

# YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU KÖPRÜLERİNDE REZONANS OLAYI

Zübeyde Öztürk \*, Turgut Öztürk\*\*, Veysel Arlı \*\*\*

\* İTÜ İnşaat Fak., Ulaştırma Anabilim Dalı, İstanbul

\*\* İTÜ İnşaat Fak., Yapı Anabilim Dalı, İstanbul

\*\*\* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

## ÖZET

Demiryollarında artan ulaşım talebine paralel olarak işletme hızları ve taşınan yükler de artmaktadır. Bir çok Avrupa Ülkesinde yolcu taşımacılığında maksimum hızlar 250-300 km/saat'e ulaşmış ve yük taşımacılığında aks yükleri 22,5 tona çıkmıştır. Hızın ve trafik yüklerinin artması bazı sorunların yanısıra titreşim ve gürültü sorununa da neden olmaktadır. Potansiyel ve kinetik enerji içeren tüm sistemler dinamik yüklerle tahrik edilmesi halinde titreşim hareketi yaparlar. Demiryolu üstyapısında da, ray ile tekerlek arasındaki temas sırasında bir çok düzensizlik ve pürüzlülükten dolayı dinamik yükler ve titreşim hareketi ortaya çıkar. Titreşimler her üç ekseninde hem taşıta hem de üstyapıya iletilir. Üstyapıya gelen titreşimler ray boyunca iletilir veya travers ve balast aracılığıyla zemine iletilir.

Ray ile tekerlek arasındaki dinamik ilişkiden dolayı ortaya çıkan titreşim frekansları demiryolu sisteminin öz frekanslarına yaklaştıkça dinamik yükler ve deformasyonlar da artmaktadır. Taşıtın tahrik frekanslarından biri veya birkaçı demiryolu sisteminin doğal frekanslarına eşit olduğu zaman "rezonans" olmakta ve bu durumda hem taşıtı hem de yolu ciddi ölçüde deforme eden dinamik yükler oluşmaktadır. Bu nedenle, istenmeyen dinamik problemlerin oluşmaması için, taşıt ve yol elemanlarının dinamik karakteristikleri çok iyi tanımlanmalı ve demiryolunun tasarım aşamasında statik analiz ile birlikte dinamik analiz de yapılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek hızlı demiryolu, köprü, rezonans

## ABSTRACT

In this paper, the mechanism involved in the phenomena of resonance in the train-induced vibrations of railway bridges is explained. The present results indicate that under certain conditions, resonances of much higher peaks can be excited on simply supported beams by moving trains at much lower speeds. In the design of railway

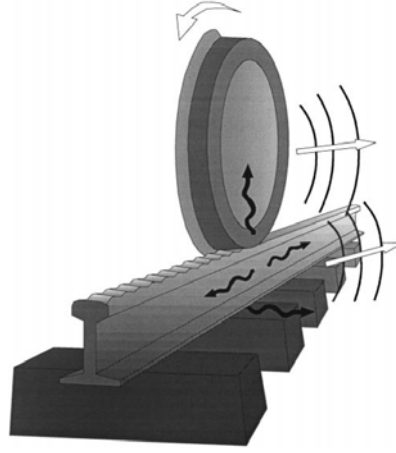
bridges, it is important that the phenomenon of resonance not be overlooked, as it is harmful not only to the riding comfort of passengers, but to the maintenance of railway tracks.

**Keywords:** High speed railway, bridge, resonance

## 1. GİRİŞ

Demiryollarında artan ulaşım talebine paralel olarak işletme hızları ve taşınan yükler de artmaktadır. Hızlı demiryolu taşımacılığına sahip ülkelerde yolcu taşımacılığında maksimum işletme hızı 250-300 km/saat'e ulaşmış ve yük taşımacılığında aks yükleri 22,5 tona çıkmıştır. Hızın ve trafik yüklerinin artması titreşim ve gürültü sorununa da neden olmaktadır.

Potansiyel ve kinetik enerji içeren tüm sistemler dinamik yüklerle tahrik edilmesi halinde titreşim hareketi yaparlar. Demiryolu üstyapısında da, ray ile tekerlek arasındaki temas sırasında bir çok düzensizlik ve pürüzlülüklerden dolayı dinamik yükler ve titreşim hareketi ortaya çıkar. Titreşimler her üç ekseninde hem taşıta hem de üstyapıya iletilir. Üstyapıya gelen titreşimler ray boyunca iletilir veya travers ve balast aracılığıyla zemine iletilir.



**Şekil 1.** Ray-tekerlek temasından titreşim ve gürültü iletimi

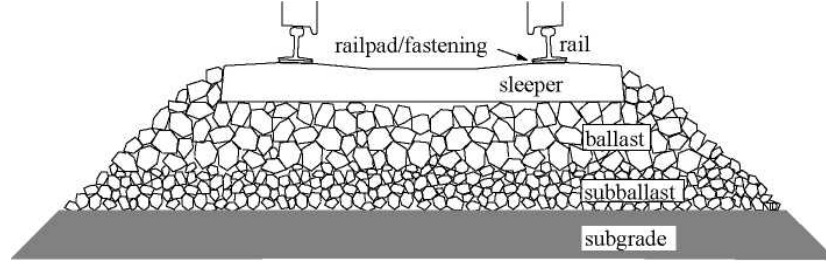
Ray ile tekerlek arasındaki dinamik ilişkiden dolayı ortaya çıkan titreşim frekansları demiryolu sisteminin öz frekanslarına yaklaştıkça dinamik yükler ve deformasyonlar da artmaktadır. Taşıtın tahrik frekanslarından biri veya birkaçı demiryolu sisteminin doğal frekanslarına eşit olduğu zaman “rezonans” denilen olay olup, bu durumda hem taşıtı hem de yolu ciddi ölçüde deforme eden dinamik yükler oluşmaktadır. Bu nedenle, istenmeyen dinamik problemlerin oluşmaması için taşıt ve yol elemanlarının dinamik karakteristikleri çok iyi tanımlanmalı ve demiryolunun tasarım aşamasında statik analiz ile birlikte dinamik analiz de yapılmalıdır.

Yüksek hızlı hatlarda, demiryolu viyadük ve köprülerinde (çalışmada sadece köprü denilecektir) trenin tahrik frekansı ile yapının öz frekansı eşit olduğu zaman rezonans denilen fenomen ortaya çıkmakta ve dinamik yüklerin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle rezonans olayından kaçınmak için tren ve köprü tasarımı aşamasında dinamik analiz yapılmalıdır.

## 2. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNDE DİNAMİK ETKİLER

### 2.1 Yüksek hızlı köprülerde dinamik analiz

Demiryolu taşıtlarının güvenli, konforlu ve ekonomik olarak seyrini sağlayan ve altyapı üzerine döşenmiş bulunan malzeme ve elamanların tümüne üstyapı denir. Demiryolu üstyapısı basit olarak ray ve traversler tarafından çerçeveselendirilmiş ve balast tarafından desteklenmiştir. Çerçeveler yolun en küçük birimi olup, ardarda gelmeleri ile yol güzergahı oluştururlar. Klasik balastlı üstyapının 150 yıl önceki tasarımı, Mc Adam tarafından geliştirilen ve 50 ile 60 mm dane iriliğinde 25 cm kalınlıkta tokmaklanmamış balast yatağından oluşan balastlı yapım tarzıydı. Rayların, traverslerin ve ray bağlantılarının sürekli daha iyi ve daha güçlü hale getirilmesi sayesinde artan dingil yükleriyle hızlar uyum sağlayabilmiştir; ama ana prensip hala o eski yol yapım tarzından kaynaklanmaktadır. Ayrıca genelde kent içi raylı sistemlerde ve bazı yüksek hızlı hatlarda balastsız üstyapı denilen balast yerine elastik malzemelerin kullanıldığı beton döşemeli yollar da yapılmaktadır. Balastsız üstyapının en önemli avantajı, bakım ihtiyacının az olması, işletme sürekliliği ve daha yüksek konfordur.



Şekil 2. Demiryolu enkesiti, [1]

Taşıtta, yolda ve çevrede salınımlara, titreşimlere ve gürültüye neden olan çok fazla sayıda tahrik kaynağı vardır. Yoldan kaynaklanan nedenler arasında yol geometri bozuklukları, ray ve tekerlek yüzeyindeki düzensizlikler, cebireli ray contaları, makas ve kruvazman geçişleri, eşit travers aralıkları, yol rijitliğinin değişmesi gibi bir çok neden sayılabilir. Taşıtta ilgili olarak ise eşit dingil veya boji aralığı önemlidir. Dingil aralığının eşit olması nedeniyle, periyodik olarak tekerlek yükü demiryolunu tahrik etmektedir. Dingil aralığına ve taşıt hızına bağlı olarak  $V$  taşıt hızı (m/sn),  $\lambda$  dingil aralığı (m) olmak üzere harmonik tahrik frekansı,

$$f=V/\lambda \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

olup, yüksek hızlı trenlerde dingil aralığı genelde 13-20m arasındadır. Bazı yüksek hızlı trenlerin dingil aralığı ve değişik hızlar için tahrik frekansı Çizelge 1'de verilmiştir. Alman Demiryollarında (DB-AG) köprü dizaynları statik tren yüklerine göre yapılırdı. Ancak yüksek hızlı trenlerin ortaya çıkması ile birlikte, yapının rezonans problemi yüzünden dinamik analiz ihtiyacı doğmuştur. İlk defa Paris-Lyon yüksek hızlı TGV hattında kısa köprülerde beton taşıyıcı elemanlarda çatlaklar, balastın aşırı parçalanması, hızlı hat bozulmaları gibi dinamik deformasyonlar görülmüştür. Rezonans durumunda köprü tabliyesinde aşırı titreşimler meydana gelir. Bu durumda, ray-tekerlek teması kaybolur, balast yatağının stabilitesi bozulur ve malzeme dayanımlarını aşan gerilmeler meydana gelir, [1].

**Çizelge 1.** Bazı yüksek hızlı trenler için tahrik frekansları, [1]

Tren	Talgo	Thalys	ICE 1
Dingil aralığı(m)	13,14	18,7	26,4
V=200km/sa için tahrik frekansı (Hz)	4,2	3	2,1
V=250km/sa için tahrik frekansı (Hz)	5,3	3,8	2,6
V=300km/sa için tahrik frekansı (Hz)	6,3	4,5	3,2

Rezonans riski olmadığı takdirde köprünün statik analizi yapılır ve hesap sonuçları dinamik etki katsayısı ile çarpılır. Köprü tabliyesinin deplasmanı ve eğilme momenti dinamik etki katsayısı ile çarpılarak dinamik değerler elde edilir. Dinamik dizaynla ilgili olarak ERRI D214 çalıştayında dizayn kriterleri EC 1991-3 kodu ile yayınlanmıştır, [2]. Buna göre basit mesnetli köprülerde 200 km/sa tren hızının altında ve 40m'den daha büyük açıklığa sahip köprülerde rezonans riski yoktur. Bu durumda dinamik etki katsayısını kullanmak yeterlidir. Ancak dinamik analiz gerekli ise, taşıt ve köprü sonlu elemanlar programı ile modellenerek dinamik analiz yapılmalıdır. Analiz sonucunda eğilme momentleri, gerilmeler ve köprü tabliyesinin ivmeleri hesaplanır. Köprü tabliyesinin maksimum titreşim ivmesinin balastlı hat için 0,35g'den ve balastsız hat için 0,5g'den daha az olması gerekir, [1].

Alman Demiryolları DS 804 köprü dizayn standardına göre, dinamik etki katsayısı

$$\Phi = 1 + \varphi' + \varphi'' \quad (2)$$

şeklinde hesaplanıp, burada  $\varphi'$  taşıt hızından kaynaklanan dinamik etkiyi ve  $\varphi''$  ise demiryolu bozukluğundan kaynaklanan dinamik etkiyi ifade etmektedir. Basit mesnetli bir köprü ortasındaki statik deplasman formülü;

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3)$$

olup, köprünün deplasmanı şu faktörlere bağlıdır:

- Tren hızına
- Köprü açıklığına
- Yapının kütleline, rijitliğine ve sönüm oranına
- Trenin dingil yüklerine.

ERRI (European Rail Research Institute) tarafından dizaynlarda kullanılan tipik L=15m boyunda basit mesnetli köprünün (eğilme rijitliği  $EI=7,694 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>) statik deplasmanı P=195 kN noktasal yük için (3) formülüne göre hesaplanırsa,  $\delta=1,78$ mm elde edilir. Tipik basit mesnetli köprünün dinamik analizine göre, maksimum deplasman 220 km/sa tren hızında 2,8 mm ve 330 km/sa tren hızında 3,02 mm hesaplanmıştır. Bu durumda, dinamik deplasman değerleri statik deplasman değerine oranlanarak dinamik etki katsayısı elde edilir. Buna göre 220 km/sa hız için dinamik etki katsayısı  $\Phi=1,57$  ve 330 km/sa tren hızı için dinamik etki katsayısı  $\Phi=1,69$  hesaplanır. Ancak (2) nolu ampirik formüle göre sadece taşıt hızından kaynaklanan dinamik etki katsayısı  $\Phi=2,16$  bulunmuştur. Buna göre, dinamik etki katsayısının dinamik analiz sonucuna göre daha güvenli tarafta kaldığı için uygun sonuç verdiği düşünülebilir. Ancak dinamik etki katsayısı rezonans olayını dikkate almaz ve rezonans durumunda ise dinamik etkiler çok daha fazla olur.

## 2.2 Köprülerde rezonans riski

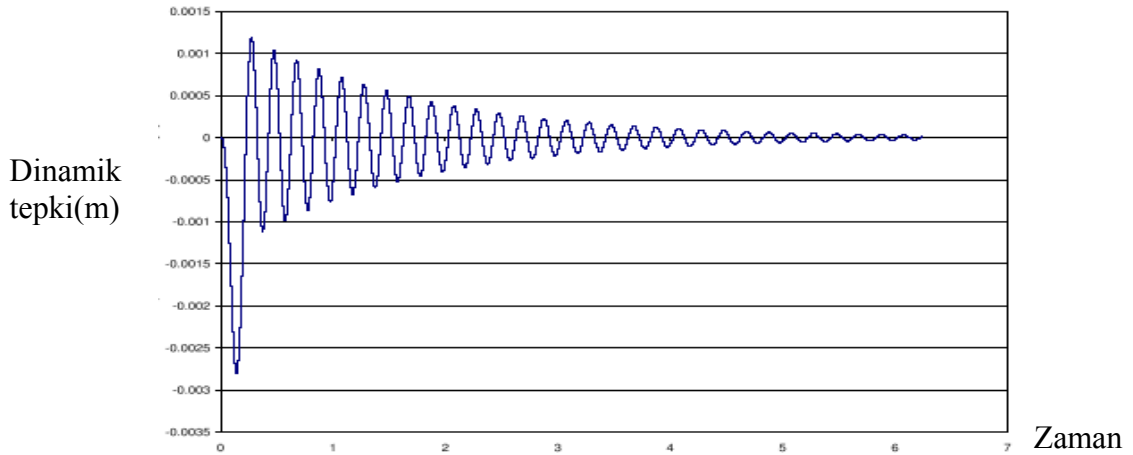
ERRI tarafından ICE 2 treni için değişik hızlarda dinamik hesaplamalar yapılmıştır. ICE 2 treni eşit dingil yüklerine ( $P=195$  kN) ve dingil aralığına (16m) sahip 10 dingilli bir trendir. Dinamik analiz sonuçlarına göre, 220 km/sa tren hızı için dinamik tepki davranışı Şekil 2’de ve tren hızına bağlı olarak değişen maksimum deplasman Şekil 3’de gösterilmiştir. Ayrıca, ERRI tarafından 288 km/sa ve 360 km/sa taşıt hızları için maksimum deplasmanlar hesaplanmış ve Şekil 4’de gösterilmiştir. Şekil 4’den görüldüğü gibi 288 km/sa taşıt hızında tabliye deplasmanları 330 km/sa taşıt hızına göre çok daha fazla olmaktadır. Çünkü, 288 km/sa taşıt hızında rezonans olayı gerçekleşmektedir, [2].  $V=288$  km/sa (80m/sn) taşıt hızında tahrik frekansı,

$$f=V/\lambda=80/16=5 \text{ Hz} \quad (4)$$

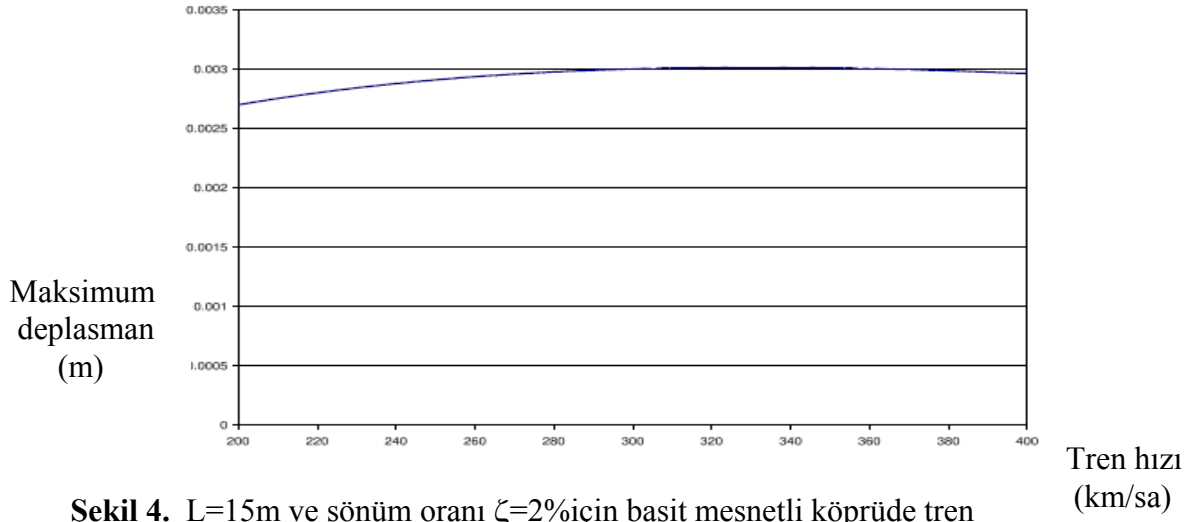
bağıntısı ile hesaplanır. Basit mesnetli köprünün temel öz frekansı,

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (5)$$

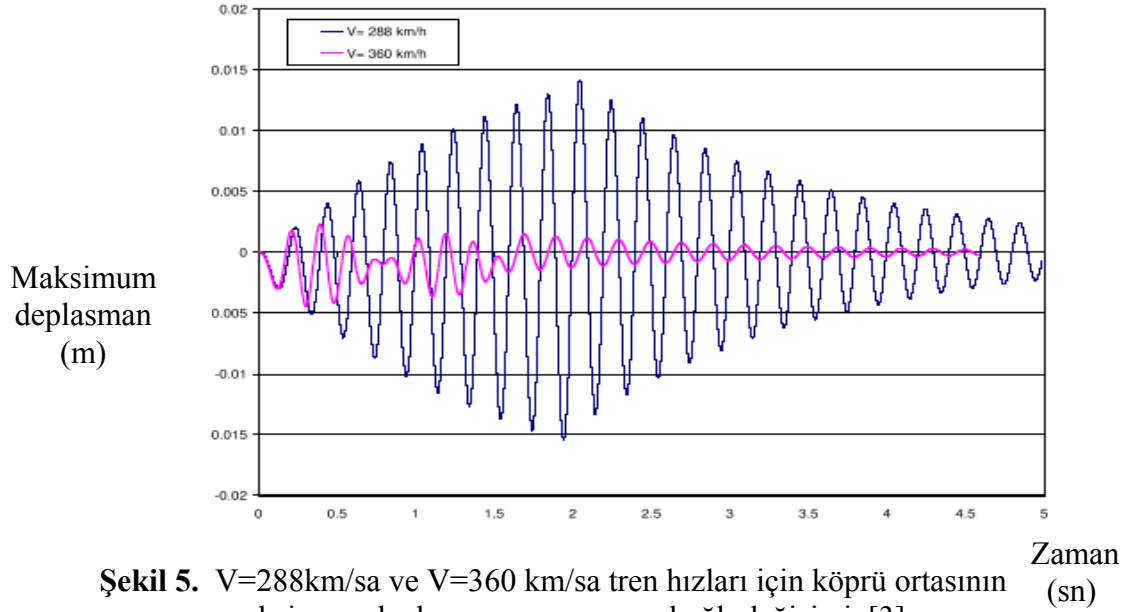
köprünün eğilme rijitliğine (EI), köprünün birim kütlesine (m) ve açıklığına (L) bağlı olarak formül (5) ile hesaplanır. ERRI tarafından dizaynlarda kullanılan tipik  $L=15$ m boyunda basit mesnetli köprünün (eğilme rijitliği  $EI=7,694 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>, birim kütle  $m=15$  ton/m) temel öz frekansı (5) formülüne göre hesaplanırsa,  $f=5$ Hz elde edilir. Burada görüldüğü gibi, örnek verilen köprünün temel öz frekansı ile 288 km/sa hızda hareket eden ICE-2 trenin tahrik frekansı eşit olduğu için rezonans olayı gerçekleşmektedir. Rezonansa neden olan taşıt hızına kritik hız ( $V_{\text{kritik}}$ ) denilmektedir. Değişik taşıt hızları için maksimum deplasmanlar hesaplanarak elde edilen sonuçlar Şekil 5’te sunulmuştur. Şekil 6’da da görüldüğü gibi 260 km/sa ile 320 km/sa hız aralığı rezonansla ilişkili olduğu için dinamik deplasmanın çok arttığı hız aralığıdır. Rezonans olayından kaçınmak için, köprü tasarım aşamasında köprünün öz frekansı, tasarım aşamasından sonra ise taşıt hızı veya dingil aralığı değiştirilebilir.



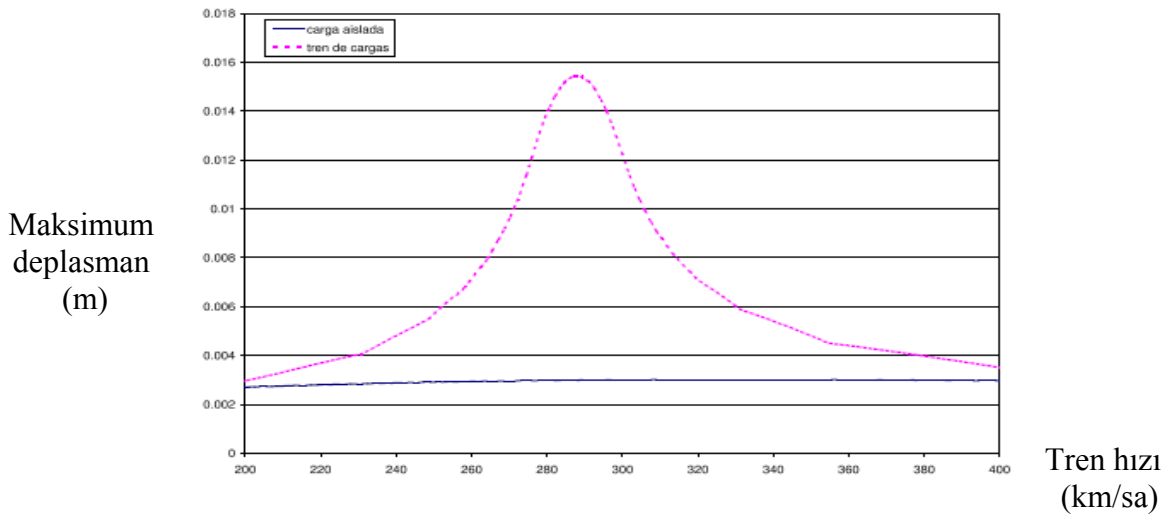
Şekil 3. 220km/sa hız ve  $P=195$ kN tek hareketli yük için basit mesnetli köprüde dinamik tepki, [2]



Şekil 4.  $L=15m$  ve sönüm oranı  $\zeta=2\%$  için basit mesnetli köprüde tren hızına bağlı köprü ortasının maksimum deplasmanı, [2]

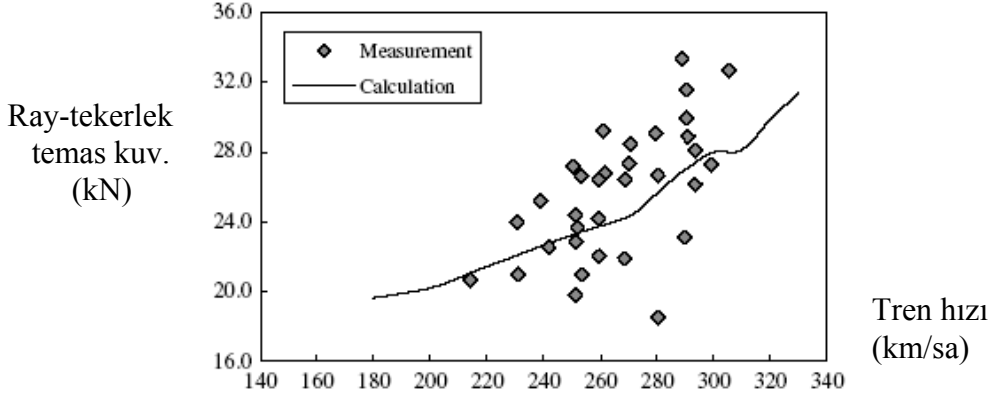


Şekil 5.  $V=288km/sa$  ve  $V=360 km/sa$  tren hızları için köprü ortasının maksimum deplasmanının zamana bağlı değişimi, [3]

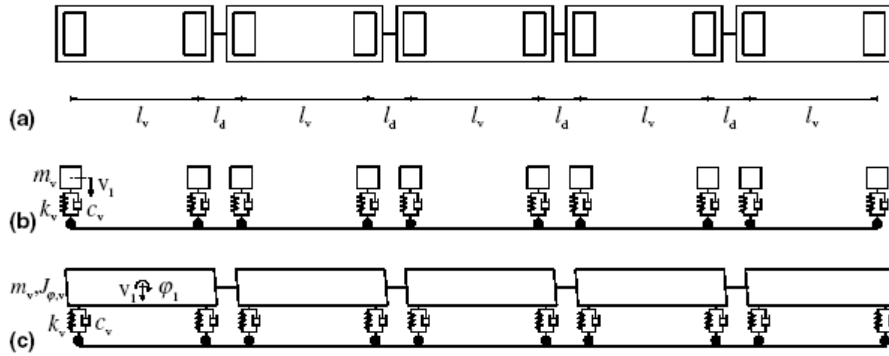


Şekil 6. Tren hızına bağlı olarak köprü ortasının maks. deplasmanı, [3]

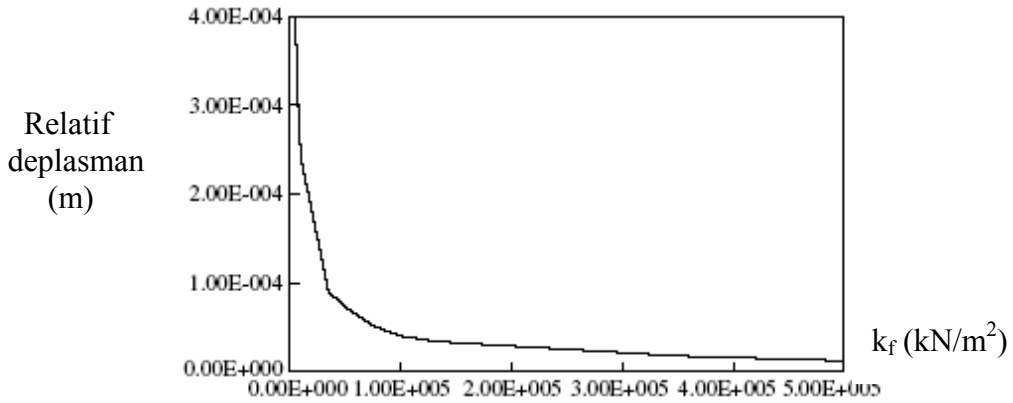
Çin'de yüksek hızlı demiryolu köprüsünde yapılan ölçüm ve hesaplama çalışmalarına göre tren hızına bağlı olarak ray-tekerlek temas kuvvetinin arttığı belirlenmiştir, (Şekil 7), [3].



Şekil 7. Tren hızına bağlı olarak ray-tekerlek temas kuvveti, [3]



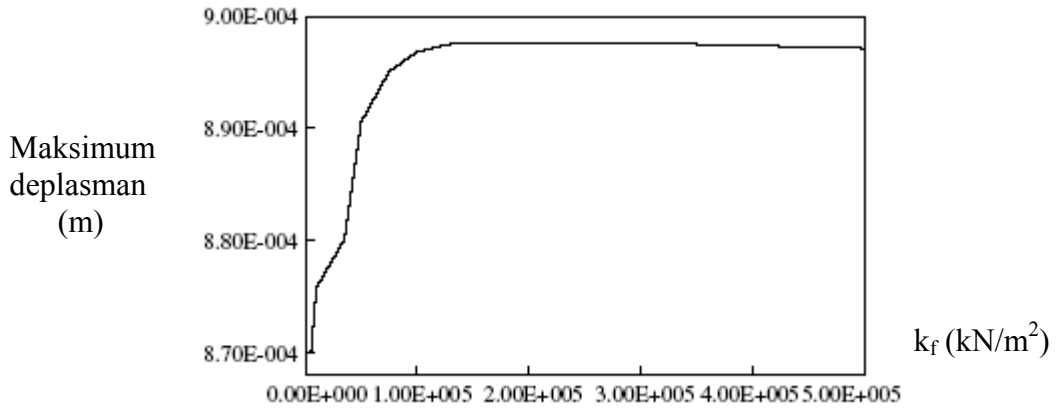
Şekil 8. Demiryolu köprü analizinde kullanılan taşıt modeli, [4]



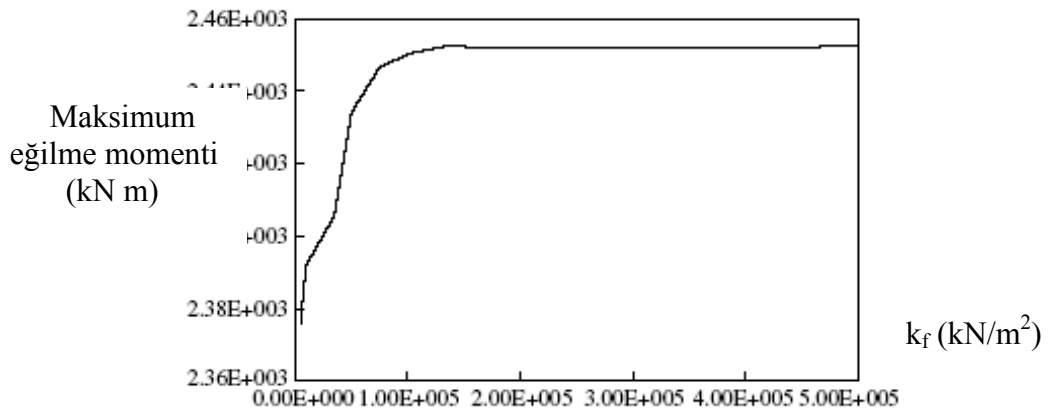
Şekil 9. Yol yatak katsayısına bağlı olarak köprü ortasında rayın köprü tabliyesine göre göreceli deplasmanı, [4]

Biondi ve ekibi tarafından 20m boyunda tek açıklıklı basit köprü için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılmıştır. Birim uzunluk kütlesi 34,088 ton/m olan ön germeli beton demiryolu köprüsünün her iki tarafından 40m uzunluğundaki yol dahil olmak üzere toplam 100 mlik demiryolu modellenmiştir. Tren, hareketli kütlesi

$m_v=22$  ton ve sabit hızı  $20\text{m/sn}$  ( $742\text{ km/sa}$ ) olarak modellenmiştir, (Şekil 7). Trenin akslar arası mesafesi  $l_d=6\text{m}$  ve  $l_v=18\text{m}$  dir. Visko-elastik balast yatak katsayısına bağlı olarak köprü ortasında rayın tabliyeye göre göreceli deplasmanı hesaplanmıştır, (Şekil 8). Şekil 8'den görüldüğü gibi, balast yatak katsayısı arttıkça ray ve köprü tek bir kiriş gibi hareket etmeye başlamaktadır ve relativ deplasman sıfıra doğru yaklaşmaktadır. Buna karşın, köprü ortasındaki köprünün maksimum deplasmanı (Şekil 9) ve eğilme momenti (Şekil 10) artmaktadır. Daha yumuşak balast yatağı, tren yüklerinin daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak eğilme momentlerini azaltmaktadır. Buna karşın, balast yatak katsayısı arttıkça taşıtın düşey ivmesi artmakta ve bu nedenle yolculuk konforu azalmaktadır, (Şekil 10),[4]. Burada görüldüğü gibi balast yatak katsayısının değişimi, köprü eğilme momenti ile yolculuk konforu arasında farklı sonuçlara neden olmaktadır. Bu nedenle optimum balast yatağı rijitliği seçilmesi gereklidir. Balast yatak katsayısı, zemin tipine, traversin yük alanına ve alan şekline, balast tabakası içindeki boşluk oranına, trenin tahrik frekansına ve balastın elastik özelliklerine bağlıdır, [5].

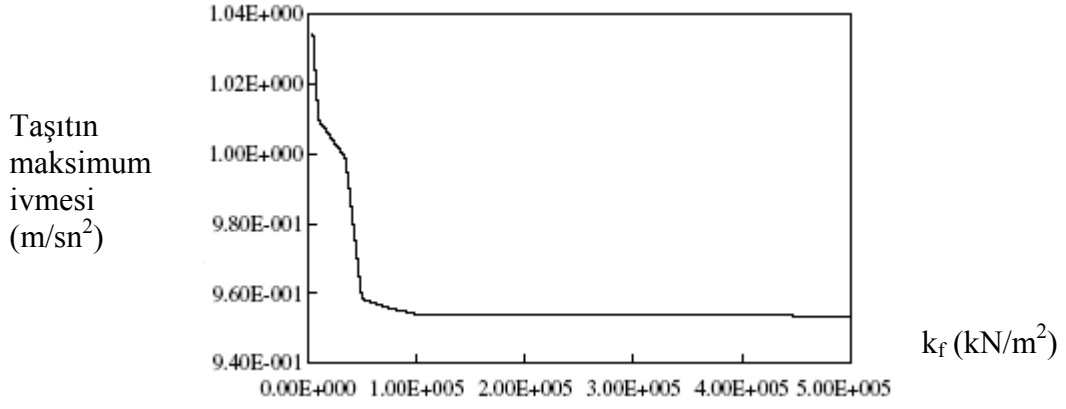


**Şekil 10.** Yol yatak katsayısına bağlı olarak köprü tabliyesinin maks. deplasmanı, [5]



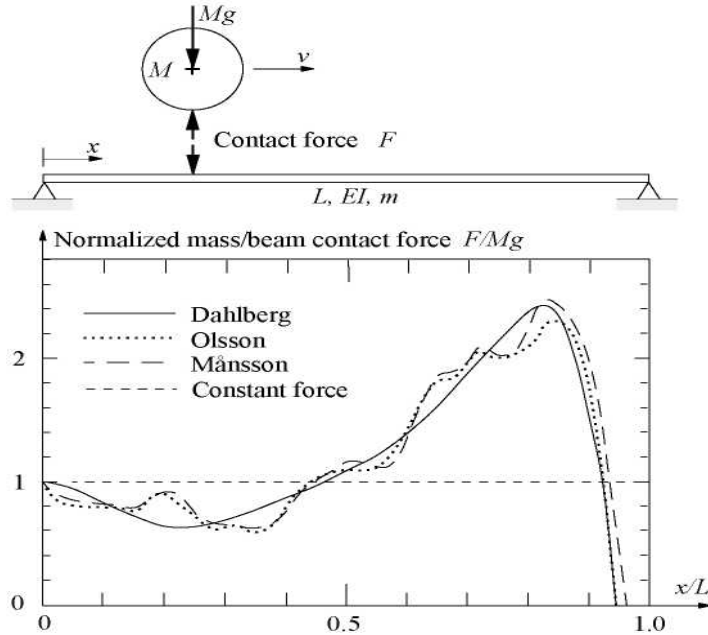
**Şekil 11.** Yol yatak katsayısına bağlı olarak köprü tabliyesinin maksimum eğilme momenti, [5]





Şekil 12. Yol yatak katsayına bağlı olarak taşıtın maks. düşey ivmesi, [5]

Bazı araştırmacılar sonlu elemanlar programları kullanarak basit mesnetli köprü ile sabit hızla hareket eden rijit kütle arasındaki dinamik temas kuvvetini hesaplamışlardır.  $M$ , tekerlek kütlesi olmak üzere statik durumda temas kuvveti  $Mg$  olmaktadır. Bu çalışmalarda tekerlek kütlesinin köprü kütlesine oranı ( $M/mL$ ) ve taşıt hızının kritik hız oranına ( $V/V_{\text{kritik}}$ ) bağlı olarak hesaplama yapılmıştır. Mansson tarafından kütle oranı ve hız oranı 0,5 kabul edilerek LS-DYNA programı ile yapılan dinamik temas kuvveti hesap sonucu Şekil 13’de gösterilmiştir. Her üç analize göre  $x/L=0.8$  noktasında çok az farklarla en yüksek temas kuvveti elde edilmiştir, [6]. Şekil 12’den görüldüğü gibi, tekerlek-köprü temas kuvveti köprünün başında tekerleğin statik yüküne eşit iken, hemen daha sonra temas kuvveti düşmeye başlar. Çünkü köprü hareketli tekerlek yükü altında aşağı doğru kayar. Temas kuvvetinin azalmasından dolayı, kütle ölü yükü  $Mg$  reaksiyon kuvvetinden daha fazla olur ve kütle aşağıya doğru hareket eder. Bir süre sonra kiriş deplasman yönü yukarı doğru değişmeye başlar ve kütle de yukarı doğru itilir. Bu nedenle kütle ile kiriş arasındaki temas kuvveti  $Mg$ ’den daha fazla olur. Tekerlek  $x=0.82L$  noktasına geldiği zaman, tekerlek-kiriş kuvveti maksimum seviyeye ulaşır ve statik kuvvetinin ( $Mg$ ) 2.5 katına eşit olur.



Şekil 13. Basit mesnetli köprüde ray-tekerlek temas kuv. dinamik etki katsayısı,[6]

### 3. SONUÇ

Yüksek hızlı hatlarda, taşıtın dingil aralığından kaynaklanan tahrik frekansları ile demiryolu köprülerinin öz frekanslarından biri eşit olduğu zaman rezonans olayı gerçekleşmektedir. Rezonans durumunda dinamik gerilmeler ve deplasmanlar çok fazla artmaktadır. Rezonans olayından kaçınmak için köprü dizaynı ve taşıt dizaynı değiştirilebilir. Bunun için köprünün tasarım aşamasında dinamik analiz yapılmalı ve dinamik gerilme ve deplasmanlar belirlenmelidir. Ayrıca köprü tabliyesinin eğilme momentini ve deplasmanını azaltmak ve yolculuk konforunu artırmak için optimum balast yatak katsayısı seçilmelidir.

Ülkemizde inşası devam eden Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu hattı ve bunun yanı sıra planlanan yeni yüksek hızlı demiryolu projeleri bulunmaktadır. Bu hatların üstündeki köprüler için statik hesaplar yerine dinamik analizlerin yapılması ve muhtemel rezonans risklerinin belirlenmesi gereklidir. Çalışma bu konuda, yapılması gerekenler hakkında ön bilgi vermektedir.

### KAYNAKÇA

- [1] Manfred Zacher, Dynamics of Railway Bridges, 5. Adams/Rail Users' Confer. A,
- [2] Golcolea J.M, Dominguez J., Navarro J.A, Gabaldon F., New Dynamic Analysis Methods for railway Bridges in Codes IAFF and Eurocode I, Ciudad Üniversitesi, Spain, June, 2002,
- [3] Xia He, Zhang Nan, Dynamic analysis of railway bridge under high-speed trains, Computers&Structures 83(2005) 1891-1901,
- [4] Biondi B., Muscolino G., Sofi A, A substructure for the dynamic analysis of train-track-bridge system, Computers&Structures 83(2005) 2271-2281,
- [5] Fremion N, Gaudard J.P, Vincent N(1996): Vibratec Report 072.028a Improvement of ballast and sleeper description in TWINS:experimental characterization of ballast properties,
- [6] Månsson F (2000): *Simulation of dynamic train-track interaction considering track settlement*. MSc thesis, Department of Mechanical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, Report LiTH-IKP-EX-1668, 2000.