

## KÖPRÜ SARSMA DENEYLERİYLE ARAÇLARIN KÖPRÜ DEPREM DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**<sup>1</sup>Nefize SHABAN, <sup>2</sup>Alp CANER**

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara  
E-mail: nefize.saban@metu.edu.tr

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara  
E-mail: acaner@metu.edu.tr

### Özet

Deprem sırasında köprü üzerinde bulunan araçların köprü dinamik özellikleri ve köprü deprem davranışı üzerindeki etkisi analitik ve deneysel olarak yeterince çalışılmamış ve mevcut yönetmeliklerde açıkça belirtilmemiştir. Bu nedenle ülkemiz ve dünyada köprü deprem tasarımında ele alınan esaslar köprü'nün gerçekteki davranışını tam olarak kapsayamamaktadır. Daha kapsamlı ve güvenilir bir tasarımı hedefleyen yeni köprü şartnamesinde de kullanılacak üzere, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında büyük ölçekli köprü üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. İnşa edilen 12 metrelik tek açıklıklı çelik kompozit köprüye harmonik yer hareketleri etki ettirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden alınan okumalar doğrultusunda köprü'nün bilgisayar ortamında oluşturulan üç boyutlu nümerik modelinin kalibrasyonu yapılmıştır. Bir sonraki aşamada bu modele gerçek bir araba modeli ilave edilmiş ve elde edilen model üzerinde köprü-araba dinamik etkileşimi incelenmiştir. Köprü üzerindeki aracın kütle oranının köprü dinamik davranışına olan etkisi ve bu etkinin tek ve iki araba durumlarında nasıl değişiklik gösterdiği araştırılmıştır. Araba her iki durumda da kütle sönmüleyici etkisi yaratarak köprü'nün sönmü oranını önemli ölçüde arttırmış ve dolayısıyla köprü'nün dinamik tepkisini azaltmıştır.

### Giriş

Deprem sırasında köprü üzerinde bulunan araçların köprü dinamik özellikleri ve deprem davranışı üzerindeki etkisi sadece sisteme etkidikleri ilave kütle ile sınırlandırılmamalıdır. Araç-köprü dinamik etkileşimi köprü'nün deprem davranışının belirlenmesinde araştırılması gereken önemli bir etkidir. Bu yöndeki sınırlı sayıda akademik çalışmalarda ve mevcut yönetmelik ve şartnamelerde araçların etkisi konusunda tasarım ve uygulamaya yönelik açıklama getirilmemiştir. Akademik araştırmalar ağırlıklı olarak demiryolu köprülerini incelemişlerdir ve analitik olarak çalışılmıştır. Otoyol köprülerini deneysel olarak inceleyen tek araştırma Amerika'da Nevada Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde hareketli yükün köprü deprem tepkisini azalttığı ve bu etkinin deprem şiddetine göre değişebileceği gözlemlenmiştir. Düşük şiddetli depremlerde bu etki daha belirgin olurken şiddetin artmasıyla

hareketli yükün olumlu etkisinin azaldığı belirlenmiştir. Araçların olumlu etkisi kütle sönümleyici şeklinde çalıştıkları yönünde yorumlanmıştır.

Bu etkinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi için Türkiye Köprü Mühendisliğinde Tasarım ve Yapıma İlişkin Teknolojilerin Geliştirilmesi Projesi kapsamında Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında büyük ölçekli köprü üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. İnşa edilen çelik kompozit köprünün açıklığı 12 metre, genişliği 3,5 metre ve yüksekliği de 1.65 metre olarak gerçek bir köprü ebatlarına sahiptir. Köprünün iki ucundaki ayaklar köprünün bir bütün halinde hareket etmesini sağlayacak bir alt tabliyeyle bağlanmıştır. Teflon yastıklar üzerine oturtulan bu tabliye, köprünün kolaylıkla hareket edebilmesine izin verir. Köprünün üst yapısı çelik kirişler üzerine yerleştirilen betonarme tabliyeden oluşmaktadır. Bu üst yapı ayakları bağlayan başlık kirişlerinin üzerine kauçuk mesnetlerle oturtulmuştur. Mesnetlerin teknik özellikleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen testler sonucunda belirlenmiştir. Bu özelliklerdeki köprünün alt yapısı 20 ton, üst yapısı 20 ton olmak üzere toplam ağırlığı 40 tondur. Köprü açıklığının ortasında alt tabliyeye bağlanan piston aracılığıyla enine yönde dinamik yükleme etki edilmiştir. Köprünün genel görünüşü Şekil 1'de verilmiştir.



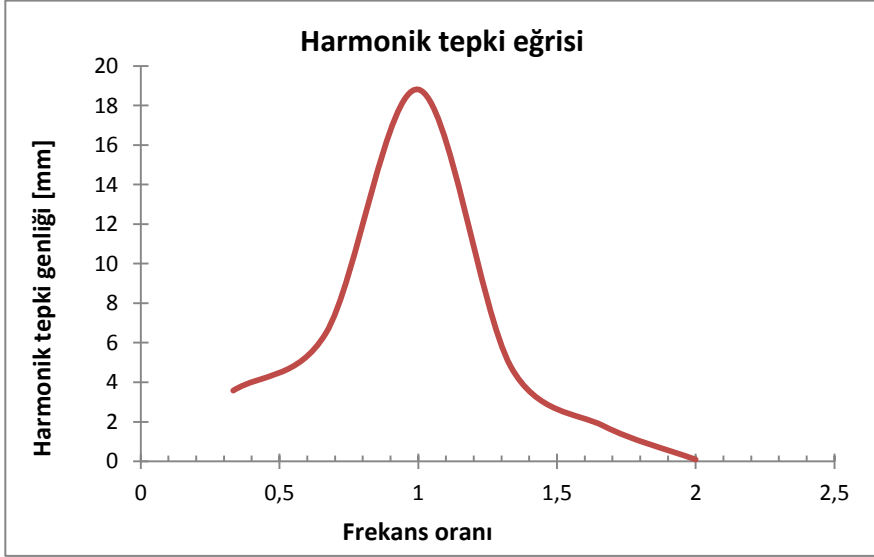
Şekil 1. Köprü genel görünüşü

## Yöntem

Deneyler sırasında okuma alt ve üst tabliyenin orta açıklığına ve üst tabliyenin her iki ucuna üç yönlü(üç yönde okuma alan) ivmeölçerler ve deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Köprünün her iki ucundaki kenar mesnetlerin altında birer yük hücresi okuma almıştır.

Pistonun karşısındaki deplasman ölçerden alınan okumalar pistonu verilen girdilerle karşılaştırılmıştır. Böylelikle her seferinde pistonun uyguladığı hareket kontrol edilmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda, pistonun tüm deneylerde istenilen hareketleri sorunsuz bir şekilde uyguladığı görülmüştür.

Köprüye, 0.5 Hz'ten başlayarak 0.5Hz'lik artışla 3Hz'e ulaşan beş tane harmonik hareket etki edilmiştir. Uygulanan ivmenin sabit kalması için sinüs dalgalarının genlikleri frekansla bağıntılı olarak değişmektedir. Alınan okumalardan harmonik tepki eğrisi çizdirilir. Eğrinin düşey ekseninde harmonik tepki genliği, yatay ekseninde ise harmonik hareket frekansının sistemin hâkim frekansına olan oranı yer almaktadır. Şekil 2'de verilen bu eğriden sistemin hâkim frekansı 1.56Hz ve sönüm oranı da %12 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Harmonik tepki eğrisi

Deneylerin yanı sıra, bilgisayar ortamında köprünün üç boyutlu nümerik modeli oluşturulmuştur. Test edilerek belirlenen malzeme ve eleman (teflon, mesnet, araba özellikleri) aynen modele girilmiştir. Harmonik deneylerden alınan okumalar doğrultusunda model kalibre edilmiştir. Bir sonraki aşamada bu modele gerçek bir arabanın modeli ilave edilmiş ve elde edilen model üzerinden köprü-araba dinamik etkileşimi incelenmiştir.

Modellenen arabanın süspansiyon sistemi ve tekerlerinin eşdeğer rijitliği ve kütlesi Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında testler sonucunda belirlenmiştir. Kütle 1ton, eşdeğer rijitlik ise 25kN/m olarak hesap edilmiştir. Böylelikle arabanın ve üst yapının kütlelerinin oranı 1/20'dir. Bir kütle sönümleyicinin etkili olabilmesi için kendi kütlelerinin yapıninkine oranı %1 ila %10 arasında olmalıdır. Dolayısıyla araba etkili bir ayarlı kütle sönümleyici gibi çalışabilecek özelliklerdedir.

Ayarlı bir kütle sönümleyicinin en önemli ve etkili parametresi kendi kütlelerinin uygulandığı yapının kütlelerine olan oranıdır. Genelde bu oranın artmasıyla sönümleyicinin etkisi de artmakta

ve yapısal titreşimlerin boyutları küçülmektedir. Bu tür bir eğilimin köprü-araba dinamik etkileşimi çerçevesinde nasıl bir boyut kazanabileceği yapısal davranış açısından önemli bir husustur. Bu yüzden kütle oranının etkisini araştırmak için sadece arabanın kütlesini değiştirerek analizler tekrarlanmıştır. Analizlerden alınan sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Araba özelliklerine göre köprü-araba sisteminin hâkim frekansları ve onlara denk gelen etkin kütle oranları (tek araba)

Araba kütlesi [ton]	Kütle oranı [%]	Hakim frekanslar [Hz]		Etkin kütle oranları [%]	
		f1	f2	m1	m2
0.5	2.5	1.52	2.28	54.30	0.96
1.0	5.0	1.40	1.75	38.09	17.76
1.5	7.5	1.21	1.66	21.19	35.23
2.0	10.0	1.06	1.63	16.75	40.23

Tablo 2. . Araba özelliklerine göre köprü-araba sisteminin sönüm oranı (tek araba)

Araba kütlesi [ton]	Kütle oranı [%]	Hareket frekansı [Hz]	Uygulanan genlik [mm]	Maksimum deplasman [mm]	Sönüm oranında artış [%]	Sönüm oranı [%]
0.5	2.5	1.52	5.38	20.41	9.83	13.18
1.0	5.0	1.40	6.34	16.64	58.75	19.05
1.5	7.5	1.66	4.51	14.25	31.87	15.82
2.0	10.0	1.63	4.68	15.79	23.50	14.82

Analiz sonuçlarına bakıldığında, yapılarda genelde gözlenen eğilim görülmemektedir. Sönüm oranındaki artış kütle oranındaki artışla doğru orantılı değildir. Köprü-araba sisteminin hakim frekansı köprünün frekansına yaklaştıkça sönüm oranı azalmaktadır.

Araştırmanın bir sonraki aşamasında, aynı arabadan iki tane köprünün ortasına simetrik şekilde birbirinden 1.3m uzaklıkta modellenmiştir. Böylelikle kütlelerin bir noktada yoğunlaşması ve dağılması arasındaki etki farkı incelenmiştir. Analizler tekrarlanmış ve sonuçları Tablo 3 ve Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Araba özelliklerine göre köprü-araba sisteminin hâkim frekansları ve onlara denk gelen etkin kütle oranları (iki araba)

Toplam araba kütlesi [ton]	Kütle oranı [%]	Hakim frekanslar [Hz]		Etkin kütle oranları [%]	
		f1	f2	m1	m2
2*0.25=0.5	2.5	1.50	3.20	56.19	0.11
2*0.5=1.0	5.0	1.47	2.32	55.54	1.32
2*0.75=1.5	7.5	1.41	1.97	51.54	5.87
2*1.0=2.0	10.0	1.33	1.81	43.96	13.99

Tablo 4. Araba özelliklerine göre köprü-araba sisteminin sönüm oranı (iki araba)

Toplam araba kütlesi [ton]	Kütle oranı [%]	Hareket frekansı [Hz]	Uygulanan genlik [mm]	Maksimum deplasman [mm]	Sönüm oranında artış [%]	Sönüm oranı [%]
2*0.25=0.5	2.5	1.50	5.52	21.86	5.22	12.63
2*0.5=1.0	5.0	1.47	5.75	21.69	10.46	13.25
2*0.75=1.5	7.5	1.41	6.25	20.67	25.99	15.12
2*1.0=2.0	10.0	1.33	7.02	18.57	57.51	18.90

Tablo 4'ten görüldüğü üzere, iki araba durumunda sönüm oranı ile kütle oranı birbirine doğru orantılıdır.

## Sonuçlar

Bu çalışma içinde hesap edilen sönüm oranı değerleri karşılaştırılınca belirli bir kütle oranına sahip tek arabanın aynı kütle oranını sağlayan iki arabadan daha etkili olduğu görülmektedir. Dolayısıyla kütle bir noktada yoğunlaşması dağılmasından daha etkili. Bu durum iki arabadan birinin köprüyle farklı fazda, diğerinin ise aynı fazda hareket etmesinden dolayı etkilerinin toplamda azaldığı yönünde açıklanabilir.

Yapılan bütün analizler sonucunda köprü üzerinde bulunan hareketli yükün sistemin sönüm oranını önemli ölçüde (%58'e kadar) arttırdığını ve böylelikle de dinamik tepkisini azalttığını göstermektedir. Sistemin davranışındaki bu değişim köprü üzerindeki arabanın süspansiyon sisteminin sayesinde kütle sönümleyici etkisi yarattığı yolunda açıklanabilir. Süspansiyon sistemi, arabanın titreşimi ile köprünün titreşimi arasında faz farkı yaratmaktadır. Bu faz farkı etki eden enerjinin bir kısmını arabanın sönümlemesini ve böylelikle köprünün tepkisinin azalmasını sağlamaktadır.

Bildiri çerçevesinde sunulan sonuçlar henüz tamamlanmamış olan bir çalışmanın bir kısmıdır. Yürütülen araştırma hareketli yüklerin karayolu köprülerinin dinamik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi yönünde bir başlangıç noktasıdır. Araştırma sonuçlarını farklı köprü tipleri, araç özellikleri, kütle oranları için genelleştirmek için daha kapsamlı çalışmalar gerekmektedir. Bu yöndeki çalışmalar halen devam etmekte ve bir önceki aşamalardan kazanılan tecrübe, deneyim ve bilgi birikimi ile araç-köprü dinamik sistemi ve etkileşimi daha ayrıntılı ve çok yönlü incelenmeye devam etmektedir.

### **Teşekkür**

Bu çalışmaya verdikleri destekten dolayı TÜBİTAK BİDEB 2215 ve TUBİTAK KAMAG 110G093 Programı'na teşekkür ederiz.

### **Kaynaklar**

1. EUROCODE EN 1990 Basis of Structural Design (2005), Brussels
2. Canadian Highway Bridge Design Code CAN/CSA-S6-06
3. "American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)", LRFD Bridge Design Specifications, Washington DC, 2007.
4. Wibowo, H., Sanford, D.M., Buckle, I.G., and Sanders, D.H. (2012)"Effects of Live Load on Seismic Response of Bridges: A Preliminary Study". Civil Engineering Dimension, 14(3), 166-172.
5. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. and Chung, R. (1997) "A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26, 617-635

**Anahtar Sözcükler:** Köprü-araba dinamik etkileşim, ayarlı kütle sönümleyici, sönüm oranı, kütle oranı.