

DEMİRYOLU HATLARINDA ELASTİK PED KULLANIMININ DİNAMİK DARBE KUVVETLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

THE EFFECTS OF THE USE OF ELASTIC PADS ON DYNAMIC IMPACT FORCES IN RAILWAY TRACKS

Erdem BALCI*, Niyazi Özgür BEZGİN**

ÖZET

Geleneksel demiryolları ray, ped, travers, balast ve altbalast katmanlarından meydana gelmektedir. Demiryolu hattına ait eşdeğer esneme direnci ise bu bileşenlerin esneme dirençlerinin bir kombinasyonudur. Elastik pedlerin esneme direnci, hattın esneme direncini etkileyerek hat performansı üzerinde önemli bir rol oynar. Özellikle toprak destekli bir hattan beton destekli bir hatta veya beton destekli bir hattan toprak destekli bir hatta geçilen kritik bölgelerde, iki bölge arasındaki esneme direnci farkları yüksek dinamik darbe kuvveti değerlerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu bölgelerde elastik pedler kullanılarak bir "geçiş bölgesi" tasarlanmalıdır.

Bezgin Yöntemi, eşdeğer hat ve sistem esneme dirençleri ile dinamik darbe kuvvetlerini ilişkilendirir. Bu çalışmada, elastik ped kullanımının demiryolu hattına aktarılan dinamik kuvvetler üzerindeki etkisi Bezgin Yöntemi kullanılarak analitik olarak incelenmiştir. Farklı esneme direnç değerlerine sahip bölgeler arasında geçiş yapılırken ortaya çıkan dinamik kuvvetlerin, elastik ped kullanımıyla %27'ye kadar azaltılabileceği görülmüştür. Ray pedleri ve travers altı pedlerin hat performansına etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için yapılması gereken çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ray pedi, Travers altı pedi, Hat esneme direnci, Dinamik darbe kuvvetleri, Bezgin yöntemi

ABSTRACT

Conventional railway tracks consist of rail, pad, sleeper, ballast, and sub-ballast layers. Equivalent track stiffness is the combination of the stiffness of these layers. The stiffness of the elastic pads affects the equivalent track stiffness and thus, track performance. Especially in critical areas where an earth-supported track is passed to a concrete-supported track or from a concrete-supported track to an earth-supported track, the stiffness differences between the two regions may cause high dynamic impact force values. A "transition zone" should be designed using elastic pads in these areas.

Bezgin Method relates the equivalent track and system stiffness with the dynamic impact forces. In this work, the effects of the use of elastic pads on the dynamic impact forces are analytically investigated by using Bezgin Method. It is seen that dynamic impact forces that occur while a train passes over the zones with different stiffness values can be reduced up to %27. Required works to understand the effects of rail pads and under sleeper pads on the track performance are suggested.

Keywords: Rail pad, Under sleeper pad, Track stiffness, Dynamic impact forces, Bezgin method

Geliş Tarihi/Received: 4 Nisan 2022
Kabul Tarihi/Accepted: 9 Haziran 2022

Araştırma Makalesi/Research Article

*
İnşaat Bölümü,
Bülent Ecevit Üniversitesi,
Zonguldak/Türkiye

Department of Construction,
Bülent Ecevit University,
Zonguldak/Turkey

ORCID: 0000-0003-1759-1946

**
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
İstanbul/Türkiye

Department of Civil Engineering,
Istanbul University-Cerrahpaşa,
Istanbul/Turkey

ORCID: 0000-0002-6518-0378

1. GİRİŞ

Demiryolları, ulaşımda dünya çapında önemli bir rol oynar. Geleneksel bir demiryolu hattı ray, ped, travers, balast ve altbalast katmanlarından oluşur. Ray oturma alanlarına yerleştirilmiş ray pedleri, ray ile travers arasında yumuşatıcı bir katman olarak rol alır. Ray pedlerinden yeterince yararlanılmaması, ray oturma alanındaki traverslerin çatlaması, yüksek hat oturmaları, yüksek hat titreşimleri, buraj sırasında balast ve altbalast tabakasındaki kırılmalar gibi sorunlara neden olabilir (Remennikov ve Kaewunruen, 2005). Travers altı pedler ise travers tabanına yerleştirilen ve travers ve balast katmanları arasında elastik bir katman oluşturan pedlerdir. Travers altı pedlerin iki ana kullanım amacı zemin titreşimlerini engellemek ve balast hasarını önlemektir (Johansson vd., 2008). Travers altı pedler temas basıncını azaltır ve yıpranmaları engeller. Bunun yanı sıra, daha düzgün bir yük dağılımıyla hat boyunca esneme direncindeki değişimlerin etkisini azaltır. Ray pedi ve travers altı pedlerin esneme direnci, eşdeğer hat esneme direnci üzerinde oldukça etkilidir. Eşdeğer hat esneme direncinde meydana gelen değişimlerin ise hatta aktarılan dinamik darbe kuvvetleri üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Darbe kuvvetlerinin belirli bir değeri aşmasıyla hat bileşenlerinde yıpranmalar meydana gelir ve hattın servis ömrü azalır. Hattın

servis süresi boyunca sık aralıklı ve yüksek maliyetli bakım çalışmalarına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle dinamik darbe kuvvetleri olabildiğince minimum seviyede tutulmalıdır.

Bugüne kadar elastik pedlerin esneme direncinin, dinamik darbe kuvvetleri üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar saha deneyleri veya rayların ayırık yaylarla desteklenen kirişler olarak modellendiği sonlu elemanlar analizleridir (Wu ve Thompson, 2004; Bruni vd., 2009; Pålsson ve Nielsen, 2015; Ngamkhanong ve Kaewunruen, 2020; Zhai ve Cai, 1997; Kaewunruen ve Remennikov, 2007; Dukkupati ve Dong, 1999; Khajehdezfuly, 2019; Li ve Berggren, 2010). Bazı çalışmalarda nümerik analiz ile elde edilen sonuçlar tam ölçekli saha deneyleriyle (Bruni vd., 2009; Pålsson ve Nielsen, 2015; Ngamkhanong ve Kaewunruen, 2020; Zhai ve Cai, 1997) veya laboratuvarda, düşen ağırlık deneyi ile (Kaewunruen ve Remennikov, 2007) doğrulanmıştır. Ped esneme direncinin artmasıyla dinamik darbe kuvvetinin de arttığı bilinmektedir (Remennikov ve Kaewunruen, 2005; Bruni vd., 2009; Zhai ve Cai, 1997; Li ve Berggren, 2010; Nicklisch vd., 2010; Markine vd., 2011). Kusurlu hat yüzeyinden tren geçişi esnasında iki adet maksimum dinamik yük meydana gelir (P_1 ve P_2). Birincisi (P_1), tekerlek-ray yüzeyindeki kusurlar nedeniyle temas sırasında derhal ortaya çıkar. Daha sonradan gelen ikinci maksimum yük (P_2) ise aksayan tekerlek-ray teması nedeniyle balast tabakasında oluşan titreşim nedeniyledir (Choi, 2013). Dukkupati ve Dong (1999), ray bağlantı noktası üzerinden geçerken oluşan dinamik kuvvet karakteristiğini ayırık destekli model üzerinden incelemiş ve deneysel verilerle doğrulamıştır (Dukkupati ve Dong, 1999). Ray pedi esneme direncinin ikinci maksimum dinamik yük (P_2) üzerinde etkili olduğunu görmüştür. Ngamkhanong ve Kaewunruen (2020), sınır darbe koşullarını test etmek için oluşturdukları hat modeline 1000 kN'luk dinamik darbe kuvveti uygulamıştır (Ngamkhanong ve Kaewunruen, 2020). Travers altı ped kullanımında tekerlek-ray temas kuvvetlerinin %10 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Kaewunruen ve Remennikov (2007), LS-Dyna sonlu elemanlar paketini kullanarak oluşturdukları üç boyutlu model üzerinden dinamik darbeleri incelemiş ve analiz bulgularını tam ölçekli düşen ağırlıklı darbe test makinesi ile doğrulamıştır (Kaewunruen ve Remennikov, 2007). 200-750 MPa aralığındaki ray pedi modülünde dinamik darbe kuvvetlerindeki artışın en fazla olduğu görülmüştür. Bruni ve diğerleri (2009), iki farklı model ile makaslardaki tekerlek-tren etkileşimini incelemiş ve bulgularını üç farklı hattan aldıkları verilerle doğrulamıştır (Bruni vd., 2009). Travers altı ped kullanımının ray ve özellikle zemin titreşimlerini önemli ölçüde azalttığını gözlemlenmiştir. Pålsson ve Nielsen (2015), saha üzerindeki hat esneme direnci değerlerini 20 Hz'ye kadar ulaşan frekans aralıklarında tekerlekli hat esneme direnci ölçüm aracı (RMSV) ile ölçmüştür (Pålsson ve Nielsen, 2015). Farklı ray pedi kullanımlarında eşdeğer hat esneme direnci ve temas kuvvetlerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Makas üzerinden 70 km/sa hızla tren geçişi esnasında, yumuşak ped ve orta sertlikteki ped kullanımlarında ortaya çıkan maksimum düşey tekerlek-ray temas kuvvetleri arasında %13'lük bir farka rastlanmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde, modelde kullanılan elemanlara ait malzemelerin Poisson oranı, yoğunluğu, kalınlığı, yatak katsayısı, elastisite modülü gibi parametreler girilmektedir. Bu nedenle analiz yapılacak hatta ait tüm parametreler ayrıntılı bir şekilde belirlenmelidir. Sonlu elemanlar analizi maliyet gerektiren ve uzun zaman alan bir süreç olabilmektedir. Buna alternatif olarak daha önceden tanıtılmış olan Bezgin Yöntemi (Bezgin, 2017; Bezgin, 2018) eşdeğer hat esneme direnci ve hat ile demiryolu aracına ait yayların oluşturduğu eşdeğer sistem esneme direnci ile dinamik darbe kuvvetlerini ilişkilendiren bir dizi denklemler sunar. Dolayısıyla elastik pedlerin eşdeğer hat ve sistem direnci üzerindeki etkisi belirlendikten sonra bu denklemler yardımıyla elastik pedlerin dinamik darbe kuvvetleri üzerindeki etkisi incelenebilir. Bu yöntemin uygulanması ile elde edilen denklemlerde; eşdeğer hat esneme direnci, trene ait esneme direnci, sönümlenme oranı, statik tekerlek kuvveti, tren hızı, pürüzlü hat uzunluğu ve eğer hattaki bozukluk profilden kaynaklı ise hattaki profil değişim miktarı ve profil değişim tipi (yükselen/alçalan profil) parametreleri ile dinamik darbe kuvveti tahmini yapılabilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda genellikle elastik pedlerin etkisi makaslar, ray bağlantı noktaları gibi ray profil değişimlerinin meydana geldiği alanlarda incelenmiştir. Bu çalışmada ise elastik ped esneme direncinin, farklı esneme direncine sahip bölgeler arasındaki geçişler esnasındaki etkileri ortaya konmuştur.

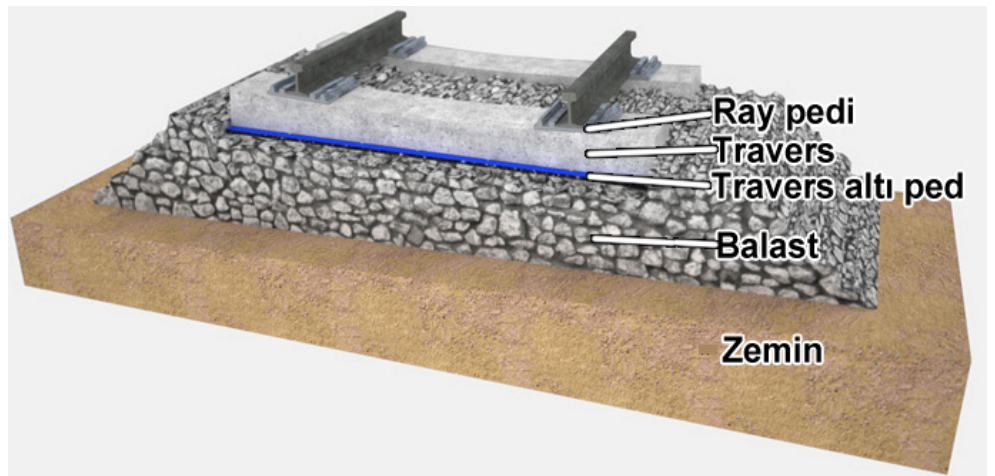
Çalışma kapsamında ray pedi ve travers altı pedi esneme direncilerinin dinamik darbe kuvvetleri üzerindeki etkisi Bezgin Denklemleri (Bezgin, 2017) ve Genişletilmiş Bezgin

Denklemleri (Bezgin ve Wehbi, 2019) yardımıyla analitik olarak gösterilmiştir. Elde edilen bulgular literatürdeki sonlu elemanlar analizi yöntemiyle elde edilen bulgular ile karşılaştırılmıştır. Hattaki mevcut bozukluklara rağmen sadece elastik eleman kullanımıyla hatta aktarılan dinamik darbe kuvvetlerinin önemli ölçüde azaltılabileceği vurgulanmıştır. Daha sonra tren süspansiyon özelliklerinin dinamik kuvvetler üzerindeki etkisi de dahil edilerek elastik ped kullanılan ve kullanılmayan hatlar arasındaki farklar tekrar incelenmiştir. Tren süspansiyon özelliklerinin de elastik pedler kadar dinamik darbe kuvvetleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür (Liu vd., 2009). Çalışmada, farklı esneme direncine sahip iki bölge arasındaki geçişlerde meydana gelen dinamik darbe kuvvetleri karşılaştırılmıştır. İki bölge arasındaki esneme direnci oranı arttıkça meydana gelen yüksek dinamik kuvvetlerin elastik pedler aracılığıyla azaltılması analitik olarak incelenmiştir.

2. ELASTİK PED ESNEME DİRENCİNİN DİNAMİK TEKER KUVVETLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Demiryollarında yüksek performanslı sefer işletimini sekteye uğratan problemlerin birçoğu hat esneme direnci değeri ile ilgilidir. Hat esneme direnci, belirli bir noktada uygulanan yük altında hatta oluşan maksimum sehimdir. Hat esneme direnci, hatta oluşacak sehim miktarını ve tekerlek yükünün hatta etkidiği alanın genişliğini belirler. Hat sehiminin azaltılması, hat içerisinde etkin enerji dağıtımının gerçekleştirilmesi ve ray momentlerinin en aza indirgenmesi açısından hat esneme direncinin yüksek bir değerde olması istenir. Öte yandan dinamik tekerlek kuvvetleri, hattaki yük dağıtımı, titreşimler ve ray basıncı göz önünde bulundurulduğunda hat esneme direncinin düşük olması istenir (Balci, 2020). Ayrıca esneme direncinin yüksek olması istenildiği durumlarda dahi, esneme direncinin çok yüksek olması maliyetli ve gereksiz olabilmektedir. Bu nedenle hat esneme direnci, tüm tasarım koşullarını karşılayabilecek ve maksimum hat performansını sağlayacak optimum bir değerde olmalıdır. López-Pita (1984), dinamik kuvvetleri ve enerji dağıtımını göz önünde bulundurarak optimum esneme direncini 50-78 kN/mm olarak bulmuştur (López Pita, 1984). Teixeira (2003), Paris-Lyon ve Madrid-Sevilla demiryolları üzerinde yapılan bakım çalışmalarından (Dahlberg, 2010)] yaptığı çıkarımla bakım maliyetlerini göz önüne alarak optimum esneme direncini 70-80 kN/mm olarak belirlemiştir.

Hattın optimum esneme direnci sağlamak için en yaygın çözüm, farklı özellikteki elastik elementlerin kullanımudur. Eşdeğer hat esneme direnci, hattı oluşturan tüm bileşenlerin esneme dirençlerinin bir kombinasyonudur ve Denklem 1'deki gibi elde edilir. Ped esneme direncinin, hat esneme direnci üzerinde doğrusal olmayan fakat önemli bir etkisi vardır. Hat boyunca, köprü ve tünel geçişleri, balast tabakasındaki aşınmalar, ray kaynakları gibi nedenlerle esneme direnci değişmektedir. Elastik pedlerin kullanımıyla eşdeğer hat esneme direnci, istenilen değere yakın seviyede tutulabilir. Ayrıca, hat boyunca gerçekleşen esneme direnci değişimlerinin ortaya çıkardığı dinamik darbe kuvvetlerinin etkisini azaltır (Lakuşi vd., 2010).

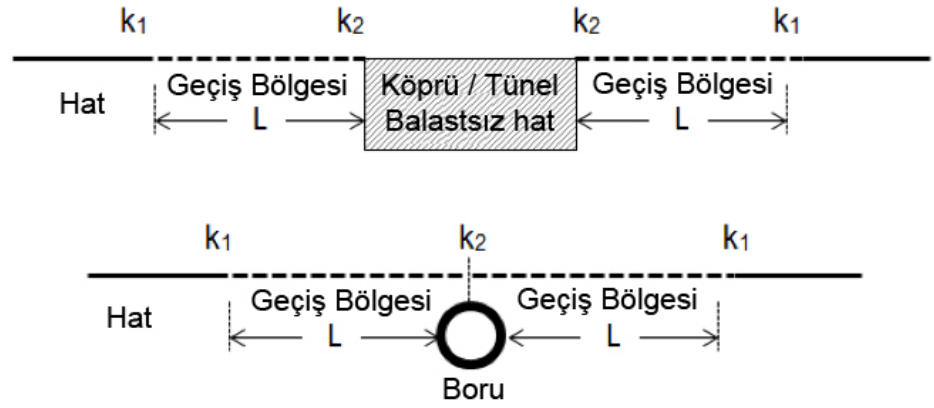


Şekil 1. Bir demiryolu en kesiti
(Kaewunruen ve Remennikov, 2007)

$$\frac{1}{k_{sistem}} = \frac{1}{k_{ray\ pedi}} + \frac{1}{k_{travers}} + \frac{1}{k_{balast}} + \frac{1}{k_{travers\ altı\ ped}} + \frac{1}{k_{zemin}} \quad (1)$$

Yumuşak ray pedi ve travers altı ped kullanımıyla hattın çeşitli katmanlarındaki gerilmeler dağıtılarak bu katmanlarda performans artışı sağlanabilir. Ancak elastik pedlerin en az bu kadar daha önemli bir diğer işlevi de hattın eşdeğer esneme direncini artırarak, performans düşüklüğüne yol açan ilk tetikleyici unsur olan dinamik darbe kuvvetlerini azaltmaktır.

Bezgin Yöntemi, hattaki profil bozuklukları ve esneme direnci farklılıkları ile eşdeğer hat esneme direncini ilişkilendirerek dinamik darbe faktörünü tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemden yararlanılarak hat profil bozuklukları, hat esneme direnci değişimleri ve tekerlek düzlükleri için dinamik darbe kuvvetlerini tahmin eden analitik denklemler geliştirilmiştir (Bezgin, 2018; Bezgin, 2017; Bezgin, 2019). Bu çalışmada esneme direnci değişimlerini ele alan denklemler üzerinden elastik pedlerin etkisi gösterilecektir. Şekil 2’de bir geçiş mesafesi boyunca hat esneme direnci değişimine örnek iki durum gösterilmiştir. Balastlı bir hattan balastsız bir hatta geçişte veya hattın köprü üzerinden veya tünel içerisinden geçmesi durumlarında farklı esneme direncine sahip bölgeler söz konusudur. Örneğin, balastlı bir hattın esneme direnci k_1 ve balastsız hattın esneme direnci k_2 ise trenin bu iki bölgenin birleşim alanından geçmesiyle, yapıların esneme direncinin oranı (k_2/k_1) ile orantılı bir dinamik darbe kuvveti oluşur.. Bu iki bölge arasındaki ani esneme direnci farklılığının azaltılabilmesi için iki bölge arasında bir geçiş bölgesi tasarlanır. Bu sayede mevcut yapıdan farklı bir yapıya geçiş sırasındaki esneme direnci oranı kademelendirilerek dinamik darbe kuvvetleri azaltılır ve daha rahat bir geçiş sağlanır.



Şekil 2. Hat esneme direncinin değiştiği geçiş bölgesi örnekleri (Li ve Berggren, 2010)

Bezgin Denklemleri’nde hattın k_1 esneme dirençli birinci bölgesinde statik tekerlek kuvveti altındaki hat sehimi “a”, k_2 esneme dirençli ikinci bölgedeki hat sehimi “b” ile gösterilmiştir. Genişletilmiş Bezgin Denklemleri’nde ise hat ve tren yaylarından oluşan eşdeğer sistem yayındaki toplam sehimler yer alır (a' , b'). L geçiş bölgesi uzunluğunu ve V tren hızını temsil etmektedir. Trene ait süspansiyon özellikleri birçok parametreye bağlıdır. Denklemlerde trene ait etkin süspansiyon kalitesi, “s” katsayısı ile yüzdesel olarak temsil edilmektedir. Azalan hat esneme direnci ve artan esneme direnci için dinamik darbe faktörünü tahmin eden Bezgin Denklemleri sırasıyla Denklem 2 ve 3’te, Genişletilmiş Bezgin Denklemleri ise yine sırasıyla Denklem 4 ve 5’te verilmiştir. Darbe azaltma katsayısı “f”, Denklem 6 ile verilmiştir. “L” mesafesi boyunca “h” kadar bir düşey profil bozukluğu söz konusuysen, tekerleğin “h” yüksekliğinden serbest düşüş yaparak hatta ulaşması için gereken süre “ $t_{düşüş}$ ” ve “L” mesafesini yatay düzlemde geçmesi için gereken süre “ $t_{geçiş}$ ”tir. Aşağıdaki örnek uygulamada, elastik pedlerin kullanımıyla eşdeğer hat esneme direncinin değişimi incelenecek, daha sonra da bu eşdeğer esneme direncinde ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetleri gösterilecektir.

$$K_{B1} = 1 + \sqrt{2 \left[(1 - f) \left(1 + \frac{a}{b} \right) \right]} \quad (2)$$

$$K_{B2} = \sqrt{2 \left[1 + f + \frac{a}{b} (1 - f) \right]} - 1 \quad (3)$$

$$K'_{B1} = 1 + \sqrt{2 \left[(1 - f - s) \left(1 - \frac{a'}{b'} \right) \right]} \quad (4)$$

$$K'_{B2} = \sqrt{2[1 + f + s + \frac{a'}{b'}(1 - f - s)]} - 1 \quad (5)$$

$$f = 1 - \frac{t_{fall}}{t_{pass}} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{2h}{g}}}{L/V} 1 - \frac{V}{L} \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (6)$$

Bu dinamik faktörlerin yanı sıra, hat esneme direnci artışı durumunda iki bölge arasında yükseklik farkı “h_a” nedeniyle tekerleğin yukarı doğru bir tırmanma hareketi vardır. Tekerlek sıfırdan başlayarak “a_v” ivmelenmesiyle düşey olarak hızlanır. Hat profil bozukluğunun bittiği noktada bu ivmelenmenin sona ermesiyle tekerlek hat üzerine düşerek ekstra bir dinamik kuvvet meydana getirir (K_J). Dolayısıyla, artan esneme direnci durumunda bu ekstra yük de dikkate alınmalıdır.

$$a_v = 2h_a \left(\frac{V}{L}\right)^2 \quad (7)$$

$$K_J = \frac{a_v}{g} \quad (8)$$

$$K_{B1} = 1 + \sqrt{2[(1 - f) \left(1 + \frac{a}{b}\right)]} \quad (2)$$

$$K_{B2} = \sqrt{2[1 + f + \frac{a}{b}(1 - f)]} - 1 \quad (3)$$

$$K'_{B1} = 1 + \sqrt{2[(1 - f - s) \left(1 - \frac{a'}{b'}\right)]} \quad (4)$$

$$K'_{B2} = \sqrt{2[1 + f + s + \frac{a'}{b'}(1 - f - s)]} - 1 \quad (5)$$

$$f = 1 - \frac{t_{fall}}{t_{pass}} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{2h}{g}}}{L/V} 1 - \frac{V}{L} \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (6)$$

Bu dinamik faktörlerin yanı sıra, hat esneme direnci artışı durumunda iki bölge arasında yükseklik farkı “h_a” nedeniyle tekerleğin yukarı doğru bir tırmanma hareketi vardır. Tekerlek sıfırdan başlayarak “a_v” ivmelenmesiyle düşey olarak hızlanır. Hat profil bozukluğunun bittiği noktada bu ivmelenmenin sona ermesiyle tekerlek hat üzerine düşerek ekstra bir dinamik kuvvet meydana getirir (K_J). Dolayısıyla, artan esneme direnci durumunda bu ekstra yük de dikkate alınmalıdır.

$$a_v = 2h_a \left(\frac{V}{L}\right)^2 \quad (7)$$

$$K_J = \frac{a_v}{g} \quad (8)$$

3. ÖRNEK UYGULAMA

Elastik pedlerin eşdeğer esneme direnci üzerindeki etkisi Denklem 1’de gösterilmiştir. Örneğin k₁=50 kN/mm’lik esneme dirençli bir hatta 80 kN/mm’lik ray pedi ve travers altı ped kullanılıyorsa bu durumda eşdeğer esneme direnci:

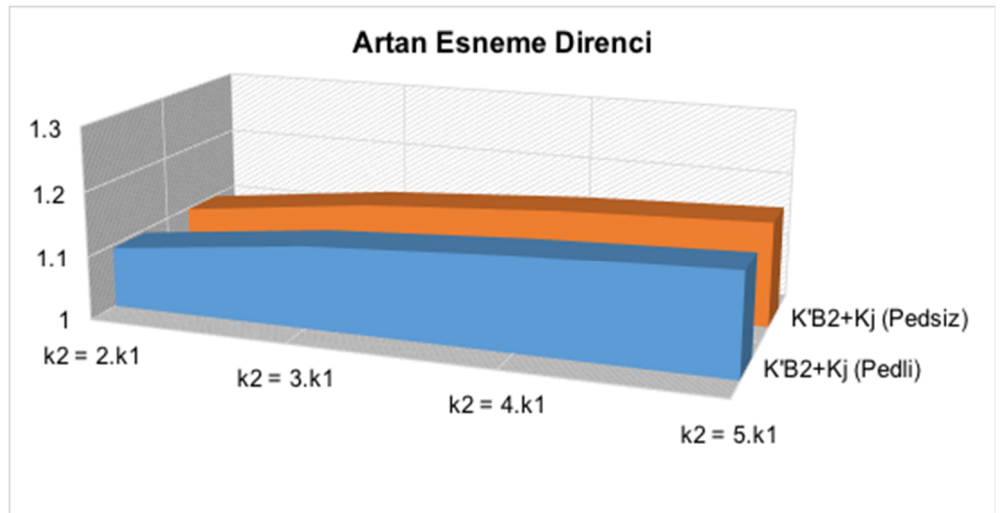
$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{1}{80} + \frac{1}{80}} = 22.22 \text{ kN/mm} \quad (9)$$

İkinci bölgedeki esneme direnci $k_2=100$ kN/mm ise yine aynı esneme direncindeki elastik pedlerin kullanımıyla bu bölgedeki eşdeğer esneme direnci:

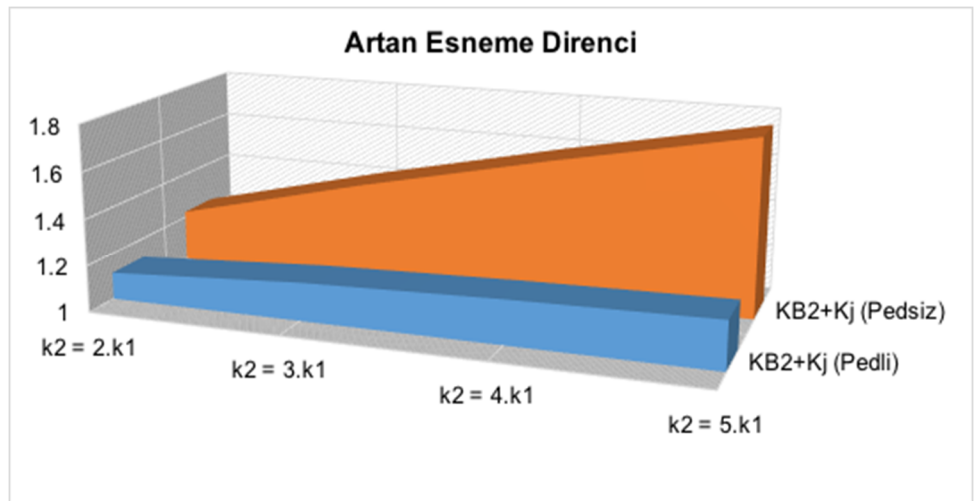
$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{150} + \frac{1}{80} + \frac{1}{80}} = 31.58 \text{ kN/mm} \quad (10)$$

İki bölge arasındaki geçişte dinamik darbe kuvvetini belirleyen unsur, iki bölge arasındaki esneme direnci oranıdır. Elastik pedler kullanılmadığında $k_2 = 3k_1$ 'ken pedler kullanıldıktan sonra $k_2 = 1.42k_1$ 'dir. İlk durumda Bezgin Denklemi ile elde edilen dinamik faktör 1.309, Genişletilmiş Bezgin Denklemi ile elde edilen faktör ise 1.078'tir. Elastik pedlerin kullanımıyla Bezgin Denklemi'nden elde edilen faktör 1.122'ye, Genişletilmiş Bezgin Denklemi'nden elde edilen faktör ise 1.077'ye düşmüştür.

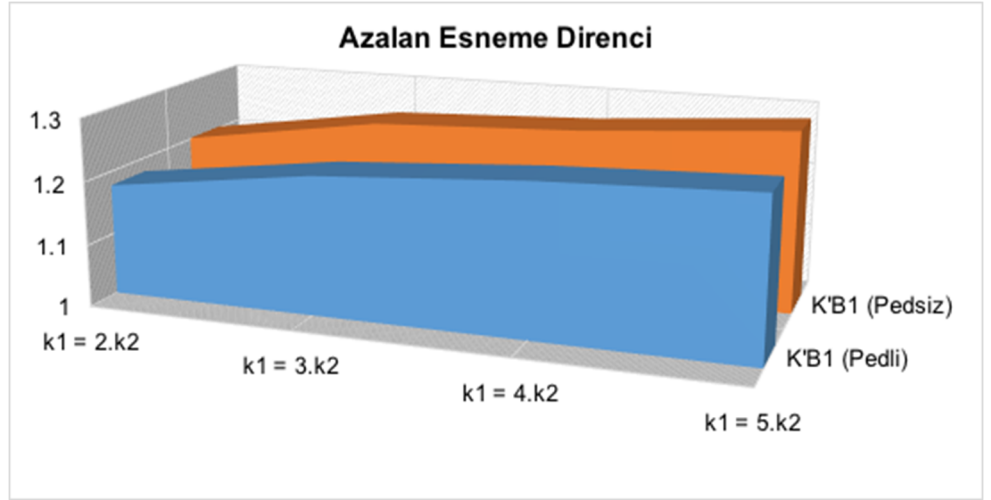
Şekil 3(a) ve 3(b)'de, hat üzerindeki esneme direncinin belirli mesafe boyunca artması durumunda ortaya çıkan, Bezgin ve Genişletilmiş Bezgin Denklemleri ile elde edilen dinamik faktörlerin pedli ve pedsiz durumlar için karşılaştırması verilmiştir. Şekil 3(c) ve 3(d)'de ise hat esneme direncinin azalması durumundaki kıyaslama yine aynı sırayla verilmiştir. Sonuçlar $V=250$ km/h, $L=4$ m, $s=\%1$ ve statik tekerlek kuvveti $F_3=85$ kN için kaydedilmiştir. X2000 yüksek hızlı trenine ait teker esneme direnci 3.28 kN/mm, boji esneme direnci 1.31 kN/mm'dir. Yapılan hesaplamalarda çok iyi süspansiyon özelliklerine sahip bir yüksek hızlı tren esas alınmıştır. Tekerlek ve bojiye ait esneme dirençleri 10 kN/mm, pedlere ait esneme dirençleri 80 kN/mm olarak seçilmiştir.



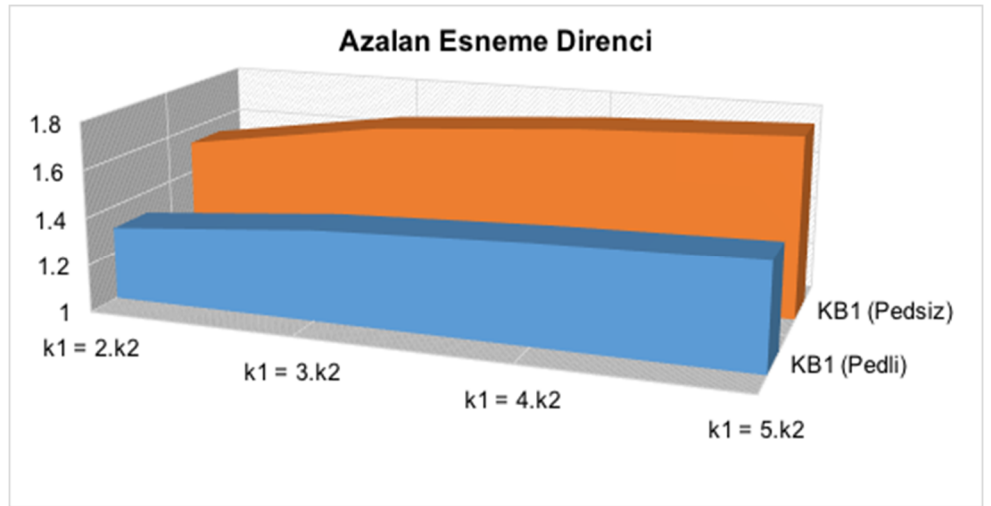
a)



b)



c)



d)

Şekil 3. Elastik pedli ve pedsiz hatlardaki a) K'B2+Kj b) KB2+Kj c) K'B1 d) KB1 darbe faktörlerinin karşılaştırması

Bezgin Denklemleri (K_{B1} ve K_{B2}) sadece hatta ait esneme direncini dikkate aldığı için elastik pedlerin dinamik faktörler üzerindeki etkisi çok daha fazladır. Özellikle esneme direncinin değiştiği iki bölgeye ait esneme direnci oranı arttıkça dinamik darbe kuvvetlerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Trenin geçiş yaptığı iki bölgeden birinin, diğerinin 5 katı kadar esneme direncine sahip olduğu durumda en yüksek dinamik darbe kuvvetleri meydana gelmektedir. Seçilen durumlar arasında en kötü hat performansının gerçekleştiği bu durumda, hatta aktarılan dinamik darbe kuvvetleri elastik pedlerin kullanımıyla %27'ye kadar azalabilmektedir. Tablo 1, farklı esneme direnci oranları ve hat bozukluk tipleri için Bezgin Denklemleri ile elde edilen dinamik darbe faktörlerinin, elastik ped kullanımıyla yüzdesel olarak azalışını göstermektedir. Çalışma, hat esneme direnci değişimlerinin olmadığı ancak hatta profil bozukluklarının mevcut olduğu durum için tekrarlandığında da benzer bir sonuç elde edilmiştir. 4 m boyunca profilde 20 mm düşmenin meydana geldiği durumda 250 km/h tren hızı ve 85 kN statik tekerlek yükü için elastik pedlerin kullanıldığı durumda dinamik darbe kuvvetlerinde %28'lik bir azalma görülmüştür. Profildeki düşme miktarının azalması veya profil bozukluğunun meydana geldiği uzunluğun artmasıyla bu oran azalmaktadır.

Hat esneme direnci oranları	Dinamik Darbe Faktöründeki Azalma (%)	
	Artan Esneme Direnci	Azalan Esneme Direnci
$k_2 = 2k_1$	7	11
$k_2 = 3k_1$	14	12
$k_2 = 4k_1$	21	13
$k_2 = 5k_1$	27	13

Tablo 1. Farklı esneme dirençlerinde dinamik darbe faktörlerindeki yüzdesel azalış

Genişletilmiş Bezgin Denklemleri'nde (K'_{B1} ve K'_{B2}) ise trene ait tekerlek yayı ve boji yayı ve Hertz temas yayı esneme direnci ile tren sönümlenmesi hesaba katılmıştır. Bu durumda elastik pedlerin dinamik darbe kuvvetlerini azaltmadaki etkisi daha azdır. Çünkü elastik ped kullanılmadığında doğan problemlerin büyük bir kısmı trenin süspansiyon özellikleri ile giderilmiştir. Bu da, kusurlu bir hat üzerinde elastik pedler kullanılmadığında, trene ait süspansiyon ve sönümlenme özelliklerinin önemini göstermektedir.

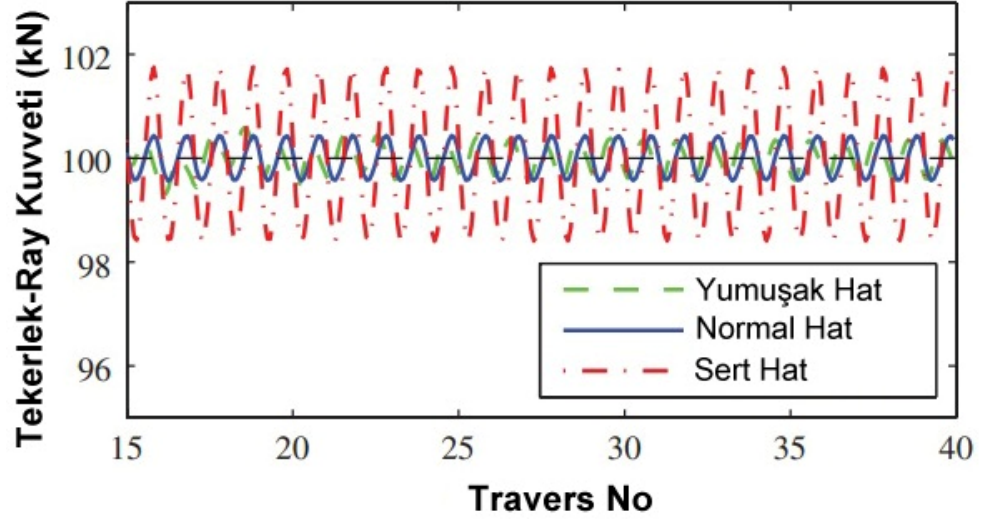
Bu çalışmada 50 kN/mm'lik hat esneme direnci kullanılmıştır. Tren, birinci bölgeden ikinci bir bölgeye geçtiği esnada artan esneme direncine maruz kalıyorsa yukarı yönlü bir harekete sahiptir. İkinci bölgenin esneme direnci daha yüksek olduğundan, burada birinci bölgeye göre daha az sehim meydana gelir. Dolayısıyla tekerlek, ilk bölgedeki yüksek sehimli, alçak bir konumdan ikinci bölgedeki daha az sehimli, yüksek bir konuma doğru tırmanır. Bu hareket hat boyunca ray profilinin yükselmesi sırasındaki tekerlek hareketine benzerlik gösterir. Azalan esneme direnci ise, alçalan ray profili durumu ile benzerlik göstermektedir. Yükselen ve alçalan profil, hat boyunca ilerlerken profile aniden veya belirli bir uzunluk boyunca meydana gelen bozuklukları (yükselme veya alçalma) belirtmektedir.

Çalışma, farklı esneme dirençlerine sahip hatlar için tekrarlandığında, hat esneme direnci arttıkça elastik pedin dinamik darbe kuvvetlerini azaltmadaki etkisinin, eğer hatta yükselen profil varsa azaldığı, alçalan profil varsa arttığı görülmüştür. Bu da hat esneme direnci ile dinamik darbe kuvvetindeki azalma arasında doğrudan bir bağlantı kurulmadığını ve hat bozukluk tipinin de dinamik darbe kuvvetindeki azalma üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

4. TARTIŞMA

Çalışma kapsamında ray pedi ve travers altı pedi esneme dirençleri hesaba katıldığında ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetleri, Bezgin Denklemleri ve Genişletilmiş Bezgin Denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı hat esneme dirençlerine sahip bölgeler arasındaki geçiş durumunda ortaya çıkan dinamik darbe faktörleri arasında kıyaslama yapılmıştır. Bu bölümde, çalışma bulguları, sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak elde edilen çalışma sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Kıyaslanan iki yöntemde kullanılan parametre farklılıklarından dolayı birebir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Ancak yine de daha önce yapılan bazı çalışmalarla, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar arasında benzerliklere rastlanmıştır.

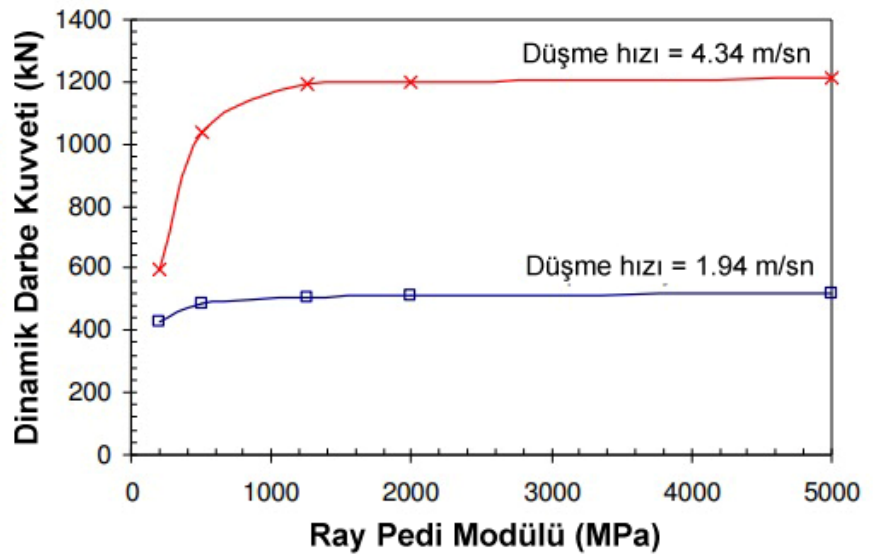
Literatürdeki birçok çalışma, eşdeğer hat esneme direnci ile dinamik darbe kuvvetlerinin arttığını göstermektedir (Remennikov ve Kaewunruen, 2005; Bruni vd., 2009; Zhai ve Cai, 1997; Li ve Berggren, 2010; Nicklisch vd., 2010; Markine vd., 2011). Li ve Berggren (2010), ray, ray pedi, travers ve balast/alt temel bileşenlerine ait farklı esneme direnci değerleri için üç farklı hat tipi elde etmiştir. Sırasıyla 31.6 kN/mm, 78 kN/mm ve 171.5 kN/mm esneme direncine sahip hatlar yumuşak, normal ve sert olarak nitelendirilmiştir. Yumuşak ve normal hatta kullanılan ray pedi esneme direnci 70 kN/mm, sert hatta kullanılan ise 500 kN/mm'dir. DIFF modelinin kullanıldığı simülasyon sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Buna göre yüksek esneme dirençli ray pedinin kullanıldığı sert hatta oluşan tekerlek-ray temas kuvvetleri, düşük esneme dirençli ray pedlerinin kullanıldığı hatlara göre daha fazladır.



Şekil 4. Farklı esneme direncindeki hatlarda ölçülen tekerlek-ray kuvvetleri (Li ve Berggren, 2010)

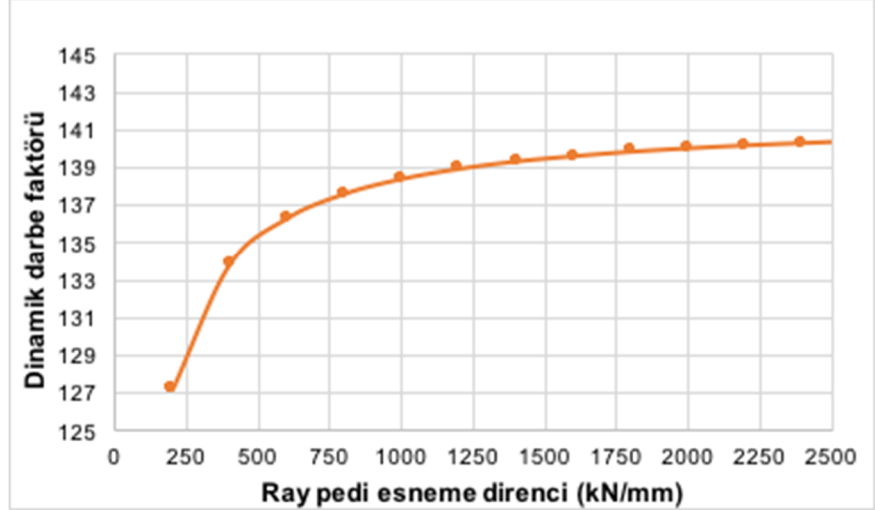
Ngamkhanong ve Kaewunruen (2020), oluşturdukları sonlu elemanlar modelinde travers altı ped kullanımında dinamik darbe kuvvetinde %10'luk bir azalma kaydetmiştir. Kullanılan sonlu elemanlar modelinde araca ait süspansiyon özellikleri dahil edilmemiş olup tekerlek kütlelerinin 0.74 m/sn, 1.94 m/sn ve 3.14 m/sn hızlarla hat üzerine düşürülmesiyle elde edilen dinamik darbe kuvvetleri kaydedilmiştir. 3.14 m/sn'lik düşürmede 1400 kN dinamik kuvvete kadar ulaşılmıştır. Bu koşulları mevcut yöntemle birebir uygulayarak test etmek mümkün olmasa da elastik ped kullanılmadan 1400 kN dinamik kuvvetin elde edildiği hat koşulu için kıyaslama yapılabilir. 50 kN/mm'den 100 kN/mm'ye geçiş yapılan bir hatta 250 km/h tren hızı, 4 m pürüzlü hat uzunluğu ve 780 kN statik tekerlek yükü ve tren süspansiyonunun gözardı edildiği durum için Bezgin Yöntemi ile elde edilen dinamik darbe faktörü 1,795'tir. Bu durumda dinamik darbe kuvveti $F_d = 1.795 \times 780 = 1400$ kN'dur. Esneme direnci $k_{ped} = 80$ kN/mm olan bir travers altı ped hesaplamaya dahil edildiğinde 50 ve 100 kN/mm olan eşdeğer hat esneme dirençleri sırasıyla 31 ve 44 kN/mm'ye düşer. Bu durumda ortaya çıkan dinamik darbe faktörü 1.625 ve dinamik darbe kuvveti $F_d = 1.625 \times 780 = 1267.5$ kN'dur. Travers altı ped kullanımı sonucunda hattaki dinamik darbe kuvveti ilk duruma göre % 9.5 azalmıştır.

Kaewunruen ve Remennikov (2007), sonlu elemanlar modeli üzerinden yaptıkları parametrik çalışmada düşen ağırlığı 5.81 kN, düşme yüksekliğini ise 100-500 mm olarak belirlemiştir. 1.94 m/sn ve 4.34 m/sn'lik iki düşme hızı için sonuçlar Şekil 5'deki gibi elde edilmiştir.

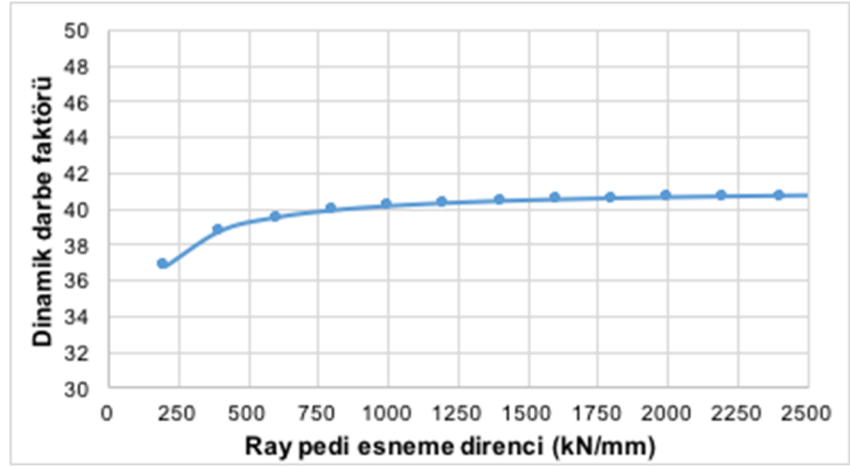


Şekil 5. Düşen ağırlık analizinde ray pedi modülü ile dinamik darbe kuvveti ilişkisi (Kaewunruen ve Remennikov, 2007)

Bu çalışmada ped esneme direncinin bir temsilcisi olarak ped modülü kullanılmıştır. Buna göre dinamik darbe kuvvetinde önemli değişimlerin gerçekleştiği elastik ped modülleri 200 MPa ile 750 MPa aralığıdır. Bu aralık UIC 54 ray tipi için 219 ve 589 kN/mm esneme dirençlerine karşılık gelmektedir. Bezgin Yöntemi'ne göre esneme direnci 50 kN/mm olan bir hatta 5.81 kN'luk bir yük 8 m boyunca 500 mm ve 100 mm hat profil bozukluklarına maruz kaldığında ortaya çıkan dinamik darbe faktörleri sırasıyla Şekil 6(a) ve Şekil 6(b)'deki gibidir. Dinamik darbe faktörünün artma eğilimi Şekil 5 ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Dinamik darbe kuvveti artış oranının maksimumda olduğu ray pedi esneme dirençleri de bir önceki çalışma ile tutarlıdır. 590 kN/mm'ye kadar olan ray pedi esneme dirençleri dinamik darbe faktörünü belirli oranda artırmıştır. Ancak 590 kN/mm esneme direnci değerinden itibaren ray pedi esneme direncinin dinamik darbe faktörü üzerindeki etkisi azalmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 6. Bezgin Yöntemi'ne göre a) 500 mm
b) 100 mm hat bozukluğunda ortaya çıkan
dinamik darbe faktörleri

Bezgin Yöntemi kullanılarak elde edilen denklemler aracılığıyla hesaplanan dinamik darbe faktörlerinin artış eğilimi, literatürde yer alan simülasyon ve saha deneyleriyle elde edilen bulgulara benzerlik göstermiştir. Sonuç olarak, ray pedi ve travers altı pedlerin esneme direncinin dinamik darbe kuvvetleri üzerindeki etkisi mevcut yöntem aracılığıyla pratik bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada elastik ped kullanımının dinamik darbe kuvvetlerini azaltmadaki etkisi analitik olarak gösterilmiştir. Seçilen ped esneme dirençlerine bağlı olarak, demiryolu aracı ve hattının bir bütün olarak ele alındığı eşdeğer esneme direnci değişir. Daha önceden tanıtılan Bezgin ve Genişletilmiş Bezgin Denklemleri, sırasıyla hat esneme direnci ve eşdeğer sistem esneme direnci ile dinamik darbe kuvvetleri arasındaki bağıntıyı ortaya koymaktadır. Elastik

pedler yardımıyla esneme direncinde yapılacak azaltmalar, dinamik darbe kuvvetlerini de önemli ölçüde etkiler.

Yapılan çalışmada, farklı esneme direncine sahip iki bölge arasındaki geçişlerde, iki bölge arasındaki esneme direnci oranı arttıkça dinamik kuvvetlerin de arttığı görülmektedir. Ancak hızlı yıpranmaların meydana geldiği bu geçiş bölgelerinde düşük esneme dirençli ray pedi ve travers altı pedi kullanımıyla dinamik darbe kuvvetlerinin %27 oranında azaltılabildiği görülmektedir.

Tren süspansiyon özelliklerinin de dinamik darbe kuvveti üzerindeki etkileri dahil edildiğinde elastik pedin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar arasındaki dinamik kuvvet farkının azaldığı ancak tamamen ortadan kalkmadığı görülmektedir. Bu farkın azalması trene ait yaylardaki esneme direnci değerinin önemini göstermektedir. Ayrıca, dinamik darbe faktörünün azaltılmasında etkili olan bir diğer parametrenin hat bozukluk tipi olduğu görülmüştür. Hat esneme direnci ile dinamik darbe kuvvetindeki azalma arasında lineer bir ilişki kurulamamıştır.

Bezgin Yöntemi ile elde edilen denklemler aracılığıyla hesaplanan dinamik darbe kuvvetlerinin, literatürdeki sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak yapılan ve saha deneyleriyle doğrulanmış bazı çalışmalarla örtüştüğü görülmüştür. Bu nedenle mevcut çalışma, elastik elemanların esneme dirençlerinin dinamik kuvvetler üzerindeki etkisi pratik bir şekilde ortaya koyabilmektedir.

Elde edilen bulgular, elastik ped kullanımıyla hattın geneline aktarılan kuvvetlerin azaltılabildiğini ve dolayısıyla aşınmaların azaltılarak daha uzun bir servis ömrü sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Ancak ray pedi ve travers altı pedlerin hat katmanları üzerinde ayrı ayrı etkileri vardır (Balci, 2020). Örneğin ray pedi traverslerin korunmasını sağlarken, travers altı pedler balast katmanı üzerindeki gerilmeleri azaltır. Ancak pedlere ait esneme dirençlerinin çok düşük veya çok yüksek seçilmesi katmanlar üzerinde istenmeyen etkiler doğurabilir. Elastik pedlerin kullanımının hat üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için, pedlerin hat üzerindeki etkileriyle birlikte hat katmanları üzerindeki etkileri de ayrı ayrı incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- 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, 75–85.
- 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. (2018). Application of a New Concept and a Method to Estimate the Vertical Impact Forces on Railway Tracks due to Track Stiffness Variations. 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Bezgin, N.Ö. (2018). Proposal of a New Analytical Method to Estimate the Vertical Impact Forces on Railway Tracks due to Changes in Track Profile and Track Stiffness. 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA, 837–845.
- 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*, 2673(7), 248–264.
- Bruni, S., Anastasopoulos, I., Alfi, S., Van Leuven, A., & Gazetas, G. (2009). Effects of Train Impacts on Urban Turnouts: Modelling and Validation Through Measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 324(3-5), 666–689.
- Choi, J. (2013). Influence of Track Support Stiffness of Ballasted Track on Dynamic Wheel-Rail Forces. *Journal of transportation engineering*, 139(7), 709–718.
- Dahlberg, T. (2010). Railway Track Stiffness Variations–Consequences and Countermeasures. *International Journal of Civil Engineering*, 8(1), 1–12.

- Dukkipati, R.V., & Dong, R. (1999). The Dynamic Effects of Conventional Freight Car Running Over a Dipped-Joint. *Vehicle System Dynamics*, 31(2), 95–111.
- Isolgomma, "Sleeper pads" [Online]. Available: <https://www.isolgomma.com/sleeper-pads/>. [Accessed July 7, 2020].
- Johansson, A., Nielsen, J. C. O., Bolmsvik, R., Karlström, A., & Lundén, R. (2008). Under Sleeper Pads—Influence On Dynamic Train–Track Interaction. *Wear*, 265 (9-10), 1479–1487.
- Kaewunruen, S., & Remennikov, A. (2007). Low-Velocity Impact Analysis of Railway Prestressed Concrete Sleepers. *Proceedings of the 23rd Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia: Design, Materials, and Construction*, 659–668.
- 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.
- Lakušič, S., Ahac, M., & Haladin, I. (2010). Experimental Investigation of Railway Track with Under Sleeper Pad. *10th Slovenian Road and Transportation Congress*, Slovenia.
- Li, M.X.D., & Berggren, E.G. (2010). A Study of the Effect of Global Track Stiffness and Its Variations on Track Performance: Simulation and Measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(5), 375–382.
- Liu, K., De Roeck, G., & Lombaert, G. (2009). The Effect of Dynamic Train–Bridge Interaction on the Bridge Response During a Train Passage. *Journal of sound and vibration*, 325(1-2), 240–251.
- López Pita, A. (1984). Posibilidades En La Reducción De Los Costes De Mantenimiento De La Calidad Geométrica De Una Vía, Mediante La Introducción De Nuevos Criterios En Su Diseño. *XVI Pan American Railway Congress*, 416–463.
- Markine, V.L., Steenbergen, M.J.M.M., & Shevtsov, I.Y. (2011). Combatting RCF on Switch Points by Tuning Elastic Track Properties. *Wear*, 271(1-2), 158–167.
- Ngamkhanong, C., & Kaewunruen, S. (2020). Effects of Under Sleeper Pads on Dynamic Responses of Railway Prestressed Concrete Sleepers Subjected to High Intensity Impact Loads. *Engineering Structures*, 214, 110604.
- Nicklisch, D., Kassa, E., Nielsen, J., Ekh, M., & Iwnicki, S. (2010). Geometry and Stiffness Optimization for Switches and Crossings, and Simulation of Material Degradation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(4), 279–292.
- Pålsson, B.A., & Nielsen, J.C., (2015). Dynamic Vehicle–Track Interaction in Switches and Crossings and the Influence of Rail Pad Stiffness—Field Measurements and Validation of a Simulation Model. *Vehicle System Dynamics*, 53(6), 734–755.
- Remennikov, A, & Kaewunruen, S. (2005). Determination Of Dynamic Properties Of Rail Pads Using Instrumented Hammer Impact Technique. *Acoustics Australia*, 33(2), 63–67.
- Teixeira, P.F. (2004). Contribución A La Reducción De Los Costes De Mantenimiento De Vías De Alta Velocidad Mediante La Optimización De Su Rigidez Vertical (Doktora Tezi). *Universitat Politècnica de Catalunya, İspanya*.
- Wu, T.X., & Thompson, D.J. (2004). The Effects Of Track Non-Linearity On Wheel/Rail Impact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 218(1), 1–15.
- Zhai, W., & Cai, Z. (1997). Dynamic Interaction Between a Lumped Mass Vehicle and a Discretely Supported Continuous Rail Track. *Computers & structures*, 63(5), 987–997.