

Hat Profilinde Meydana Gelen Değişimler Nedeniyle Oluşan Dinamik Darbe Kuvvetlerinin Tahmini için Geliştirilen Yeni bir Yöntemin Uygulaması

Niyazi Özgür BEZGİN*¹

1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, , Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar, İstanbul

**ozgur.bezgin@istanbul.edu.tr*

(Alınış / Received: 08.06.2018, Kabul / Accepted: 01.08.2018)

Özet: Demiryolu hatlarının ray üstü kot değerlerinin hat boyunca değişimi şartnameler ile sınırlandırılmıştır. Ülkemizde bu konuda esas alınabilen bir kaynak EN 13848 – Hat Geometrik Kalitesi şartnamesi olup, bu şartname’de belirli bir hat uzunluğu boyunca hat profilinde meydana gelen kot değişim değerleri hakkında sınırlamalar ve öneriler getirilmektedir. Bu sınırlamaların iki önemli gerekçesi, yolcu konforunu ve seyir güvenliğini sağlamaktır. Profilde meydana gelecek değişiklikler, tren hızına, profildeki değişim değerine ve bu değerlerin oluştuğu hat uzunluğuna bağlı olarak hat üzerinde farklı kuvvetlerin oluşmasına neden olacaktır. Hazırlanan bu çalışma içerisinde, çalışmanın yazarı tarafından geliştirilen ve demiryolları üzerinde profil değişimlerinden kaynaklı dinamik darbe kuvvetlerinin tahminine yönelik yeni bir yöntemin özeti sunulacaktır. Çalışma içerisinde, geliştirilen bu yöntem ile hat üzerine etki eden dinamik darbe kuvvetlerinin, trenin hareket yönünde alçalacak şekilde değişen hat profili ve hat esneklik değeriyle olan ilişkisi anlatılacaktır. Son olarak, önerilen yeni yöntem ile elde edilen dinamik darbe katsayıları, mevcut deneysel denklemler ile elde edilen katsayılar ile kıyaslanacaktır.

Anahtar kelimeler: *Demiryolları, Hızlı trenler, Yük trenleri, Dinamik darbe kuvvetleri, Hat esnekliği, Hat profili, Darbe Etkisi Azaltma Katsayısı, Bezgin Yöntemi, Bezgin Darbe Kuvveti Katsayıları.*

Development and Application of a New Method that Estimates the Dynamic Impact Forces due to Variations in Track Profile

Abstract: Variation of top of rail profile along railway tracks is limited by specifications. EN 13848 is a specification commonly used in our country and this specification brings limitations and recommendations about the variation of the track profile along particular lengths of railway tracks. Two primary reasons for the specification of such limitations are to facilitate passenger comfort and establish operational safety. Variations in track profile will generate additional forces on the railway track depending on the train speed, value of profile variation and the length of the track along which this variation occurs. This study will present a summary of a new method developed by the author that estimates dynamic impact forces on railway tracks due to descending variations in the track profile. Through the developed method, this study will explain the relationship that the dynamic impact forces acting on railway tracks have with the descending track profile and track stiffness. In conclusion, a comparison will be made between the dynamic impact force factors estimated by the proposed new method and the factors estimated with some of the existing empirical methods.

Key words: *Railways, High Speed Trains, Freight Trains, Dynamic impact forces, Track Stiffness, Track Profile, Impact Reduction Factor, Bezgin Method, Bezgin Impact Force Factors.*

1. Giriş

Hareket eden bir trenin tekerleklerinin, demiryolu hattı üzerine, tekerleklerin durağan halde uyguladıkları kuvvetten daha yüksek değerde kuvvetler uygulamaları muhtemeldir. Tekerleklerin, hareket halinde daha yüksek kuvvetler uygulamasının nedenleri arasında hat profilinde meydana gelen değişimler, hat esnekliğinde meydana gelen değişimler veya tekerleklerde meydana gelen düzleşmeler gösterilebilir. İfade edilen bu nedenler ayrı ayrı etki edebilecekleri gibi hepsi bir arada da etki edebilirler.

Demiryolu mühendisliği kaynaklarında, dinamik darbe kuvvetlerinin tahminine yönelik deneysel nitelikte birçok denklem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu denklemlere örnek olarak 1900'lü yılların başında önerilen Talbot denklemi ile 1970'lerde önerilen Eisenmann denklemi örnek gösterilebilir [1,2]. Deneysel yöntemler sonucu ortaya çıkan bu denklemler, birim uyumu içermeyen ve ortaya çıktıkları deneysel şartları içeren rakamsal değerler içerirler. Çoğunlukla, belirli hat ve araç koşulları ile gerçekleştiren deneyler sonucu elde edilen bulgulara bağlı olarak geliştirilen deneysel denklemlerin her hat ve koşul altında kullanımlarında dikkat edilmesi gerekir.

Bununla birlikte, hat üst yapısı ile demiryolu aracı arasındaki etkileşimde etkin olan tüm değişkenleri bir arada ele alarak ifade edebilen bir denklem ise mevcut değildir. Zira etkin olan değişkenlerin sayısı, bu değişkenlerin doğru değerlerinin tespitinde yaşanan zorluklar ve bu değişkenlerin tümünü bir araya getirebilecek kuramın eksikliği, böyle bir denklem elde etmeyi de zorlaştırmaktadır. Bu nedenle günümüzde, demiryolu hat ve araç etkileşiminde tespit edilebilen ve değerleri tespit edilebilen tüm değişkenlerin tren hızına bağlı olarak bir arada etkileşimini inceleyebilen bilgisayar programları mevcuttur. Çoğunlukla, sonlu elemanlar veya ayrık elemanlar yöntemi ile işleyen bu programlar, gerçeğin pratik olarak en uygun tasvirini içeren modellerden yola çıkarak ve küçük zaman adımları içerisinde mekanik denge denklemlerini çözerek hat üzerine uygulanan kuvvetler ile hatta gözlenmesi muhtemel tepkileri açığa çıkarmaya çalışırlar. Günümüzde, Vampire[®], Simpack[®], Simulia[®], Universal Mechanism[®], ANSYS[®] ve ABAQUS-SIMULIA[®] gibi programlar ile demiryolu hattı ile demiryolu aracı arasındaki hareketten kaynaklı etkileşimi inceleyebilmek mümkündür. Ancak bu programların gerçekleştirdikleri işlemlerin sayısı ile bu işlemlerin gerçekleştiği sürenin kısalığı bir insanın hesaplama kabiliyetlerinin çok üzerindedir. Bu nedenlerden ötürü, bu programların ürettiği sonuçların sınanması yaklaşık bazı hesap sonuçları ile veya nitelikli programların sonuçları ile kıyaslanarak gerçekleştirilebilmektedir. Ancak günümüzde bir mühendis, karşılaştığı bir mühendislik sorununa çözüm bulabilmek için ne yazık ki bilgisayar programlarına fazlaca bağımlı hale gelmiştir.

Değerlendirilen bu sorun nedeniyle yazar, demiryolu hatları üzerine etki eden dinamik darbe kuvvetlerini basit ve açık bir şekilde tahmin edebilmek üzere matematiksel bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem enerjinin korunumu ilkesi ile kinematik kurallara bağlı olup, yazar tarafından geliştirilen ve “darbe azaltma katsayısı” adı verilen yeni bir kavram üzerine inşa edilmiştir. Geliştirilen bu yöntem ve yöntemin alçalan demiryolu hat profillerine uygulaması ile elde edilen ilk denklem, 17-19 Mayıs 2017 tarihleri arasında Rusya'nın St. Petersburg kentinde düzenlenen Transportation Geotechnics and Geoecology Konferansında sunulmuştur ve Procedia Engineering'de yayınlanmıştır [3]. Burada elde edilen başarılı ilk tanıtımın ardından yöntem daha da geliştirilerek, hat esnekliğinde gözlenebilen değişimler sonucunda ortaya çıkan dinamik

darbe kuvvetlerinin tahmini için iki yeni denklem daha geliştirilmiştir ve St. Petersburg’da sunulan denklem ile birlikte ABD’nin Washington DC eyaletinde, 7-11 Ocak 2018 tarihleri arasında 97.si düzenlenen Transportation Research Board Meeting’de sunulmuştur [4,5]. Burada, Network Rail, AREMA ve FRA’den yetkililer ile önerilen denklemler paylaşılmıştır. Çalışmanın ortaya koyduğu yararı takiben yükselen hat profili üzerinde ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetinin tahminine yönelik dördüncü denklem, 17-19 Mayıs 2018 tarihlerinde Hırvatistan’ın Zadar kentinde düzenlenen 5. International Conference on Roadway and Railway Infrastructures Konferansı’nda sunulmuştur [6]. Önerilen yöntemin, dinamik darbe kuvvetlerinin oluşumu üzerinde etkili çok farklı koşulları irdeleyebilmesi nedeniyle yöntem son olarak tekerlek düzlüklerinden kaynaklı dinamik darbe kuvvetlerinin tahmini için, yazarın yüksek lisans öğrencisi ile bir başka denklemi geliştirmek için de kullanılmıştır [7].

Bu çalışma içerisinde öncelikle bazı deneysel nitelikte dinamik darbe kuvvet tahmin denklemleri tanıtılacaktır ve bu denklemlerin tahmin değerleri sunulacaktır. Ardından yazar tarafından, alçalan hat profili üzerinde hareket sonucu ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet denklemi tanıtılarak, bu denklem ile elde edilen değerler, seçilen deneysel denklemler ile elde edilen değerler ile kıyaslanacaktır. Demiryolu profilinde ortaya çıkan değişim nedeniyle oluşan dinamik darbe kuvvetinin üzerinde hat esnekliğinin etkisi vurgulanarak, aynı profil koşullarında fakat farklı esnekliğe sahip demiryolu hatlarında oluşan dinamik etkilerin farklılıkları gösterilecektir.

2. Dinamik Darbe Kuvvetlerinin Tahmini için Kullanılan Bazı Denklemler

Yazar tarafından tespit edilebilen yirmiye yakın denklem arasından beş tanesi bu çalışmada irdelenmiştir. Talbot, Eisenmann, Alman Demiryolları, Japon Demiryolları ve Clarke tarafından önerilen bu denklemler, dinamik darbe kuvvetlerinin tahminine yönelik farklı yaklaşımlar içermektedir. Tren hızı tüm denklemlerin ortak bileşeni iken Talbot denklemi, dönemin ihtiyacına da bağlı olarak tekerlek yarıçapını içermektedir ve azalan tekerlek çapı ile artan tekerlek esneklik değerinin yaratacağı dinamik darbe kuvvet artışını vurgulamaktadır. Eisenmann denklemi, hat üstyapısında oluşabilen kusurlara odaklanmakta ve aynı zamanda üst yapı unsurlarının hat güvenliği için kritiklik derecesini belirten istatistiksel bir yaklaşım içermektedir. Japon Demiryolları tarafından önerilen denklem de benzer bir yaklaşım izlemektedir. Alman Demiryolları tarafından önerilen denklemde değişken olarak sadece hız görülmekte, diğer unsurlar kapalı bir şekilde muhtelif rakamsal sabitler ile temsil edilmektedirler. Clarke tarafından önerilen denklem ise tekerlek çapına ve hat modülüne vurgu yapmaktadır. Bu denklemler, takip eden satırlarda sırayla belirtilmişlerdir [3,4].

1. Talbot denklemi: $K = 1 + 5.21 \frac{v}{D}$, D: tekerlek çapı (mm) , v: Tren hızı (km/saat)

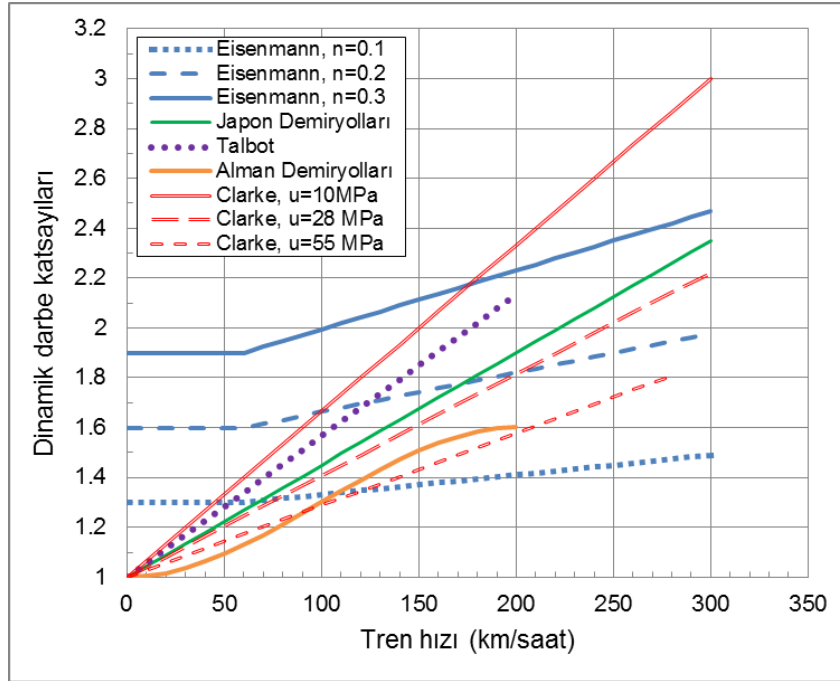
2. Eisenmann denklemi: $K = 1 + \varphi \cdot n \cdot t$

$$\varphi = 1 + 0.5 \frac{v-60}{190} \quad (60 < v < 300 \text{ km/saat}) \text{ ve } \varphi = 1 \quad (v \leq 60 \text{ km/saat})$$

n = 0.1 iyi hat koşulları, n = 0.2 ve n = 0.3 sırasıyla normal ve kötü hat koşulları. Hat bileşeninin kritik önemine bağlı olarak istatistiksel bir katsayı olan t=1, 2 veya 3.

3. Alman Demiryolları denklemi: $K = 1 + \frac{11.655v^2}{10^5} - \frac{6.252v^3}{10^7}$, v: Tren hızı (km/saat)
4. Japon Demiryolları denklemi: $K = 1 + n \cdot t \frac{v}{200}$, n=0.3 ve t=3 için $\rightarrow K = 1 + 0.0045v$, v: km/saat
5. Clarke denklemi: $K = 1 + \frac{19.7v}{D\sqrt{u}}$, v: Tren hızı (km/saat), D Tekerlek çapı (mm), u: hat modülü (MPa).

Açıklanan bu denklemlerin dinamik darbe kuvvet katsayı tahminleri, 920 mm tekerlek çapı ve Eisenmann ve Japon Demiryolları denklemi için kritik hat unsurunu temsil edecek şekilde t=3 seçilerek hıza bağlı olarak çözümlenmişler ve Şekil 1’ de sunulmuşlardır.

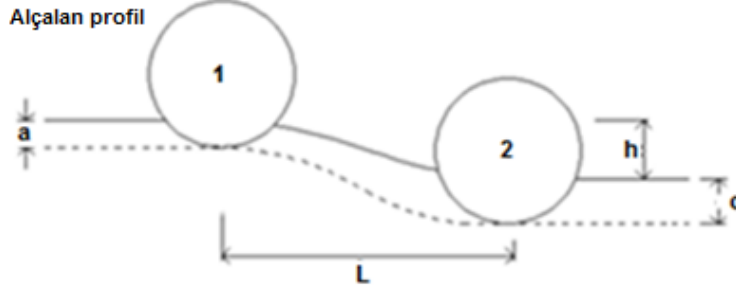


Şekil 1. İrdelenen deneysel denklemler ile tren hızına ve ele alınan değişkenlere bağlı olarak tahmin edilen dinamik darbe kuvvet katsayıları

Görüldüğü üzere, deneysel denklem tahminleri belirli sınırlar içerisinde uyumlu olmakla birlikte tahmin değerleri arasında farklılıklar mevcuttur. Bununla birlikte, “iyi”, “normal” veya “kötü” hat gibi öznel yorumlar içermektedir. Bu nedenlerle, bu denklemler konuya dair bir fikir vermekle birlikte, bu denklemlerin sağlıklı bir şekilde kesin değerlendirme için kullanımları önerilmemektedir ve bir hattı nesnel ve analitik bir şekilde değerlendirebilmek için bir yöntem ihtiyacı bulunmaktadır.

3. Bezgin Tarafından Dinamik Darbe Kuvvetlerinin Tahmini için Geliştirilen Yeni Bir Yöntem

Şekil 2, hat profilinde alçalan yönde değişim gösteren bir hattı tasvir etmektedir [3,4].



Şekil 2. Hat profilinde meydana gelen değişim.

Düşey düzensizlik değeri olan “h”, hat profilinde “L” hat uzunluğu boyunca oluşan düşey farkı temsil etmektedir. Tekerleğin 1 numaralı konumunda, statik kuvvet altında “a” olan sehim, 2 numaralı konumda daha yüksek olan “c” değerine ulaşabilmektedir. “k” hat esnekliğini temsil etmektedir.

Eğer tren, düzensizlik içeren bir bölgeden çok hızlı geçecek olursa, tekerlekler üzerine etki eden kuvvetin, statik tekerlek kuvvetinden yüksek olması beklenebilir. Bu durumu tasvir etmek için bir hız kasisini ele alalım. Şayet bir araç, kasis üzerinden yüksek bir hızda geçecek olursa kasis, üzerinden geçen tekerleğe çok yüksek bir kuvvet uygulayacaktır. Bu geçiş çok düşük bir hızda olursa, tekerleğe etki eden dinamik darbe kuvveti de düşük olacaktır.

İşte bu felsefeden yola çıkarak yazar, Denklem 1’de sunduğu “f: darbe etkisi azaltma katsayısını (impact reduction factor)” önermiştir. Burada, $t_{\text{düşüş}}$, trenin tekerleği tarafından taşına kütlelerin “h” yüksekliğinde bir yükseltiden hat üzerine teorik düşme zamanını, $t_{\text{geçiş}}$ ise tren tekerleğinin “h” yükseklik değişiminin meydana geldiği “L” hat uzunluğunu katetmesi için gereken zamanı temsil etmektedir [3,4,5].

$$f = 1 - \frac{t_{\text{düşüş}}}{t_{\text{geçiş}}} \quad (1)$$

Denklem 2 ve 3, düşüş ve geçiş sürelerinin kinematik ifadelerini göstermektedir.

$$t_{\text{düşüş}} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2)$$

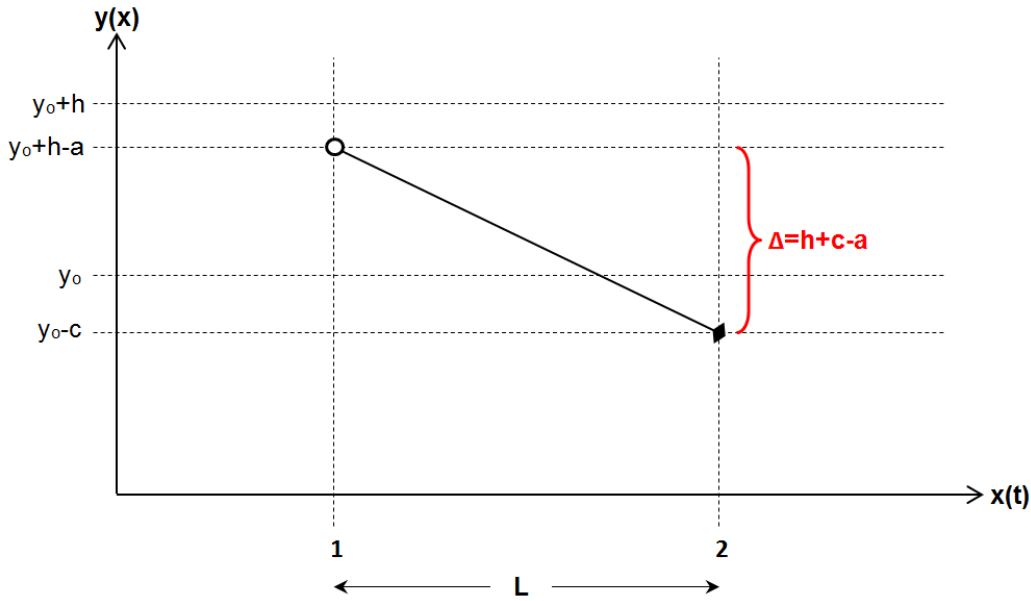
$$t_{\text{geçiş}} = \frac{L}{v} \quad (3)$$

Denklem 4’ de sunulan değerlendirmeler ise, tren hızına ve düzensizlik değerlerine bağlı olarak “f” değişkeninin alabileceği değerleri ifade etmektedir [3,4,5].

$$\text{Eğer } \left\{ \begin{array}{l} t_{\text{düşüş}} < t_{\text{geçiş}} \\ t_{\text{düşüş}} = t_{\text{geçiş}} \\ t_{\text{düşüş}} > t_{\text{geçiş}} \end{array} \right\} \text{ o halde } \left\{ \begin{array}{l} 0 < f \leq 1 \\ f = 0 \\ f < 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

Şekil 3, alçalan bir hat üzerinde hareket eden bir tren tekerleğinin düşey seviyesinin değişimini göstermektedir. Bu tasvirde y_0 , hattın tasarım düşey kotunu belirtmektedir. Ancak meydana gelen kusurlar nedeniyle hattın uzunluğu boyunca istenen kotunun y_0 olmaması nedeniyle tekerleğin taşıdığı kütle için hat boyunca potansiyel enerji farkı meydana gelmektedir ve tekerlek 2 numaralı konuma geldiğinde düşeyde net bir yükseklik farkı tecrübe etmektedir. Denklem 5, bu yükseklik farkından oluşan potansiyel enerjiyi ifade etmektedir.

$$E1 = m. g. (h + c - a) \quad (5)$$

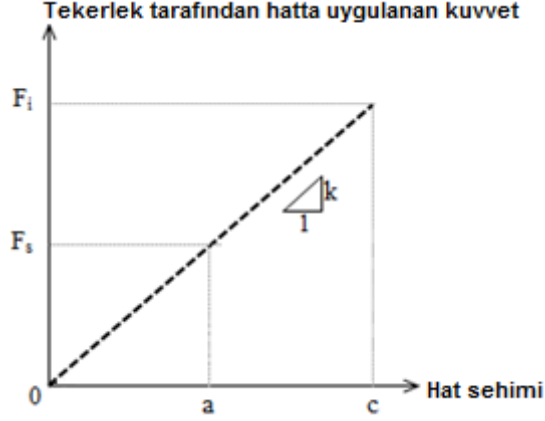


Şekil 3. Alçalan bir hat üzerinde tekerleğin taşıdığı kütle için zaman bağlı yükseklik değişimi.

Ancak $E1$ potansiyel enerjisinin tamamı hatta aktarılmamaktadır. Tanıtılan darbe azaltma katsayısına bağlı olarak bu enerjinin Denklem 6 ile ifade edilen kısmı hatta aktarılmaktadır.

$$E2 = m. g. (h + c - a) - m. g. h. f \quad (6)$$

Şekil 4'de, doğrusal ve elastik olarak betimlenmiş esnekliğe sahip hattın, F_s statik tekerlek kuvveti ve F_i dinamik darbe kuvveti altında sıkışma değerleri görülmektedir. Denklem 7 ise statik hal altındaki sehinden dinamik darbe kuvveti altındaki sehime geçişte depolanan enerjiyi ifade etmektedir.



Şekil 4. Doğrusal ve elastik bir davranış tasviri ile hattın kuvvet-sehim ilişkisi.

$$E3 = \frac{1}{2}k(a + c)(c - a) \quad (7)$$

Denklem 8, Denklem 6' da ifade edilen enerjinin, Denklem 7' de depolanmasını belirtmektedir. Denklem 9 ve 14 arasında, kurgulanan eşitliğin cebri sadeleştirilmesi gerçekleştirilmekte ve Denklem 15 ile dinamik darbe kuvveti altında oluşan sehim ile statik kuvvet altında oluşan sehim ilişkilendirilmektedir.

$$m. g. (h + c - a) - m. g. f. h = \frac{1}{2}k(a + c)(c - a) \quad (8)$$

$$h + c - a - f. h = \frac{1}{2} \frac{(a+c)(c-a)}{a} \quad (9)$$

$$2. a. h + 2. a. c - 2. a^2 - 2. a. f. h = c^2 - a^2 \quad (10)$$

$$a^2 + 2. a. h. (1 - f) - 2. a^2 = c^2 - 2. a. c \quad (11)$$

$$2. a. h. (1 - f) - a^2 = (c - a)^2 - a^2 \quad (12)$$

$$\sqrt{2. a. h. (1 - f)} = c - a \quad (13)$$

$$c = a + \sqrt{2. a. h. (1 - f)} \quad (14)$$

$$c = a \left(1 + \sqrt{2h/a (1 - f)} \right) \quad (15)$$

Denklem 16'da, trenin hızı ve hat düzensizliğinden kaynaklı dinamik darbe kuvveti ifade edilmektedir.

$$F_i = k. c = k. a. \left(1 + \sqrt{2h/a (1 - f)} \right) = F_s. \left(1 + \sqrt{2h/a (1 - f)} \right) \quad (16)$$

Parantez içerisinde yer alan denklem ise Denklem 17'de ifade edilen "K_{B,d}: Alçalan hat profili nedeniyle oluşan Bezgin Darbe Katsayıları Denklemi" dir.

$$K_{B,d} = 1 + \sqrt{2h/a(1-f)} \quad (17)$$

Elde edilen bu denklemin en önemli bulgusu, hat üzerinde gerçekleşmesi muhtemel darbe kuvvetinin sadece “h” düzensizlik değerine bağlı olmayıp, bu değer, statik sehim değerine oranına bağlı olduğunu göstermesidir. Örnek vermek gerekirse, belirli bir hızda giden tren için 30 metre bozuk hat uzunluğu boyunca hat üzerinde profilde 10 mm alçalma var demek yeterli değildir. Eğer bu hattın yay esneklik değeri az ise ve statik tekerlek yükü altında 10 mm sehim yapıyorsa, profilde gözlenen 10 mm’lik kot farklılığını etkisi fazla olmayabilir. Ancak bu hattın yay esneklik değeri yüksekse ve statik tekerlek kuvveti altında 1 mm sehim yapıyorsa, o halde 30 metre boyunca profilde gözlenen 10 mm’lik azalmanın etkisi daha fazla olacaktır. Benzer şekilde, belirli bir hızda giden tren için 10 metre bozuk hat boyunca oluşabilecek 10mm kot farkının etkisi ile 100 metre bozuk hat boyunca oluşabilecek 10 mm kot farkını etkisi aynı olmayacaktır. Ayrıca, ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet katsayısı, tekerlek kuvvetine de bağlıdır. Artan tekerlek yükleri için hat sehimine de (a) artmakta ve belirli bir hat düzensizliğinin (h) hat sehimine oranı azalmaktadır. Dolayısı ile dinamik darbe katsayısı belirli bir hızda tekerlek yükü ile ters orantılıdır. Sıradaki bölümde, geliştirilen denklemin bir uygulaması sunulacaktır.

4. Geliştirilen $K_{B,d}$ Denkleminin Örnek Uygulaması

Tek bir ray için hat esneklik değeri 42.5 kN/mm olan örnek bir hattın $L_1= 35$ m ve $L_2= 12.5$ m uzunlukları boyunca profilinde $h=4, 8, 12, 16, 20$ ve 24 mm alçalma yönde değişimler meydana gelmektedir. 85 kN statik tekerlek kuvveti altında statik sehim $a=85/42.5 = 2$ mm dir. Tablo 1’de, 35 metre uzunluğunda olan bozuk hattın, farklı tren hızlarında katedilme süreleri görülmektedir. Tablo 2’de ise “h” düşey mesafelerinde hat üzerine teorik düşüş süreleri ve bu sürelerin, geçiş sürelerine oranları görülmektedir. Tablo 3 ve 4 ise sırasıyla, darbe azaltma katsayılarını ve dinamik darbe kuvvet katsayılarını belirtmektedir.

Tablo 1. 70 metre Uzunluğundaki Bozuk Hattın Katedilme Süreleri.

Tren hızı		L=35 m için geçiş süresi
km/saat	m/s	$t_{geçiş}=35/v$ (s)
50	13.9	2.52
100	27.8	1.26
150	41.7	0.84
200	55.6	0.63
250	69.4	0.50

Tablo 2. Teorik Düşüş Süreleri ve Bu Sürelerin Geçiş Sürelerine Oranları.

h (m)	h/a	t _{düşüş} (s)	Tren hızı (km/saat)				
			50	100	150	200	250
			t _{düşüş} /t _{geçiş} (düşüş ve geçiş zamanlarının oranı), L=35 m				
0	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.004	2.00	0.029	0.011	0.023	0.034	0.045	0.057
0.008	4.00	0.040	0.016	0.032	0.048	0.064	0.080
0.012	6.00	0.049	0.020	0.039	0.059	0.079	0.098
0.016	8.00	0.057	0.023	0.045	0.068	0.091	0.113
0.02	10.00	0.064	0.025	0.051	0.076	0.101	0.127
0.024	12.00	0.070	0.028	0.056	0.083	0.111	0.139

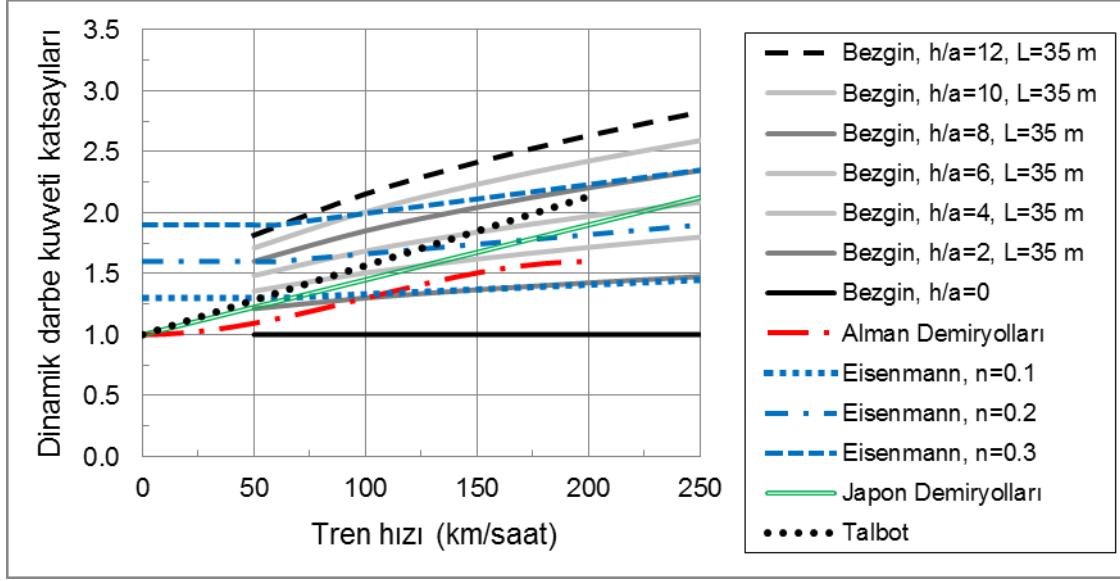
Tablo 3. Darbe Azaltma Katsayıları

h (m)	h/a	Tren hızı (km/saat)				
		50	100	150	200	250
		f = 1-t _f /t _p (Darbe azaltma katsayısı), L=35 m				
0	0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.004	2.00	0.989	0.977	0.966	0.955	0.943
0.008	4.00	0.984	0.968	0.952	0.936	0.920
0.012	6.00	0.980	0.961	0.941	0.921	0.902
0.016	8.00	0.977	0.955	0.932	0.909	0.887
0.02	10.00	0.975	0.949	0.924	0.899	0.873
0.024	12.00	0.972	0.944	0.917	0.889	0.861

Tablo 4. Alçalan Hat Profili için Bezgin Dinamik Darbe Katsayıları (K_{B,d})

h (m)	h/a	Tren hızı (km/saat)				
		50	100	150	200	250
		K _{B,d} (Dinamik darbe katsayısı), L=35 m				
0	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.004	2.00	1.21	1.30	1.37	1.43	1.48
0.008	4.00	1.36	1.51	1.62	1.72	1.80
0.012	6.00	1.49	1.69	1.84	1.97	2.09
0.016	8.00	1.60	1.85	2.04	2.20	2.35
0.02	10.00	1.71	2.01	2.23	2.42	2.59
0.024	12.00	1.82	2.15	2.41	2.63	2.83

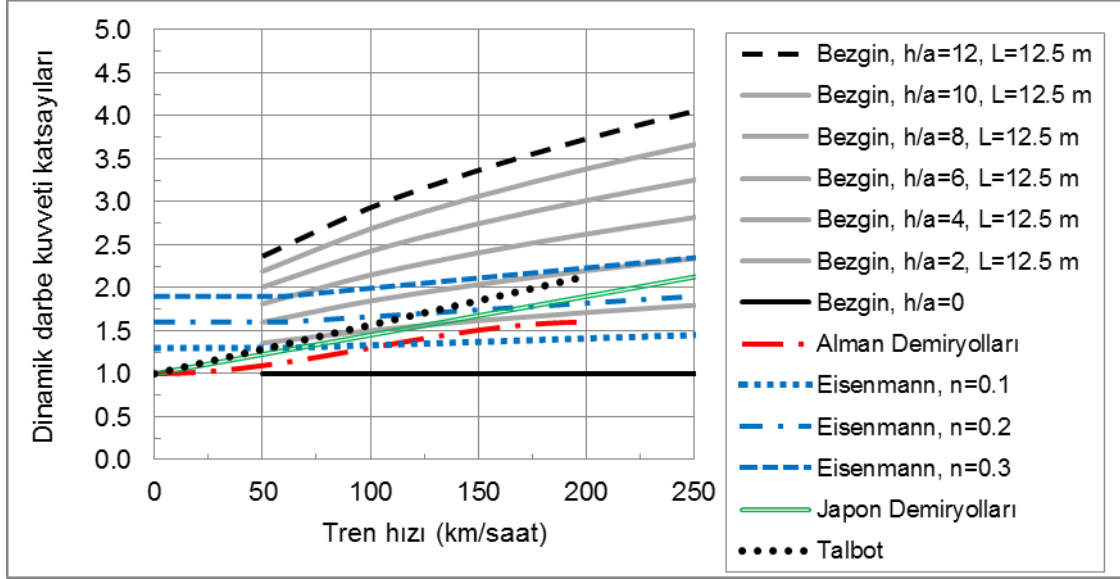
Tablo 4’de sunulan K_{B,d} değerleri Şekil 5’da, Eisenmann, Talbot, Alman Demiryolları ve Japon Demiryolları denklem tahmin sonuçları ile kıyaslanarak gösterilmektedir. Bezgin tarafından önerilen yöntemin önemli bir yararı, hatta mevcut bir düzensizlik değerini, bu düzensizliğin görüldüğü hat uzunluğu ve hattın esneklik değeri ile birlikte değerlendirmeye alabilmesidir.



Şekil 5. $L=35$ m için $K_{B,d}$ denklemi ile tahmin edilen dinamik darbe katsayılarının deneysel denklem tahminleri ile kıyaslanması.

Şekil 6'da, daha önceki tablolarda sunulan değerlendirmelerin $L=12.5$ m uzunluğunda bozuk hat için ifadesi görülmektedir. Önceki değerlendirmede dikkate alınan hat profilinde meydana gelen düşey değişimler, daha kısa bir hat uzunluğunda ele alındığında, elde edilen dinamik darbe kuvvet katsayıları beklendiği gibi daha yüksek elde edilmektedir. Örnek vermek gerekirse, 50 m hat boyunca düşeyde ortaya çıkacak 20 mm kot farklılığının belirli bir tren hızı altındaki etkisi, aynı düşey farkın 10 m hat boyunca çıkması ile oluşacak etki ile aynı olmayacaktır. Önerilen yöntem bu farkı yakalayabilmektedir. Şekil 5'e göre, Eisenmann tarafından "kötü" hat olarak anılan durum, $L=35$ m uzunluğunda olan ve ray başına hat esneklik değeri 42.5 kN/mm olan hat için düşeyde $h=16$ mm bir fark ile ortaya çıkmaktadır. Oysaki aynı durum, $L=12.5$ metre uzunluğunda bozuk bir hatta düşeyde $h=8$ mm bir fark altında ortaya çıkmaktadır.

Geliştirilen yöntem ile elde edilen bir diğer önemli bir bulgu ise dinamik darbe kuvvetlerinin oluşumunda tek başına hat geometrik düzensizliğinin değil, hat esnekliğinin de önemli bir rol aldığıdır. Statik tekerlek yükleri altında esneklik değeri yüksek çok sert bir hat çok az bir sehim yapacaktır. Dolayısıyla bu hat boyunca hat profilinde meydana gelebilecek küçük bir değişim bile, hat üzerinde yüksek bir dinamik darbe etkisi yapabilecektir. Oysa hattın esneklik değeri düşükse buna bağlı olarak tekerlek yükleri altında statik sehim değeri yüksek olacaktır ve hat profilinde meydana gelebilecek bir değişim, yüksek bir dinamik darbe etkisi uyandırmayabilecektir. Şekil 5 ve 6'da h/a ile işaret edilen değişimler bu fikri doğrulamaktadır.



Şekil 6. $L=12.5$ m için $K_{B,d}$ denklemi ile tahmin edilen dinamik darbe katsayılarının deneysel denklem tahminleri ile kıyaslanması.

6. Sonuç ve Yorum

Geliştirilen yöntem ile demiryolu hatlarında meydana gelen dinamik darbe kuvvetlerinin tahmin edilebilmesi basit bir matematiksel çözümlenme ile mümkün hale gelmiştir. Yöntemin, alçalan yönde hat profili üzerinde hareket eden bir trenin tekerlekleri üzerinde oluşturacağı dinamik darbe kuvvetleri için uygulanması ile bir denklem elde edilmiştir. Elde edilen bu denklem ile bulunan dinamik darbe kuvvet katsayıları ile kaynaklarda belirtilen bazı deneysel denklemler ile bulunan katsayılar arasında uyum gözlenmiştir.

Yöntemin ihtiyaç duyduğu önemli bir girdi hattın profil değerinin değişimidir ve uygulamada hat profili düzensiz bir şekilde değişmektedir. Bu değişimi yöntem içerisinde uygulanabilir niteliğe kavuşturmak için fraktal analiz, Fourier dönüşümleri veya küçük dalga (wavelet) analizi kullanılabilir.

Geliştirilen yöntemin, alçalan ve artan hat profilleri nedeniyle, azalan ve artan hat esneklikleri nedeniyle ve tekerlek düzlükleri nedeniyle ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetlerinin tahminine yönelik kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca yöntem ile demiryolu aracının tekerlek ve boji yay ve sönümleme sabitleri de dikkate alınabilmektedir. Bugün ilerlemekte ve sonuçlanmakta olan bu çalışmalar tamamlandığında detayları ve sonuçları paylaşılacaktır.

Kaynakça

- [1] Talbot, A.N ve diğerleri. Stresses in Railroad Track, Report of the Special Committee to Report on Stresses in Railroad Track, First Progress Report, AREA Proceedings, Vol. 19, 873-1062.
- [2] Eisenmann, J. Stresses in Rail Acting as a Beam Special excerpt from ETR Eisenbahntechnische Rundschau, Vol.8, Hestra, Darmstadt. 1969.

- [3] Bezgin, N.O., Development of a new and an explicit analytical equation that estimates the vertical impact loads of a moving train. Procedia Engineering, Volume 189, Mayıs 2017, Pages 2-10.
- [4] Bezgin, N.O., Application of a new concept and a new method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to track profile irregularities. 97th Transportation Research Board Meeting, Washington DC, USA, Paper No.: 18-00037. Kabul edilme tarihi: Ekim 16, 2017, sunum: Ocak 9, 2018.
- [5] Bezgin N.O., Application of a new concept and a method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to track stiffness variations. 97th Transportation Research Board Meeting, Washington DC, USA, Paper No.: 18-00407. Kabul edilme tarihi: Ekim16, 2017, sunum: Ocak 9, 2018.
- [6] Bezgin N.Ö., "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 2018, Zadar, HIRVATISTAN, 17-19 Mayıs 2018, pp.837-845
- [7] Kolukırık C., Bezgin N.Ö., "Analysis of Dynamic Impact Forces on Railway Tracks Due to Wheel Flats ", 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA 2018, Zadar, HIRVATISTAN, 17-19 Mayıs 2018, pp.697-705

Özgeçmiş



Doç. Dr. Niyazi Özgür BEZGİN

Doç. Dr. Niyazi Özgür Bezgin 16 Nisan 1977 yılında Ankara’da doğmuştur. 1994 senesinde Ankara Atatürk Anadolu Lisesi’nden mezuniyetinin ardından Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği’nde başladığı mühendislik eğitimine, 1999 senesinde New York’ta bulunan Polytechnic University, Brooklyn İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde devam ederek 2001 yılında şeref derecesiyle mezun olmuştur. Yapı ve zemin mekaniği konularında, Rutgers, the State University of New Jersey inşaat Mühendisliği Bölümü’nde 2002’de ve 2005’de tamamladığı Yüksek Lisans ve Doktora çalışmalarının ardından 2005-2007 yılları arasında New York’ta bulunan Langan Engineering and Environmental Services isimli firmada Tasarım Mühendisi olarak çalışarak 2007 senesinde Türkiye’ye dönmüştür. 2007 yılında Araştırma ve Geliştirme Sorumlusu olarak çalıştığı Yapı Merkezi Prefabrikasyon AŞ’den 2012 yılının sonunda ayrılarak 2013 senesinde İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde ulaştırma yapıları üzerine araştırmalar yapmak üzere Öğretim Üyesi olarak akademik çalışmalarına başlamıştır ve 2017 senesinde Doçent unvanını kazanmıştır. Dr. Bezgin, ayrıca 2010 senesinden beri Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Bahar dönemlerinde “CE 48D: Prefabrication in Structural Engineering” isimli seçmeli dersini sunmaktadır.