



Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemlerinin Tanıtılması

Niyazi Özgür BEZGİN

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

ozgur.bezgin@istanbul.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6518-0378

(Alınış/Received: 12.05.2019, Kabul/Accepted: 08.07.2019, Yayımlama/Published: 31.07.2019)

Özet: Demiryolu hatları üzerine tren tekerlekleri ile aktarılan dinamik darbe kuvvetlerinin tahmin edilebilmesi için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi tam ölçekli veya ölçeklendirilmiş deney koşulları altında veya hizmet veren demiryolu hatları üzerinden tren geçişleri esnasında elde edilen veriler ile oluşturulan deneysel ve istatistiki denklemlerin kullanımudur. Yöntemlerden bir diğeri, yüksek nitelikte bilgisayar programları aracılığı ile oluşturulan demiryolu hat modelleri üzerinde, bilgisayarlar aracılığı ile gerçekleştirilen rakamsal irdelemelerin kullanılmasıdır. Demiryolu hatları üzerinde dinamik darbe kuvvetlerinin tahmin edilebilmesi için gereken matematiksel denklemleri içeren analitik yöntemi sağlamak üzere Bezgin Yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntem ile Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemlerin tahmin değerleri ABAQUS® ile üretilen hat modellerinin sonuçları ile yakın sonuçlar vermiştir. Bu yeni yöntem ve yöntem ile geliştirilen denklemler uluslararası demiryolu mühendisliği literatürüne girmiştir. Bu çalışmada, geliştirilen denklemler Türkçe olarak tekrar tanıtılacaklardır.

Anahtar kelimeler: Bezgin Yöntemi, Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemleri, Bezgin Darbe Katsayıları, Dinamik darbe kuvvetleri, ABAQUS®.

Introduction of the Extended Bezgin Equations

Abstract: There are different methods to estimate the dynamic impact forces that are conveyed onto the railway tracks by rolling train wheels. One of these methods involve the estimation of dynamic impact forces via equations developed by scaled or full scale tests or equations based on data collected on operational railway tracks and statistical evaluation of data. One other method involves the use of high performance computer programs to develop models of the railway track and numerical analysis of these models by high performance computers. Bezgin Method, which was developed due to the need to produce an analytical method that can yield simple mathematical equations, resulted in the Extended Bezgin Equations. The dynamic impact force estimations of these equations were found to be successful in estimating dynamic impact wheel forces based on their comparisons with the estimates of advanced finite element models of railway tracks. Both the method and the developed equations were introduced into the international railway literature. This study will reintroduce these equations in Turkish.

Key words: Bezgin Method, Extended Bezgin Equations, Bezgin Impact Factors, Dynamic impact forces, ABAQUS®.

1. Giriş

Hat üst yapısının ve alt yapısının yapısal tasarımı, tren tekerlekleri tarafından hat üzerine aktarılan kuvvet değerlerinin doğruluk ile tahmin edilebilmelerini gerektirir. Tren hareketi ile demiryolu hatları üzerine etki eden düşey tekerlek kuvvetleri, tekerleklerin durağan halde taşıdıkları düşey kuvvet değerlerinin üzerine çıkabilmektedir. Deneysel yöntemler ile elde edilen denklemlerin tahmin değerleri arasında tutarsızlıklar olabileceği gibi bu denklemlerin tam olarak hangi hat koşullarında kullanılabilecekleri de çoğunlukla belirsizdir. Rakamsal yöntemler

Atif için/Cite as: N. Ö, Bezgin, "Kapsamı genişletilmiş bezgin denklemlerinin tanıtılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 10, pp. 1-16, July 2019.

Demiryolu Mühendisliği

ise maliyetli bilgisayar ve program yatırımları gerektirmekte ve tahmin değerine ulaşmak için gereken program işletim süresi günlere yayılabilmektedir.

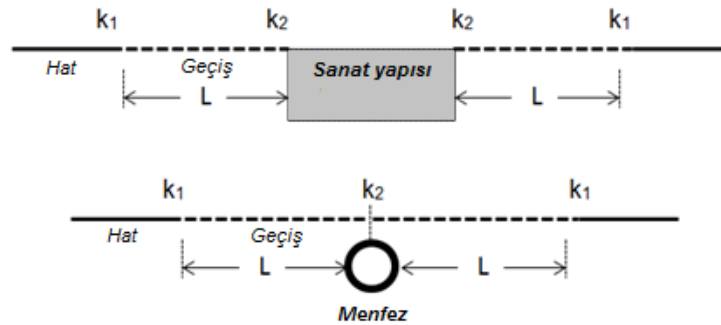
Uluslararası demiryolu mühendisliği kaynaklarında dinamik darbe kuvvetlerinin tahmin edilebilmesi için analitik bir yöntemin bulunmaması nedeniyle Bezgin Yöntemi geliştirilmiştir [1]. Bezgin yöntemi, enerjinin korunumu yasası, kinematik kurallar ve yeni bir kavram olan darbe azaltım katsayısı üzerine kuruludur. Geliştirilen bu yöntem ile elde edilen ve sadece hattın esneklik değerini dikkate alan Bezgin Denklemleri aracılığı ile elde edilen dinamik darbe kuvvetlerinin tahmin değerlerinin, Talbot, Eisenmann, Japon Demiryolları ve Alman Demiryolları tarafından önerilen deneysel ve istatistiki yöntemler ile elde edilen denklemlerin tahmin sonuçları ile uyumlu olduğu ve deneysel denklemlerin aksine, her türlü hat için uygulanabildikleri görülmüştür [1,2]. Uluslararası kongrelerde tanıtılan ve büyük ilgiyle karşılaşılan yöntem en son tren tekerleklerinin ve bojilerinin esneklik değerleri ile ray ve tekerlek arasında mevcut olan Hertz temas esnekliği ile sönümleme değerlerini de içerecek şekilde uygulanması ile Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemleri elde edilmiştir [3]. Bu denklemler hat profilinin arttığı ve azaldığı durumlar ile hat esnekliğinin arttığı ve azaldığı durumlar için dört adet birincil dinamik darbe kuvvet tahmin denklemi ve bir adet ikincil dinamik darbe kuvvet tahmin denkleminde oluşmaktadır.

Bu denklemlerin uygulandığı ve hat esnekliğinin değiştiği kuramsal hat koşulları için ürettiği tahmin değerleri, aynı kuramsal koşullar için İngiliz Network Rail demiryolu hat tasarım ekibinin başında yer alan Dr. Mohamed Wehbi tarafından ABAQUS® kullanarak oluşturulan hat modellerinin rakamsal analizleri ile elde edilen tahmin değerleri ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonunda, Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Yöntemi ile elde edilen denklemlerin tahmin değerlerinin ABAQUS® tarafından hat esnekliğinin değiştiği durumlar için elde edilen değerlerinden en fazla %10 farklı oldukları görülmüştür. Bu bulguların yer aldığı çalışma Ocak 2019'da 98. Transportation Research Board Meeting'de sunulmuş ve ardından da Nisan 2019'da Transportation Research Record'da yayınlanmıştır [3].

Burada sunulan çalışma ile Ocak 2019'da sunulan denklemler Türkçe olarak tanıtılacak ve denklemlerin örnek uygulamaları gösterilecektir.

2. Hat Boyunca Esneklik Değişimi ve Sistem Esnekliği

Bir demiryolu hattı boyunca hat esnekliğinin (stiffness) değişmemesi istenir. Ancak, özellikle hattın sanat yapıları üzerinden geçtiği veya hat boyunca hattın balastlı hat türünden raylı levha (slab track) hat türüne geçiş yaptığı bölgelerde hat esnekliği önemli değişim gösterebilir [4,5]. Şekil 1'de demiryolu hat esnekliğinin değişebileceği bazı durumlar tasvir edilmiştir. Dolgu veya doğal zemin tarafından taşınan bir hat, sanat yapısı üzerinden geçtiğinde veya hattın türü değiştiğinde, hat esnekliği de özel bir önlem alınmadığı takdirde değişebilir.

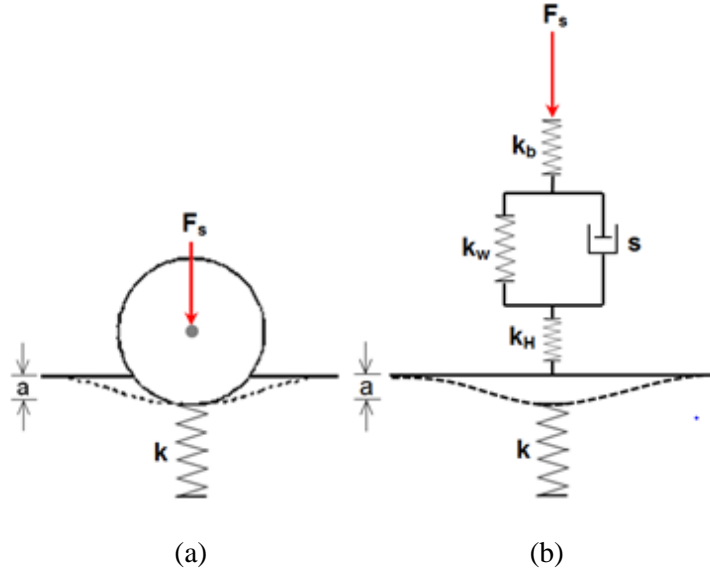


Şekil 1. Hat esnekliğinin hat boyunca değişimi [3].

Demiryolu Mühendisliği

Esneklik, mekanik olarak bir yapının en önemli yapısal değerlerindedir. Bir yapı, üzerine uygulanan etkilere esneklik değerine bağlı olarak tepki verir. Burada verilen yapısal tepki, etki değerleri altında oluşan yapısal esneme değerleridir. Bir demiryolu hattı için hattın tepki değeri, hat üzerine tren tekerlekleri tarafından etki eden düşey basınç kuvvetleri altında hattın sehim değeridir. Bu durumda demiryolu hattının esnekliği ile anlaşılan, tekerlek tarafından ray'a uygulanan düşey kuvvet değerlerinin, o kuvvet değerlerinin uygulandığı noktada ölçülen hat sehim değerlerine bölünmesi ile elde edilen değer veya değerlerdir. Ray başına hat esneklik değerinin uygulamada 40 kN/mm ile 60 kN/mm arasında olmasının yeterli olduğu kabul edilebilir [6]. Doğrusal ve elastik olarak anılan ideal şartlar altında esneklik değeri sabit iken, çoğu zaman uygulamada esneklik değeri sabit olmayıp, uygulanan kuvvet değerleri altında artmaktadır. Ancak demiryolu tasarımcıları, doğrusal ve elastik davranışa yakın davranış sergileyecek bir hat tasarlamak ve inşa etmek üzere çaba gösterirler.

Hareket halinde bir demiryolu aracının hatta aktardığı dinamik darbe kuvvetleri, hattın esnekliğine bağlı olduğu kadar tekerlek ile boji arasında yer alan tekerlek yay esnekliğine de bağlıdır. Özellikle yolcu trenlerinde boji ile araç gövdesi arasında yer alan boji yay esnekliğinin de oluşan bu kuvvetler ve yolcu konforu üzerinde etkisi vardır. Şekil 2' de, tekerlek tarafından durağan halde aktarılan F_s kuvvet değeri altında "a" sehimini yapan hat tasvirleri görülmektedir. Sağdaki şekilde, hat esnekliğine bağlı olarak tekerlek yay esnekliği (k_w), boji yay esnekliği (k_b), tekerlek ve ray arasında mevcut Hertz temasından kaynaklı Hertz temas esnekliği (k_H) ve sönümlenme (s) unsurları görülmektedir. Denklem 1' de ise belirtilen unsurlardan oluşan sistemin eşdeğer esneklik değeri (k_{eq}) ifade edilmektedir.

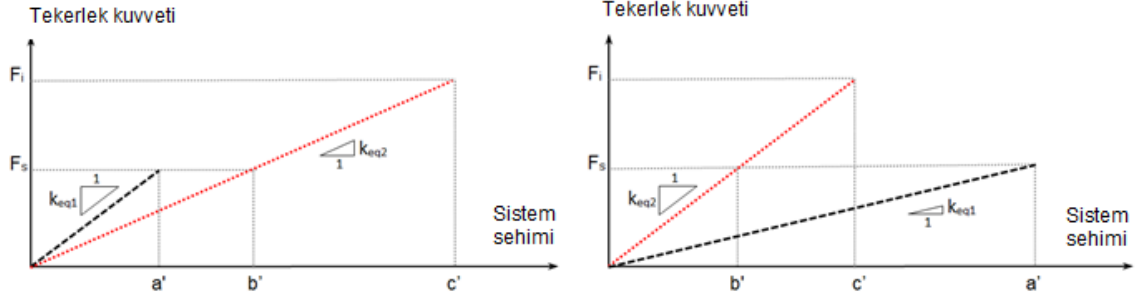


Şekil 2. (a) Sadece hat esnekliğini kapsayan yaklaşım, (b) Sistem esnekliğini kapsayan yaklaşım [3].

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_w} + \frac{1}{k_H} + \frac{1}{k} \quad (1)$$

Şekil 3'de doğrusal ve elastik olarak davranış gösteren hat esneklik değerleri tasvir edilmiştir. Durağan halde hat üzerine F_s kuvvet değerini aktaran tekerlek, dinamik darbe etkisi ürettiği hareketli durumda hat üzerine F_i kuvvet değerini aktarmaktadır.

Demiryolu Mühendisliği

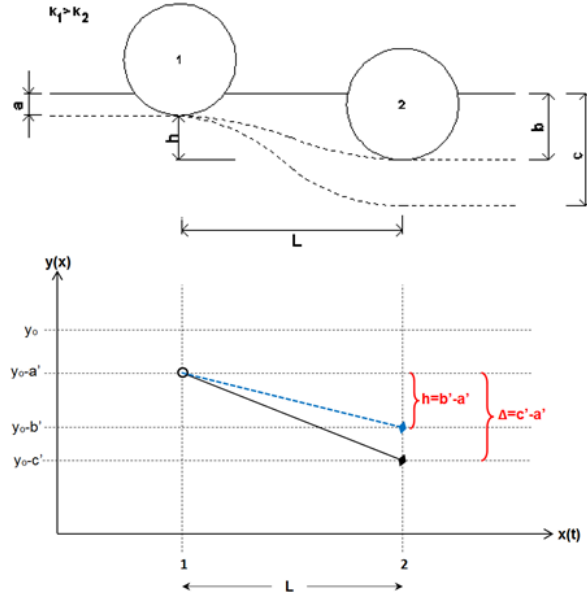


Şekil 3. (a) Yüksek hat esnekliğinden düşük hat esnekliğine geçiş, (b) Düşük hat esnekliğinden yüksek hat esnekliğine geçiş [3].

Takip eden bölümlerde, Bezgin Yöntemi kullanılarak, sistem esnekliğini dikkate alan Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemleri tanıtılacaktır.

3. Azalan Hat Esnekliği ile Oluşan Dinamik Darbe Kuvvetleri

Şekil 4'te üst kısımda yer alan tasvirde, hat esnekliğinin azaldığı yönde hareket eden bir trenin bir tekerleği tasvir edilmektedir. Sol tarafta hat esnekliğinin k_1 olduğu yerde "a" değerinde sehim oluşturan durağan tekerlek kuvveti, sağ tarafta hat esnekliğinin k_2 olduğu yerde "b" değerinde sehim oluşturmaktadır. Bu iki bölge arasında oluşan esneklik değişim oranına ve tren hızına bağlı olarak tekerlek, sağ tarafta "c" değerinde bir dinamik sehim değeri oluşturabilir. Şekil 4'te alt kısımda yer alan tasvirde, tekerlek tarafından taşınan toplam kütle için sistem sehimleri bağlamında potansiyel enerji değişimi görülmektedir. Hat esnekliğindeki değişimden dolayı 1 ve 2 numaralı noktalar arasında tekerleğin durağan halinde Denklem 2'de $E1$ ile ifade edilen potansiyel enerji farkı oluşmaktadır. Tren hızına (v) ve esneklikte meydana gelen değişimin oluşturduğu "h" durağan halde sehim farkına ve bu değişimin gerçekleştiği mesafeye (L) bağlı olarak hattın 2 numaralı noktasında "c" değerinde bir dinamik darbe kuvveti kaynaklı sehim oluşabilir. Belirtilen iki nokta arasında durağan halde gözlenen sehim farkı $h=b-a=b'-a'$ olmaktadır. Bu durumda, 1 ve 2 numaralı noktalar arasında ortaya çıkan potansiyel enerji farkı trenin hareketli durumunda Denklem 3 ile ifade edilen $E2$ potansiyel enerji farkına eşittir.



Şekil 4. Azalan hat esnekliği altında hat sehimlerinin ve tekerlek tarafından taşınan kütle için potansiyel enerji değişiminin tasvirleri [3].

Demiryolu Mühendisliği

$$E1 = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot (b' - a') \quad (2)$$

$$E2 = m \cdot g \cdot \Delta = m \cdot g \cdot (c' - a') \quad (3)$$

Burada temel soru, E2 ile ifade edilen enerjinin ne kadarlık kısmının demiryolu hattına aktarıldığıdır. Tren hızı ve hat esnekliğinin değişim değerlerine bağlı olarak Denklem 4 ile ifade edilen darbe azaltım katsayısı ile ortaya çıkan potansiyel enerji farkının ne kadarlık bir kısmının hatta aktarılabileceği temsil edilebilir [1,7]. Darbe azaltım katsayısı, önceki çalışmalarda detaylarıyla açıklanmıştır.

$$f = 1 - \frac{t_{düşüş}}{t_{geçiş}} = 1 - \frac{\sqrt{2 \cdot h / g}}{L / v} = 1 - \frac{v}{L} \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (4)$$

Sistem sönümlemesini ifade eden “s” değerinin de kullanımı ile Denklem 5’te hatta aktarılan E3 net potansiyel enerji değeri ifade edilmektedir.

$$E3 = E2 - E1 \cdot f - E1 \cdot s = m \cdot g \cdot (c' - a') - m \cdot g \cdot (b' - a') \cdot f - m \cdot g \cdot (b' - a') \cdot s \quad (5)$$

Hat üzerine aktarılan E3 enerjisi, sistemin doğrusal ve elastik olarak Şekil 3a’da tasvir edilen davranışı içerisinde b’ ile c’ arasında sıkışması ile depolanmaktadır. Denklem 6’da, Denklem 5 tarafından ifade edilen E3 enerjisinin sistem esnekliği içerisinde anlık olarak depolanması görülmektedir. Denklem 7 ve Denklem 13 arasında gerçekleştirilen cebirsel çözümleme ile Denklem 14 ile tekerleğin 2 numaralı konumda hat üzerine aktardığı F_i dinamik darbe kuvvet değeri ifade edilmektedir.

$$m \cdot g \cdot (c' - a') - m \cdot g \cdot (b' - a') \cdot f - m \cdot g \cdot (b' - a') \cdot s = \frac{(k_{eq2} \cdot b' + k_{eq2} \cdot c')}{2} \cdot (c' - b') \quad (6)$$

$$2m \cdot g \cdot (c' - a') - 2m \cdot g \cdot (b' - a') \cdot f - 2m \cdot g \cdot (b' - a') \cdot s = \frac{m \cdot g}{b'} \cdot (c'^2 - b'^2) \quad (7)$$

$$2 \cdot b' \cdot c' - 2 \cdot b' \cdot a' - 2 \cdot b'^2 \cdot f + 2 \cdot a' \cdot f \cdot b' - 2 \cdot b'^2 \cdot s + 2 \cdot a' \cdot s \cdot b' = c'^2 - b'^2 \quad (8)$$

$$b'^2 - 2 \cdot b' \cdot a' - 2 \cdot b'^2 \cdot f + 2 \cdot a' \cdot f \cdot b' - 2 \cdot b'^2 \cdot s + 2 \cdot a' \cdot s \cdot b' = c'^2 - 2 \cdot b' \cdot c' \quad (9)$$

$$b'^2 - 2 \cdot b' \cdot a' - 2 \cdot b'^2 \cdot (f + s) + 2 \cdot a' \cdot b' \cdot (f + s) = (c' - b')^2 - b'^2 \quad (10)$$

$$\sqrt{2 \cdot b'^2 \cdot (1 - f - s) - 2 \cdot a' \cdot b' \cdot (1 - f - s)} = c' - b' \quad (11)$$

$$b' + \sqrt{2 \cdot b'^2 \cdot (1 - f - s) - 2 \cdot a' \cdot b' \cdot (1 - f - s)} = c' \quad (12)$$

$$b' \cdot \left[1 + \sqrt{2 \left[1 - f - s + \frac{a'}{b'} \cdot (f + s - 1) \right]} \right] = c' \quad (13)$$

$$F_i = k_{eq2} \cdot c' = F_s \left[1 + \sqrt{2 \left[(1 - f - s) \left(1 - \frac{a'}{b'} \right) \right]} \right] \quad (14)$$

Denklem 15’te, “ K'_{B1} : Azalan Hat Esnekliği İçin Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemi” sunulmaktadır. Bu denklem ile elde edilen katsayıların durağan tekerlek kuvveti ile çarpılması ile tasvir edilen durumda ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet değerleri bulunmaktadır.

$$K'_{B1} = 1 + \sqrt{2 \left[(1 - f - s) \left(1 - \frac{a'}{b'} \right) \right]}, \text{ burada } a' \leq b' \quad (15)$$

4. Artan Hat Esnekliği ile Oluşan Dinamik Darbe Kuvvetleri

Şekil 5’te üst kısımda yer alan tasvirde, hat esnekliğinin arttığı yönde hareket eden bir trenin bir tekerleği tasvir edilmektedir. Alt kısımda ise tekerleğin taşıdığı toplam kütle için potansiyel enerji değişimi görülmektedir. Denklem 16 ve 17, artan hat esneklik koşulu için E1 ve E2 değerlerini, Denklem 18 ise hatta aktarılan E3 değerini sunmaktadır.

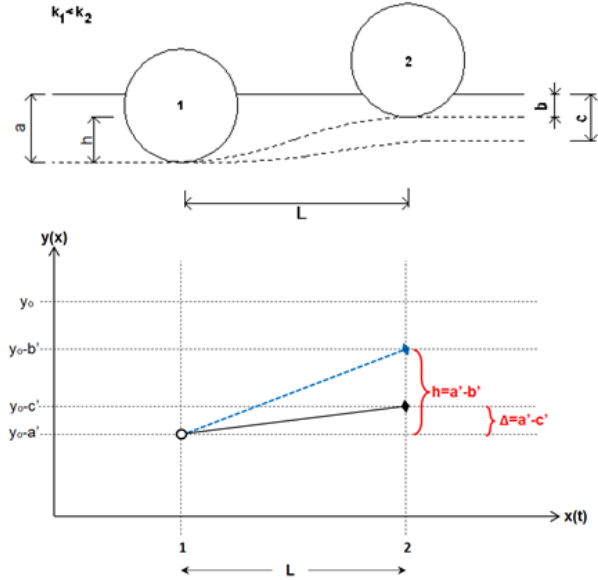
$$E1 = m. g. h = m. g. (a' - b') \quad (16)$$

$$E2 = m. g. (a' - c') \quad (17)$$

$$E3 = E2 - E1. f - E_1. s = m. g. (a' - c') - m. g. (a' - b'). f - m. g. (a' - b') \quad (18)$$

Hat üzerine aktarılan E3 enerjisi, sistemin doğrusal ve elastik olarak Şekil 3b’de tasvir edilen davranışı içerisinde b’ ile c’ arasında sıkışması ile Denklem 19’da sunulduğu gibi geçici olarak depolanmaktadır.

$$m. g. (a' - c') - m. g. (a' - b'). f - m. g. (a' - b'). s = \frac{(k_{eq2}.b' + k_{eq2}.c')}{2}. (c' - b') \quad (19)$$



Şekil 5. Artan hat esnekliği altında hat sehimlerinin ve tekerlek tarafından taşınan kütle için potansiyel enerji değişiminin tasvirleri [3].

Önceki bölümde sunulan cebirsel sadeleştirmeye benzer bir şekilde Denklem 19’un sadeleştirilmesi ile artan hat esnekliği durumu ile ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet değeri Denklem 20’de sunulmaktadır.

$$F_i = k_{eq2}.c' = F_s. \left[\sqrt{2 \left[1 + f + s + \frac{a'}{b'}. (1 - f - s) \right]} - 1 \right] \quad (20)$$

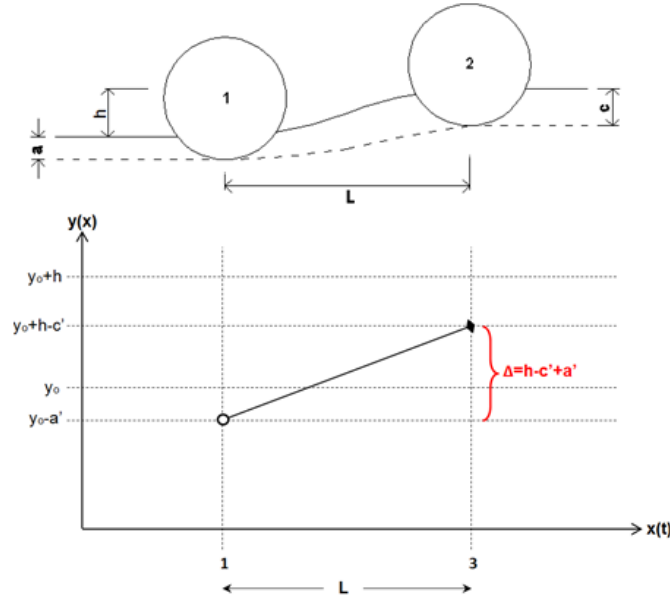
Denklem 21’de, “K’_{B2}: Artan Hat Esnekliği İçin Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemi” sunulmaktadır. Bu denklem ile elde edilen katsayıların durağan tekerlek kuvveti ile çarpılması ile tasvir edilen durumda ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet değerleri bulunmaktadır.

Demiryolu Mühendisliği

$$K'_{B2} = \sqrt{2 \left[1 + f + s + \frac{a'}{b'} \cdot (1 - f - s) \right]} - 1, \text{ burada } a' \geq b' \quad (21)$$

5. Artan Hat Profil Değişimi ile Oluşan Dinamik Darbe Kuvvetleri

Şekil 6'da üst kısımda yer alan tasvirde, hat profilin arttığı yönde hareket eden bir trenin bir tekerleği tasvir edilmektedir. Alt kısımda ise tekerleğin taşıdığı toplam kütle için potansiyel enerji değişimi görülmektedir. Denklem 22'de tekerleğin taşıdığı kütle için değişen potansiyel enerjisinin, hat üzerine aktarılan ve hat tarafından anlık olarak depolanan kısmı ifade edilmektedir. Denklem 23 ve 28 arasında gerçekleştirilen cebirsel sadeleştirme ardından Denklem 29'da F_i dinamik darbe kuvvet eşitliği elde edilmektedir. Denklem 30'da "K'_{B,a}: Artan Hat Profili İçin Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemi" sunulmaktadır.



Şekil 6. Artan hat profili altında hat sehimlerinin ve tekerlek tarafından taşınan kütle için potansiyel enerji değişiminin tasvirleri [3].

$$m \cdot g \cdot (h - c' + a') - m \cdot g \cdot h \cdot f - m \cdot g \cdot h \cdot s = \frac{1}{2} k_{eq} (a' + c') (c' - a') \quad (22)$$

$$h - c' + a' - h \cdot f - h \cdot s = \frac{1}{2} \frac{(a' + c')(c' - a')}{a'} \quad (23)$$

$$2 \cdot a' \cdot h - 2 \cdot a' \cdot c' + 2 \cdot a'^2 - 2 \cdot a' \cdot h \cdot f - 2 \cdot a' \cdot h \cdot s = c'^2 - a'^2 \quad (24)$$

$$3a'^2 + 2 \cdot a' \cdot h \cdot (1 - f - s) = c'^2 + 2 \cdot a' \cdot c' \quad (25)$$

$$3a'^2 + 2 \cdot a' \cdot h \cdot (1 - f - s) = (c' + a')^2 - a'^2 \quad (26)$$

$$\sqrt{4a'^2 + 2 \cdot a' \cdot h \cdot (1 - f - s)} = c' + a' \quad (27)$$

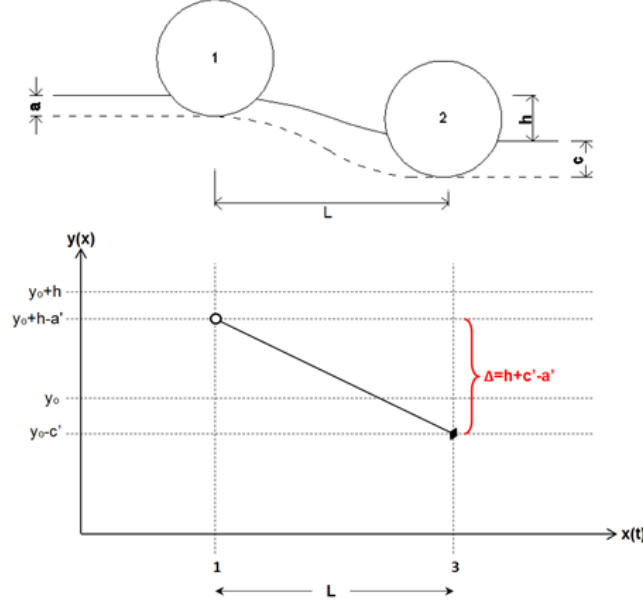
$$a' \left[2 \sqrt{\frac{h}{2a'} \cdot (1 - f - s)} + 1 - 1 \right] = c' \quad (28)$$

$$F_i = k_{eq} \cdot c' = k_{eq} \cdot a' \left[2 \sqrt{\frac{h}{2a'} \cdot (1 - f - s)} + 1 - 1 \right] = F_s \left[2 \sqrt{\frac{h}{2a'} \cdot (1 - f - s)} + 1 - 1 \right] \quad (29)$$

$$K'_{B,a} = 2 \sqrt{\frac{h}{2a'} \cdot (1 - f - s)} + 1 - 1 \quad (30)$$

6. Alçalan Hat Profil Değişimi ile Oluşan Dinamik Darbe Kuvvetleri

Şekil 7’de üst kısımda yer alan tasvirde, hat profilin alçaldığı yönde hareket eden bir trenin bir tekerleği tasvir edilmektedir. Alt kısımda ise tekerleğin taşıdığı toplam kütle için potansiyel enerji değişimi görülmektedir. Denklem 31, hat üst yapısına aktarılan ve üst yapı tarafından anlık olarak depolanan net potansiyel enerji değerini göstermektedir. Bu denklemin cebirsel sadeleştirilmesi ile ortaya çıkan F_i dinamik darbe kuvveti Denklem 32 ile ifade edilmektedir.



Şekil 7. Alçalan hat profili altında hat sehmlerinin ve tekerlek tarafından taşınan kütle için potansiyel enerji değişiminin tasvirleri [3].

$$m \cdot g \cdot (h + c' - a') - m \cdot g \cdot h \cdot f - m \cdot g \cdot h \cdot s = \frac{1}{2} k_{eq} (a' + c') (c' - a') \quad (31)$$

$$F_i = k \cdot c' = k_{eq} \cdot a' \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{2h}{a'} (1 - f - s)} \right] = F_s \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{2h}{a'} (1 - f - s)} \right] \quad (32)$$

Denklem 33’ de “ $K'_{B,d}$: Azalan Hat Profili İçin Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemi” sunulmaktadır.

$$K'_{B,d} = 1 + \sqrt{\frac{2h}{a'} (1 - f - s)} \quad (33)$$

7. İkincil Dinamik Darbe Kuvveti

Hat profilinde veya hat esnekliğinde meydana gelen değişimler nedeniyle hat üzerine etki eden dinamik darbe kuvvetlerinin tahmini için geliştirilen denklemler, tekerlek tarafından taşınan kütle için potansiyel enerjisinin değişimi ve bu değişimin gerçekleşme hızına bağlı olarak ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetlerini temsil etmektedir. Bu kuvvet değerlerine ek olarak, artan hat profili ve/veya artan hat esnekliği içeren durumlarda tekerlek ve dolayısı ile taşıdığı kütle düşey yönde ivmelenerek yukarı doğru hız kazanmaktadır. Profil artışının sonlanması ve/veya yüksek hat esnekliği içeren bölgeye geçişin tamamlanması ile bu yukarı doğru hız artışı sonlanmakta ve tekerlek bu sefer aşağı yönde hızlanarak hat üzerine çarpmaktadır. Bir başka deyişle ikincil

Demiryolu Mühendisliği

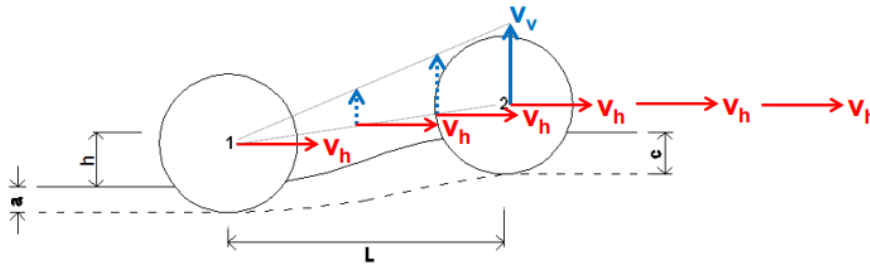
darbe, tekerleğin yukarı yönde ivme kazanması ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 8, artan hat profili ile düşey yönde yukarı doğru hız kazanan (v_v) bir tekerleği tasvir etmektedir. Tırmanışın tamamlanması ile tekerlek, düşey yönde kazandığı v_v hızı ile tekrar hat üzerine çarpmaktadır.

Denklem 34, h_a ile temsil edilen artan yükseklik ile ulaşılan düşey hızı temsil etmektedir. Burada h_a , “h” değerinde bir yükselen profil farkına, artan hat esnekliği nedeniyle oluşan $h=a-b$ değerine veya her iki durumun da olması durumunda bu iki değer toplamına ($h_a=h+a-b$) eşittir. Denklem 34 içinde yer alan “t”, trenin, Şekil 8’de belirtilen hattın “L” mesafesini katetmesi için gereken süreyi ($t=L/v$) temsil etmektedir. Sabit ivme ile hız artışının ifadesi olan Denklem 34’ü kullanarak, ikincil darbe kuvvet etkisini oluşturan a_v değerini Denklem 35 ile elde etmek mümkündür. Burada a_v , tekerlek üzerinde her an etkin durumda olan “g” yerçekimi ivme değerine eklenmektedir. Denklem 36 ile sunulan K_j , ikinci dinamik darbe kuvvet katsayısını belirtmektedir. Bu durumda artan yönde profil değişiminin veya artan yönde hat esneklik değişiminin olduğu durumlarda oluşan toplam dinamik darbe kuvvet katsayılarını bulabilmek için K_j katsayıları, $K'_{B,a}$ ve K'_{B2} katsayılarına eklenmelidir.

$$h_a = \frac{v_v \cdot t}{2} = \frac{a_v \cdot t^2}{2} = \frac{a_v \cdot \left(\frac{L}{v}\right)^2}{2} \quad (34)$$

$$a_v = 2h_a \cdot \left(\frac{v}{L}\right)^2 \quad (35)$$

$$K_j = \frac{a_v}{g} \quad (36)$$



Şekil 8. Artan hat profili ile ortaya çıkan düşey tekerlek hızı.

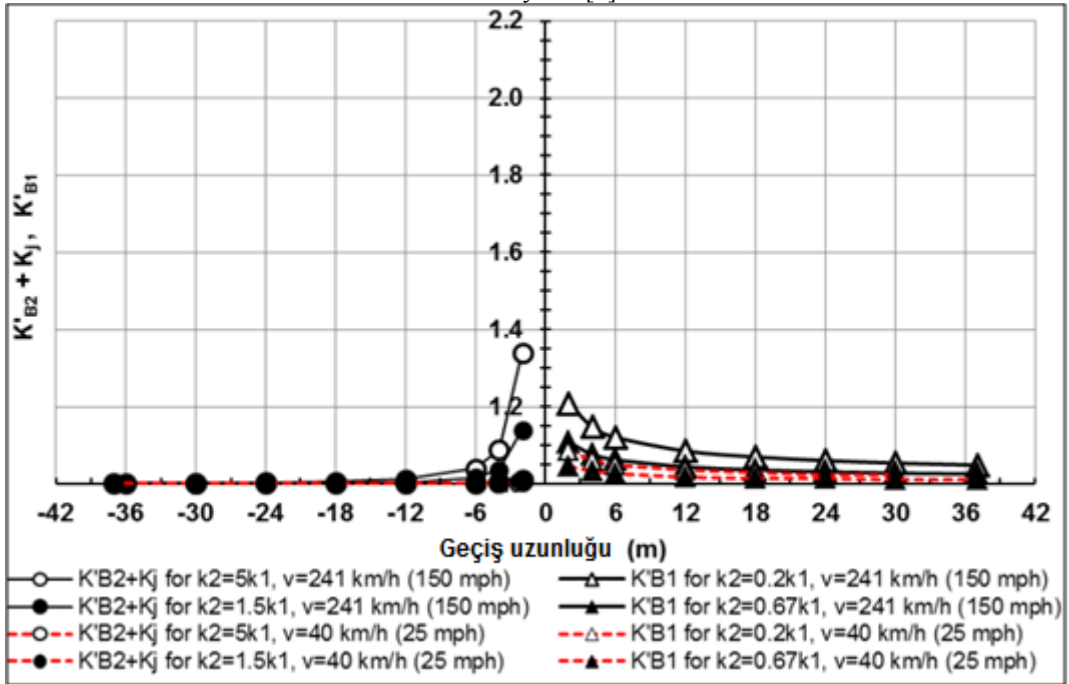
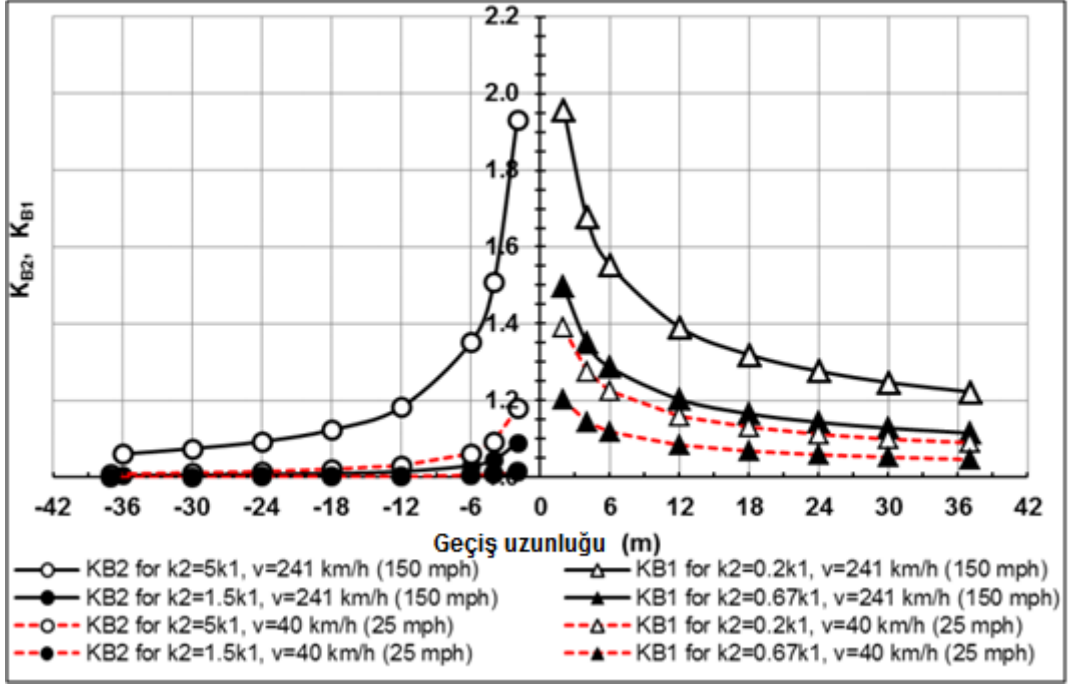
8. Örnek Uygulama

Bu bölümde, $k_1=50$ kN/mm esneklik değerine sahip bir hat üzerinde, tekerlek yay esneklik değeri $k_w=3.6$ kN/mm, boji yay esneklik değeri $k_b=8.1$ kN/mm ve Hertz temas esneklik değeri $k_H=1600$ kN/mm olan bir trenin, durağan halde $F_s=90$ kN kuvvet taşıyan tekerleğin hat üzerine aktardığı dinamik darbe kuvvet değerlerini tahmin etmek üzere bulunan katsayıları sunulmaktadır. Hat esnekliğinin değiştiği durumda k_1 değeri, sanat yapısı üzerinde en fazla 5 kat artmakta, sanat yapısından tekrar hat üzerine geçişte 1/5 değerine inmektedir. Trenin hızı ise en düşük 40 km/saat en yüksek 241 km/saat olarak kabul edilmiştir. Hat profilinin değişimi ise en düşük 2.5 mm en yüksek 12.5 mm olmaktadır. Belirtilen hat esnekliği ve profil değişimlerinin gerçekleştiği geçiş uzunlukları ise sanat yapısına 2 m mesafeden 37 m mesafeye kadar değişmektedir [3].

Hat esnekliğindeki değişimlerden kaynaklı dinamik darbe kuvvet katsayıları Şekil 9 ve Şekil 10’da sunulmuştur. Şekil 9’da, sadece hat esnekliğini dikkate alan K_{B2} ve K_{B1} sunulmaktadır. Şekil 10’da ise sistem esnekliğini ve ikincil darbe etkisini dikkate alan $K'_{B2}+K_j$ ve K'_{B1} sunulmaktadır. Şekil 9 ve 10’un kıyaslanması ile varılan önemli bir sonuç, tekerlek ve boji esneklik değerlerinin, meydana gelen dinamik darbe kuvvetlerinin sınırlandırılmasında çok önemli bir görev üstlendikleridir. Bu nedenle özellikle tekerlek süspansiyonunun düzgün

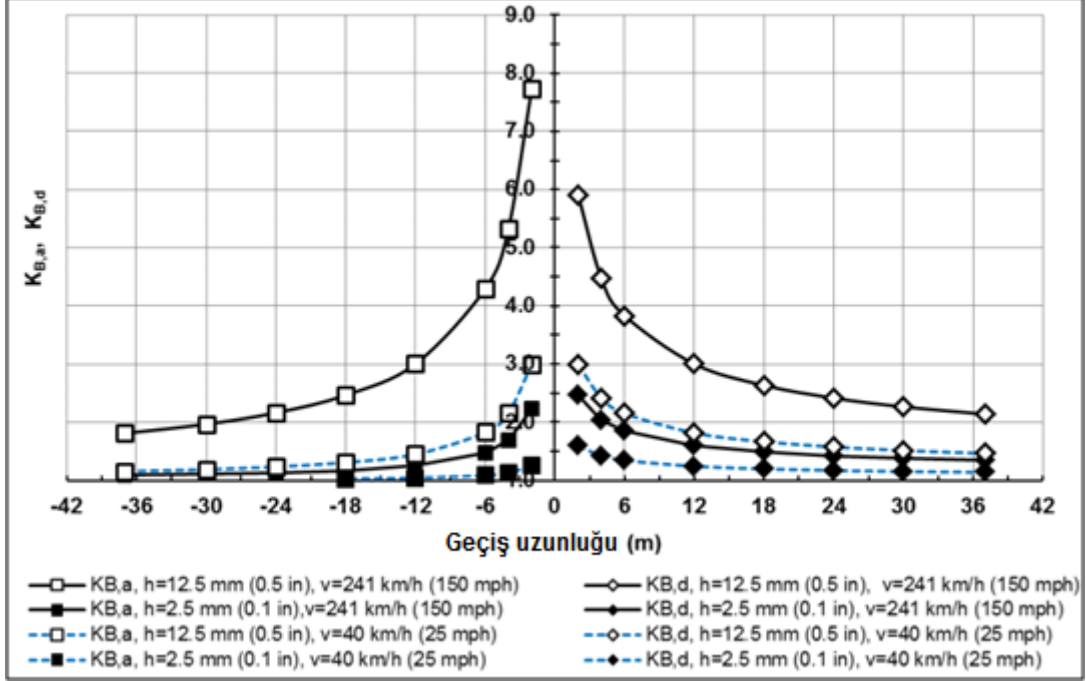
Demiryolu Mühendisliği

işlerliği çok önemlidir. Yüksek hızlı tren hatları için, hat esnekliğinin değişim gösterebileceği bir sanat yapısı veya menfez yaklaşımının 12 metrelik kısmının veya bir başka deyişle 60 cm aralıklarla yerleşik 20 travers içeren kısmının, ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Şekil 10'da, esneklik değişiminin gerçekleştiği geçiş uzunluğunun en az 12 m olması durumunda ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet katsayısının en fazla 1.1 olduğu görülmektedir.

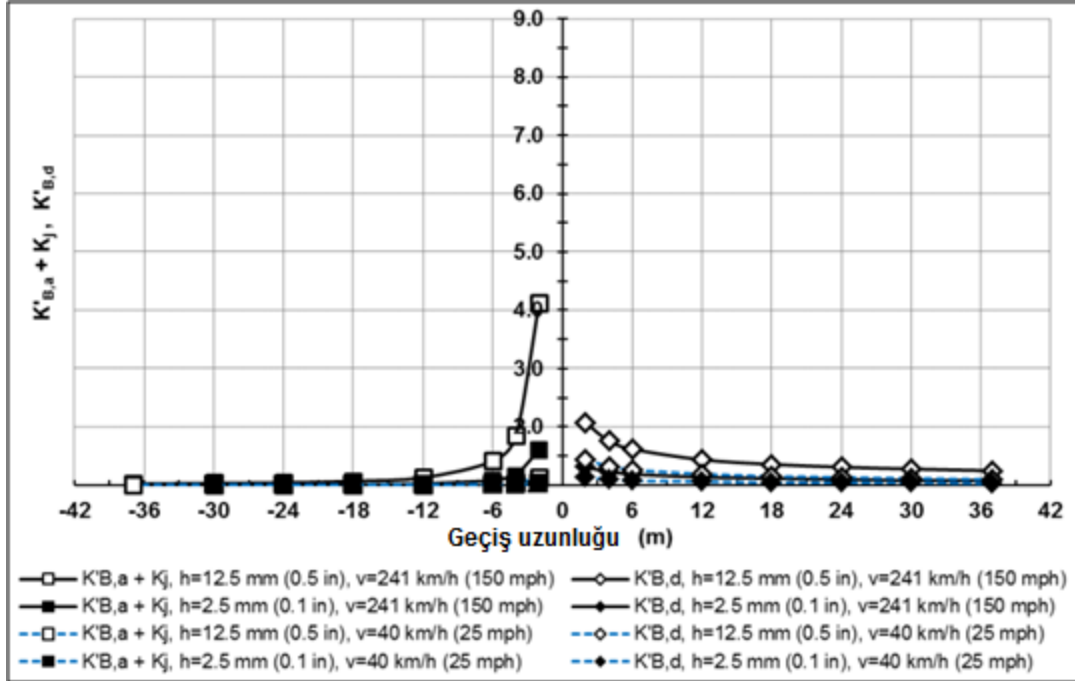


Demiryolu Mühendisliği

Hat profilindeki değişimlerden kaynaklı dinamik darbe kuvvet katsayıları Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulmuştur. Şekil 11'de, sadece hat esnekliğini dikkate alan $K_{B,a}$ ve $K_{B,d}$ sunulmaktadır. Şekil 10'da ise sistem esnekliğini ve ikincil darbe etkisini dikkate alan $K'_{B,a}+K_j$ ve $K'_{B,d}$ sunulmaktadır.



Şekil 11. Değişen hat profili koşullarında Bezin Denklemleri ile bulunan dinamik darbe kuvvet katsayıları [3].



Şekil 12. Değişen hat profili koşullarında Kapsamı Genişletilmiş Bezin Denklemleri ile bulunan dinamik darbe kuvvet katsayıları [3].

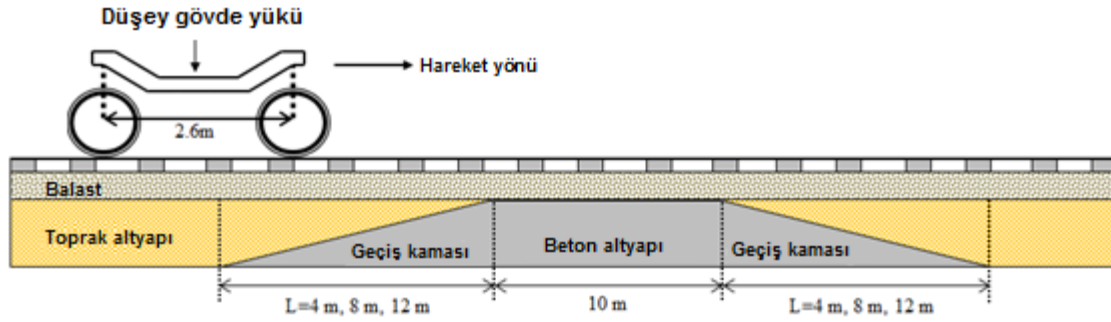
Demiryolu Mühendisliği

Hat profilinde meydana gelen değişimlerden kaynaklı dinamik darbe kuvvetlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Tekerlek ve boji süspansiyonlarının, kırılma veya diğer nedenlerle işlevsiz kalması durumunda özellikle yüksek hızlarda ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet değerinin çok yüksek olması, hat bakımı kadar, tekerlek ve boji aksamalarının bakımlarının da çok önemli olduğunu göstermektedir.

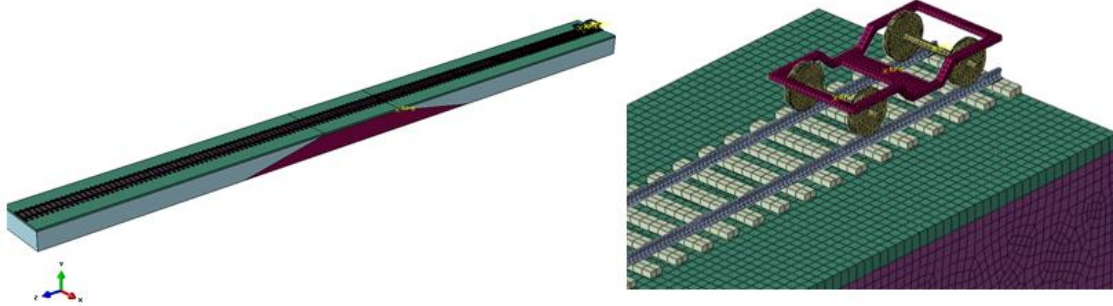
9. Bezgin Yöntemi ile dinamik darbe kuvvet değerleri için elde edilen tahmin değerlerinin nümerik analiz ile elde edilen tahmin değerleri ile kıyaslanması

Bu bölümde, Dr. Mohamed Wehbi tarafından oluşturulan rakamsal modeller üzerinden elden edilen tahmin değerleri ile Bezgin Yöntemi ile elde edilen tahmin değerleri kıyaslanacaktır. Kurgulanan rakamsal modeller ABAQUS® Explicit ile gerçekleştirilmiş olup ilgili kurumun hat geçiş bölgelerinin incelenmesinde başvurduğu temel yöntemi oluşturmaktadır. Modelin kurgulanma süreci yaklaşık 2 hafta olup, 16 çekirdekli bir bilgisayarda çalıştırılması ve sonuç vermesi ise 1 gün sürmektedir.

Şekil 13'te kurgulanan hat geçiş bölgesinin eskizi sunulmaktadır. Şekil 14'te ise kurgulanan hat ve hat üzerinde hareket eden boji modelleri görülmektedir. Burada, zemin üzerinde yerleşik balastlı bir hat, beton bir kaide üzerine geçiş yapmakta ve ardından tekrar zemin üzerine geçiş yapmaktadır.



Şekil 13. Network Rail tarafından kurgulanan model eskizi [3].

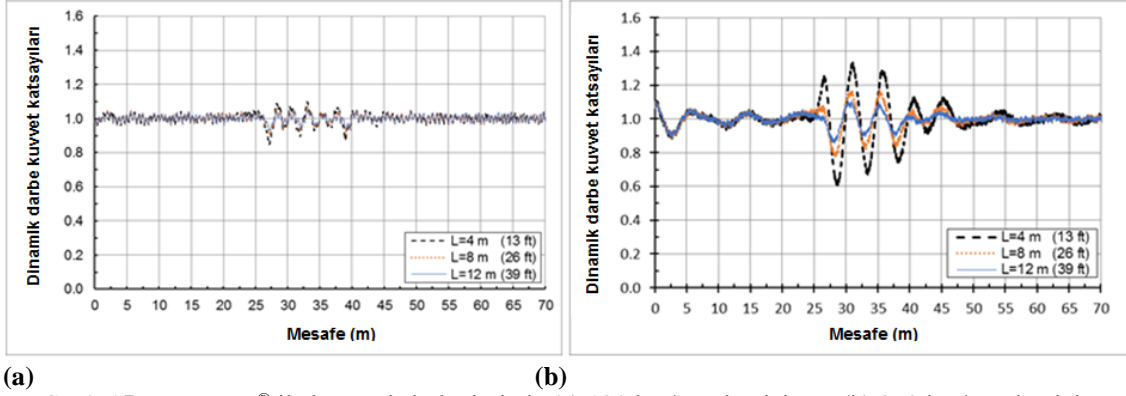


Şekil 14. Network Rail tarafından ABAQUS® ile kurgulanan hat geçiş bölgesi ve araç modeli [3].

Kurgulanan model için gerek değişken değerler ilgili kaynakta yer almaktadır [3]. Hat esnekliği toprak zemin üzerinde $k_1=30$ kN/mm değerinden beton zemin üzerinde $k_2=180$ kN/mm değerine çıkmaktadır. Eşdeğer sistem esnekliği ise $k_w=1.85$ kN/mm olan birincil süspansiyon esnekliği ile azalmakta ve toprak zemin üzerindeki bölgede $k_{eq1}=1.71$ kN/mm değerinden beton zemin üzerinde $k_{eq2}=1.83$ kN/mm değerine çıkmaktadır. Birincil süspansiyonun amacı, sistem esnekliğini azaltarak ortaya çıkan ve boji ile hat üzerine etki eden dinamik darbe kuvvet değerlerini azalmaktır.

Demiryolu Mühendisliği

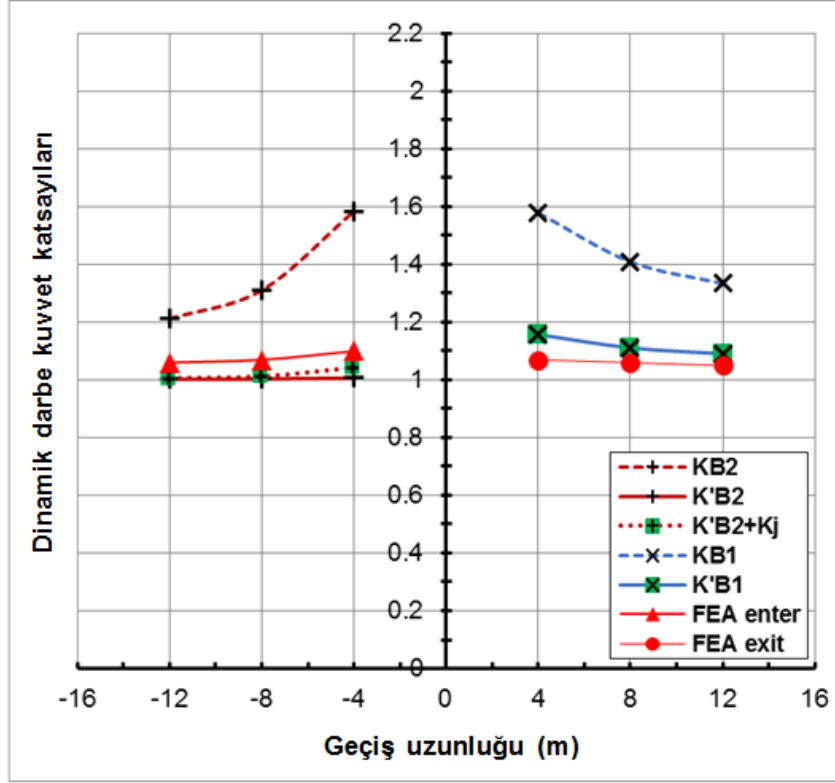
Şekil 15a ve 15b’de, sırasıyla 120 km/saat ve 250 km/saat hızlar ile kurgulanan model üzerinde hareket eden bojinin, beton zemine geçişte ve çıkışta hat üzerinde oluşturduğu dinamik darbe kuvvet katsayı değerleri görülmektedir. Yükselen hız değeri ile dinamik darbe yük katsayı değerlerinin arttığı görülmektedir.



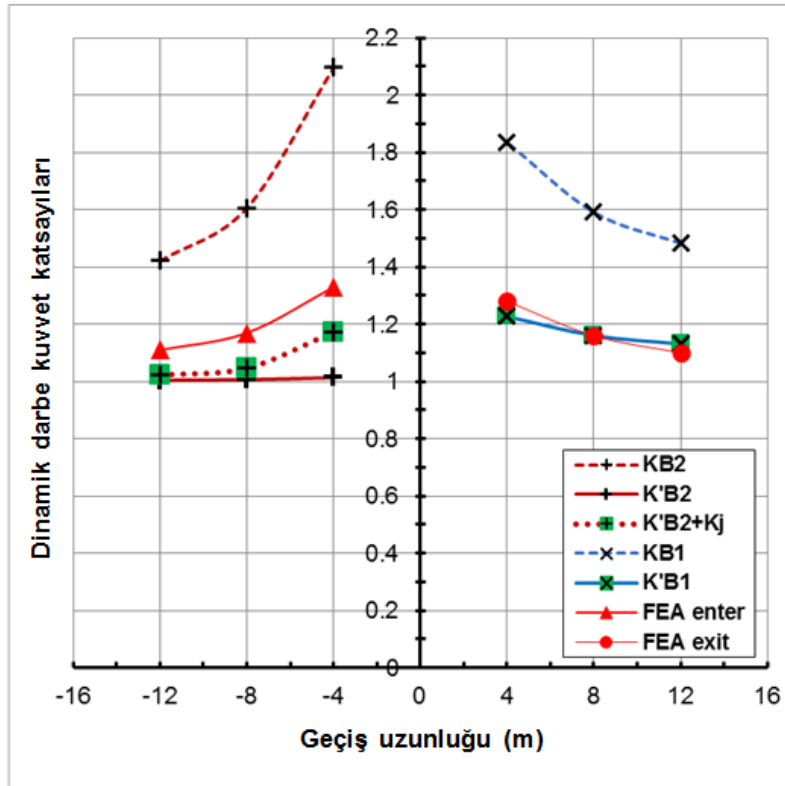
(a) (b)
Şekil 15. ABAQUS® ile hat geçiş bölgelerinde (a) 120 km/saat hız için ve (b) 250 km/saat hız için oluşacağı tahmin edilen dinamik darbe kuvvet katsayıları [3].

Şekil 16 ve 17’de, sırasıyla 120 km/saat ve 250 km/saat hız değerleri için sonlu elemanlar ile kurgulanan modeller üzerinden rakamsal yöntem kullanan ABAQUS®Explicit tahmin değerleri ile analitik yöntem olan Bezgin Yöntemi ile elde edilen denklemlerin tahmin değerleri kıyaslanmıştır. FEA_{ENTER} ve FEA_{EXIT} ile temsil edilen değerler, rakamsal yöntem ile elde edilen katsayılarıdır. K_{B2} ve K_{B1} ile bulunan katsayılar, sadece hat esneklik değerini dikkate aldıkları için yüksek olmaktadır. Ancak Artan ve Azalan Hat Esneklikleri için Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemleri’ni temsil eden $K'_{B2}+K_j$ ve K'_{B1} katsayıları, sistem esnekliğini dikkat almakta ve aynı zamanda giriş bölgesinde oluşan ikincil darbe etkisini de dahil etmektedir (K_j). Sistem esnekliğinin dahil edildiği durumlarda rakamsal ve analitik yöntemler ile hat üzerine etki eden dinamik darbe kuvvet katsayı tahmin değerlerinin birbirine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Şekil 16’da, 120 km/saat hız için Bezgin yöntemi ile elde edilen tahmin değerleri, rakamsal yöntem ile giriş bölgesinde rakamsal yöntem ile elde edilen tahmin değerlerinin %5 kadar aşağısında kaldığı görülürken çıkış bölgesinde %5 kadar yukarısında kalmaktadır. Şekil 17’de, 250 km/saat hız için tahmin değerleri giriş bölgesinde rakamsal yöntemin %10’u kadar aşağıda, çıkış bölgesinde ise rakamsal değerlere çok yakın sonuçlar vermektedir.

Demiryolu Mühendisliği



Şekil 16. 120 km/saat hız ile oluşan dinamik darbe kuvvet katsayılarının kıyaslanması [3].



Şekil 17. 250 km/saat hız ile oluşan dinamik darbe kuvvet katsayılarının kıyaslanması [3].

10. Sonuçlar ve Süren Çalışmalar

Önerilen denklemler, mekanik ve geometrik girdi değeri olarak sadece hattın ve demiryolu aracının ilgili esneklik değerleri (k) ile hat esnekliğinin veya hat profilinin değiştiği mesafe (L) ile bu mesafe içerisinde değişen profil değişimi (h) veya hat esneklik değişiminden kaynaklanan durağan halde hat sehim değerlerini (a ve b) içermektedir. Bu değerlere ek olarak tren hızının (v) denklemler içinde kullanılması ile dinamik darbe kuvvet katsayıları kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Önerilen denklemler incelendiğinde, hat ve sistem esnekliğinin, oluşan dinamik kuvvetler üzerindeki etkileri h/a ve a/b oranları ile açıkça temsil edilmektedir.

Bezgin Yönteminin uygulanması ile elde edilen Kapsamı Genişletilmiş Bezgin Denklemlerinin kullanılması ile demiryolu hatları üzerine etki eden dinamik darbe kuvvet değerlerinin kolay el hesabı ile tahmin edilebilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen yöntemin bu çalışmada sunulamayan detayları için ilgili çalışma incelenmelidir [3]. Değişken hat esnekliği ile ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet katsayılarının tahmini için önerilen denklemlerin tahmin sonuçlarının, üst düzey bir sonlu elemanlar ile analiz programı olan ABAQUS®'un tahmin sonuçları ile kıyaslanması ile denklemlerin tahminlerinin, ABAQUS® tahminlerine bu tahminlerin %10' u içerisinde yaklaştığı görülmüştür [3]. Kağıt ve kalem kullanarak bir dakika içinde gerçekleştirebilen hesaplar ile elde edilen sonuçların, model kurgulama süreci birkaç haftayı bulabilen ve analiz süreci bir günü bulabilen bir programın sonuçlarına bu kadar yaklaşması demiryolu mühendisleri için önemli bir kazanımdır.

Burada ek olarak vurgulanması gereken önemli bir konu, Şekil 15'de de görüldüğü gibi, rakamsal yöntem ile hat üzerinde, boji henüz geçiş bölgesine varmadan titreşimlerin oluştuğudur. Rakamsal yöntem ile traversler arasında ray sehim etkileri de dikkate alınmakta ve hat üzerinde 1.05-1.10 mertebesinde, statik kuvvet değerinin yaklaşık %5-%10 üstünde bir dinamik darbe kuvveti oluşmakta ve geçiş bölgesi üzerinde oluşan dinamik darbe kuvvetine eklenmektedir. Oysa ki Bezgin Yöntemi, sadece geçiş bölgesinde oluşan dinamik darbe kuvvet değerini tahmin etmektedir. Bu nedenle, rakamsal yöntem ile analitik yöntem arasında tam bir karşılaştırma yapabilmek için geçiş bölgesi öncesinde ki bu titreşimin, geçiş bölgesi üzerinde oluşan titreşimden çıkarılması gerekir. Ancak, rakamsal analiz sonuçlarına herhangi bir müdahalede bulunmamak adına bu yapılmamıştır ve rakamsal analiz tahmin değerleri, analitik tahmin değerleri ile doğrudan kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada tanıtılan denklemlerin kullanımına dair detaylar ve bu denklemler üzerine inşa edilerek yazar tarafından geliştirilen ALLTRACK® v1 uygulamasının detaylı tanıtımı bir başka çalışmada ele alınacaktır. Hat ve araç esneklik değerleri ile hat ve tekerlek düzensizliğine dair verilerin girilmesi ile oluşan dinamik darbe kuvvet değerlerini veren bu uygulamanın demiryolu mühendislerine yararlı olacağı düşünülmektedir [8].

Kaynakça

- [1] Bezgin, N.Ö., *Development of a new and an explicit analytical equation that estimates the vertical impact loads of a moving train*. Procedia Engineering, Volume 189, May 2017, Pages 2-10.
- [2] 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, Croatia, 17-19 May 2018, pp.837-845
- [3] Bezgin, N.Ö., Wehbi, M. *Advancement and Application of the Bezgin Method to Estimate the Effects of Stiffness Variations Along Railways on Wheel Forces*. Transportation Research Record. Basım aşamasında. Online 3 Nisan, 2019. <https://doi.org/10.1177/0361198119836973>

- [4] Wang, H., Markine, V.L., Shevstov, I.Y., Dollevoet, R. *Analysis of the dynamic behaviour of a railway track in transition zones with differential settlement*. Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference. JRC2015-5735. 2015
- [5] Dahlberg, T. *Railway track stiffness variations – Consequences and countermeasures*. International Journal of Civil Engineering. Vol 8, No 1, 2010
- [6] Raymond, G.P. *Analysis of Track Support and Determination of Track Modulus*. Transportation Research Record, Issue 1022. 1985.
- [7] Bezgin, N.Ö. *Hat Profilinde Meydana Gelen Değişimler Nedeniyle Oluşan Dinamik Darbe Kuvvetlerinin Tahmini için Geliştirilen Yeni bir Yöntemin Uygulaması*. Demiryolu Mühendisliği / 8 (June 2018): 40-51.
- [8] Bezgin, N.Ö. ALLTRACK V1 January 2, 2019. Researchgate. DOI: 10.13140/RG.2.2.32548.94083

Özgeçmiş



Niyazi Özgür BEZGİN

1977 yılında Ankara’da doğdu. Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği’nde başladığı eğitime, 1999 senesinde New York’ta bulunan Polytechnic University, Brooklyn İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde devam ederek 2001 yılında mezun oldu. Yapı ve zemin mekaniği konularında, Rutgers, the State University of New Jersey İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde 2002’de Yüksek Lisans ve 2005’de Doktora çalışmalarını tamamladı ve 7 yıl yapısal tasarım ve geoteknik mühendisliği konularında özel sektörde çalıştı.