme direnci değeri, yapı-zemin etkileşimine bağlı olduğu gibi hat üzerinden geçen araç ile hat arasındaki etkileşime de bağlıdır. Hat üstyapısına ve taşıyıcı zemine ait tüm parametreler aynı kalsa dahi, sadece tren bojisine ait dingil mesafesinin değişmesiyle, hattan tren geçişinde deneyimlenecek olan hat esneme direnci değeri değişmektedir.

Bu çalışmada taşıyıcı zemin, hat üstyapısı ve araca ait bazı özelliklerin, hat esneme direnci değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hatta kullanılan malzeme özellikleri, bu malzemelerin tekrarlı yükler altındaki performansı, balast koşulları, belirli bir mesafe boyunca veya yerel olarak zeminde meydana gelen değişimler, üstyapı tipi, elastik pedlerin kullanımı ve asılı traverslerin varlığı gibi bazı özellikler ile hat esneme direnci arasındaki bağıntı incelenmiştir. Ancak hat esneme direnci mekanik bazı özelliklerin yanı sıra, ray üst profilinde meydana gelen geometrik düzensizliklerden de etkilenmektedir. Buna istinaden, ray bitiş noktaları ve makasların hat esneme direnci üzerindeki etkilerine yer verilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Anbazhagan, P., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Su, L. 2010. Using a seismic survey to measure the shear modulus of clean and fouled ballast. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 5(2), 117-126.

- Balci, E., 2021. Ray Pedi ve Travers Altı Pedlerin Hat Bileşenleri ve Hat Performansı Üzerindeki Etkileri. *Demiryolu Mühendisliği*, 13, 14-28.
- Balci, E., Bezgin, N. Ö., 2020. Hat esneme direncinin hat performansı üzerindeki etkileri. *Demiryolu Mühendisliği*, 11, pp. 75-85.
- Balci, E., Bezgin, N. Ö., Wehbi, M., 2021. Investigation of Variation of Track Response to Wheel Forces with Bogie Axle Spacing and Introduction of the Concept of Effective Track Stiffness. *Transportation Research Record (In-Review)*.
- Berggren, E., 2009. Railway track stiffness. Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance. Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm
- Bezgin, N. Ö. 2017. Development of a New and an Explicit Analytical Equation that Estimates the Vertical Dynamic Impact Loads of a Moving Train. *Procedia Engineering*, 189, 2-10.
- Bezgin, N. Ö., & Wehbi, M. 2019. Advancement and Application of the Bezgin Method to Estimate Effects of Stiffness Variations along Railways on Wheel Forces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119811983580.
- Burrow, M., Teixeira, P.F., Dahlberg, T., Berggren, E. 2009. Track stiffness considerations for high speed railway lines. *Railway transportation: policies, technology and perspectives*, pp. 303-354.
- Dahlberg, T., 2010. Railway Track Stiffness Variations Consequences and Countermeasures. *International Journal of Civil Engineering*, Vol 8, No 1.
- Grossoni, I., Bezin, Y., Neves, S. 2018. Optimisation of support stiffness at railway crossings. *Vehicle System Dynamics*, 56(7), 1072-1096.
- Grossoni, I., Hughes, P., Bezin, Y., Bevan, A., Jaiswal, J., 2020. Observed Failures at Railway Turnouts: Failure Analysis, Possible Causes and Links to Current and Future Research. *Engineering Failure Analysis* Vol. 119.
- Gürmak Demiryolu, "W21 Ray Bağlantı Sistemi" [Online]. Available: <https://www.gurmakdemiryolu.com.tr/tr/urunlerimiz/w21-ray-baglanti-sistemi/>. [Accessed July 7, 2020].
- Indiamart, "Grooved rubber sole plates rail pad" [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/grooved-rubber-sole-plates-rail-pad-20756032791.html>. [Accessed July 7, 2020].
- Kausel, E. 2010. Early history of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9), pp. 822-832.
- Kerr, A. D., Cox, J. E., 1999. Analysis and Tests of Bonded Insulated Rail Joints Subjected to Vertical Wheel Loads. *International Journal of Mechanical Sciences* 41, p.1253-1272
- Khajehdezfuly, A. 2019. Effect of rail pad stiffness on the wheel/rail force intensity in a railway slab track with short-wave irregularity. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 233(10):1038-1049.
- Koro, K., Abe, K., Ishida, M., Suzuki, T., 2004. Timoshenko beam finite element for vehicle-track vibration analysis and its application to jointed railway track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 218(2):159-172
- Lakusic, S., Ahac, M., Haladin, I., 2010. Experimental investigation of railway track with under sleeper pad. 10th Slovenian road and transportation congress, Ljubljana, Slovenia, 2010, pp. 20-22.
- Loy, H., 2008. Under Sleeper Pads: Improving Track Quality while Reducing Operational Costs. *European Railway Review*, vol. 4, pp. 46-51.
- Lundqvist, A., Dahlberg, T. 2005. Load impact on railway track due to unsupported sleepers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 219(2), pp. 67-77.
- Markine, V. L., Shevtsov, I., 2012. Experimental Analysis of the Dynamic Behaviour of Railway Turnouts, Civil-Comp Press, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*.
- Michas, G., 2012. Slab track systems for high-speed railways. Master Degree Project, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Moderen, O., 2010. Balastsız demiryolu üstyapısının yapısal modellenmesi ve analizi. Doctoral dissertation, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Selig, E. T., and Li, Di., 1994. Track Modulus: Its Meaning and Factors Influencing It. *Transportation Research Record* 1470, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 47-54.
- Selig, E. T., Waters, J. M., 1994. *Track geotechnology and substructure management*. London: Thomas Telford.
- Skar, A., Klar, A., Levenberg, E. 2019. Load-Independent Characterization of Plate Foundation Support Using High-Resolution Distributed Fiber-Optic Sensing. *Sensors*, 19(16), 3518.
- Song, X., Qian, Y., Wang, K., Liu, P., 2020. Effect of rail pad stiffness on vehicle-track dynamic interaction excited by rail corrugation in metro. *Transportation Research Record*, vol. 2674, no. 6, pp. 225-243.
- Steffens, D., Murray, M. H., 2005. Establishing meaningful results from models of railway track dynamic behaviour. 8th International Heavy Haul Conference.
- Suzuki, T., Iahida, M., Abe, K., Koro, K., 2005. Measurement on Dynamic Behaviour of Track near Rail Joints and Prediction of Track Settlement. *QR of RTRI*, Vol.46, No.2.
- Terzaghi, K. 1955. Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. *Geotechnique*, 5(4), 297-326.
- Wehbi, Mohamed., Burrow, M., Shi, J., Ghatoara, G., 2013. Investigating the Effects of Soft Spots on the Functional and Structural Condition of a Railway Track. 4th Bear Post Graduate Conference in High Performance Computing, Birmingham, the UK.
- Winkler, E. 1867. *Die Lehre von der Elasticitat und Fastigkeit*, Verlag von H. Dominicus, Prague.
- Winkler, E. 1875. *Der Eisenbahnoberbau*, Verlag von H. Dominicus, Prague.
- Witt, S., 2008. The Influence of Under-Sleeper Pads on Railway Track Dynamics. Report LiU-IEIA-08/00442-SE, Linköping University, Division of Solid Mechanics/IEI, Linköping, Sweden.
- Xu, J., Wang, P., Ma, X., Gao, Y., Chen, R. 2016. Stiffness Characteristics of High-Speed Railway Turnout and the Effect on the Dynamic Train-Turnout Interaction. *Shock and Vibration*, pp. 1-14.

- Yılmaz, A. 2015, Demiryolu Üstyapısında Balast Kirliliği. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(1), 11-17.
- Zhu, J. Y., 2005. On the effect of varying stiffness under the switch rail on the Wheel-rail dynamic characteristics of a high-speed turnout. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 220(1): 69-75.
- Zhu, K., Qian, Y., Edwards, J. R., Andrawes, B. O. 2017. Finite Element Analysis of Rail-End Bolt Hole and Fillet Stress on Bolted Rail Joints. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2607(1), pp. 33-42.
- Zimmermann, H. 1888, Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues, Verlag W. Ernst and Sohn, Berlin.