



## Hat Esneme Direncinin Hat Performansı Üzerindeki Etkileri

Erdem BALCI<sup>1</sup>, Niyazi Özgür BEZGİN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
34320, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup> YAPIRAY Demiryolu İnşaat Sistemleri San. ve Tic. A.Ş., İstanbul, Türkiye

\*erdem.balci@yapiray.com.tr

(Alınış/Received: 14.12.2019, Kabul/Accepted: 20.01.2020, Yayınlama/Published: 31.01.2020)

**Özet:** Bir demiryolu hattının sahip olması gereken esneme direnci değeri, hattın güvenli hizmet vermesini sağlamakla birlikte hattın bakım maliyetini de azaltacak şekilde belirlenmelidir. Hattın geometrik özelliklerini korumak için hat esneme direnç değerinin yüksek olması istendiği gibi, uygun yük dağılımını sağlamak ve hat bileşenlerinin yıpranmasını önlemek amacıyla bu değer azaltılması gerekir. Bir bütün olarak hattın en fazla verimin alınabilmesi için en uygun esneme direnci değerinin seçilmesi gerekir. Bu değer seçiminde, esneme direncinin hat performansını etkileyen ray sehimleri, basınç ve gerilmeler gibi unsurlar üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada hat esneme direncinin değişmesiyle hat performansını etkileyen parametrelerin değişimi incelenmiştir. Çok yüksek ve çok düşük esneme direnci değerleri altında karşılaşılan sorunlar ele alınmıştır. Böylece en yüksek güvenlik, en az bakım maliyeti ve en uzun hizmet ömrünü sağlayan bir esneme direnç değeri seçilmesinin önemi ortaya konulmuştur. Son olarak, belirlenen esneme direnci değerinin uygulamada sağlanabilmesi için yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hat modülü, Hat esneme direnci, Winkler modeli, Hat performansı

## The Effects of the Track Stiffness on Track Performance

**Abstract:** Required stiffness value for a railway track must determined within the safety limits and it should reduce maintenance costs. While track must be stiff enough to conserve track's geometric qualities, it must also provide sufficient flexibility in order to provide proper load distribution and avoid wear in track components. While determining this value, effects of the track stiffness on the track design parameters that influence track performance such as track deformations, pressure and strains must be taken into consideration.

In this work, variation of the parameters that influence track performance with respect to the change of track stiffness is examined. Problems faced in tracks with very high stiffness or very low stiffness are discussed. Therefore, importance of the determination of optimum stiffness value that provides maximum safety, minimum maintenance cost and long service life is shown.

**Keywords:** Track modulus, Track stiffness, Winkler model, Track performance

### 1. Giriş

Demiryolu hattının düşey esneme direnci, hattın yapısal davranışını belirleyen önemli bir değerdir. Hattın esneme direnci, tekerlek tarafından hatta aktarılan kuvvetin, tekerlek altında oluşan sehim değerine oranıdır. Tren hareketi sırasında hat boyunca oluşan basınç, sehim, moment ve gerilmeler, hattın esneme direnci ile yakında ilgilidir. Ayrıca, tren tarafından hatta aktarılan dinamik yüklerin tayininde ve aktarılan yüklerin hat içerisindeki dağıtımında da önemli

Atıf için/Cite as: E. Balci, N.Ö. Bezgin, "Hat esneme direncinin hat performansı üzerindeki etkileri," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 75-85, Jan. 2020.

bir rol oynar [1-3]. Bu nedenle hattın esneme direnci değeri, hat tasarımı ve bakım çalışmalarının uygun bir şekilde yapılabilmesi için göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür [4].

Geometrisi düzgün bir hatta esneme direnci değişimi olmadığı sürece teker, hat boyunca aynı sehim değerlerini oluşturacak şekilde ilerler [3, 5]. Hattın esneme direnci değeri, uygulanan tekerlek kuvveti altında hat sehimlerinin hat boyunca dağılımını etkileyen bir değerdir. Esneme direnci çok yüksek olan bir hatta, hat sehimleri ağırlıklı olarak tekerlek altında ve yakınında odaklanırken, hattın esneme direnci düştükçe bu sehimler, kuvvetin uygulandığı noktadan hat boyunca daha uzak mesafelere yayılma eğilimi gösterirler. Bu durum hat performansını belirleyen parametreler üzerinde etkilidir. Çok yüksek veya çok düşük esneme direncine sahip hatlarda sehim, gerilme, moment gibi faktörlerden bir kısmı sınır değerlerini aşarak güvenlik tehlikesi yaratabilir. Örneğin esneme direnci yüksek bir hatta, ray ve bağlantı elemanı hasarları, ray yüzeyi aşınması, balast kirlenmesi gibi durumlar meydana gelebilir [6]. Öte yandan, demiryolu işletmelerinde yüksek hızlara ulaşılması nedeniyle dingil yükünün artması, hatta belirli bir ölçüde yüksek esneme direncinin kazandırılmasını gerektirir. Çok düşük esneme direncine sahip bir hatta ise ray eğilmesinden kaynaklı yorulmalar, bağlantı elemanlarında yüksek gerilmeler, ani geometrik kayıplar gibi önemli sorunlar ortaya çıkabilir [7]. Diğer yandan, uygun yük iletiminin sağlanması ve hat içi gerilmelerin azaltılması amacıyla hatta belirli bir esneme direnç değerinin kazandırılması gerekmektedir. Esneme direnç değeri uygun olarak seçilmeyen hattın verimi düşer ve hizmet ömrü kısalmır. Daha olumsuz bir durumda ise raydan çıkmaya varabilecek tehlikeler doğabilir. Bu nedenle, tüm performans kriterlerini sağlayabilen, çok yüksek veya çok düşük esneme direncine sahip hatların dezavantajlarını oluşturmayacak güvenilir bir esneme direnci değeri seçilmelidir. Bunun için de esneme direncinin hat performansını üzerindeki etkilerinin bilinmesi ve bu bağlamda hattın durumuna göre optimizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, hat esneme direnci kavramı irdelenmiş bu direncin hatta oluşan sehim, gerilim ve momentler gibi hattın performansını belirleyen unsurlar üzerindeki etkileri rakamsal olarak ortaya konulmuştur. Çok yüksek veya çok düşük esneme direncine sahip hatlarda karşılaşılabilecek sorunlar ele alınmıştır. Böylece hat tasarımında belirlenen esneme direnç değerinin, güvenlik ve bakım maliyetleri açısından öneminin gösterilmesi amaçlanmıştır. Son olarak, optimum bir hat esneme direnci değeri seçilmesinin gerekliliğinden ve uygulamada bu değeri sağlayabilmek amacıyla yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

## 2. Hat Esneme Direnci ve Winkler Modeli

Hat üzerindeki bir noktaya tekerlek tarafından uygulanan kuvvetin, hattın o noktasında ölçülen hat sehim değerine oranı, İngilizce’de hattın “stiffness” değeridir. Bu terimin Türkçe literatürde tam bir karşılığı bulunmamakla birlikte, “düşey birim direnç” [8], “rijitlik” [10] gibi kavramlarla ifade edilmiştir. Rijitlik, bir yapının geometrik formunu koruma direncidir ve dolayısı ile “stiffness” ile tanımlı fiziksel değeri etkilemekle birlikte, bu değerden farklı bir yapısal niteliği tanımlamaktadır. Esneme ise bir yapısal unsurun uygulanan bir etki altında, uygulanan etki ile ilgili doğrultulardan sapma miktarıdır. Bir yapısal unsurun esneme direnci arttıkça o yapısal unsurun esnemeye karşı gösterdiği direncin arttığı ve bir etki altında daha az miktarda esneme yaptığı anlaşılır. Bu makalede İngilizce bir terim olan “stiffness”, Türkçe’de “esneme direnci” olarak ifade edilecektir.

Zemin-yapı etkileşimini temsil etmek için geliştirilmiş çeşitli modeller bulunmaktadır [11]. Rayları elastik temel üzerinde sürekli olarak desteklenen kirişler olarak tasvir eden Winkler (1867) modeli en eski, pratik ve yaygın modeldir. Bu modelde ray destekleri birbirine çok yakın konumlandırılmış eşdeğer, ayırık, bağımsız ve elastik yaylardan meydana gelir [12]. Herhangi bir t anındaki temas basıncının (p), o andaki hat sehimleriyle (w) ve yay esneme direnciyle (k) Denklem 1’de görüldüğü gibi doğru orantılı olduğu varsayılır.

# Demiryolu Mühendisliği

$$p(t) = kw(t) \quad (1)$$

Demiryolu hattındaki her bir bileşen, malzeme özelliği, kesit alanı ve boyutlarına göre farklı esneme direnç değerlerine sahiptir. Hat esneme direnci, raya ait eğilme rijitliği (EI) de dahil olmak üzere tüm bileşenlerin esneme dirençlerinin bir kombinasyonudur. Bu nedenle kaynaklarda “global stiffness” ve “composite stiffness” olarak da geçmektedir [3].

Hat performansının değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulacak bir diğer parametre; hat modülü ise hattın birim uzunluğunun esneme direnç değeridir. Winkler modeline göre P teker yükünün herhangi bir x noktasından uygulanmasıyla, ray çeliğinin elastisite modülü E, rayın yatay merkez eksenine göre atalet momenti I ve hat modülü u olmak üzere hatta oluşan sehim (w),

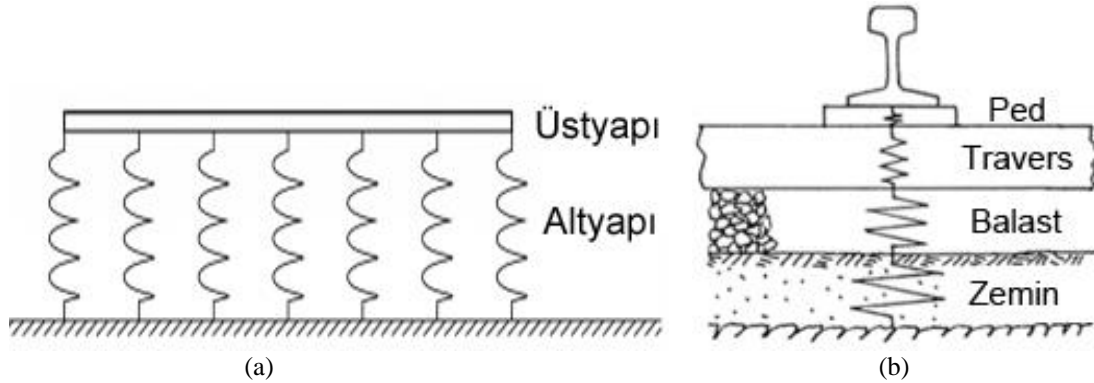
$$B = \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \quad (2)$$

olmak üzere Denklem 3’teki gibidir.

$$w(x) = \frac{PB}{2u} e^{-B|x|} [\cos(B|x|) + \sin(B|x|)] \quad (3)$$

Denklem 4 ise hat modülü (u) ile hattın esneme direnci (k) arasındaki ilişkiyi ifade eder.

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



Şekil 1. a) Yapısal Winkler Modeli gösterimi [11] b) Ray desteğinin bileşenlere ait yaylar ile ifadesi

Demiryolu hattında bir destek yayı, tüm hat bileşenlerine ait yayların seri olarak bağlanmasıyla ortaya çıkar. Bu durumda hattın eşdeğer esneme direncini Denklem 4 ile ifade etmek mümkündür:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_{ped}} + \frac{1}{k_{travers}} + \frac{1}{k_{balast}} + \frac{1}{k_{zemin}}} \quad (5)$$

Bu modelde hattın yük altındaki davranışını belirleyen tek parametre esneme direnci olduğu için, hat tasarımında istenilen direnç değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve belirlenen değer pratikte sağlanabilmesi oldukça önemlidir. Bunun için öncelikle esneme direncinin, hattın kalitesini etkileyen çeşitli faktörler üzerindeki etkilerinin bilinmesi gereklidir.

### 3. Hat Esneme Direncinin Hat Performansı Üzerindeki Etkileri

# Demiryolu Mühendisliği

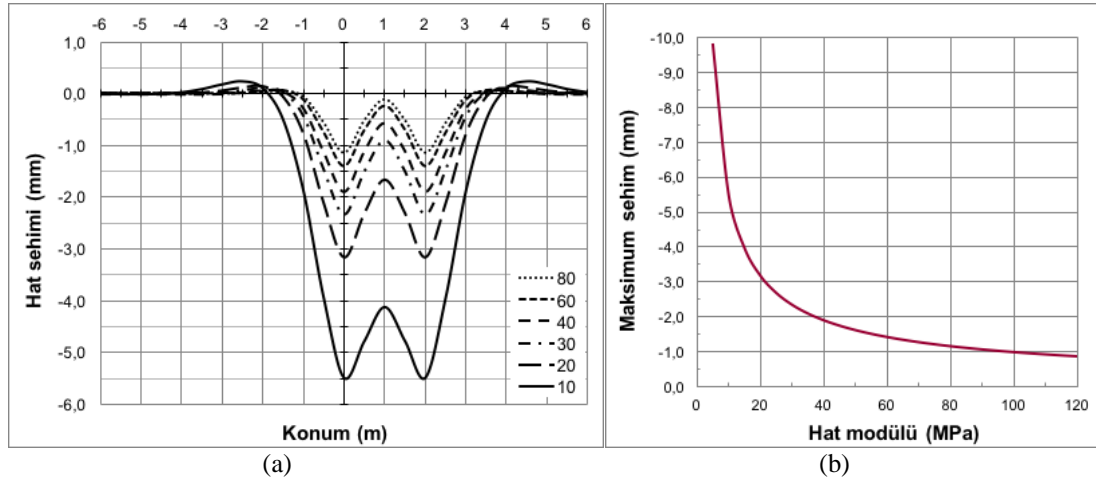
Hatta oluşan sehimler, hat içerisindeki yük aktarımı, enerji dağıtımı, ray momenti ve ray kesme kuvveti, hattın esneme direncine bağlı olarak değişen unsurlardır. Hattın güvenliği, işletme performansı, bakım maliyetleri ve hat bileşenlerinin servis ömrü bu unsurlar ile doğrudan ilişkilidir. Bu bölümde, performansı belirleyen bu unsurlar ile hat modülü arasındaki ilişki gösterilecektir.

## 3.1. Hat sehimleri

Modern demiryollarında yüksek işletim hızlarına ulaşılmış ve bu da hatta aktarılan yüklerin artmasına neden olmuştur. Teker yükünün artmasıyla, ray basıncı ve dinamik yüklere bağlı olarak hatta oluşan sehimler de artar. Ancak, sehimlerin kabul edilemeyecek seviyelere çıkması önlenmelidir. Bu nedenle, fazladan yükü karşılamak için daha dirençli hatlara ihtiyaç duyulmuştur [13]. Hat sehimi Denklem 3'teki formül yardımıyla hesaplanır.

Şekil 2(a)'da UIC 60 ray tipi için ve 90 kN teker yükünde statik yüklemde oluşan hat sehimleri, farklı hat modülleri için gösterilmiştir. Çift dingilli bir boji içerisindeki tekerler 0 ve 2. m'ye yerleştirilmiştir. Düşük hat modülünde yüksek sehimlerin meydana geldiği ve oluşan sehim çukurunun hattın daha geniş bir kısmını etkilediği görülmektedir. Düşük hat modülünde, dingil aralığına da bağlı olmak üzere aynı boji içerisindeki komşu tekerler birbirinin sehim alanından etkilenebilir. Bu da hattın deneyimlediği etkin esneme direnç değerinin tek teker altındaki esneme direnci değerinden farklı olmasına yol açar [14]. Buna kıyasla yüksek hat modülünde, sehim daha çok tekerin hatta temas ettiği nokta çevresinde oluşmaktadır. Bu nedenle tekerler arasındaki etkileşim daha azdır.

Şekil 2(b)'de ise hat modülünün artmasıyla hatta oluşan maksimum sehimin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu açıdan hat modülünün yüksek seçilmesi gerekir. Ancak belirli bir hat modülünden itibaren maksimum sehimdeki düşüş oranı azalmaktadır. Bu hat modülü, oluşan sehimler açısından optimum olarak kabul edilebilir. Bu noktadan itibaren hat modülünü daha fazla artırmak sehimi azaltsa da, bu azalış küçük boyutlarda olacağından çok avantajlı ve ekonomik olmayacaktır.



Şekil 2. a) Farklı hat modüllerinde oluşan sehim çukurları b) Hat modülü ile maksimum sehimin değişimi

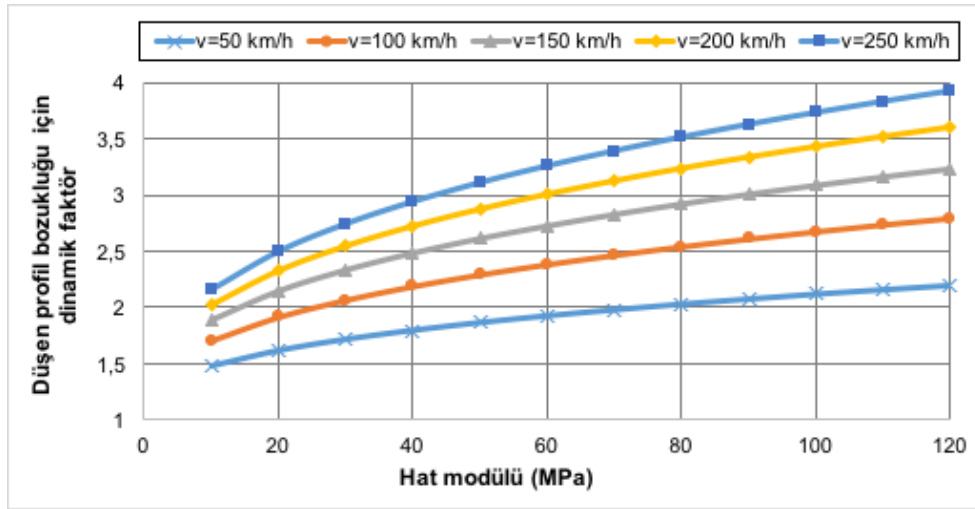
## 3.2. Dinamik kuvvetler

Sehimler konusundaki hesaplamalar belirli bir dingil yükü ve statik yüklem içinidir. Hatta profil bozuklukları veya esneme direnci değişimi olması durumunda oluşacak dinamik kuvvetler nedeniyle bu sehimler daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Hat esneme direnci dinamik kuvvetler üzerinde önemli bir rol oynar [5, 9]. Dinamik dingil yükünün artması, hat bileşenlerinde aşınma

## Demiryolu Mühendisliği

ve yorulmaya neden olur [7, 15]. Ayrıca, dinamik kuvvet nedeniyle hattaki kalıcı sehimleri artar ve hat güzergahı boyunca oturma farklılıkları oluşur. Trenin tekrarlı olarak bu noktalardan geçmesiyle dinamik kuvvet giderek artar. Şekil 3'te 90 kN teker yüküne ve %1 sönülemeye sahip bir tekerin, 15 metre boyunca 15 mm'lik bir profil düşmesinde ortaya çıkan, Bezgin Yöntemi'ne [5, 9] göre elde edilmiş  $K_{B,d}$  dinamik kuvvet faktörleri gösterilmiştir.

Eğer dinamik darbe kuvveti hat boyunca esneme direncinin değişmesi nedeniyle ortaya çıkıyorsa, dinamik kuvvet esneme direncindeki değişim oranı ile orantılıdır. Ancak, ray profilindeki bozulmalar nedeniyle oluşan dinamik kuvvetler hat modülüyle birlikte artar. Trenin hızına da bağlı olmakla birlikte, Şekil 3'te  $u=120$  MPa için oluşan dinamik kuvvet faktörünün,  $u=10$  MPa'dakinin yaklaşık 2 katı olduğu görülmektedir. Profil bozukluğunun artmasıyla bu oranın 2'den fazla olabileceği görülmüştür [14]. Hesaplama tren süspansiyon özelliklerinin hesaba katılmadığı not edilmelidir. Süspansiyon ile oluşan dinamik kuvvetler düşürülebilir. Ancak bu durumda yine hat modülünün etkisi göz ardı edilemez.



Şekil 3. Hat modülüyle ray profilindeki düşme nedeniyle oluşan dinamik kuvvet faktörünün değişimi

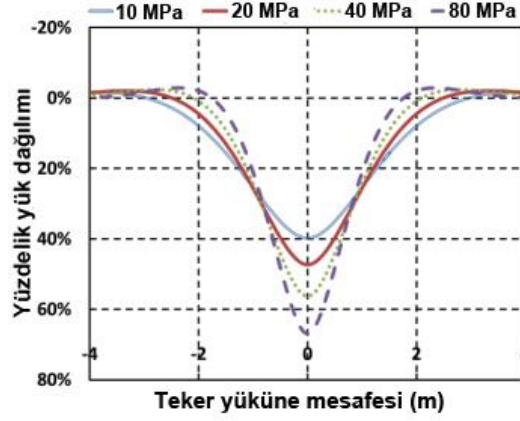
### 3.3. Yük dağıtımı

Hattaki toplam oturma, genellikle altyapıdan (zeminden) kaynaklı olarak balast tabakasındaki oturma nedeniyledir. Tekrarlı yükler altında gerilime maruz kalan balast tabakasında kalıcı sehimler meydana gelir [16, 17]. Hattın geometrik stabilitesini korumak için traversler ile istenen yük dağılımı sağlanmalıdır [2].

Esneme direnci düşük bir hatta, teker-ray temasının hat boyunca daha uzun bir sehim çukur meydana getirmesi, tekerden hatta aktarılan yükün daha geniş bir alanda yayılmasını sağlar. Bu durumda tekerlek yükleri, hat boyunca daha fazla travers üzerinde dağılır. Bu nedenle travers ve balast arasındaki temas gerilimi düşüktür [3]. Esneme direnci yüksek bir hatta ise yük dağıtım özelliği daha azdır [2]. Bu nedenle yük, tekerin temas ettiği raydaki travers üzerinde yoğunlaşır ve alt katmanlara daha dar bir açı ile yayılır. Tekerin temas ettiği noktadaki ray ve traversler üzerindeki basınç artar.

Şekil 4'te farklı hat modüllerinde, yükün uygulanma noktasına göre mesafe ile toplam teker yükünün yüzdesel dağılımı verilmiştir. Hat modülü 10 MPa olan esneme direnci düşük bir hattaki yük altındaki travers, teker yükünün %40'ını taşıırken, hat modülü 80 MPa olan bir hatta %60'ından fazlasını taşımaktadır [3].

# Demiryolu Mühendisliği



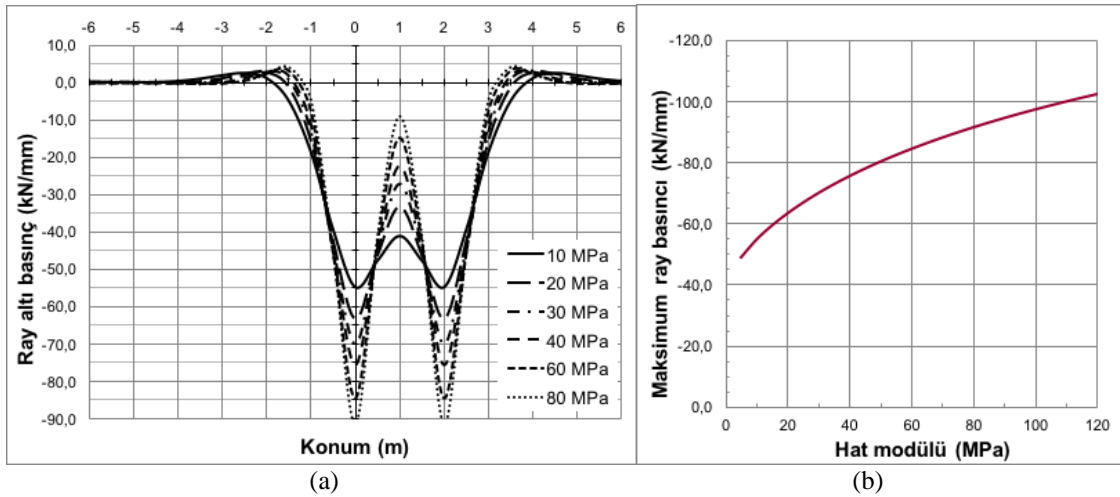
Şekil 4. Teker yüküne olan mesafeye göre aktarılan yüzdelik yük dağılımı [3]

## 3.4. Ray altındaki basınç

Ray altındaki basıncın artmasıyla travers ve balast tabakasındaki gerilmeler artar ve daha kolay aşınırlar. Winkler modeline göre rayın traverslere uyguladığı basınç Denklem 6'ya göre hesaplanır.

$$p(x) = uw(x) = \frac{PB}{2} e^{-B|x|} [\cos(B|x|) + \sin(B|x|)] \quad (6)$$

Hat modülü ile ray altındaki basınç arasındaki ilişki Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5(a)'da düşük hat modülüne sahip esneme direnci düşük hatlarda rayın daha uzun bir kısmının basınca maruz kaldığı görülmektedir. Diğer yandan yüksek hat modülünde, ray basıncının büyük bir kısmı teker altında meydana gelir. Tekerlerin raya temas ettiği iki noktanın ortasında dahi ray üzerindeki basınç oldukça azdır. Şekil 5(a) ve 5(b)'de hat modülünün artmasıyla ray basıncının arttığı görülmektedir. Hat modülü  $u=120$  MPa için oluşan basınç,  $u=10$  MPa için oluşan basıncın yaklaşık 2 katı kadardır.



Şekil 5. a) Farklı hat modüllerinde oluşan ray basıncı b) Hat modülü ile maksimum ray basıncının değişimi

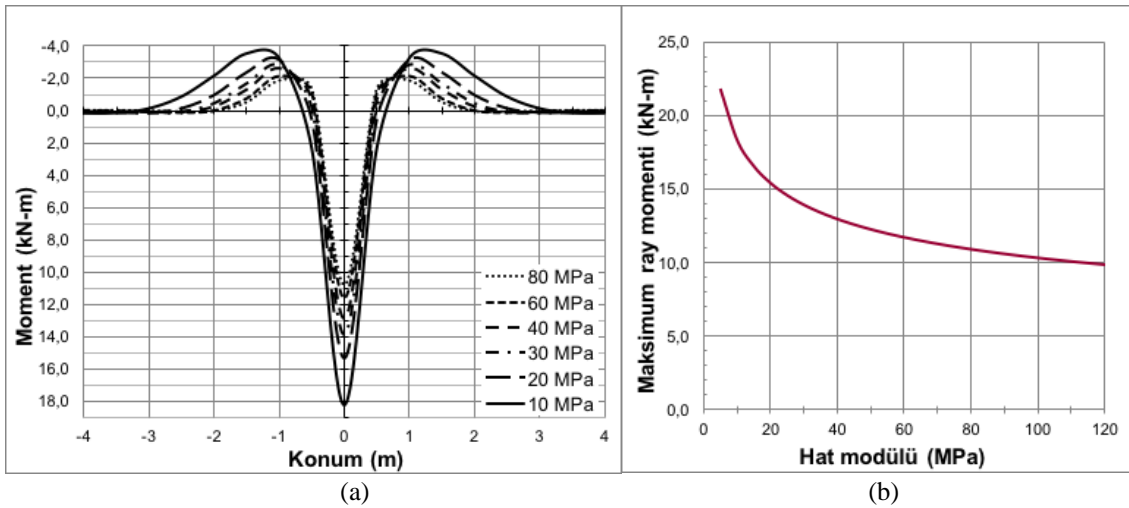
## 3.5. Ray momentleri

Ray eğilmelerinin artmasıyla raydaki gerilmeler artar ve ray, travers ve bağlantı elemanı gibi bileşenlerin servis ömürleri azalır [3]. Tasarım aşamasında ray eğilme momentine uygun bir ray profili seçilir [19]. Esneme direnci düşük bir hattın yüke geniş bir alanda tepki vermesi, daha uzun bir ray kesiminin eğilmeye maruz kalmasına ve ray momentlerinin artmasına neden olur [2, 3]. Ray momenti, Winkler Modeli'nden yola çıkarak Denklem 7 ile hesaplanır.

$$M(x) = -EIw''(x) = \frac{P}{4B} e^{-B|x|} [\cos(B|x|) - \sin(B|x|)] \quad (7)$$

Hat modülünün artmasıyla ray momentinde meydana gelen değişim Şekil 6 ile gösterilmiştir. Şekil 6(a)'da  $u=10$  MPa için oluşan maksimum ray momentin,  $u=120$  MPa için oluşan değer 2 katına yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca düşük hat modülünde oluşan ray momentleri daha geniş bir alanda etkilidir.

Şekil 6(b)'de artan hat modülüyle azalan maksimum ray momentleri gösterilmiştir. İki parametre arasındaki değişimi gösteren eğri, ray sehimi ve enerji dağıtımındaki benzer bir davranışa sahiptir. Belirli bir hat modülünden sonra ray momentindeki azalış kayda değer seviyelerde değildir. Bu durum hat modülünü çok yüksek değerlere çıkarmanın pek çok açıdan gerekli olmadığını göstermektedir.



Şekil 6. a) Farklı hat modüllerinde oluşan ray momentini b) Hat modülü ile maksimum ray momentinin değişimi

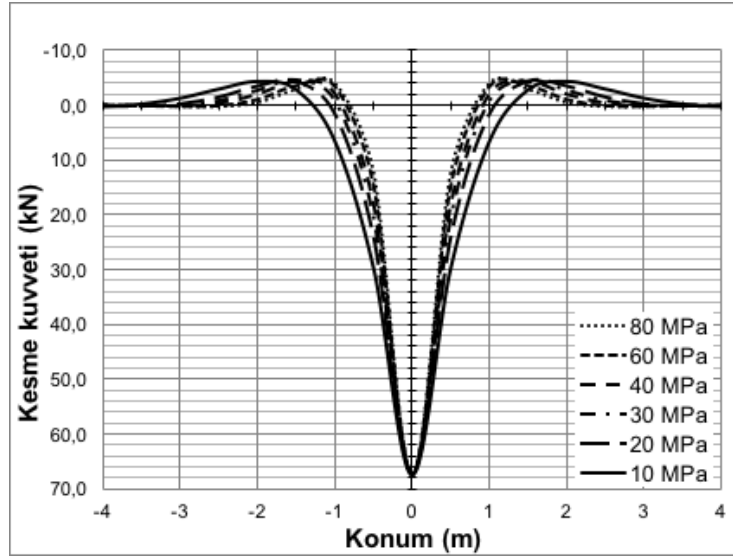
### 3.6. Ray kesme kuvveti

Küçük bir alanda meydana gelen ray-teker teması nedeniyle oluşan yorulma çatlaklarının iki tipi vardır. Çatlaklar temas yüzeyinde başlayarak yayılabilir veya yüzeyin altında, maksimum tekrarlı kesme gerilmelerinin olduğu alanda oluşur [20]. Yorulma testlerinde çatlakın maksimum kesme gerilimi düzleminde ilerlemeye devam ettiği gözlemlenmiştir [21]. Ray kesme kuvveti Denklem 8'deki formül ile hesaplanabilir.

$$V(x) = -EIw'''(x) = \frac{P}{2} e^{-B|x|} \cos(B|x|) \quad (8)$$

Şekil 7'de farklı hat modüllerinde meydana gelen maksimum kesme kuvvetlerinin eşit olduğu görülmektedir. Ancak düşük hat modülündeki kesme kuvveti rayın daha uzun bir kısmını

etkilemektedir. UIC 60 ray tipi, 1.5 dinamik yük faktörü ve 90 kN teker yükü için tüm hat modüllerinde oluşan maksimum kesme kuvveti 67,5 kN'dir.

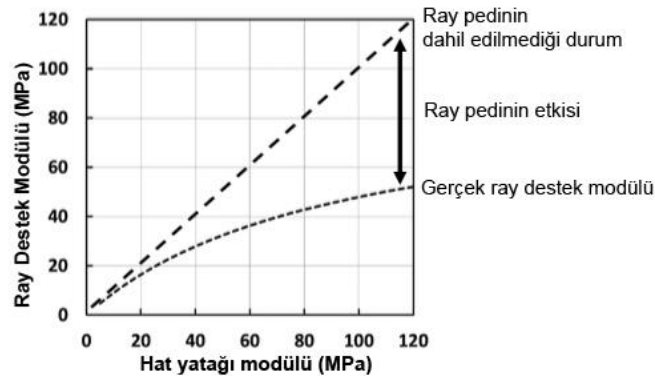


Şekil 7. Farklı hat modüllerinde ortaya çıkan kesme kuvvetleri

#### 4. Uygun Hat Esneme Direncinin Sağlanması

Bir önceki bölümde düşük ve yüksek esneme direncinin avantaj ve dezavantajları nümerik olarak gösterilmiştir. Hattın köprü üzerinden veya tünelden geçişi veya yüksek esneme dirençli dolgu malzemesi kullanımı, hattın esneme direncinin artmasına neden olur. Bu geçiş bölgelerinde, düşük esneklik direncine sahip ray pedi ve travers altı pedlerin (USP) kullanımıyla hattın esneme direnci düşürülebilir. Bu pedler, bir önceki bölümde bahsedilen hattın performansını belirleyen parametreler üzerinde de oldukça etkilidir. Diğer yandan, kötü kalitedeki dolgu malzemesi kullanımı veya hattın geçtiği bölgenin yumuşak doğal zemine sahip olması gibi nedenler hat esneme direncinin azalmasıyla sonuçlanır. Bu bölgelerde iyileştirme çalışmaları yapılarak istenen esneklik direnç değeri sağlanmalıdır. Aksi halde sürekli oturmalar meydana gelir.

Şekil 8'e göre, ray pedinin etkisi göz ardı edildiğinde 120 MPa olarak hesaplanan hat modülü, ray pedi hesaba katıldığında 60 MPa'dan daha düşük olabilir. Bu sonuç ray pedi esneme direncinin, sistemin genel esneme direnci içerisindeki önemini göstermektedir.



Şekil 8. Ray destek modülünün belirlenmesinde ray pedinin önemi [3]

Ray pedi esneme direncinin artmasıyla hattın esneme direnci de artar. Bu durumda ray pedi esneme direncinin, hat performansını belirleyen faktörler üzerindeki etkileri hat esneme direnciyle aynıdır. Örneğin ray pedi düşük esneme dirençli seçilirse tekerlek yükü daha geniş bir



## Demiryolu Mühendisliği

alan içerisinde yayılır. Yüksek esneme direncine sahip bir ray pedi kullanımında ise tekerin temas ettiği ray noktasından yayılan yük daha fazladır [22]. Bunun dışında ray pedinin sağladığı en önemli iki avantaj şu şekildedir:

1. Demiryolu hatlarında periyodik aşınmalar sonucunda ondülasyon (rail corrugation) adı verilen ve hat ile araca ciddi hasar verebilen bozukluklar ortaya çıkar. Yumuşak ray pedi kullanımını ondülasyonların gelişimini engeller [23, 24].
2. Tekerden hatta aktarılan dinamik yükün etkilerini azaltır ve traversi çatlamaya karşı korur [25].

Travers altı pedler (USP) ise travers ve balast arasında elastik bir katman oluşturmak amacıyla traversin alt yüzüne yerleştirilen 10-20 mm kalınlığındaki pedlerdir. Ped ile balast tabakası arasındaki etkileşim, pedin esneme direnciyle yakından ilgilidir [26]. Ped esneme direncinin artmasıyla genel hat esneme direnci de artar. Hat sehimi, ray momentleri gibi performans belirleyen faktörlerin esneme direncine bağlı değişimi 3. Bölüm’de anlatılanlara benzer şekilde olur. Ancak, travers altı ped kullanımı şu iki farklılığı kazandırır:

1. Travers altı ped ile balast tabakası arasındaki temas alanı, travers-balast etkileşimindekine göre yaklaşık 10 kat daha fazladır [37]. Temas alanının artması, balast tabakasındaki basıncı ve dolayısıyla bu tabakadaki aşınmayı azaltır [28, 29].
2. Travers altı ped kullanımıyla hat boyunca gerçekleşen esneme direnci değişimleri azaltılabilir. Farklı esneme direncine sahip bölgeler arasında daha yumuşak bir geçiş sağlanır. Bu açıdan geçiş bölgelerinde oluşan dinamik yükler ve titreşimler daha az olur [30].

Ray pedleri ve travers altı pedler yukarıda verilen özellikleri bakımından hat esneklik direnci değeri üzerinde etkilidir. Bu iki hat bileşeni haricinde, yüksek esneme direncine sahip bir hatta balast matları ve kum örtü tabakası kullanılabilir. Bir diğer çözüm de balast ve altbalast tabaka derinliklerini artırarak yüklerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlamaktır.

Düşük esneme direncine sahip bir hatta, düşük kalitedeki bir zemin üzerinden geçiyorsa ankraj uygulanması veya geoweb ve geogrid gibi güçlendirme teknikleri kullanılması gerekir. Eğer esneme direncinin düşme nedeni yüksek su seviyesi veya kötü drenaj ise drenaj koşulları iyileştirilmelidir [3, 31].

### 5. Sonuç ve Yorum

Bu çalışma kapsamında hat esneme direncinin, hattın işletmesi boyunca gösterdiği performansı belirleyecek olan faktörler üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Çalışma sonucunda; hatta oluşan sehimler, hat içerisindeki enerji dağıtımı ve ray momentleri açısından yüksek esneme dirençli hatlara ihtiyaç duyulurken, teker dinamik yükleri, hat içerisindeki yük dağıtımı ve ray basıncı düşünüldüğünde düşük hat esneme direnci gerektiği görülmüştür. Ayrıca yüksek esneme direncinin (veya yüksek hat modülünün) istendiği durumlarda, hat modülünü çok fazla artırmanın önemli bir yarar sağlamadığı tespit edilmiştir. Hatta bu durum, maliyet açısından bir zararar dönüşebilir. Bu nedenle tüm bu hat performans parametrelerini göz önünde bulundurarak, her bir faktör açısından güvenli sınır içerisinde kalacak optimum bir hat esneme direnci seçilmelidir. Uygulama sırasında zemin durumu, hattın köprü/tünel üzerinden veya tarihi yapıların çevresinden geçmesi gibi özel koşullar dikkate alınarak gerekli müdahaleler yapılmalıdır. Yüksek esneme direncine sahip bir bölgede balast matları, yumuşak ray pedi ve travers altı pedi kullanımıyla, düşük esneme direncine sahip bir bölgede zemin iyileştirme ve drenaj uygulamalarıyla, esneme direnci değişim bölgelerinde ise yine pedler yardımıyla hat boyunca mümkün mertebede sabit istenilen değerlerde bir hat esneme direnci sağlanmalıdır.

## Kaynakça

- [1] G. Sauvage and J. Fortin, “La traînée de roulement des véhicules de chemin de fer,” *Rev. Gen. Chemins Fer*, pp. 383–390, 1982.
- [2] B. Lichtberger, *Track Compendium*. Hamburg, Germany: Eurail Press, 2005.
- [3] W. Powrie and L. Le Pen, *A Guide to Track Stiffness*. Southampton, UK: University of Southampton, 2016.
- [4] M. Burrow, P. Teixeira, T. Dahlberg, and E. Berggren, “Track stiffness considerations for high speed railway lines,” *Railway transportation: policies, technology and perspectives*, pp. 303–354, 2009.
- [5] N.Ö. Bezin, “Development of a New and an Explicit Analytical Equation that Estimates the Vertical Dynamic Impact Loads of a Moving Train” *Procedia Engineering* Volume 189, 2017, Pages 2-10
- [6] M. Wehbi and P. Musgrave, “Optimisation of track stiffness on the UK Railways,” *Permanent Way Institute Journal*, pp. 135, 2017.
- [7] E. Berggren, “Railway track stiffness. Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance,” Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009.
- [8] C. Kolukirik and N.Ö. Bezin, “Demiryolu taşıt tekerleklerinde oluşabilen geometrik kusurlar nedeniyle meydana gelen dinamik darbe yüklerinin tahmini için yeni bir yöntem,” *7. Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Turkey, 2017.
- [9] N.Ö. Bezin, M. Wehbi “Advancement and Application of the Bezin Method to Estimate Effects of Stiffness Variations along Railways on Wheel Forces” *Transportation Research Record*, Volume: 2673 issue: 7, page(s): 248-264. 2019.
- [10] O. Şahin, “Demiryolunda hat rijitliğinin ve etkilerinin incelenmesi,” M.Sc. dissertation, İstanbul Technical University, İstanbul, 2011.
- [11] C. Aron and E. Jonas, “Structural element approaches for soil-structure interaction,” M.Sc. dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2012.
- [12] L. Puzavac, Z. Popović, and L. Lazarević, “Influence of track stiffness on track behaviour under vertical load,” *PROMET - Traffic & Transportation*, no. 24, pp. 405–412, 2012.
- [13] B. McVey, C. Norman, N. Wood, S. Farritor, R. Arnold, M. Fateh, and M. El-Sibaie, “Track Modulus Measurement From A Moving Railcar,” *Proceedings of the AREMA 2005 Annual Conference*, Chicago, IL, 2005.
- [14] E. Balcı, “Demiryollarında esneklik değişimlerinin düşey tekerlek kuvvetleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi” M.Sc. dissertation, İstanbul Üni.-Cerrahpaşa, İstanbul, 2019.
- [15] J. Ringsberg, “Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue,” *International Journal of Fatigue*, no. 22(3), pp. 205–215, 2000.
- [16] Y. Sato, “Study on high-frequency vibration in track operated with high-speed train,” *Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst. (RTRI)*, no. 18(3), pp. 63–76, 1977.
- [17] V.A. Diyaljee, “Effects of stress history on ballast deformation”, *Journal of Geotechnical Engineering*, no. 113(8), pp. 909–914, 1987.
- [18] A.L. Pita, P.F. Teixeira, and F. Robuste, “High speed and track deterioration: The role of vertical stiffness of the track,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, no. 218(1), pp. 31–40, 2004.
- [19] A.D. Kerr, *Fundamentals of railway track engineering*. Omaha, Nebraska: Simmons-Boardman Books, 2003.
- [20] A.F. Bower, “The Influence of Crack Face Friction and Trapped Fluid on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue Cracks,” *Journal of Tribology*, no. 110(4), 1988.
- [21] P.E. Bold, M.W. Brown, and R.J. Allen, “Shear mode crack growth and rolling contact fatigue,” *Wear*, no. 144(1-2), pp. 307–317, 1991.
- [22] V. Arlı, *Demiryolu Mühendisliği (genişletilmiş 2. baskı)*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2015.
- [23] H. Ilias, “The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth,” *Journal of Sound and Vibration*, no. 227(5), pp. 935–948, 1999.
- [24] J.I. Egana, J. Vinolas, and M. Seco, “Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system,” *Wear*, no. 261(2), pp. 21, 2006.
- [25] A. Remennikov, S. Kaewunruen, and K. Ikaunieks, “Deterioration of dynamic rail pad characteristics,” *Conference on Railway Engineering*, Melbourne, Australia, 2006, pp. 173-179.
- [26] P. Schneider, R. Bolmsvik, and J.C.O. Nielsen, “In situ performance of a ballasted railway track with under sleeper pads,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, no. 225(3), pp. 299–309, 2011.

- [27] A. Riessberger, “Ballast track for high speeds,” *Proceedings "Tracks for High-Speed Railways"*, Porto, Portugal, 2006, pp. 23-44.
- [28] S. Witt, “The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics,” *Proceedings of Linköping University*, Division of Solid Mechanics, 2008.
- [29] A. Johansson, J.C.O. Nielsen, R. Bolmsvik, A.Karlström, and R. Lundén, “Under sleeper pads—Influence on dynamic train–track interaction,” *Wear*, no. 265(9-10), pp. 1479–1487, 2008.
- [30] J. Ali Zakeri, M. Esmaili, and H. Heydari-Noghabi, “A field investigation into the effect of under sleeper pads on the reduction of railway-induced ground-borne vibrations,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, no. 230(3), pp. 999–1005, 2016.
- [31] P.K. Woodward, J. Kennedy, O. Laghrouche, D.P. Connolly, and G. Medero, “Study of railway track stiffness modification by polyurethane reinforcement of the ballast,” *Transportation Geotechnics*, no. 1(4), pp. 214–224, 2014.

### Özgeçmiş



#### **Erdem BALCI**

1994 yılında Wuppertal’da doğdu. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2019 yılında İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde, Doç. Dr. Niyazi Özgür Bezg’in danışmanlığı ile demiryolu araç dingil mesafelerinin ve hat esneklik değişimlerinin tekerlek yükleri üzerindeki etkilerini incelediği teziyle yüksek lisansını tamamladı ve yüksek mühendis unvanını kazandı. Aynı yıl içerisinde Yıldız Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde tezsiz yüksek lisans çalışmalarını tamamladı. Demiryolu mühendisliği alanındaki çalışmalarına devam etmektedir.



#### **Niyazi Özgür BEZGİN**

1977 yılında Ankara’da doğdu. 1999 yılında Polytechnic University, Brooklyn İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2002 ve 2005 yıllarında Rutgers, the State University of New Jersey İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans ve doktorasını tamamladı. 7 yıllık özel sektör deneyiminin ardından 2013 yılında İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’da Öğretim Üyesi oldu. 2017 yılında Doçent unvanını kazandı. Demiryolu hat mekaniği üzerine çalışmalarına, Bezg’in Yöntemi adını verdiği çalışmasını geliştirerek devam etmektedir. Kendisi bugün, demiryolu hatları üzerine etki eden dinamik darbe kuvvetlerinin oluşumunu açıklamak üzere 2021’de sunulacak olan bir teori geliştirmektedir.