

DEMİRYOLU HATLARINDA ETKİN HAT ESNEME DİRENCİ VE DİNAMİK DARBE KUVVETLERİNİN BOJİ DİNGİL MESAFESİYLE DEĞİŞİMİ

Erdem BALCI^{*1}, Niyazi Özgür BEZGİN², Mohamed WEHBI³

^{1,2} *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
34320, İstanbul, Türkiye*

³ *Network Rail, Track Bed Investigation Team, Birmingham, B1, 2D, UK*

**erdembalci@outlook.com*

ÖZET

Bir demiryolu hattının esneme direnci, seyir halindeki trenin hatta aktardığı dinamik darbe kuvvetleri üzerinde doğrudan etkilidir. Ancak hatta ait esneme direnci hesaplanırken trenin taşıyıcı unsurları olan bogiler içerisindeki komşu tekerler arasındaki etkileşim göz önünde bulundurulmalıdır. Zemin mekaniğinde sıkça karşılaşılan grup etkisi demiryollarında da meydana gelmektedir. İki komşu teker arasındaki dingil mesafesine bağlı olarak hattın, üzerinden geçen demiryolu aracına verdiği tepki farklılaşır. Bu nedenle seyir sırasında meydana gelen dinamik darbe kuvvetleri de dingil mesafesinden etkilenir.

Bu çalışmada Winkler yay modeli kullanılarak, dingil mesafesinin hat esneme direnci üzerindeki etkisini ortaya koyan etkin esneme direnci kavramı sunulmuştur. Farklı hat esneme dirençleri, dingil mesafeleri ve ray profillerinde ortaya çıkan etkin esneme direnci değerleri grafikler halinde gösterilmiştir. Farklı esneme direncine sahip iki hat arasındaki geçiş bölgesinde meydana gelen dinamik darbe kuvvetleri, üç farklı dingil mesafesi için nümerik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, dinamik darbe kuvvetlerinin etkin esneme direncine bağlı olarak değiştiğini gösteren sonlu elemanlar analizi bulgularıyla desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: hat esneme direnci, dingil mesafesi, dinamik darbe kuvvetleri, Bezgin Yöntemi

1. GİRİŞ

Hat esneme direnci, bir demiryolu hattında güvenli geçişin sağlanması ve hat bileşenlerinin uzun servis ömrüne sahip olabilmesi için hattın tasarımında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir değerdir. Bu değer çok düşük olduğunda hat üzerinde yüksek sehimler ve yüksek ray momentleri meydana gelir. Travers, ray ve ray bağlantı elemanlarında oluşan gerilmeler, bu elemanların ortalama servis ömrünü azaltır [1]. Diğer yandan yüksek hat esneme direncinde dinamik darbe kuvvetleri ve hattaki kötü yük dağıtımı nedeniyle balast tabakasındaki gerilmeler artar ve temas yorulması ve ray yüzeyinde çatlaklar meydana gelebilir [2–7]. Tekrarlı tren geçişleri sonucunda zaman içerisinde hatta kalıcı profil bozuklukları meydana gelir. Bu nedenle hat tasarımında, bir hatta bozulmaya yol açan tüm kriterleri istenen seviyede tutacak optimum bir hat esneme direnci değeri sağlanmalıdır [4, 8]. Winkler modeline göre hat esneme direnci (k), hat üzerinde herhangi bir noktada uygulanan teker yükünün (P), o noktada oluşturduğu hat sehimini (w) olarak ifade edilir. Bu tanım, hattın tek bir tekere karşı gösterdiği tepkiyi içermektedir. Günümüzde kullanılan trenlerde, trenin taşıyıcı elemanı olan bojiler içerisinde genellikle iki veya üç, bazen ise dört dingil bulunmaktadır. Bu nedenle günümüzde hat esneme direnci kavramı ele alınırken aynı boji içerisindeki komşu tekerlerin birbiriyle olan etkileşimi de göz önünde bulundurulmalıdır. Zemin mekaniğinde yaygın bir kullanımı olan grup etkisi, demiryollarında da iki komşu tekerin hat üzerine birlikte etkimesi ve hattaki toplam gerilmelerin bu birliktelikten etkilenmesiyle ortaya çıkar. İki komşu tekerin hat üzerinde oluşturacağı toplam sehim, tekerler arasında bulunan dingil mesafesine bağlıdır. Aynı statik teker kuvveti altında ve aynı hat koşulları içerisinde sadece dingil mesafesinin değişmesiyle hattaki toplam sehim miktarı değişir. Bu durumda, teker tarafından deneyimlenen hat esneme direnci de teker etkileşiminin hesaba katılmadığı yaklaşıma göre elde edilen değerden daha farklıdır.

Dinamik darbe kuvvetleri, hat esneme direncindeki değişimler veya hattaki profil bozuklukları nedeniyle ortaya çıkar. Hat yükleme araçlarıyla [9, 10] yapılan ölçümlerde kaliteli hatlarda dahi hat esneme dirençlerinin oldukça yüksek seviyede olabildiği görülmüştür [11]. Dinamik darbe kuvvetlerinin meydana geldiği geçiş bölgelerinde, tekerin tekrarlı geçişi sonucunda profil bozuklukları daha da artar. Bu durum yolcu konforunu azalttığı ve hattın servis ömrünü azalttığı gibi zaman içerisinde raydan çıkmaya varan boyutlara ulaşabilir. Daha önceden tanıtılan Bezgin Yöntemi ile elde edilen analitik denklemler ile dinamik darbe kuvveti tahmini yapılabilmektedir [12–14]. Bu denklemlerle tren hızı, hat esneme direnci değeri ve statik hat sehimleri dikkate alınarak hat kusuruna bağlı olarak ortaya çıkan dinamik darbe faktörleri elde edilir. Komşu tekerlerin dingil mesafesine bağlı olarak yaptıkları etkileşimin sonucunda hat esneme direncinin değişmesiyle hat üzerinde oluşan dinamik darbe kuvvetleri de değişir. Hat stabilitesinin sağlanması açısından dinamik kuvvetlerin, teker etkileşimini de göz önünde bulundurarak doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekir.

Bu çalışmada aynı bojiye bağlı komşu tekerlerin, dingil mesafesine bağlı olarak hat üzerinde oluşturduğu sehimlerin değişimi incelenmiştir. Daha sonra, hat esneme direnci tanımına komşu tekerlerin etkileşimini dahil eden “etkin esneme direnci” kavramı ortaya konmuştur. Belirli bir dingil mesafesi ve hat esneme direncinde ortaya çıkan etkin esneme

direnci değeri elde edilebileceği tablo ve grafikler sunulmuştur. Dingil mesafesinin, hat esneme direncini etkilediği gibi dinamik darbe kuvvetlerini de etkilemesi gerektiği hipotezi ortaya konmuştur. Bezgin Yöntemi kullanılarak analitik bir değerlendirme yapılmış ve iki dingilli bir trenin toprak destekli hat ile beton destekli bir hat arasındaki geçişini içeren bir sonlu elemanlar modeliyle ortaya konulan hipotez doğrulanmıştır.

2. AYNI BOJİYE BAĞLI KOMŞU TEKERLER ALTINDAKİ ETKİN HAT ESNEME DİRENCİ

Çift dingilli bojiye sahip trenler günümüzde yaygın kullanımdadır. Aynı bojideki komşu tekerlerin her biri belirli bir hat mesafesi boyunca sehim yapar. İki tekerin oluşturduğu sehimler,

tekerler arasındaki mesafeye bağlı olarak birbiriyle girişim yapar. Dingil mesafesinin etkin esneme direnci üzerindeki etkisini anlayabilmek için öncelikle iki tekerin farklı dingil mesafelerinde yaptıkları girişimler ve hatta birlikte oluşturdukları sehimler süperpozisyon prensibi kullanılarak incelenmelidir.

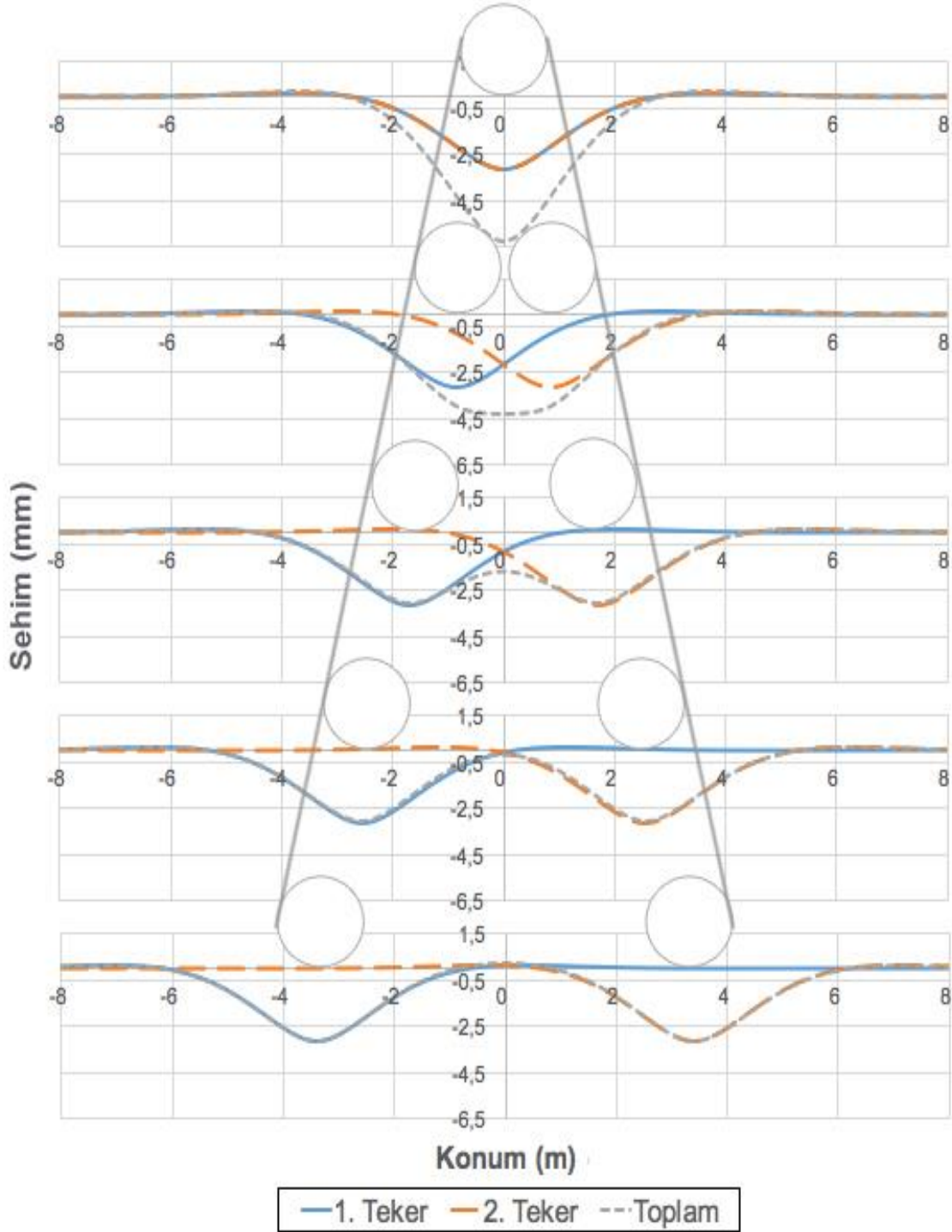
Hattın bağımsız yaylar olarak temsil edilmesiyle, bağımsız teker kuvveti P ve hatta oluşan maksimum sehim $w_{\max}$ olmak üzere bağımsız bir tekerin esneme direnci $k=P/w_{\max}$ olarak ifade edilir. Denklem 1 ve 2’de bir x noktasındaki sehim $w(x)$, hat modülü u , ray elastisite modülü E ve yatay eksenindeki ray atalet momenti I olmak üzere sırasıyla Winkler sehim ve hat esneme direnci denklemleri verilmiştir.

$$w(x) = \frac{P \left(\sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \right)}{2u} \cdot e^{-\left(\sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \right) x} \cdot \left[\cos \left(\sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} x \right) + \sin \left(\sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} x \right) \right] \quad (1)$$

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

Bir boji içerisinde merkezleri arasındaki mesafe “ m ” olan iki dingil yer alıyorsa, iki teker ile desteklenen yarım bojinin bir ray üzerine uyguladığı kuvvet $2P$ ’dir. Eğer tekerlerin varsayımsal olarak ray üzerinde aynı noktaya temas ettiği düşünülürse yani dingil mesafesi 0 ise bu iki tekerlek, her biri w olmak üzere toplamda hat üzerinde $w_{\max} = 2w$ kadar bir sehim oluşturur. Bu durumda boji tarafından hattan alınan minimum etkin esneme direnci $k_{\min}^* = 2P/2w = k$ kadardır. Diğer bir deyişle, bojideki tek bir teker tarafından deneyimlenen minimum etkin esneme direnci $k_{\min}^*/2 = 0.5 k$ kadardır. Ancak, dingil mesafesinin artmasıyla teker etkileşimleri azalır ve belirli bir mesafeden sonra iki teker bağımsız hale gelir. Eğer iki teker, oluşturdukları sehimler birbirinden etkilenmeyecek kadar uzaktaysa hat üzerindeki toplam kuvvet yine $2P$ ancak oluşan maksimum sehim $w_{\max} = w$ kadardır. Bu durumda boji tarafından deneyimlenen etkin hat esneme direnci $k_{\text{free}}^* = 2P/w = 2k$ ve boji içerisindeki her bir teker tarafından deneyimlenen etkin hat esneme direnci $k_{\text{free}}^*/2 = k$ kadardır. Dingil mesafesinin 0’dan başlayarak giderek

artmasıyla bojinin deneyimlediği etkin esneme direnci k ile başlamalı ve tekerlekler bağımsız hale geldiğinde $2k$ değerine ulaşmalıdır. Şekil 1’de aynı bojideki iki tekerin hatta oluşturduğu toplam sehimler, bağımsız tekere ait hat esneme direnci $k=50$ kN/mm, teker kuvveti $P=125$ kN, ray tipi UIC 60 ve dingil mesafeleri 0 m, 1.7 m, 3.4 m, 5.1 m ve 6.8 m için gösterilmiştir.



Şekil 1. (a) 0 m, (b) 2 m, (c) 4 m, (d) 6 m dingil aralıklarında hatta oluşan sehimler [15]

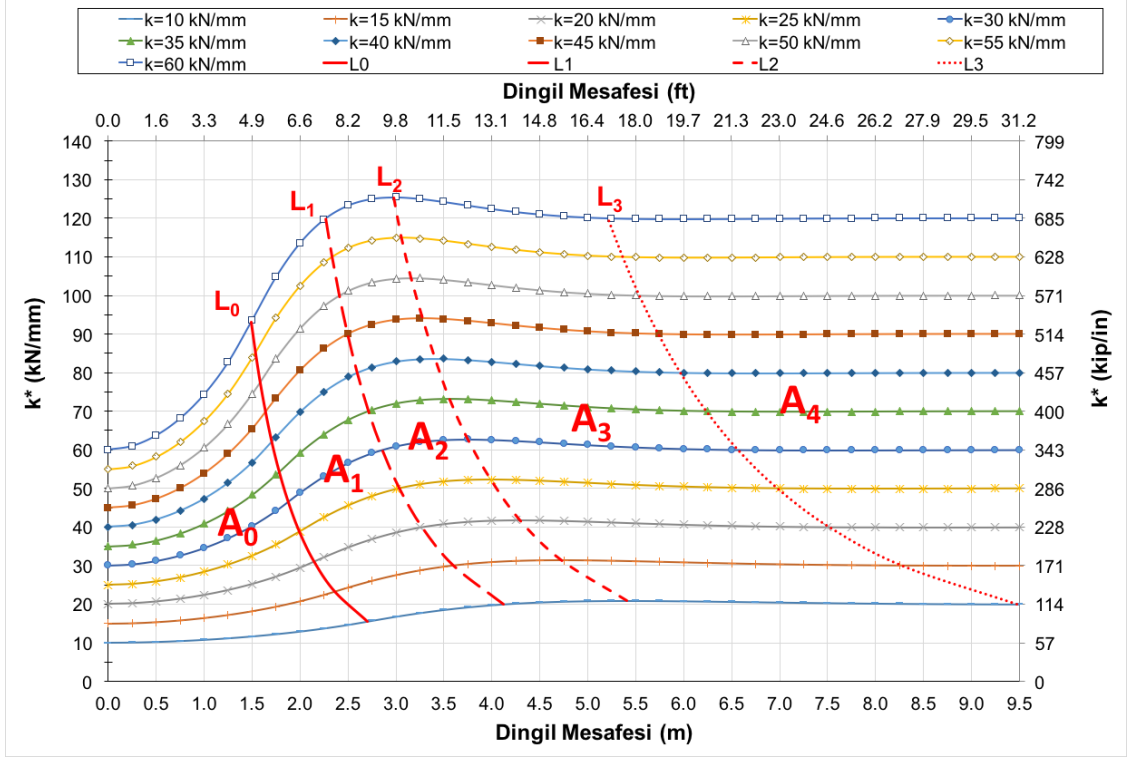
Şekil 1’de hat esneme direnci sabitken hatta oluşan maksimum sehimin dingil mesafesine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Dingil mesafesi 3.25 m veya daha büyük olduğunda, iki tekerin oluşturduğu sehimlerin birbiriyle kayda değer bir girişim yapmadığı ve etkin esneme direncini etkilemediği gözlemlenmiştir.

3. DİNGİL MESAFESİNE BAĞLI OLARAK HAT ESNEME DİRENCİNİN DEĞİŞİMİ

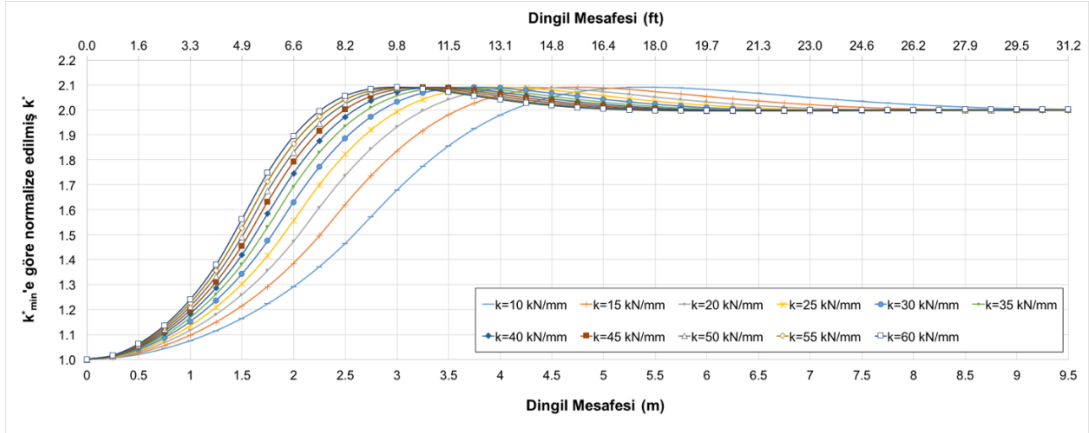
Bu bölümde UIC 60 ray tipi ve 10 kN/mm ile 60 kN/mm arasındaki hat esneme direncine sahip hatlar için çeşitli dingil aralıklarında elde edilen etkin hat esneme dirençleri elde edilmiş ve Şekil 2’de verilen bu değişim grafiğinde karakteristik noktalar tespit edilmiştir. L_0 ile gösterilen noktalardan itibaren, dingil mesafesine bağlı etkin hat esneme direnç değişim oranı azalmaktadır. Bu noktalarda iki tekerin hattaki sehimlerinin yaptığı girişim artık birbirinden ayrılmaya başlamıştır. L_1 ile gösterilen noktalar, etkin esneme direncinin, komşu teker ile etkileşim halinde olmayan bağımsız teker altında elde edilen esneme direncine eşit olduğu dingil mesafeleridir. L_2 noktalarında, tekerleklerin etkileşimi sonucunda hat üzerinde maksimum esneme direnci elde edilir. Bir teker hatta bastığı noktada maksimum sehim yapar. Tekerin bastığı noktadan belirli bir mesafe uzaklıkta sehim sona erer ve hatta kaldırma etkisi meydana gelir. Aralarında L_2 ’deki dingil mesafeleri bulunan iki tekerden birinin maksimum sehim yaptığı yerde, diğer tekerin kaldırma etkisi vardır. Bu nedenle her iki teker birbirinin hat üzerinde oluşturdukları sehim miktarını azaltarak, bağımsız bir teker altındaki hat esneme direncinden daha yüksek bir etkin esneme direnci ortaya çıkmasına neden olurlar. L_3 dingil mesafelerinde, iki teker arasındaki etkileşim sona erer ve tekerler artık bağımsız hale gelir. Hat esneme direnci azaldığında tekerler arasındaki etkileşimin daha yüksek dingil mesafelerine kadar devam ettiğine dikkat edilmelidir. Bahsedilen bu 4 karakteristik noktadan yola çıkarak, Şekil 2(a)’daki grafik, hat tasarımında yararlanılmak üzere alanlara ayrılmıştır. Bu alanlardan her biri, tekerler arasındaki etkileşimin farklı bir safhasını temsil etmektedir.

A_0 , farklı hat esneme dirençleri için varsayımsal olarak dingil mesafesi $m=0$ durumundan başlayarak artan m değerlerinde ortaya çıkan etkin hat esneme dirençlerini temsil eder. A_1 alanında etkin esneme direncinin artış hızı azalmaktadır. A_2 , etkin hat esneme direncinin, teker sehimlerinin girişim yapmadığı bağımsız bir teker altındaki hat esneme direncine eşit olduğu dingil mesafesi ile maksimum etkin hat esneme direncinin elde edildiği dingil mesafesi arasındaki alandır. A_3 alanı içerisinde dingil mesafesinin artmasıyla teker sehimlerinin yaptığı girişim sona erer. A_2 ve A_3 alanlarında bojinin deneyimlediği etkin hat esneme direnci, bağımsız bir tekerin deneyimlediği esneme direncinden daha fazladır. A_4 , bojideki komşu tekerlerin birbirinden tamamen bağımsız olduğu alanı göstermektedir.

Şekil 2(b), etkin esneme direncinin dingil mesafesiyle değişimini gösteren Şekil 2(a)’nın hattaki minimum etkin esneme direncine göre normalizasyonudur. Bu iki şekil, aynı boji içerisindeki tekerler arasındaki mesafe değiştikçe hattan alınan etkin esneme direncinin de değiştiğini analitik olarak göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. a) Etkin esneme direncinin dingil mesafesiyle değişimi ve b) minimum etkin esneme direncine göre normalizasyonu [15]

Şekil 2(a) üzerinden, etkin hat esneme direnci ile bağımsız teker altındaki hat esneme direnci arasındaki ilişkiyi gösteren bir tablo oluşturulabilir. Eğer hattın esneme direnci (k) tahmin edilebilirse, hat üzerinde işletme yapacak olan aracın dingil aralığına (m) göre ve belirli bir ray tipi için Tablo 1 ile verilen katsayılar aracılığıyla etkin hat esneme direncine ulaşılabilir. Bu tablodaki katsayılar UIC 60 ray tipi için elde edilmiştir. C_B katsayıları, boji tarafından deneyimlenen hat esneme direncinin, bağımsız teker tarafından deneyimlenen hat esneme direncine oranıdır. Denklem 3'te C_B katsayısı yardımıyla belirli bir hat esneme direnci ve dingil mesafesi için etkin hat esneme direncinin elde edilişi gösterilmiştir.

$$k^* = k \cdot C_B \quad (3)$$

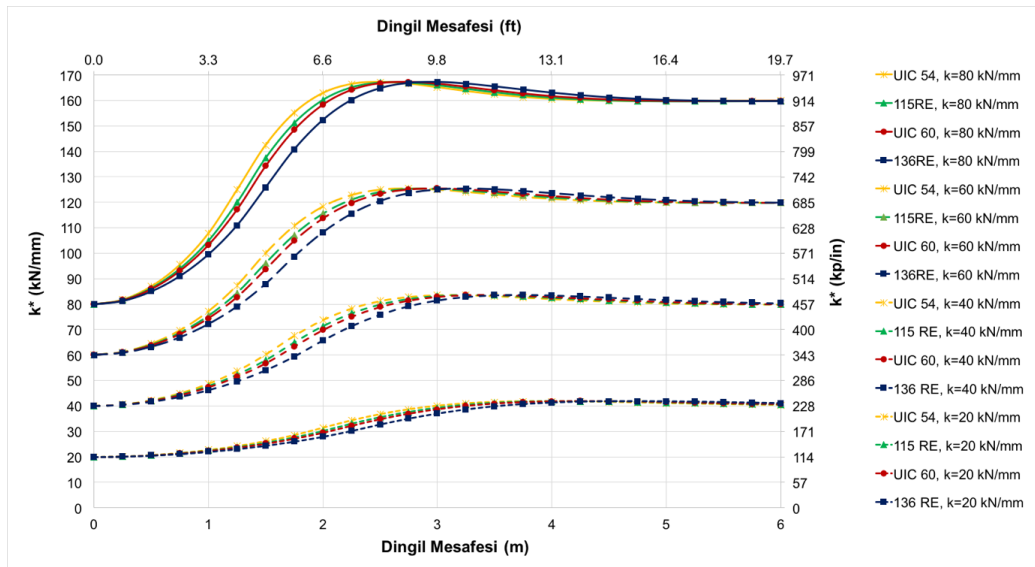
Tablo 1’de farklı hat esneme direnci değerleri ve dingil aralıkları için önerilen C_B katsayıları yer almaktadır.

Tablo 1. Çeşitli dingil aralıkları ve hat esneme direnç değerleri için önerilen katsayılar [16]

k (kN/mm)	k (kip/in)	Dingil Aralığı (m) (ft)														
		1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.5	5	5.5
		4.9	5.7	6.6	7.4	8.2	9.0	9.8	10.7	11.5	12.3	13.1	13.9	14.8	16.4	18.0
10	57	C _B														
15	86	0.58	0.61	0.65	0.69	0.73	0.79	0.84	0.89	0.93	0.96	0.99	1.01	1.03	1.04	1.05
20	114	0.61	0.65	0.69	0.75	0.81	0.87	0.92	0.96	0.99	1.01	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04
25	143	0.63	0.68	0.74	0.80	0.87	0.92	0.97	1.00	1.02	1.03	1.04	1.05	1.04	1.04	1.03
30	171	0.65	0.71	0.78	0.85	0.91	0.96	1.00	1.02	1.04	1.04	1.05	1.04	1.04	1.03	1.02
35	200	0.67	0.74	0.81	0.89	0.94	0.99	1.02	1.03	1.04	1.05	1.04	1.04	1.03	1.02	1.01
40	228	0.69	0.76	0.85	0.91	0.97	1.00	1.03	1.04	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.01
45	257	0.71	0.79	0.87	0.94	0.99	1.02	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00
50	285	0.73	0.82	0.90	0.96	1.00	1.03	1.04	1.05	1.04	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	1.00
55	314	0.75	0.84	0.91	0.97	1.01	1.03	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.01	1.00	1.00
60	342	0.76	0.86	0.93	0.99	1.02	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	1.00	1.00
		0.78	0.87	0.95	1.00	1.03	1.04	1.05	1.04	1.04	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00

4. RAY TİPİNİN KOMŞU TEKERLER ALTINDAKİ ETKİN HAT ESNE ME DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Bu bölüme kadar yapılan çalışmada UIC 60 ray tipi kullanılmış ve C_B katsayıları bu ray tipi için elde edilmiştir. Bu bölümde ise dört farklı ray tipi kıyaslanacak ve ray tipinin etkin esneme direnci üzerindeki etkisi irdelenecektir. Çalışmada kullanılan ray tipleri hafiften ağıra doğru sırayla UIC 54, 115RE, UIC 60 ve 136RE olarak seçilmiştir. Bağımsız teker altındaki hat esneme dirençleri $k=20$ kN/mm, 40 kN/mm, 60 kN/mm ve 80 kN/mm etkin hat esneme dirençleri bulunmuştur. Şekil 3’te bu ray tiplerinin kullanımında, dingil mesafesine bağlı olarak değişen etkin hat esneme direnci değerleri gösterilmiştir. Şekilde, bağımsız teker altındaki hat esneme direnci yüksek olduğunda, ray tipleri arasındaki farkın nispeten belirginleştiği görülmektedir. Ancak yine de ray tipleri arasındaki farklılıklar sınırlıdır. Düşük hat esneme direncinde ise tüm ray tipleri oldukça benzer bir davranış göstermiştir.



Şekil 3. Farklı ray tiplerinin etkin esneme dirençleri açısından kıyaslanması [15]

Dingil mesafesi genellikle 1.5 m ile 2.2 m arasında değişir. Ancak dingil mesafesinin daha fazla olduğu trenler de bulunmaktadır. Örneğin, Electrostar’da 2.6 m, Pendolino’da 2.7 m, AVE-Alstom YHT’de 3 m’dir. Şekil 3’te, etkin hat esneme direncindeki değişimin en fazla olduğu dingil aralıklarının 1.5 – 3 m arası olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu aralıkta, dingil mesafesindeki küçük bir değişme etkin hat esneme direncini diğer dingil aralıklarına nispeten daha fazla etkiler.

5. ETKİN HAT ESNEME DİRENCİ VE DİNAMİK DARBE KUVVETLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Bir önceki bölümde, dingil mesafesine bağlı olarak bojinin deneyimlediği hat esneme direncinin değiştiği gösterilmiştir. Hat esneme direnci, hattaki profil bozuklukları veya hat esneme direnci değişimi nedeniyle meydana gelen dinamik darbe kuvvetlerinin büyüklüğünün belirlenmesinde önemli bir parametredir. Eğer, dingil mesafesine bağlı olarak deneyimlenen hat esneme direnci değişiyorsa, yine dingil mesafesine bağlı olarak hat üzerinde meydana gelen dinamik darbe kuvvetleri de değişmelidir. Tekerlerin oluşturduğu taşıma gerilmelerinin dingil mesafesine bağlı olarak yaptıkları girişim geoteknik mühendisliğindeki “grup etkisi mekanizması” ile benzerlik gösterir. Bu girişim sonucunda hatta farklı bir tepki meydana gelir.

Daha önce tanıtılan Bezgin Yöntemi ile hatta oluşan dinamik darbe kuvvetlerini tahmin eden analitik denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler ile profil bozuklukları, hat esneme direnci farklılıkları ve teker düzlükleri nedeniyle oluşan dinamik darbe kuvvetleri tahmin edilebilir. Bu bölümde sadece hat esneme direnci değişimi nedeniyle olan dinamik darbe kuvvetlerini inceleyen denklemler ele alınacaktır.

Bezgin Denklemleri’nde [12, 13] statik teker kuvveti altında hatta meydana gelen sehim “a” ile gösterilmiştir. Genişletilmiş Bezgin Denklemleri’nde [14] hat ve trene ait sönümlleme yaylarının bir kombinasyonu olan sistem yayında meydana gelen sehimi (a’) yer alır. Tren bir bölgeden diğerine giderken hat boyunca esneme direnci değerinde bir değişim varsa, hat esneme direncinin değiştiği 2. bölgede hatta meydana gelen sehimi “b” dir. Genişletilmiş Bezgin Denklemleri’nde ise sistem yayında meydana gelen sehimi (b’) yer alır. Denklemlerdeki a/b veya a’/b’ değerlerinin, yani iki bölge arasındaki hat esneme direnci oranının dinamik darbe kuvvetini doğrudan etkileyen bir faktör olduğuna dikkat edilmelidir. Darbe azaltma katsayısı olarak bilinen “f”, trenin hızına, hat bozukluğunun meydana geldiği geçiş uzunluğuna ve hat bozukluğunu oluşturan yükseklik farkına bağlıdır.

Denklem 4 ve 5’te sırasıyla azalan hat esneme direnci ve artan hat esneme direnci için dinamik darbe faktörünü tahmin eden Bezgin Denklemleri verilmiştir. Daha sonradan sunulan Genişletilmiş Bezgin Denklemleri’nde, hat esneme direncine ek olarak trene ait teker ve boji yaylarının esneme dirençleri ve teker/hat arasındaki temas esneme direnci de hesaba dahil edilmiştir. Ayrıca trenin süspansiyon özellikleri de “s” ile ifade edilmiştir. Denklem 6 ve 7 sırasıyla azalan hat esneme direnci ve artan hat esneme direnci için

dinamik darbe faktörü sunan Genişletilmiş Bezgin Denklemleri'dir. Denklem 8'de ise darbe azaltma katsayısının formülü verilmiştir.

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

$$K_{B2} = \sqrt{2 \left[1 + f + \frac{a}{b} (1 - f) \right]} - 1 \quad (5)$$

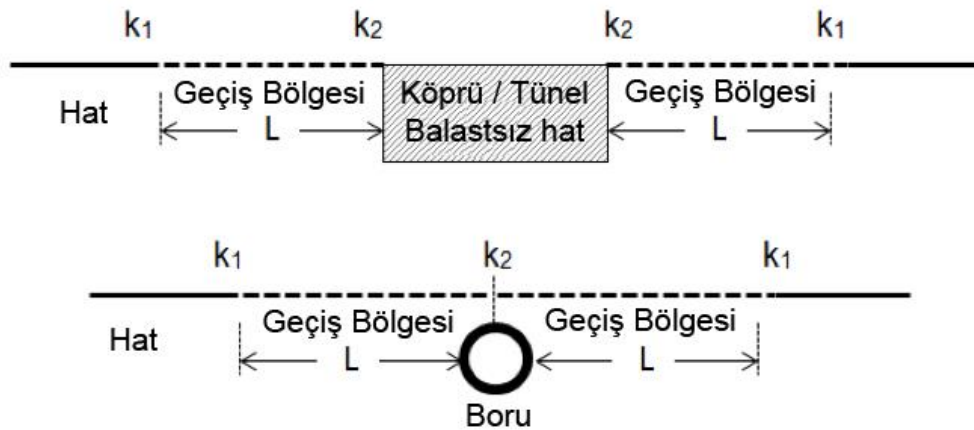
$$K'_{B1} = 1 + \sqrt{2 \left[(1 - f - s) \left(1 - \frac{a'}{b'} \right) \right]} \quad (6)$$

$$K'_{B2} = \sqrt{2 \left[1 + f + s + \frac{a'}{b'} (1 - f - s) \right]} - 1 \quad (7)$$

$$f = 1 - \frac{t_{fall}}{t_{pass}} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{2h}{g}}}{L/V} = 1 - \frac{V}{L} \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (8)$$

5.1. Örnek bir uygulama ile dinamik darbe kuvvetlerinin analitik olarak tahmin edilmesi

Köprü, tünel gibi yapıların hat esneme dirençleri demiryolu hattından farklıdır. Toprak destekli hatta giden bir tren bu yapılardan geçerken bir esneme direnci değişimine maruz kalır. Şekil 4'te dinamik darbe kuvvetlerinin meydana geldiği esneme direnci değişimlerine örnek durumlar gösterilmiştir. İlk bölgenin hat esneme direnci k_1 'ken ikinci bölgede k_2 kadardır.



Şekil 4. Hat esneme direnci değişimlerinin gerçekleştiği örnek durumlar [14]

Hat esneme direnci değişimi gerçekleşen bir hat üzerinde, örneğin toprak destekli hattan köprüye geçişte, ilk bölgedeki esneme direncini $k_1=23$ kN/mm ve ikinci bölgedeki $k_2=185$ kN/mm olarak ele alalım. Bu hat üzerinden geçen 1.5 m, 2.3 m ve 3.1 m dingil aralığına sahip üç farklı tren varsayalım. Şekil 2 ve Tablo 1'den enterpolasyon yapılarak bu üç tren için birinci bölgedeki etkin esneme direnci katsayıları sırasıyla $c_{1.5}=0.64$, $c_{2.3}=0.83$ ve $c_{3.1}=1.00$ olarak bulunur. Yine aynı tablodan ekstrapolasyon yapılarak ikinci bölgedeki esneme direnci katsayıları sırasıyla $c_{1.5}=1.00$, $c_{2.3}=1.04$ ve $c_{3.1}=1.00$ olarak elde edilir. Bu durumda birinci bölgedeki boji etkin esneme dirençleri, verilen dingil aralıkları için sırasıyla $k_1^*=14.7$ kN/mm, 19.1 kN/mm ve 23 kN/mm'dir. İkinci bölgedeki etkin esneme dirençleri ise yine sırasıyla $k_2^*=185$ kN/mm, 192.4 kN/mm ve 185 kN/mm'dir. Yüksek hat esneme direncine sahip olan ikinci bölgede, dingil aralığının etkin esneme direnci üzerindeki etkisinin daha az olduğuna dikkat edilmelidir.

Dinamik darbe kuvvetlerinin büyüklüğü, iki bölge arasındaki hat esneme direnci oranına bağlıdır. İki bölge arasındaki bu oran sabit olmasına rağmen, hat üzerinden farklı dingil aralığına sahip araçların geçmesiyle etkin esneme dirençleri arasındaki oran değişir. 1.5 m, 2.3 m ve 3.1 m dingil aralıkları için köprü ile toprak destekli hat arasındaki etkin esneme direnci oranları sırasıyla 12.59, 10.07 ve 8.04'tür. Eğer araca ait teker ve boji esneme dirençleri ve temas esneme direnci dahil edilirse, iki bölge arasındaki sistem esneme direnci oranları sırasıyla 1.117, 1.084 ve 1.071 olarak elde edilir. Esneme direnci oranının en fazla olduğu dingil aralığı 1.5 m, sonra 2.3 m ve son olarak da 3.1 m'lik dingil aralığıdır. Dolayısıyla toprak destekli hattan köprüye geçişte oluşan dinamik darbe kuvvetlerinin en fazla 1.5 m, sonra 2.3 m'lik dingil aralığında ve en az 3.1 m'lik dingil aralığında olması beklenir. Bölüm 4'te tanıtılan Bezgin Denklemleri ile dinamik darbe kuvvetleri tahmin edilebilir. Geçiş bölgesi uzunluğu $L=8$ m, statik teker yükü 123 kN ve dingil aralığı 1.5 m için bu denklemleri kullanarak örnek bir hesaplama yapılacaktır.

1.5 m'lik dingil aralığında, toprak destekli hattaki etkin esneme direnci $k_1^*=14.7$ kN/mm ve köprüde $k_2^*=185$ kN/mm'dir. Statik yük altındaki sehimler birinci bölgede $a= F_s/k_1^*=8.37$ ve ikinci bölgede $b=F_s/k_2^*=0.66$ mm'dir. Hattaki esneme direnci farkı nedeniyle iki bölge arasında oluşan yükseklik farkı ise $|a-b|=|8.37-0.66|=7.70$ mm'dir. Denklem 9'da darbe azaltma katsayısı ve Denklem 10'da trenin toprak destekli hattan köprüye girişinde ortaya çıkan dinamik darbe faktörü hesaplanmıştır.

$$f = 1 - \frac{v}{L} \sqrt{\frac{2h}{g}} = 1 - \frac{33.33 \frac{m}{sn}}{8 m} \sqrt{\frac{2 \times 0.0077 m}{9.81 \frac{m^2}{sn^2}}} = 0.835 \quad (9)$$

$$K_{B2} = 1.414 \sqrt{1 + 0.835 + \frac{8.37}{0.66} (1 - 0.835)} - 1 = 1.83 \quad (10)$$

Genişletilmiş Bezgin Denklemleri'nde, trene ait hat esneme dirençleri de dahil edilerek eşdeğer sistem esneme direnci elde edilir. Teker yayı esneme direnci $k_w=10$ kN/mm dahil edilirse sistem esneme dirençleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{1}{k_{eq1}^*} = \frac{1}{k_w} + \frac{1}{k^*} = \frac{1}{10} + \frac{1}{14.7} \rightarrow k_{eq1}^* = 5.95 \text{ kN/mm} \quad (11)$$

$$\frac{1}{k_{eq2}^*} = \frac{1}{k_w} + \frac{1}{k^*} = \frac{1}{10} + \frac{1}{185} \rightarrow k_{eq2}^* = 9.49 \text{ kN/mm} \quad (12)$$

Statik yük altındaki sehimler birinci bölgede $a'=F_s/k_{eq1}^*=20.67$ mm ve ikinci bölgede $b'=F_s/k_{eq2}^*=12.96$ mm'dir. Sistem sönümlemesinin olmadığı varsayılmıştır ($s=0$). Bu durumda elde edilen dinamik darbe faktörü aşağıda verilmiştir.

$$K'_{B2} = \sqrt{2[1 + 0.835 + \frac{20.67}{12.96}(1 - 0.835)]} - 1 = 1.048 \quad (19)$$

Yukarıda yapılan örnek darbe kuvveti faktörü hesaplamaları, tüm dingil aralıkları için yapıldığında 1.5 m, 2.3 m ve 3.1 m'lik dingil aralıklarındaki dinamik darbe faktörleri sırasıyla 1.83, 1.59 ve 1.43 olarak elde edilir. Bu hesaplamalara teker yayı esneme direnci de dahil edildiğinde ortaya çıkan dinamik darbe faktörleri 1.048, 1.032 ve 1.023'tür. Bu sonuçlara göre en yüksek dinamik kuvvetler $m=1.5$ m'lik dingil aralığında ve en düşük dinamik kuvvetler $m=3.1$ m'lik dingil aralığında ortaya çıkmaktadır.

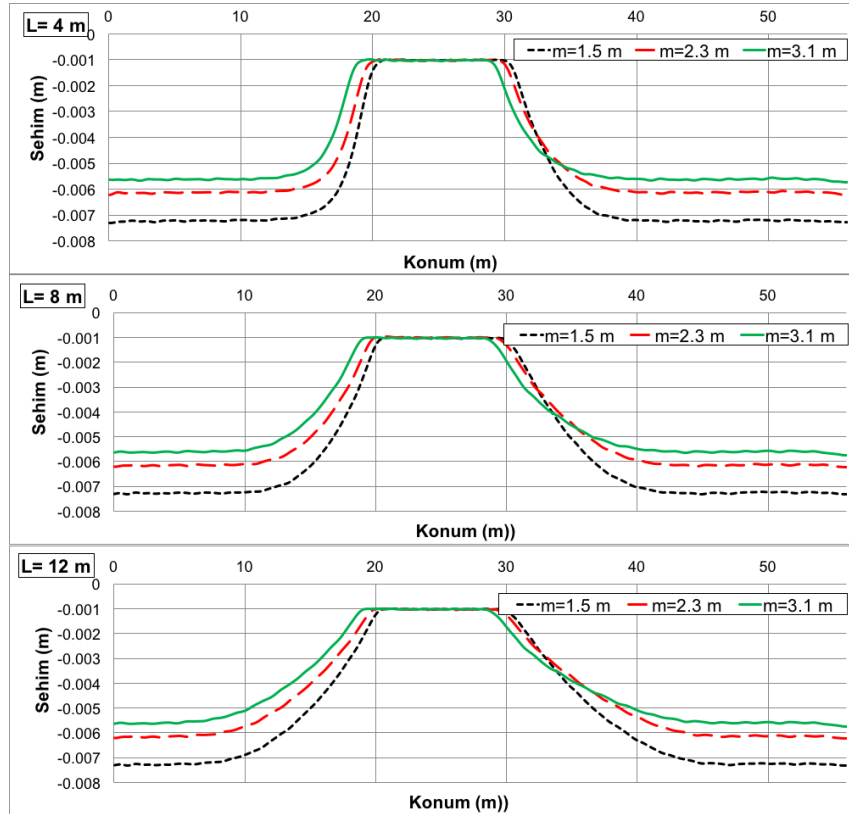
5.2. Dingil mesafesine bağlı dinamik darbe kuvveti değişiminin sonlu elemanlar analizi

Dingil mesafelerine bağlı olarak etkin esneme direncinin değişmesi ve bunun sonucunda da dinamik darbe kuvvetlerinin değişmesi gerektiği hipotezini test etmek amacıyla üç farklı geçiş bölgesi için ABAQUS® Explicit kullanılarak 3B Sonlu Elemanlar Modeli geliştirilmiştir. 4 m, 8 m ve 12 m'lik geçiş uzunlukları boyunca toprak destekli balastlı hattan beton destekli balastlı hatta geçiş simülasyonları yapılmıştır. 50 m'lik modelin 20. ve 30. m'leri arasında 10 m boyunca beton destekli balastlı hat yer almaktadır. Bu geçiş bölgesi üzerinden 1.5 m, 2.3 m ve 3.1 m'lik dingil aralıklarına sahip üç farklı araç geçişi yapılmıştır. Birinci bölgeden ikinci bölgeye geçişte hat esneme direnci yaklaşık 8 kat artarken, ikinci bölgeden çıkışta 1/8 katına düşer. Bağımsız teker altındaki esneme direnci birinci bölgede $k_1=23$ kN/mm ve ikinci bölgede $k_2=185$ kN/mm'dir. Teker yayı esneme direnci is $k_w = 1.85$ kN/mm olarak alınmıştır. Modele ait özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sonlu elemanlar modeline ait özellikleri [16]

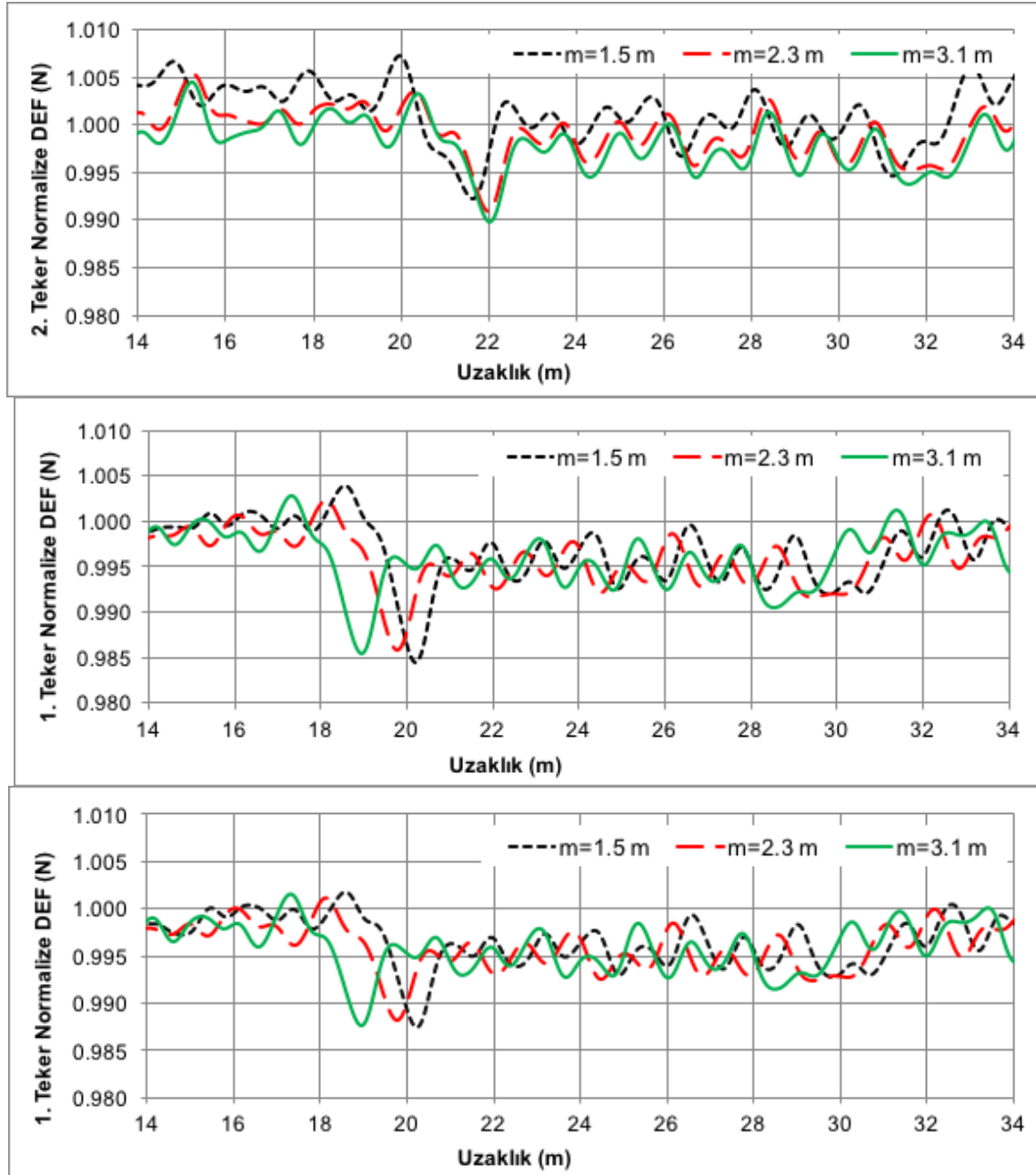
Toplam uzunluk (m)	50	Balast kalınlığı (mm)	300
Tren hızı (km/sa)	120	Balast yoğunluğu (kg/m ³)	1800
Toplam dingil yükü (kN)	246 kN	Balast Poisson oranı	0.28
Teker çapı (m)	0.9	Balast kayıp faktörü	0.1
Teker seti kütlesi (kg)	981	Ray pedi esneme direnci (kN/mm)	150
Ray tipi	CEN60	Ray pedi kayıp faktörü	0.2
Ray Young Modülü (MPa)	210,000	Alt temel Elastisite Modülü (MPa)	10
Ray yoğunluğu (kg/m ³)	7750	Alt temel kalınlığı (mm)	3000
Ray kaybı faktörü	0.01	Alt temel yoğunluğu (kg/m ³)	2000
Travers boyutları (m) (enxboyxyyükseklik)	2.5x0.25x0.14	Alt temel Poisson oranı	0.3
Travers aralığı (m)	0.6	Alt temel kayıp faktörü	0.5
Hertz temas yayı esneme direnci (N/m)	10x10 ⁹	Beton Elastisite modülü (MPa)	35000
Balast Elastisite Modülü (MPa)	180	Beton yoğunluğu (kg/m ³)	2400

Bir önceki bölümde yapılan hesaplamalarda, toprak destekli 1. bölgede en yüksek esneme direnci 3.1 m'lik dingil aralığında ve en düşük 1.5 m'lik dingil aralığında elde edilmiştir. Bu durumda en 1. bölgede en düşük sehimin 3.1 m'lik dingil aralığında ve en yüksek sehimin de 1.5 m'lik dingil aralığında elde edilmesi beklenir. Şekil 5'te 4, 8 ve 12 m'lik geçiş uzunluklarında ortaya çıkan sehimler gösterilmiştir. Beklenen şekilde, bu üç dingil aralığı içerisinde dingil aralığı arttıkça hattaki sehimin azaldığı görülmektedir.

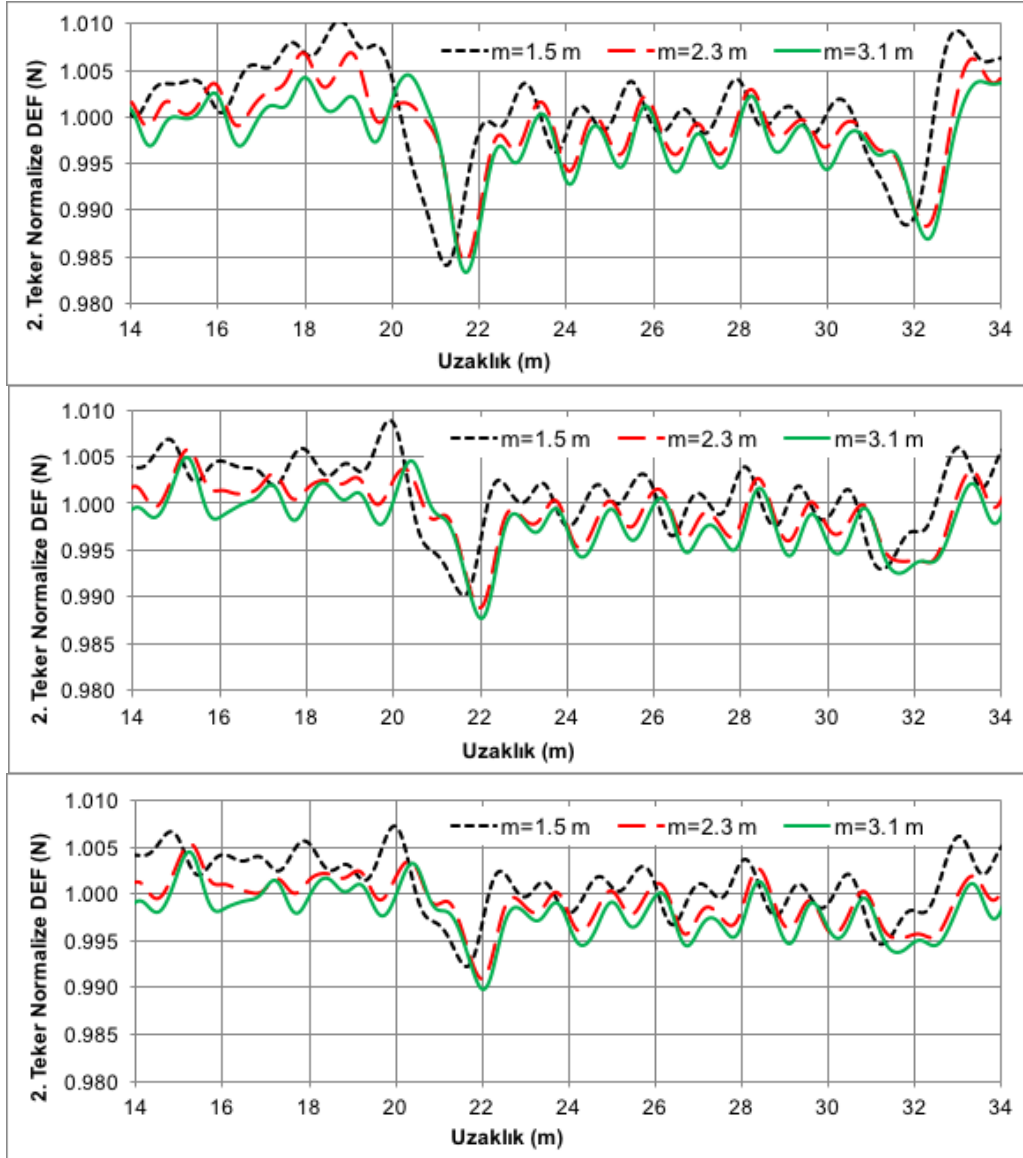


Şekil 5. Toprak destekli hattan köprüye geçiş yapan teker kuvveti altında elde edilen hat sehimleri [16]

Örnek hesaplamalarda, iki bölge arasındaki en yüksek esneme direnci oranının ve dolayısıyla en yüksek dinamik darbe kuvvetlerinin $m=1.5$ m'lik dingil aralığında ve en düşük dinamik kuvvetlerin $m=3.1$ m'lik dingil aralığında ortaya çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 6'da birinci teker ve Şekil 7'de ikinci teker, geçiş bölgesinden geçerken ortaya çıkan normalize dinamik kuvvetler gösterilmiştir. Dinamik kuvvetler $F_s=123$ kN olan statik teker kuvvetine göre normalize edilmiştir. Bulgular, analitik hesaplamalar ile tahmin edildiği şekilde en yüksek dinamik kuvvetin $m=1.5$ m'lik dingil aralığında ortaya çıktığını göstermektedir.



Şekil 6. Birinci tekerin hatta aktardığı normalize dinamik darbe kuvvetleri [16]



Şekil 7. İkinci tekerin hatta aktardığı normalize dinamik darbe kuvvetleri [16]

Şekil 6 ve 7’deki sonuçlar, tüm hat ve araç özellikleri aynı kalsa bile sadece boji dingil mesafesinin değişmesiyle tekerin hattan aldığı etkin esneme direncinin ve bunun sonucu olarak dinamik darbe kuvvetinin değiştiğini göstermektedir. Örneğin, aynı statik teker kuvvetine sahip fakat dingil aralığı farklı olan iki aracın hatta aktardığı dinamik kuvvetler farklıdır. Bu nedenle bir demiryolu hattı için servis yükleri belirlenirken sadece aracın tonajı değil, aynı zamanda dingil yükleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada aynı boji içerisindeki komşu tekerlerin etkileşimi ortaya konmuştur. Çalışmanın teorik temeli, “grup etkisi” olarak bilinen, sürekli elastik ortamlarda bağımsız taşıyıcı elemanlarda meydana gelen gerilme alanlarının girişimidir. Düşey ve yatay yükleri taşıtan iki veya daha fazla çakma kazığın zemine gömülmesiyle ortaya çıkan gerilme alanları ile aynı boji içerisindeki 2 veya daha fazla komşu tekerin hatta oluşturduğu gerilmeler arasında bir benzerlik vardır. Bu benzerlikten yola çıkılarak her bir tekerin

deneyimlediği hat tepkisi ayrı ayrı ele alınarak “etkin esneme direnci” kavramı ortaya konmuştur.

Demiryolu hatlarının işletmesinde farklı dingil mesafesine sahip birçok farklı tren kullanılabilir. Aynı hat üzerinden geçen farklı dingil aralıklarındaki trenlere hattın verdiği tepki farklıdır. Hat kusurlarının bulunduğu bölgelerden geçerken oluşan dinamik darbe kuvvetleri de dingil mesafesindeki farklılıklardan etkilenir. Daha önce sunulan Bezgin Yöntemi, dinamik darbe kuvvetleri ile hat ve trene ait esneme dirençlerini analitik olarak ilişkilendirir. Bu yöntem ile geliştirilen denklemler ile hat kusurunun olduğu bir bölgede, bir boji içerisindeki yakın mesafedeki tekerlerin deneyimlediği dinamik darbe kuvvetlerinin dingil mesafesiyle değiştiği hipotezi öne sürülebilir. Sonlu elemanlar analizi, aynı hat üzerinden geçiş yapan farklı dingil aralığına sahip trenlerin farklı dinamik darbe kuvvetleri oluşturduğunu göstermiştir. Sonlu elemanlar modelinde boji içerisinde teker yayı da kullanılması nedeniyle hat yayının esneme direnci sistem esneme direncini ve dolayısıyla farklı bölgeler arasındaki hat esneme direncindeki farklılıkları azaltmıştır. Bu nedenle analitik olarak tahmin edilen kuvvetler arasındaki farklar çok fazla değildir. Ancak yine de sonuçlar, bir boji içerisindeki tekerlerin etkin esneme direnci konseptini destekler niteliktedir.

Çalışma kapsamında belirli bir hat esneme direnci, ray tipi ve dingil aralığı için boji içerisindeki tekerin deneyimlediği etkin esneme direncini veren katsayılar sunulmuştur. Böylece günümüzde kullanılan zaman alıcı ve pahalı olabilen kompleks bilgisayar modelleri ile yapılan analizlere alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Aynı zamanda, demiryolu hatlarının değerlendirilmesinde ve optimum hat ve boji tasarımlarının sağlanmasında kullanılabilecek pratik bir yöntemdir.

REFERANSLAR

- [1] Powrie W, Le Pen L. 2016, *A Guide to Track Stiffness*, Milton Keynes: The Permanent Way Institution.
- [2] Balcı E, Bezgin NÖ. Hat Esneme Direncinin Hat Performansı Üzerindeki Etkileri. *Demühder* 2020(11); 75-85.
- [3] Burrow MPN, Teixeira PF, Dahlberg T, Berggren E. Track Stiffness Considerations for High Speed Railway Lines. In: Scott NP, editor. *Railway Transportation: Policies, Technology and Perspectives*. New York: Nova Science Publishers; 2010. p. 1–55.
- [4] Wehbi M, Musgrave P. Optimisation of Track Stiffness on the UK Railways. *Permanent Way Institution* 2017; 135.
- [5] Pita AL, Teixeira PF, Robuste F. 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* 2004; 218(1):31–40.

- [6] Sauvage R, Fortin J. La traînée de roulement des véhicules de chemin de fer. Rev. Générale Chemins Fer 1982; 7:383–390.
- [7] Popović Z, Puzavac L, Lazarević L. Rail defects due to rolling contact fatigue 2016; 54:17–29.
- [8] Nicklisch D, Kassa E, Nielsen J, Ekh M, Iwnicki S. 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 2010; 224(4):279–292.
- [9] Bergreen E, Jaehlenius A. Continuous Track Stiffness Measurement: An Effective Method to Investigate the Structural Conditions of the Track. Proc. Railway Engineering International Conference, London, 2002.
- [10] Li D, Thompson R, Kalay S. Development of Continuous Lateral and Vertical Track Stiffness Measurement Techniques. Proc., Railway Engineering 2002 International Conference, London, 2002.
- [11] Teixeira PF, López-Pita A, Casas C, Bachiller A, Robusté F. Improvements in High-Speed Ballasted Track Design. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2006; 1943(1):43–49.
- [12] Bezgin NÖ. Development of a New and an Explicit Analytical Equation that Estimates the Vertical Dynamic Impact Loads of a Moving Train. Procedia Engineering 2017; 189:2–10.
- [13] Bezgin NÖ. 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. Zadar, Croatia. 2018.
- [14] Bezgin NÖ, Wehbi M. 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 2018.
- [15] Balcı E. Demiryollarında Esneklik Değişimlerinin Düşey Tekerlek Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi – Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa.
- [16] Balcı E, Bezgin NÖ. Evaluation of Track Stiffness Variation with Bogie Axle Spacing from a New Perspective. Transportation Geotechnics 2020 (In-Review).