



Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions

Kurtuluş Soyluk¹ , Hayrettin Karaca²

¹Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 06570 Maltepe, Ankara, Turkey

²Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Yozgat, Turkey

Highlights:

- Wave propagation velocity and near-fault ground motion effects are considered in the dynamic analyses of cable-supported bridges
- Wave propagation velocity has a complex effect on cable-supported bridge responses
- When the wave velocity is infinite, the effect of near-fault ground motion on structural responses becomes larger

Keywords:

- Cable-stayed bridge
- Suspension bridge
- Near-fault ground motion
- Far-fault ground motion
- Asynchronous ground motion model

Article Info:

Research Article
Received: 19.07.2019
Accepted: 14.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.594282

Correspondence:

Author: Kurtuluş Soyluk
e-mail: ksoyluk@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3244

Graphical/Tabular Abstract

In this paper a cable-stayed bridge and a suspension bridge with closer main span lengths are considered to determine the effects of near-fault and far-fault ground motions on the seismic responses of these bridges under asynchronous excitations. For this purpose, near fault and far fault ground motion components of Chi-Chi earthquake are used. As the TCU050 and TCU054 components of the Chi-Chi earthquake are used as pulse type near fault ground motions, TCU089 component is used as the near fault ground motion without pulse type and the HWA032 component is used as the far fault ground motion. As can be noticed from the following graphs the traveling wave has a complicated effect on the bridge responses and underestimates or overestimates the seismic responses depending on the wave propagation velocity and considered structural responses for the TCU050 component of the Chi-Chi earthquake.

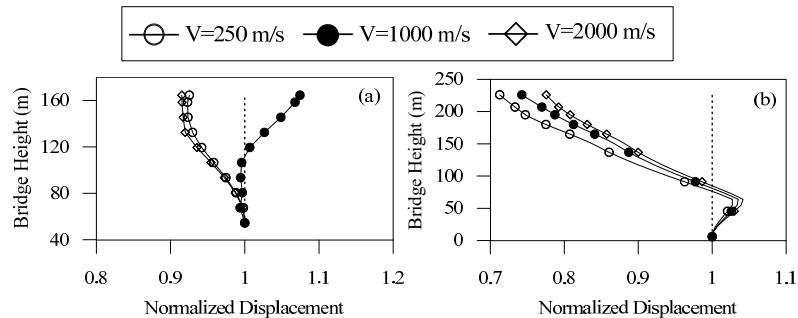


Figure A. Horizontal tower displacements of a) FSM b) Tatar bridges for travelling wave effect

Purpose: Because there are still uncertainties about the dynamic responses of cable supported bridges under the combined effect of spatially varying and near fault ground motions, the purpose of this paper is to analyze these type of bridges under asynchronous near fault ground motions.

Theory and Methods:

Three dimensional time history analysis of the cable-supported bridge systems are performed for the ChiChi ground motion recordings of TCU050, TCU054, TCU089 and HWA032. Each ground motion recording is applied with one vertical component and two orthogonal horizontal components. To perform the numerical calculations, the modified version of the computer program MULSAP which is an adaptation of the SAP4 structural analysis program, is used.

Results:

Traveling wave has a complicated effect on the bridge responses and underestimates or overestimates the seismic responses depending on the wave propagation velocity and considered structural responses. The increments in the structural responses due to the near fault ground motion components with respect to the far fault ground motion component under infinite wave propagation are clearly larger than those of the increments due to the wave propagation velocity of 250 m/s.

Conclusion:

Cable supported bridges with center spans around 1000 m and dependently having relatively larger vibration periods have the potential to show larger seismic demands when subjected to the near fault ground motions with pulse type characteristics.



Yakın-fay yer hareketi etkisindeki kablo-destekli köprülerin asinkronize dinamik analizi

Kurtuluş Soyluk^{1*}, Hayrettin Karaca²

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

²Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Kablo-destekli köprülerin dinamik analizinde dalga yayılma hızı ve yakın-fay yer hareketi dikkate alınmıştır
- Dalga yayılma hızının yapısal tepkiler üzerinde karmaşık bir etkisinin olduğu görülmüştür
- Dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda yakın-fay yer hareketi yapısal tepkiler üzerinde daha etkili olmuştur

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.07.2019

Kabul: 14.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.594282

Anahtar Kelimeler:

Yakın-fay yer hareketi,
asinkronize yer hareketi
modeli,
uzak-fay yer hareketi,
eğik-kablo askılı köprü,
asma köprü

ÖZET

Bu çalışmada, deprem hareketi dalga yayılma hızının dikkate alındığı asinkronize yer hareketi etkisindeki merkez açıklık uzunlukları birbirine yakın olan eğik kablo askılı ve asma köprü sistemlerinin yakın fay ve uzak fay yer hareketi (1999 Chi-Chi depremi) etkisi altındaki yapısal tepkileri karşılaştırılmıştır. Japonya'da inşa edilen Tataro Köprüsü eğik kablo askılı köprü modeli olarak seçilirken, Türkiye'de inşa edilen Fatih Sultan Mehmet Köprüsü asma köprü modeli olarak tercih edilmiştir. Dikkate alınan asma köprü sisteminde gergi halatı, ana kablo ve askılar için P-delta etkisi tanımlanarak köprü sisteminin geometrik açıdan lineer olmayan dinamik analizi yapılırken, eğik kablo askılı köprü için kabloların doğrusal olmayan davranışları eşdeğer elastisite modülü ile göz önüne alınarak dinamik analiz yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, dalga yayılma hızının köprü sistemlerinin yer değiştirme ve iç kuvvetleri gibi yapısal tepkileri üzerinde karmaşık bir etkisinin olduğunu, dalga yayılma hızına ve dikkate alınan yapısal tepkilere bağlı olarak söz konusu tepkilerin artabileceğini veya azalabileceğini göstermiştir. Bunun yanında yakın fay yer hareketi kayıtları için dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen tepki değerlerindeki uzak fay yer hareketine göre elde edilen artışın, 250 m/s dalga yayılma hızı için elde edilen artıştan belirgin olarak daha büyük çıktığı gözlenmiştir.

Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions

HIGHLIGHTS

- Wave propagation velocity and near-fault ground motion effects are considered in the dynamic analyses of cable-supported bridges
- Wave propagation velocity has a complex effect on the cable-supported bridge responses
- When the wave velocity is infinite, the effect of the near-fault ground motion on the structural responses becomes larger

Article Info

Research Article

Received: 19.07.2019

Accepted: 14.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.594282

Keywords:

Near-fault ground motion,
asynchronous ground motion
model,
far-fault ground motion,
cable-stayed bridge,
suspension bridge

ABSTRACT

In this paper a cable-stayed bridge and a suspension bridge with closer main span lengths are considered to determine the effects of near-fault and far-fault ground motions on the structural responses of these bridges under asynchronous excitations. While the Tataro Cable-Stayed Bridge constructed in Japan is preferred as a cable-stayed bridge model, the Fatih Sultan Mehmet Bridge constructed in Turkey is considered as a suspension bridge model. While the geometric nonlinearity including P-delta effects resulting from the self weight of the suspension bridge is considered in the dynamic analysis of the suspension bridge, the nonlinearity of the cable-stayed bridge cables are taken into account with the equivalent modulus of elasticity. The results show that the traveling wave has a complicated effect on the structural responses like displacements and internal forces, and underestimates or overestimates the structural responses depending on the wave propagation velocity and the considered structural responses. It is also observed that the increment of the responses for the infinitely propagating near fault ground motions with respect to the far-fault ground motions are obviously larger than the increment obtained for the 250 m/s wave propagation velocity.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Faya yakın konumda kaydedilen yer hareketlerinin, sismik kaynaktan uzakta kaydedilen yer hareketlerinden önemli ölçüde farklı olduğu belirlenmiştir. Yakın fay bölgesinde belirli alanlardaki yer hareketleri; fay kırılma mekanizması, fayın sahaya göre kayma yönü, tektonik hareket sonucu sahadaki kalıcı yer değiştirme faktörlerinden önemli derecede etkilenmektedir [1]. Son zamanlardaki Kobe 1995, Kocaeli 1999, Chi-Chi 1999 ve Düzce 1999 gibi büyük depremlerde, yakın fay yer hareketlerinin darbe tipi özellikler gösterdiği gözlenmiştir.

Uzun açıklıklı köprülerde yer hareketinin sonlu hızla yayılmasına bağlı olarak köprü mesnetleri farklı yer hareketine maruz kalmakta ve bu nedenle de bütün mesnet noktalarına üniform olarak uygulanan yer hareketine göre farklı yapısal davranışlara neden olmaktadır. Dolayısı ile yapısal sistemin bütün mesnet noktalarına aynı yer hareketinin aynı anda uygulanması pek gerçekçi değildir. Değişerek yayılan yer hareketinin kablo destekli köprü sistemleri üzerindeki etkileri konusunda daha önce gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir kısmı uzak fay yer hareketleri dikkate alınarak yapılmıştır. Ancak son yıllarda meydana gelen Northridge, Kobe ve Chi-Chi gibi depremler ile yer hareketindeki değişim ile yakın fay etkilerinin bir arada etkimesinden dolayı uzun açıklıklı köprü sistemlerinde önemli sismik taleplerin ortaya çıkabileceği gözlenmiştir [2]. Bu bakımdan deprem hareketindeki değişim ve yakın fay etkileri uzun açıklıklı kablo destekli köprülerin dinamik analizinde dikkate alınması gereken etkenlerdir.

Darbe etkili yakın fay yer hareketi etkisindeki sürekli kırışlardan oluşan karayolu köprüleri üzerine daha önce yapılan çalışmalarda, yakın fay yer hareketinin uzak fay yer hareketine göre daha fazla süneklik talebi ortaya çıkardığı ve taban kesme kuvvetlerini yaklaşık 1.5-2 kat arttırdığı gösterilmiştir (Liao vd. [3]). Jalali vd. [4], faya yakın bölgelerde meydana gelen darbe etkili yakın fay yer hareketi etkisindeki bir karayolu köprüsünü incelemişler ve çalışma sonucunda köprü ayakları ile tabiiye arasındaki kuvvetlerin artan dalga yayılma hızı ile birlikte genelde azaldığını göstermişlerdir. Daha çok son yirmi yılda kaydedilen sınırlı sayıdaki yakın fay yer hareketi kayıtları dikkate alınarak kablo destekli köprülerin incelendiği aşağıda belirtilen çalışmalar gerçekleştirilmiş olmasına rağmen bu tür köprü sistemlerinin yakın fay yer hareketi etkisi altındaki davranışları, daha fazla yakın fay yer hareketi dikkate alınarak daha kapsamlı bir şekilde incelenmelidir. McCallen vd. [5], uzun periyotlu yakın fay yer hareketinin asma köprüler üzerindeki etkisini incelemişler ve düşük frekans dalga biçimli yakın alan hareketlerinin asma köprüler üzerinde önemli talepler doğurduğu sonucuna ulaşmışlardır. Jia ve Ou [6] darbeli yakın fay yer hareketinin eğik kablo askılı köprüler üzerindeki etkisini incelemişler ve darbe tipi yakın fay yer hareketinin büyük hakim periyotlu

mühendislik yapılarına hasar verme potansiyelinin daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Shrestha ve Tuladhar [7] ve Shrestha [8] aktif fay bölgesine yakın konumda olan eğik kablo askılı bir köprünün yapısal davranışına düşey yer hareketinin göreceli etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda düşey yer hareketinin kablo ve kulelerdeki eksenel kuvvetler üzerinde fazla bir etkisinin olmadığını göstermişlerdir. Ayrıca Shrestha ve Tuladhar [7], ileri yönelme etkili yakın fay yer hareketinin, özellikle hız-zaman grafiğinde gözlenen darbe etkisine ait periyot ile çelik köprü kulesinin periyodunun uyumlu olması durumunda, köprü sistemi üzerinde yıkıcı etkilerin ortaya çıkabileceğini vurgulamışlardır. Adanur vd. [9], 1999 Chi-Chi, 1999 Kocaeli ve 1979 Imperial Valley yakın fay kayıtlarının asma köprü sistemleri üzerindeki etkisini incelemişler ve yakın fay yer hareketinin özellikle köprü tabiiyesinde elde edilen yer değiştirme ve iç kuvvetlerde uzak fay yer hareketine oranla 6-7 kata kadar varan artışlara neden olduğunu göstermişlerdir. İsmail vd. [10] eğik kablo askılı köprü modeli üzerindeki izolasyon sisteminin yakın fay sismik performansını incelemişler ve yakın fay yer hareketine karşı eğik kablo askılı köprüleri koruma amaçlı olarak kullanılan izolasyon sisteminin uygunluğunu göstermişlerdir. Li vd. [11] eğik kablo askılı bir köprünün sismik analizini yakın-fay etkileri yanında yapı-zemin etkileşimini de dikkate alarak gerçekleştirmişler ve çalışma sonucunda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmamasının köprü yer değiştirmelerinin daha küçük bulunmasına neden olacağını ortaya koymuşlardır. Bunun yanında ileri yönelme etkisi için elde edilen köprü tepkilerinin geri yönelme etkisi ve nötr yönelme etkisi için elde edilen tepkilerden daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Soyuluk ve Karaca [12] merkez açıklık uzunlukları birbirine yakın olan eğik kablo askılı ve asma köprü sistemlerini dikkate alarak, yakın fay ve uzak fay yer hareketinin köprülerin davranışı üzerindeki etkisini incelemişler ve darbe-etkili yakın fay etkilerinin asma köprülerde eğik kablo askılı köprülere oranla daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Karaca ve Soyuluk [13] yapmış oldukları bir başka çalışmada 1995 Kobe, 1999 Chi-Chi, 1999 Kocaeli ve 1999 Düzce depremlerinde gözlenen yakın fay etkilerinin eğik kablo askılı köprülerin dinamik tepkileri üzerindeki etkilerini kapsamlı olarak ele almışlar ve çalışma sonucunda özellikle darbe etkili yakın fay yer hareketinin eğik kablo askılı köprüler üzerinde önemli etkilerinin olduğunu ortaya koymuşlardır. Guan vd. [14] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada yakın fay yer hareketi etkisindeki eğik kablo askılı köprüler için kullanılabilir bir izolator sistemi geliştirmişler ve bunun yanında ankraj bölgelerinde meydana gelebilecek bozulmalar için yeni bir ankraj tasarımı önermişlerdir.

Son zamanlarda yakın fay yer hareketi etkisindeki uzun açıklıklı köprülerin dinamik davranışlarını belirlemek için birtakım çalışmalar yürütülmüş olmasına rağmen, yakın fay etkileri ile yayılan dalga etkilerinin birlikte dikkate alındığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Yan ve Lee [15], yakın fay

yer hareketi etkisindeki bir çelik kemer köprü sistemini deprem hareketinin yayılma hızını da dikkate alarak incelemişlerdir. Ayrıca yakın fay yer hareketinin sıçrama etkisini ve uzun periyotlu darbe etkisini dikkate alarak, kemer köprüler üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Yasrebi and Ghafory-Ashtiany [2] üniform ve asinkronize yer hareketi etkisindeki üç açıklıklı bir köprü sistemini yakın fay ve uzak fay yer hareketleri için incelemişler ve darbe etkili yakın fay yer hareketinin sonlu hızla yayılması durumunda ortaya çıkan sismik tepkilerin uzak fay etkisine göre daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Liu and Zhang [16], sonlu yayılma hızının dikkate alındığı yakın fay yer hareketi etkisindeki uzun açıklıklı kemer köprüleri ele almışlar ve yapısal hasarların dalga yayılma etkisi ile birlikte arttığını ve bu artışın yakın fay yer hareketi için daha da belirgin olduğunu göstermişlerdir. Karaca [17], Karaca ve Soyluk [18] yapmış oldukları çalışmalarda deprem hareketinin değişimini tanımlayan etkenlerden biri olan sonlu yayılma hızı ve yakın fay etkilerinin kablo-destekli köprülerin yapısal tepkileri üzerindeki etkilerini ele almışlar ve yakın fay yer hareketinin ve dalga yayılma etkisinin söz konusu köprü sistemler üzerinde önemli etkilerinin olabileceğini belirtmişlerdir. Son zamanlarda yapılan diğer bir çalışmada Yılmaz ve Soyluk [19], sonlu dalga yayılma hızı ile yayılan yakın fay yer hareketi etkisindeki çelik kemer köprüleri ele almışlar ve çalışma sonucunda dalga yayılma hızının, yönelme etkisi gösteren darbe etkili yakın fay hareketi için elde edilen köprü tepkilerinden ziyade daha çok sıçrama etkili yakın fay hareketi için elde edilen köprü tepkileri üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir.

Köprü endüstrisinde son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelerle eğik kablo askılı köprüler, asma köprülerle yarışabilecek şekilde daha büyük açıklıklar için kullanılmaya başlanmıştır. Eğik kablo askılı köprülerin artan merkez açıklıkları, 1000 m'ye varan merkez açıklıklar için kullanılan köprü tipinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır.

Uzun hakim periyotlara sahip bu tür köprü sistemleri, fay hattına yakın kaydedilen yer hareketleri ile yapı sisteminin mesnet noktalarına farklı zamanlarda etkiyen deprem dalgalarına hassas olabileceği için bu çalışmada yakın merkez açıklık uzunluğuna sahip bir eğik kablo askılı köprü ve bir asma köprü sistemi, asinkronize etkiler altında yakın fay ve uzak fay yer hareketi etkileri için incelenmiş ve sismik tepkileri karşılaştırılmıştır. Yer hareketinin sonlu hızla yayılmasına bağlı olarak yer hareketi değişiminin köprü sistemleri üzerindeki etkilerini yakın fay etkisini de dikkate alarak belirlemek amacıyla Chi-Chi Depremi'ne ait kayıtlar kullanılmış ve dikkate alınan köprü sistemlerinin üç boyutlu dinamik analizi yapılmıştır.

2. SEÇİLEN YER HAREKETLERİ (INPUT GROUND MOTIONS)

Yakın fay bölgelerindeki yer hareketleri; fayın kırılma mekanizmasından, fay kırığının bölgeye göre olan göreceli yayılma doğrultusundan ve tektonik hareket sonucu

meydana gelen kalıcı yer değiştirmelerden önemli derecede etkilenmekte ve bunun sonucunda “yönelme etkisi” ve “sıçrama etkisi” ortaya çıkmaktadır [20]. Yönelme etkisi kalıcı statik yer değiştirme meydana getirmeyen ve dolayısıyla iki yönlü hız darbeleri içeren dinamik bir etki iken, sıçrama etkisi tek yönlü hız darbelerine neden olan kalıcı zemin yer değiştirmeleri sonucu ortaya çıkmaktadır [1]. Bu çalışmada kablo destekli köprülerin yakın fay yer hareketi etkisi altındaki sismik tepkilerini belirlemek için darbe etkisinin gözlemlendiği “yönelme etkisi” dikkate alınmıştır.

Uzun açıklıklı köprü sistemlerinde zeminle etkileşimde olan mesnet sayısı göreceli olarak fazla sayıda olduğundan, bu sistemler zeminde meydana gelen farklı yer değiştirme hareketinden önemli derecede etkilenmektedir. Söz konusu bu farklı yer değiştirmeler zeminde meydana gelen hem dinamik hem de statik yer değiştirmelerden kaynaklanabilmektedir. Bu durumda yakın fay bölgesindeki köprü ayaklarında farklı zemin yer değiştirmelerine neden olabilecek sismik etkilerin aşağıdaki gibi tanımlanması mümkündür [21]:

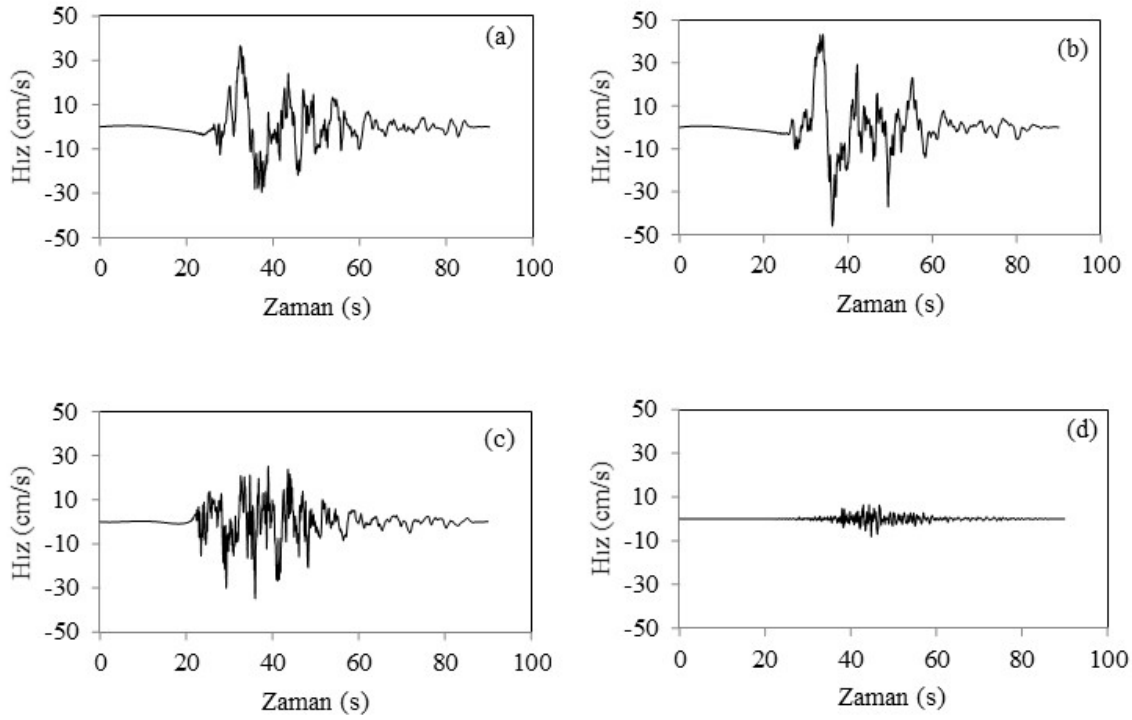
- Sismik dalgalar nedeniyle mesnetler arasında meydana gelebilecek farklı dinamik yer değiştirme bileşenleri. Deprem hareketinin sonlu yayılma hızına bağlı olarak ortaya çıkan dalga yayılma etkisi bu kapsamda ortaya çıkan bir etkidir [22].
- Statik alan yer değiştirmesi nedeniyle mesnetler arasında meydana gelebilecek kalıcı karakterdeki farklı yer değiştirme bileşenleri.

Bir deprem hareketinin yakın fay yer hareketi olarak tanımlanabilmesi için (Liao vd. [23]);

- Deprem kayıt istasyonunun faya uzaklığı 10 km'den küçük olmalıdır.
- Deprem kayıtlarının hız-zaman grafiklerinde gözlenen darbe süresi 1-2 saniyeden büyük olmalıdır.
- Maksimum yer hızının, maksimum yer ivmesine oranı (PGV/PGA) 0,1 saniyeden büyük olmalıdır.

Yer hareketinin sonlu hızla yayılmasına bağlı olarak yer hareketi değişiminin kablo-destekli köprü sistemleri üzerindeki etkilerini yakın fay etkisini de dikkate alarak belirlemek amacıyla Chi-Chi Depremi'ne ait kayıtlar kullanılmıştır. Chi-Chi Depremi dikkate alınarak yapılan analizlerde yakın fay darbeli deprem kaydı bileşenleri TCU050 ve TCU054, yakın fay darbesiz deprem kaydı TCU089 ve uzak fay deprem kaydı HWA032 dikkate alınmıştır (Şekil 1-Şekil 3). Bu çalışmada kullanılan Chi-Chi deprem kayıtlarına ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 1-Şekil 3'den görüleceği üzere, darbe tipi yakın fay yer hareketi için darbe süresi genel olarak 5 s'den büyüktür. Yakın fay yer hareketleri için maksimum yer hızının (PGV) maksimum yer ivmesine oranı (PGA) 0,1 s'den büyüktür ve kayıt istasyonlarının deprem fayından uzaklığı 10 km'den



Şekil 1. Dikkate alınan yer hareketi bileşenleri için doğu-batı hız-zaman grafikleri a) TCU050-EW b) TCU054-EW c) TCU089-EW d) HWA032-EW (PEER Ground Motion Database [24])
(East-west velocity time histories for the considered ground motion components a) TCU050-EW b) TCU054-EW c) TCU089-EW d) HWA032-EW)

küçüktür. Yakın fay ve uzak fay yer hareketlerini uygun bir şekilde karşılaştırabilmek için zaman tanım alanındaki deprem ivme kayıtlarının (TCU050, TCU054, TCU089 ve HWA032) enine, boyuna ve düşey yer hareketi bileşenleri sırasıyla 0,35g, 0,35g, 0,20g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir (Karaca [17]).

3. ASİNKRONİZE DİNAMİK ANALİZ FORMÜLASYONU (THEORETICAL FORMULATION OF ASYNCHRONOUS EXCITATION)

Bilindiği gibi deprem hareketinin kaynağından itibaren yayılması esnasındaki değişim genellikle dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve zemin etkisi parametrelerine bağlı olarak tanımlanmaktadır. Dalga yayılma etkisi deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşmaya kadar geçen zaman farkından kaynaklanırken, korelasyon etkisi deprem hareketinin düzgün olmayan faylar boyunca çok değişik kaymalar sonucunda meydana gelmesi ve ortaya çıkan yer değiştirme dalgalarının rastgele sayılabilecek sayısız yansıma ve kırılmadan geçmesi ile açıklanmaktadır. Zemin etkisi ise mesnet noktalarındaki yerel zemin koşullarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada deprem hareketindeki değişimi tanımlayan parametrelerden biri olan dalga yayılma etkisi bir başka ifadeyle asinkronize yer hareketi etkisi dikkate alınmıştır.

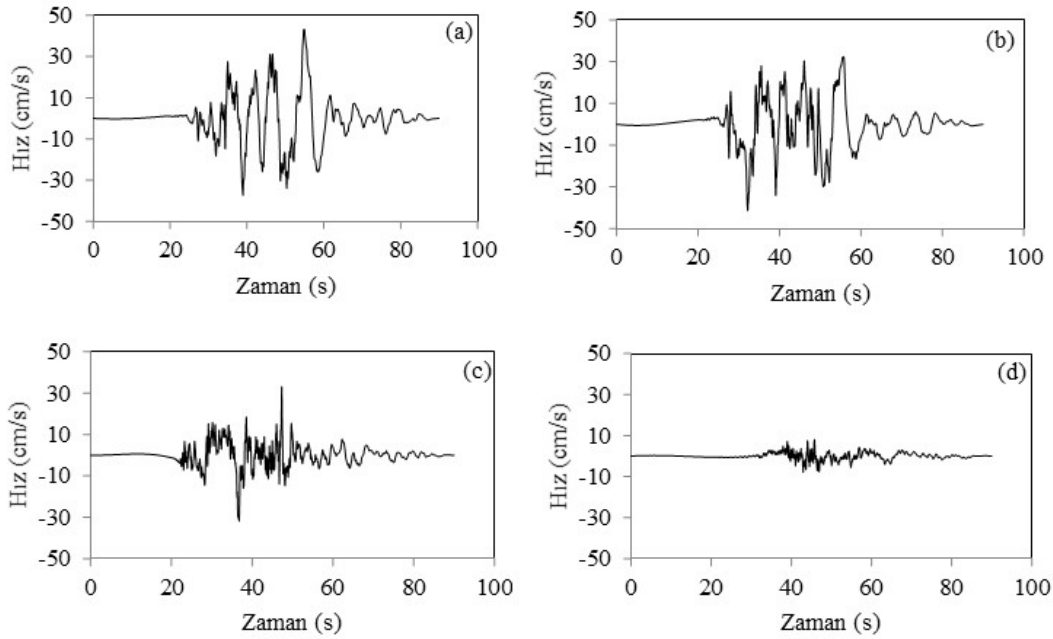
Yer hareketinin sonlu hızla yayılması, dinamik yer değiştirmelere ek olarak zahiri-statik yer değiştirmelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dinamik yer değiştirmeler atalet kuvvetlerinden kaynaklanırken, zahiri-statik yer değiştirmeler mesnet noktalarının farklı hareketinden kaynaklanmaktadır. Ayrıntılı formülasyon farklı kaynaklarda verildiğinden [25], burada sadece nihai denklemlere yer verilmiştir. Zahiri-statik ve dinamik bileşenlere bağlı olmak üzere toplam tepki Eş. 1'deki gibi yazılmaktadır.

$$u(t) = \sum_j r_j u_{jg}(\tau_j, t) + \sum_i \varphi_i Y_i(t) \quad (1)$$

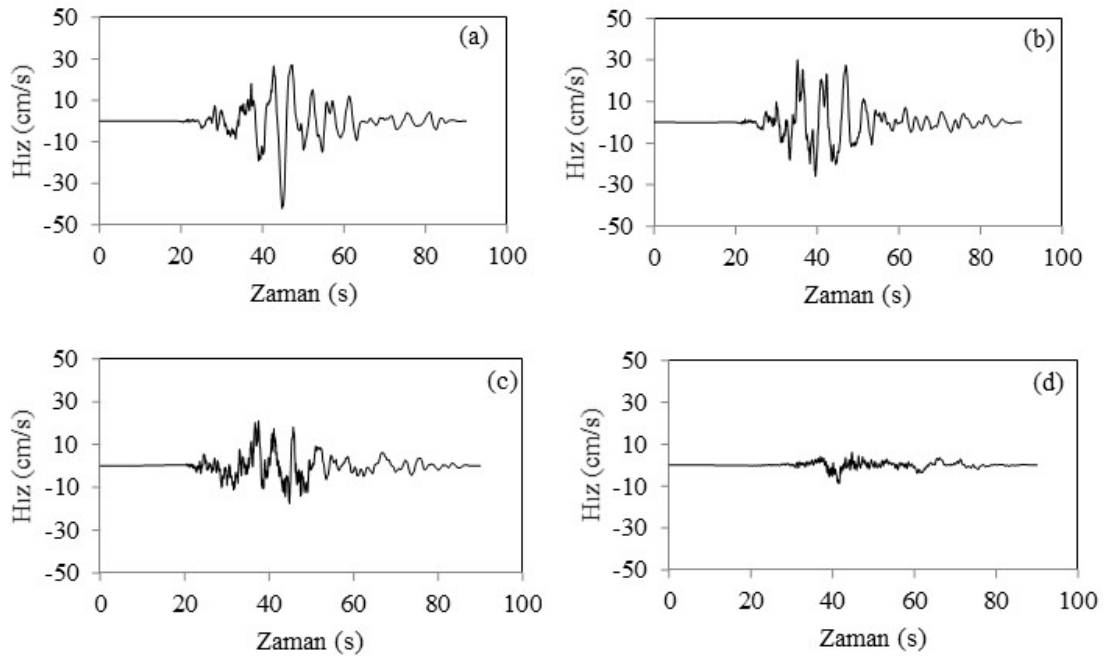
Burada r_j , j zemin serbestlik derecesine uygulanan birim yer değiştirmeden dolayı meydana gelen şekil fonksiyonunu, u_{jg} , j serbestlik derecesine karşılık gelen zemin yer değiştirmesini, τ_j , yer hareketinin belirli bir j mesnet noktasına ulaşma zamanını, φ_i , i . modal vektörü ve Y_i , i . mod için modal genliği göstermektedir.

Bu durumda yapısal sistemdeki iç kuvvetler Eş. 1 ile ilgili eleman rijitlik matrisinin çarpılmasıyla hesaplanmaktadır.(Eş. 2)

$$\{p\} = [K]\{u\} \quad (2)$$



Şekil 2. Dikkate alınan yer hareketi bileşenleri için kuzey-güney hız-zaman grafikleri a) TCU050-NS b) TCU054-NS c) TCU089-NS d) HWA032-NS (PEER Ground Motion Database [24])
(North-south velocity time histories for the considered ground motion components a) TCU050-NS b) TCU054-NS c) TCU089-NS d) HWA032-NS)



Şekil 3. Dikkate alınan yer hareketi bileşenleri için dikey doğrultudaki hız-zaman grafikleri a) TCU050-V b) TCU054-V c) TCU089-V d) HWA032-V (PEER Ground Motion Database [24])
(Vertical velocity time histories for the considered ground motion components a) TCU050-V b) TCU054-V c) TCU089-V d) HWA032-V)

4. KABLO DESTEKLİ KÖPRÜLERİN SONLU ELEMAN MODELLERİ (FINITE ELEMENT MODELS OF CABLE-SUPPORTED BRIDGES)

Bu çalışmada, eğik kablo askılı köprü modeli olarak Japonya’da inşa edilen Tatara Eğik Kablo Askılı Köprüsü, asma köprü modeli olarak da Türkiye’de inşa edilen Fatih Sultan Mehmet Köprüsü dikkate alınmıştır. Tatara Köprüsü’nün merkez açıklığı 890 m ve toplam uzunluğu 1480 m iken, Türkiye’deki Avrupa ve Asya kıtalarını birleştiren Fatih Sultan Mehmet Köprüsü’nün merkez açıklığı 1090 m’dir.

4.1. Asma Köprü Modeli (Suspension Bridge Model)

Fatih Sultan Mehmet Köprüsü (FSM), ağırlık ankrajlı, kenar açıklığı olmayan, çelik kuleleri ve ikili olarak düzenlenmiş düşey askıları olan bir asma köprüdür. Çelik kulelerin yer seviyesinden yüksekliği 110 m’dir. Askıda olan çelik tabliye ortotropik, berkitmeli panellerden oluşan aerodinamik en kesitli kapalı kutu biçimindedir. FSM Köprüsü’nün gerçekçi deprem analizi için üç boyutlu bir analitik model dikkate alınmıştır (Şekil 4). Köprünün sonlu eleman modelinde köprü tabliyesi, kuleler ve kablolar çubuk elemanlarla

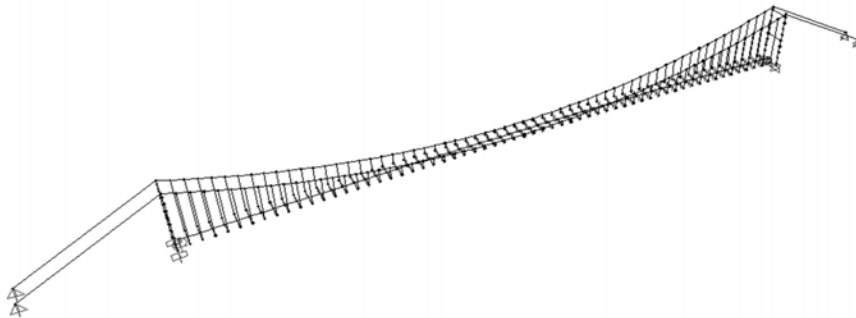
modellenirken askılar kafes elemanlarla modellenmiştir. Köprü modelinin sonlu eleman modeli 346 düğüm noktası, 227 çubuk elemanı, 120 rijit bağlantı elemanı ve 120 kablo elemanından oluşmaktadır. Tabliye, tabliye enkesitinin orta noktasından geçen eksen üzerinde tanımlandığı için tabliye geometrisi rijit bağlantı elemanları vasıtasıyla modellenmiştir.

Rijit bağlantı elemanları, tabliye ve askılar arasındaki bağlantıyı sağlamak üzere kullanılmıştır. Söz konusu kütleli bağlantı elemanları, rijit cisim davranışını sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Seçilen sonlu eleman modeli 2048 serbestlik dereceli sistem olarak tanımlanmış ve hesaplarda sönüm oranı %2 olarak dikkate alınmıştır. Gergi halatı, ana kablo, askılar ve kuleler için köprü ağırlığından kaynaklanan P-delta etkileri tanımlanarak ([26]) köprü sisteminin geometrik açıdan lineer olmayan analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada dikkate alınan analitik model için elde edilen köprü frekans değerleri Tablo 2’de, frekansların daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen frekans değerleri ile karşılaştırılması Tablo 3’de verilmiştir. Köprü frekans değerleri arasında küçük farklılıklar gözlenmekle birlikte, elde edilen sonuçlar dikkate alınan analitik modelin uygunluğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Chi-Chi deprem kaydına ait yer hareketi bileşenlerinin özellikleri
(Parameters of the selected ground motion components of Chi-Chi earthquake)

Deprem Kaydı	Kayıt Karakteristiği	Mw	d (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV/PGA (s)	Tp (s)
TCU050, EW	Darbe Etkili Yakın Fay	7,62	9,49	0,14	36,67	0,27	7,7
TCU050, NS	Darbe Etkili Yakın Fay	7,62	9,49	0,13	43,28	0,34	7,8
TCU050, V	Darbe Etkili Yakın Fay	7,62	9,49	0,09	42,14	0,48	4,7
TCU054, EW	Darbe Etkili Yakın Fay	7,62	5,28	0,15	46	0,31	9,2
TCU054, NS	Darbe Etkili Yakın Fay	7,62	5,28	0,19	41,4	0,22	5,8
TCU054, V	Darbe Etkili Yakın Fay	7,62	5,28	0,13	30,13	0,24	5,7
TCU089, EW	Darbe Etkisiz Yakın Fay	7,62	9	0,35	34,97	0,1	Darbesiz
TCU089, NS	Darbe Etkisiz Yakın Fay	7,62	9	0,23	33,13	0,15	Darbesiz
TCU089, V	Darbe Etkisiz Yakın Fay	7,62	9	0,19	21,02	0,11	Darbesiz
HWA032, EW	Uzak Fay	7,62	47,31	0,15	8,2	0,06	Darbesiz
HWA032, NS	Uzak Fay	7,62	47,31	0,11	8,17	0,08	Darbesiz
HWA032, V	Uzak Fay	7,62	47,31	0,09	8,71	0,1	Darbesiz



Şekil 4. Fatih Sultan Mehmet (FSM) köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli
(Three dimensional finite element model of Fatih Sultan Mehmet (FSM) Bridge)

Tablo 2. Fatih Sultan Mehmet Köprüsüne ait hesaplanan doğal frekanslar
(Calculated natural vibration frequencies of Fatih Sultan Mehmet Bridge)

Mod No	Mod Şekli	(Frekans, Hz)
1	1. yatay simetrik	0,070
2	1. düşey asimetrik	0,100
3	1. düşey simetrik	0,128
4	2. düşey simetrik	0,130
5	1. burulma simetrik	0,176
6	2. düşey asimetrik	0,186
7	1. burulma asimetrik	0,187
8	1. yatay asimetrik	0,226
9	3. düşey simetrik	0,289
10	1. kablo (zıt fazlı) simetrik	0,295

4.2. Eğik-Kablo Askılı Köprü Modeli (Cable-Stayed Bridge Model)

Merkez açıklığı 890 m olan Tatar Köprüsü'nün toplam uzunluğu 1480 m'dir ve kenar açıklıkları 270 m ve 320 m'dir. Köprü uzunluğu boyunca 1312 m'lik tabliye kesiti çelikten oluşmaktadır. Negatif reaksiyonları önlemek amacıyla 105,5 m ve 62,5 m'lik kenar açıklık kesitlerinde ön gerilmeli beton kullanılmıştır. Ana kule yüksekliği 220 m'dir ve ters Y şeklinde tasarlanmıştır. Sonlu eleman analizinde üç

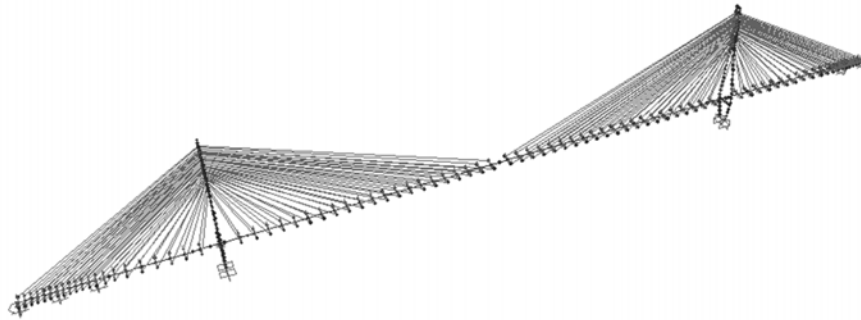
boyutlu analitik model dikkate alınmıştır (Şekil 5). Sonlu eleman modelinde 450 düğüm noktası, 283 çubuk elemanı, 168 kafes elemanı ve 168 rijit bağlantı elemanı kullanılmıştır. Köprü tabliyesi ve kuleleri çubuk elemanlarla tanımlanırken, kablolar kafes elemanlarla tanımlanmıştır. Kutu kesitli tabliye, tabliyenin ortasından geçen eşdeğer kiriş elemanı ile modellenmiştir. Tabliyenin her bir kablo bağlantı noktasında, kabloların tabliye merkezinden olan mesafelerini uygun şekilde dikkate alabilmek amacıyla, tabliye eksenine dik olacak şekilde yatay yönde rijit bağlantı elemanları yerleştirilmiştir. Eşdeğer kiriş elemanları ve rijit bağlantı elemanlarının asıl görevi rijitlik sağlamak olduğundan kütsüz olarak modellenmiştir. Tabliyenin kütlesi her bir rijit bağlantı elemanının dış uç noktasında toplanmıştır. Rijit bağlantı elemanları aynı zamanda tabliye çubuk elemanları ile kule çubuk elemanlarının birleşim noktalarında da kullanılmıştır. Eşdeğer elastisite modülü kullanılarak kabloların doğrusal olmayan davranışları da göz önünde bulundurulmuştur [31].

5. SAYISAL ÇÖZÜMLEME (NUMERICAL ANALYSIS)

Bu çalışmada yakın-fay ve uzak-fay yer hareketlerinin, merkez açıklıkları yakın ve asinkronize yer hareketi etkisindeki asma ve eğik kablo askılı köprülerin dinamik

Tablo 3. Fatih Sultan Mehmet Köprüsüne ait doğal frekansların önceki çalışmalarla karşılaştırılması
(Comparison of natural vibration frequencies of Fatih Sultan Mehmet Bridge with the previous studies)

Mod Numarası	Apaydın [27] (Frekans, Hz)	Dumanoğlu vd. [28] (Frekans, Hz)	Apaydın [29] (Frekans, Hz)	Apaydın vd. [30] (Frekans, Hz)	Mevcut Çalışma (Frekans, Hz)
1	0,074	0,076	0,069	0,066	0,070
2	0,111	0,108	0,100	0,098	0,100
3	0,155	0,125	0,148	0,148	0,128
4	0,159	0,145	0,156	0,152	0,130
5	0,217	0,159	0,207	0,192	0,176
6	0,220	0,211	0,221	-	0,186
7	0,253	0,232	0,237	-	0,187
8	0,276	0,243	0,251	-	0,226
9	0,278	0,250	0,262	-	0,289
10	0,288	0,266	0,270	-	0,295



Şekil 5. Tatar köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli (Three dimensional finite element model of Tatar Bridge)

tepkileri üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Köprü sistemlerinin üç boyutlu sonlu eleman modelleri, yakın fay ve uzak fay için seçilen Chi-Chi TCU050, TCU054, TCU089, HWA032 deprem kayıtlarının her birinin üç bileşeni dikkate alınarak zaman tanım alanında çözümlenmiştir. Bu deprem kayıtları için deprem hareketi yayılma hızının zemin durumuna göre değişim gösteren farklı değerleri kullanılarak kule yüksekliği ve köprü açıklığı boyunca yakın fay ve uzak fay etkileri için elde edilen yapısal tepkilerin değişimleri, üniform ve asinkronize dinamik analiz için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her bir deprem kaydı, düşey doğrultuda bir ve yatay doğrultuda ortogonal iki bileşenden oluşacak şekilde köprü sistemine uygulanmıştır. Dikkate alınan yer hareketleri, deprem hareketinin köprü sistemlerinin uzunlamasına doğrultusunda yayıldığı kabul edilerek, deprem hareketinin yayılma hızına bağlı olarak köprü sistemlerinin mesnet noktalarına gecikmeli olarak etki ettirilmiştir. Örneğin, Chi-Chi depremi darbe etkili yakın fay yer hareketi kaydı TCU050 bileşeninin 1000 m/s dalga yayılma hızı ile hareket ettiğinin kabul edildiği durumda, söz konusu yer hareketi bileşenine ait ivme-zaman kayıtları eğik kablo askılı Tatar Köprüsü'nün köprü eksenine doğrultusunda 0, 270 m, 1160 m ve 1480 m mesafede bulunan köprü mesnetlerine sırasıyla 0, 0,27 s, 1,16 s ve 1,48 s'lik zaman farkı ile uygulanmıştır. Sayısal hesaplamalar için SAP4 [32] yapısal analiz programının geliştirilmesi ile elde edilen MULSAP programı kullanılmıştır.

5.1. Sonlu Yayılma Hızı (Asinkronize Etki) için Kablo-Destekli Köprülerin Dinamik Analizi

(Dynamic Analysis of Cable-Supported Bridges for Travelling Wave Effect (Asynchronous Excitation))

Deprem hareketi yayılma hızları zemin koşullarına bağlı olarak farklılık gösterdiğinden, bu çalışmada üniform ve asinkronize yer hareketi için dikkate alınan köprü sistemlerinin dinamik tepkilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Yer hareketinin iki farklı bölge arasındaki değişimi, esas olarak görünen dalga yayılma hızına (V_{app}) bağlı olarak belirlenmektedir. V_{app} , sismik dalgaların bölgeye gelişi açısına ve zemin koşullarına bağlıdır. Deprem kayıtlarının incelenmesi neticesinde dalga yayılma hızı V_{app} 'nin frekansa bağlı ve oldukça karmaşık olduğu görülmüştür. Ancak gelen sismik dalgaların esas olarak S dalgalarından oluştuğu kabul edilebilir ki bu durumda V_{app} 'nin alt sınırı bölgenin kayma dalgası hızına (V_s) ve üst sınırı sonsuz dalga yayılma hızına eşit olmaktadır [2, 33]. Bu çalışmada $V_s = V_{app}$ olduğu kabul edilmiş ve zemin cinsine bağlı olarak deprem hareketi yayılma hızları için $V_{app} = 250$ m/s, $V_{app} = 1000$ m/s, $V_{app} = 2000$ m/s ve $V_{app} =$ Sonsuz hız değerleri kullanılmıştır. Deprem hareketinin sonlu yayılma hızı dikkate alınarak çözüm yapılırken, Eş. 1 ile de gösterildiği gibi deprem hareketi köprü sistemlerinin mesnet noktalarına, mesnetler arasındaki mesafeye ve dalga yayılma hızına bağlı olarak belirlenen farklı varış zamanları ile uygulanmıştır.

5.1.1. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün dalga yayılma etkisi için dinamik analizi

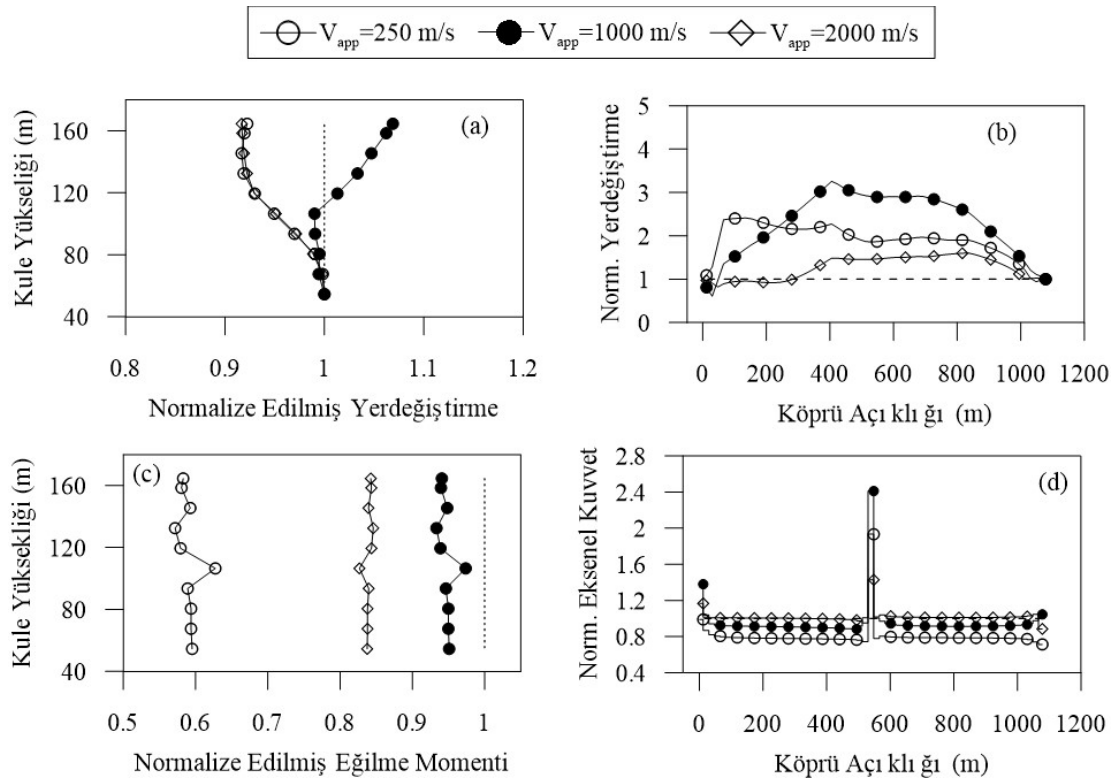
(Dynamic analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge for travelling wave effect)

$V_{app} = 250$ m/s, $V_{app} = 1000$ m/s, $V_{app} = 2000$ m/s ve $V_{app} =$ Sonsuz deprem hareketi yayılma hız değerleri için Chi-Chi Depremi yakın fay darbeli yer hareketi kaydı TCU050 dikkate alınarak gerçekleştirilen dinamik analiz sonucu elde edilen asma köprü tepkileri burada karşılaştırılmıştır. Dikkate alınan dalga yayılma hızları için köprü tabliyesi ve kulesinde elde edilen yapısal tepkiler, dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen tepki değerlerine göre normalize edilmiştir.

Şekil 6a'da köprü kule yüksekliği boyunca elde edilen normalize edilmiş yatay kule yer değiştirmeleri karşılaştırılmaktadır. $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için kule tepe noktasında elde edilen yer değiştirmeleri, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen yer değiştirme değerinden sırasıyla 0,922, 1,069 ve 0,917 kez daha büyük yer değiştirmelere neden olmuştur. Şekil 6a'da görüleceği üzere 1000 m/s sonlu yayılma hızı için ortaya çıkan sismik talepler, diğer dalga yayılma hızları için elde edilenlerden daha büyük çıkmıştır. Kule yatay yer değiştirmeleri için elde edilen sonuçlar, deprem hareketi yayılma hızına bağlı olarak düzenli bir değişimin ortaya çıkmadığını göstermektedir.

Şekil 6b'de köprü açıklığı boyunca elde edilen normalize edilmiş düşey yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için tabliye orta noktasında elde edilen yer değiştirmeleri, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen yer değiştirme değerinden sırasıyla 1,87 2,9 ve 1,47 kez daha büyük yer değiştirmelere neden olmuştur. Yatay kule yer değiştirmeleri için elde edildiği gibi tabliyede de 1000 m/s deprem dalgası yayılma hızının köprü davranışı üzerindeki etkisi diğer deprem dalgası yayılma hızlarına göre daha büyük olmuştur. Bunun yanında deprem dalgası yayılma hızının artması ile birlikte tabliye açıklığındaki düşey yer değiştirmelerin genel olarak azaldığı gözlenmiştir.

Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değişimi Şekil 6c'de verilmiş olup, $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için kule taban noktasında elde edilen eğilme momentleri, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen eğilme momenti değerinden sırasıyla 0,60, 0,95 ve 0,84 kez daha büyük moment değerlerine neden olmuştur. Kule eğilme momentlerinin deprem hareketinin yayılma hızındaki artışla birlikte genel olarak arttığı görülmektedir. En büyük eğilme momentleri yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilirken, en küçük eğilme momentleri $V_{app}=250$ m/s deprem dalgası yayılma hızı için elde edilmiştir.



Şekil 6. Sonlu dalga yayılma hızları için FSM köprü tepkileri a) Kule yatay yer değiştirmeleri b) Tabliye düşey yer değiştirmeleri c) Kule eğilme momentleri d) Tabliye eksenel kuvvetleri (FSM bridge responses for travelling wave effect a) Horizontal tower displacements b) Vertical deck displacements c) Tower bending moments d) Deck axial forces)

Şekil 6d'de tabliye açıklığı boyunca elde edilen eksenel kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için maksimum eksenel kuvvetin elde edildiği tabliye noktasında ($x=370,0$ m) elde edilen eksenel kuvvetler, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen eksenel kuvvet değerinden sırasıyla 0,77, 0,9 ve 1,0 kez daha büyük eksenel kuvvet değerlerine neden olmuştur. En büyük eksenel kuvvetler genel olarak yer hareketi yayılma hızının 2000 m/s olması durumunda elde edilirken, en küçük eksenel kuvvetler $V_{app}=250$ m/s deprem dalgası yayılma hızı için elde edilmiştir.

Şekillerden anlaşılacağı üzere, dalga yayılma hızının yapısal tepkiler üzerinde oldukça karmaşık bir etkisi vardır ve dikkate alınan dalga yayılma hızına ve yapısal tepkiye bağlı olarak sismik tepkileri arttırabilmekte veya azaltabilmektedir.

5.1.2. Tatar Köprüsü'nün dalga yayılma etkisi için dinamik analizi

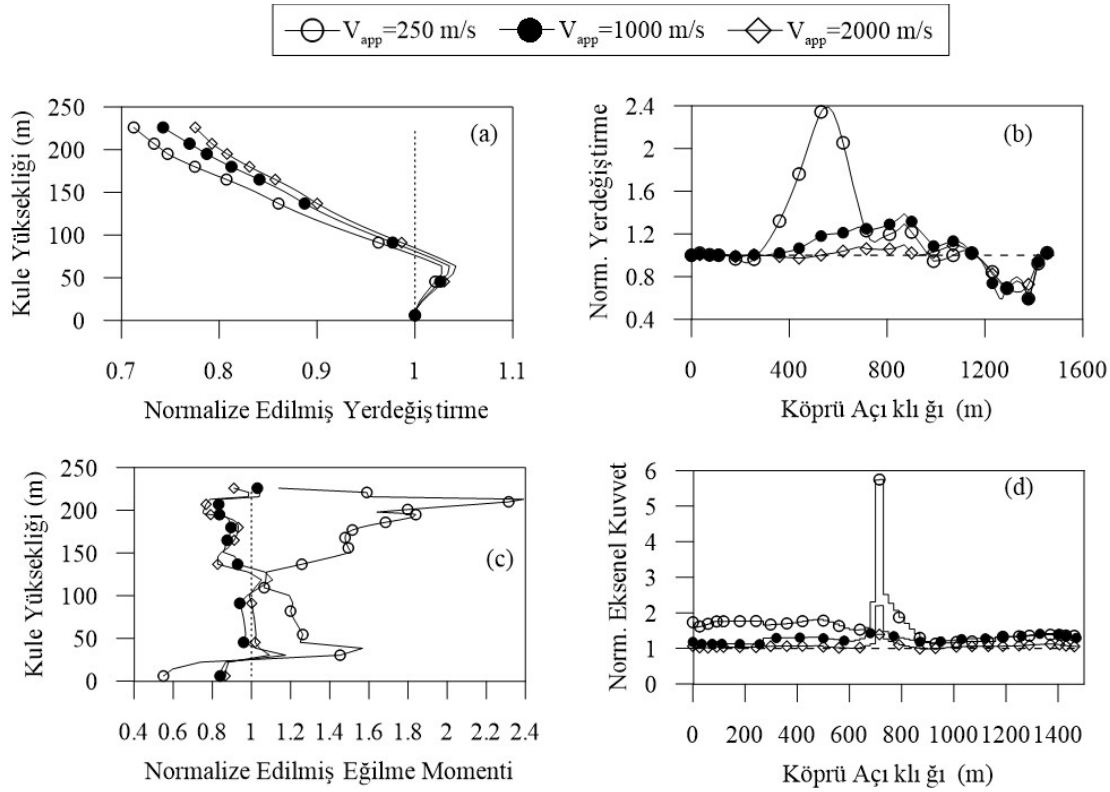
(Dynamic analysis of Tatar Cable-Stayed Bridge for travelling wave effect)

$V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s, $V_{app}=2000$ m/s ve $V_{app}=\infty$ Sonsuz deprem hareketi yayılma hız değerleri için Chi-Chi Depremi yakın fay darbeleri yer hareketi kaydı TCU050

dikkate alınarak gerçekleştirilen dinamik analiz sonucu elde edilen eğik kablo askılı köprü tepkileri burada karşılaştırılmıştır. Dikkate alınan dalga yayılma hızları için köprü tabliyesi ve kulesinde elde edilen yapısal tepkiler, dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen tepki değerlerine göre normalize edilmiştir.

Şekil 7a'da köprü kule yüksekliği boyunca elde edilen normalize edilmiş yatay kule yer değiştirmeleri karşılaştırılmaktadır. $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için kule tepe noktasında elde edilen yer değiştirmeler, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen yer değiştirme değerinden sırasıyla 0,71, 0,74 ve 0,78 kez daha büyük yer değiştirmelere neden olmuştur. En büyük yer değiştirmeler yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilirken, en küçük yer değiştirmeler $V_{app}=250$ m/s deprem dalgası yayılma hızı için elde edilmiştir. Kule yatay yer değiştirmelerinin, deprem hareketinin yayılma hızındaki artışla birlikte arttığı anlaşılmaktadır.

Şekil 7b'de köprü tabliyesi boyunca elde edilen normalize edilmiş düşey yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için maksimum yer değiştirmenin elde edildiği tabliye noktasında ($x=640,0$ m) elde edilen yer



Şekil 7. Sonlu dalga yayılma hızları için Tatar köprü tepkileri a) Kule yatay yer değiştirmeleri b) Tabliye düşey yer değiştirmeleri c) Kule eğilme momentleri d) Tabliye eksenel kuvvetleri (Tatar bridge responses for travelling wave effect a) Horizontal tower displacements b) Vertical deck displacements c) Tower bending moments d) Deck axial forces)

değiştirmeler, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen yer değiştirme değerinden sırasıyla 1,87, 1,22 ve 1,05 kez daha büyük yer değiştirme değerlerine neden olmuştur. Kule yer değiştirmeleri için elde edilen değişimin tersine, deprem dalgası yayılma hızının sonsuz olması durumunda genellikle en küçük yer değiştirmeler elde edilirken, 250 m/s hız değeri için en büyük yer değiştirmeler elde edilmiştir. Burada deprem dalgası yayılma hızının azalması ile birlikte tabliye düşey yer değiştirmelerinin genel olarak arttığı gözlenmiştir.

Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değişimi Şekil 7c'de verilmiş olup, $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$ m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için kule taban noktasında elde edilen eğilme momentleri, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen eğilme momenti değerinden sırasıyla 0,55, 0,84 ve 0,87 kez daha büyük moment değerlerine neden olmuştur. $V_{app}=1000$ m/s, $V_{app}=2000$ m/s ve $V_{app}=\infty$ hız değerleri için elde edilen moment değerleri genel olarak birbirine yakın çıkarken, $V_{app}=250$ m/s hız değeri için özellikle kule üst bölümünde en büyük momentler, en alt kule bölümünde ise en küçük momentler ortaya çıkmıştır.

Şekil 7d'de tabliye açıklığı boyunca elde edilen eksenel kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. $V_{app}=250$ m/s, $V_{app}=1000$

m/s ve $V_{app}=2000$ m/s dalga yayılma hız değerleri için maksimum eksenel kuvvetin elde edildiği tabliye noktasında ($x=250,0$ m) elde edilen eksenel kuvvetler, dalga yayılma hızının sonsuz olduğu hız değeri için elde edilen eksenel kuvvet değerinden sırasıyla 1,77, 1,12 ve 1,03 kez daha büyük eksenel kuvvet değerlerine neden olmuştur. Tabliye düşey yer değiştirmelerine benzer olarak deprem dalgası yayılma hızının sonsuz olması durumunda en küçük eksenel kuvvetler elde edilirken, 250 m/s hız değeri için genel olarak en büyük eksenel kuvvetler elde edilmiştir. Burada da deprem dalgası yayılma hızının azalması ile birlikte tabliye eksenel kuvvetlerinin arttığı anlaşılmaktadır.

5.1.3. 250 m/s dalga yayılma hızı için Fatih Sultan Mehmet Köprü'sünün dinamik analizi

(Dynamic analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge for wave propagation velocity of 250 m/s)

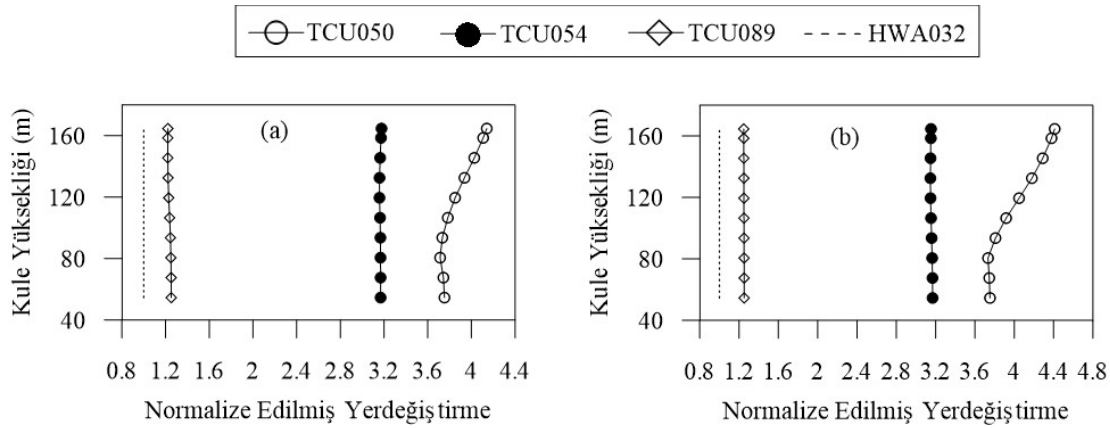
Yakın fay yer hareketinin asma köprüler üzerindeki etkisini dalga yayılma hızına bağlı olarak incelemek amacıyla, Chi-Chi Depremi'nin TCU050, TCU054, TCU089 ve HWA032 kayıtları için Fatih Sultan Mehmet Köprü'sü'nün kule yüksekliği ve köprü açıklığı boyunca elde edilen yer değiştirmeler üniform (sonsuz dalga yayılma hızı) ve asinkronize ($V_{app}=250$ m/s) yer hareketleri için karşılaştırmalı olarak Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Dikkate alınan yer hareketi bileşenleri için köprü tabliyesi ve

kulesinde elde edilen yer değiştirmeler, HWA032 uzak fay yer hareketi bileşeni için elde edilen yer değiştirmelere göre normalize edilmiştir.

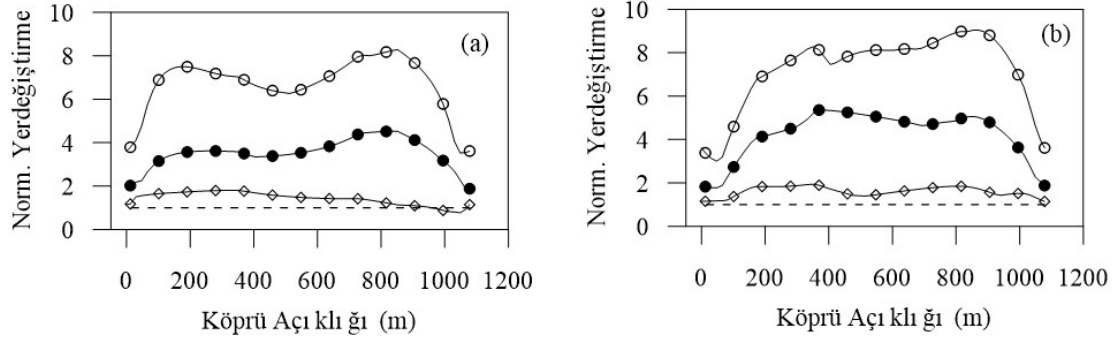
Deprem hareketinin sonsuz hızla yayılması durumunda gözlemlendiği gibi deprem dalgası yayılma hızının 250 m/s olması durumunda da hem tabliye hem de kulede yakın fay darbeleri yer hareketi kayıtları TCU050 ve TCU054 için elde edilen tepki değerlerinin, yakın fay darbesiz yer hareketi kaydı TCU089 ve uzak fay yer hareketi kaydı HWA032 için elde edilen tepki değerlerinden önemli oranda daha büyük olduğu görülmüştür. Chi-Chi Depremi'nin köprü sistemi üzerindeki yakın fay etkisi burada açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Bunun yanında yakın fay darbesiz yer hareketi

kaydı TCU089 için elde edilen tepki değerlerinin, uzak fay yer hareketi kaydı HWA032 için elde edilen tepki değerlerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Kule tepe noktasındaki yatay yer değiştirme, maksimum düşey yer değiştirmenin elde edildiği tabliye noktasındaki düşey yer değiştirme, kule taban noktasındaki eksenel kuvvet ve maksimum eksenel kuvvetin elde edildiği tabliye noktasındaki eksenel kuvvet değerleri, 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için TCU050, TCU054 ve TCU089 yakın fay yer hareketi bileşenleri için hesaplanmış ve HWA032 uzak fay yer hareketi bileşeni ile normalize edilerek Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4'den görüleceği üzere, TCU050, TCU054 ve TCU089 yakın fay yer hareketi



Şekil 8. FSM köprüsü için kule yatay yer değiştirmeleri a) $V_{app} = 250$ m/s, b) Sonsuz dalga yayılma hızı (Horizontal tower displacements of FSM a) $V = 250$ m/s b) infinite wave velocity)



Şekil 9. FSM köprüsü için tabliye düşey yer değiştirmeleri a) $V_{app} = 250$ m/s b) Sonsuz dalga yayılma hızı (Vertical deck displacements of FSM. a) $V = 250$ m/s b) infinite wave velocity)

Tablo 4. Normalize edilmiş FSM Köprü Tepkileri (Normalized FSM Bridge Responses)

	Kule Yerdeğiřtirmesi		Tabliye Yerdeğiřtirmesi		Kule Eksenel Kuvvet		Tabliye Eksenel Kuvvet	
	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$
TCU050/ HWA032	4,14	4,41	6,58	8,12	7,2	11,7	9,79	9,85
TCU054/ HWA032	3,18	3,15	3,57	5,03	3,58	8,83	4,4	4,25
TCU089/ HWA032	1,22	1,25	1,50	1,58	1,56	2,56	1,86	2,04

kayıtları için dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen tepki değerlerindeki HWA032 uzak fay yer hareketine göre elde edilen artış, 250 m/s dalga yayılma hızı için elde edilen artıştan belirgin olarak daha büyük çıkmıştır. Dikkate alınan asma köprü örneği için elde edilen yapısal tepkiler, yakın fay yer hareketinin özellikle yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda daha etkili olduğunu göstermektedir.

5.1.4. 250 m/s dalga yayılma hızı için Tatar köprü'sünün dinamik analizi

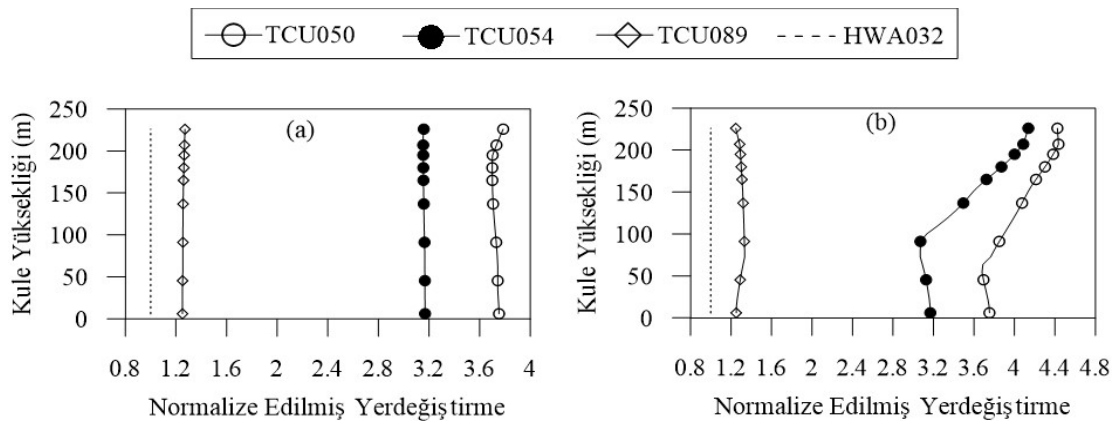
(Dynamic analysis of Tatar Cable-Stayed Bridge for wave propagation velocity of 250 m/s)

TCU050, TCU054, TCU089 ve HWA032 Chi-Chi deprem kaydı bileşenleri dikkate alınarak 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen Tatar köprüsüne ait tabliye ve kule yer değiştirmeleri Şekil 10 ve Şekil 11'de karşılaştırılmıştır. Dikkate alınan yer hareketi bileşenleri için köprü tabliyesi ve kulesinde elde edilen yer değiştirmeler, HWA032 uzak fay yer hareketi bileşeni için elde edilen tepki değerlerine göre normalize edilmiştir.

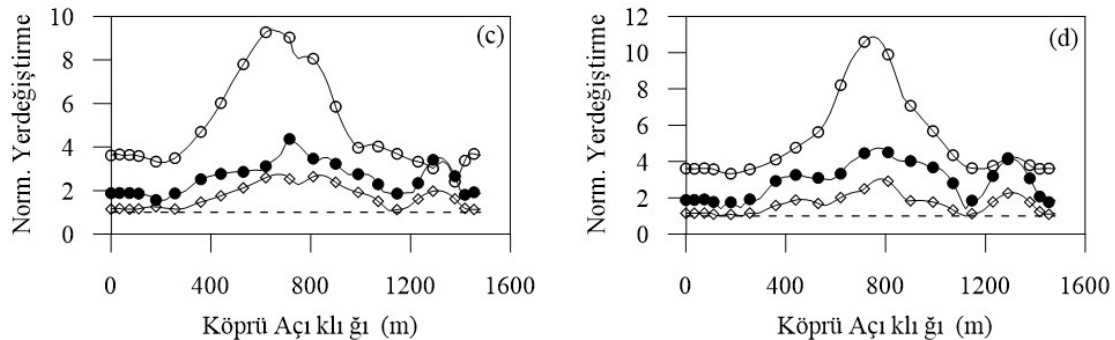
Deprem hareketinin sonsuz hızla yayılması durumunda gözlemlendiği gibi $V_{app}=250$ m/s olması durumunda da hem

tabliye hem de kulede yakın fay darbeleri yer hareketi kayıtları TCU050 ve TCU054 için elde edilen tepki değerlerinin, yakın fay darbesiz yer hareketi kaydı TCU089 ve uzak fay yer hareketi kaydı HWA032 için elde edilen tepki değerlerinden önemli oranda daha büyük olduğu görülmüştür. Chi-Chi Depremi'nin eğik kablo askılı köprü sistemi üzerindeki yakın fay etkisi burada da açık bir şekilde gözlenmiştir. Bunun yanında yakın fay darbesiz yer hareketi kaydı TCU089 için elde edilen tepki değerlerinin, uzak fay yer hareketi kaydı HWA032 için elde edilen tepki değerlerinden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır.

Kule tepe noktasındaki yatay yer değiştirme, maksimum düşey yer değiştirmenin elde edildiği tabliye noktasındaki düşey yer değiştirme, kule taban noktasındaki eksenel kuvvet ve maksimum eksenel kuvvetin elde edildiği tabliye noktasındaki eksenel kuvvet değerleri, 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için TCU050, TCU054 and TCU089 yakın fay yer hareketi bileşenleri için hesaplanmış ve HWA032 uzak fay yer hareketi bileşeni ile normalize edilerek Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'den görüleceği üzere, TCU050, TCU054 ve TCU089 yakın fay yer hareketi kayıtları için dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen tepki değerlerindeki HWA032 uzak



Şekil 10. Tatar köprüsü için kule yatay yer değiştirmeleri a) $V_{app}=250$ m/s b) Sonsuz dalga yayılma hızı (Horizontal tower displacements of Tatar Bridge a) $V=250$ m/s b) infinite wave velocity)



Şekil 11. Tatar köprüsü için tabliye düşey yer değiştirmeleri a) $V_{app}=250$ m/s b) Sonsuz dalga yayılma hızı (Vertical deck displacements of Tatar Bridge a) $V=250$ m/s b) infinite wave velocity)

Tablo 5. Normalize edilmiş Tatar Köprü Tepkileri (Normalized Tatar Bridge Responses)

	Kule Yerdeğiřtirmesi		Tabliye Yerdeğiřtirmesi		Kule Eksenel Kuvvet		Tabliye Eksenel Kuvvet	
	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$	$V_{app}=250$ m/s	$V_{app}=snz$
TCU050/ HWA032	3,78	4,42	9,4	10,88	6,56	19,26	12,77	18,39
TCU054/ HWA032	3,16	4,14	3,3	4,68	2,99	10,53	4,71	10,51
TCU089/ HWA032	1,27	1,25	2,68	2,89	2,43	5,7	3,26	5,25

fay yer hareketine göre elde edilen artış, 250 m/s dalga yayılma hızı için elde edilen artıştan belirgin olarak daha büyük çıkmıştır. Dikkate alınan eğik kablo askılı köprü örneği için elde edilen yapısal tepkiler de, yakın fay yer hareketinin özellikle yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda daha etkili olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Deprem hareketi dalga yayılma hızının dikkate alındığı asinkronize yer hareketi etkisindeki merkez açıklık uzunlukları birbirine yakın olan eğik kablo askılı ve asma köprü sistemlerinin yakın fay ve uzak fay yer hareketi etkisi altındaki yapısal tepkilerinin karşılaştırılması ile elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Deprem hareketi dalga yayılma hızına bağlı olarak Chi-Chi Depremi yakın fay darbeleri yer hareketi kaydı TCU050 dikkate alınarak gerçekleştirilen dinamik analiz sonucu elde edilen kablo destekli köprülerinin tepkileri karşılaştırılmış ve dalga yayılma hızının yapısal tepkiler üzerinde oldukça karmaşık bir etkisinin olduğu, dikkate alınan dalga yayılma hızına ve yapısal tepkiye bağlı olarak yapısal tepkilerin artabileceği veya azalabileceği anlaşılmıştır.
- Asma köprü yapısal tepkileri üzerinde daha çok dalga yayılma hızının yüksek değerlerinin etkiliği olduğu görülürken, eğik kablo askılı köprüye ait yapısal tepkiler üzerinde daha çok dalga yayılma hızının küçük değerlerinin etkiliği olduğu gözlenmiştir.
- Deprem hareketinin hem sonsuz (üniform hareket) hem de $V_{app} = 250$ m/s hızla yayılması (asinkronize hareket) durumunda her iki köprü modelinde yakın fay darbeleri yer hareketi kayıtları TCU050 ve TCU054 için elde edilen tepki değerlerinin, yakın fay darbesiz yer hareketi kaydı TCU089 ve uzak fay yer hareketi kaydı HWA032 için elde edilen tepki değerlerinden önemli oranda daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Asma köprüde yakın fay darbeleri yer hareketleri için elde edilen tabliye düşey yer değiştirmelerinin uzak fay yer hareketine oranla yaklaşık 8 kat, eğik kablo askılı köprüde ise yaklaşık 11 kat mertebelerinde daha büyük olabileceği gözlenmiştir.
- Dikkate alınan kablo destekli köprü örnekleri için elde edilen yapısal tepkiler, yakın fay yer hareketinin özellikle yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda

daha etkili olduğunu göstermektedir. Örneğin, TCU050 yakın fay darbeleri yer hareketi bileşeni için 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için asma köprü kule taban noktasında elde edilen eksenel kuvvetler, uzak fay yer hareketine göre, sırasıyla, 7,2 ve 11,7 mertebelerinde daha büyük çıkmıştır. Aynı oranlar eğik kablo askılı köprüde, sırasıyla, 6,56 ve 19,26 mertebelerinde elde edilmiştir.

- Son yıllarda meydana gelen büyük depremlerde yakın fay bölgelerinde elde edilen kayıtlar, yer hareketindeki değişimin ve yakın fay etkilerinin birlikte söz konusu olması durumunda uzun açıklıklı köprü sistemlerinde yapısal tepkilerde ciddi artışlar ortaya çıkabileceğini gösterdiğinden, deprem hareketindeki değişim ve yakın fay etkilerinin uzun açıklıklı kablo destekli köprülerin dinamik analizlerinde birlikte dikkate alınması daha gerçekçi bir yaklaşım ortaya koyacaktır.
- Bunun yanında 2018 yılında yayımlanan yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, yakın fay etkisi bir çarpanla dikkate alınmış olmakla birlikte darbe etkili ve sıçrama etkili yakın fay etkilerinin analizlere daha kapsamlı olarak dahil edilerek yapı sistemlerinin depreme karşı daha güvenli hale getirilebilmesi için bu alanda yapılacak çalışmalar sürdürülmelidir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bray J. D., Rodriguez-Marek, A., Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 815-828, 2004.
2. Yasrebi L., Ghafory-Ashtiany M., Inelastic response of a long span bridge under asynchronous near-field pulse-like and far-field excitations, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 16 (2), 111-128, 2014.
3. Liao W.I., Loh C.H., Wan S., Jean W.Y., Chai J.F., Dynamic responses of bridges subjected to near-fault ground motions, *Journal of the Chinese Inst. of Engineers*, 23, 455-464, 2000.
4. Jalali R.S., Jokandan M.S., Trifunac M.D., Earthquake response of a three-span simply supported bridge to near-field pulse and permanent-displacement step, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 380-397, 2012.
5. McCallen D., Astaneh-Asl A., Larsen S., Hutchings L., Dynamic response of the suspension spans of the San

- Francisco-Oakland Bay Bridge, 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco-USA, 2005.
6. Jia J.F., Ou J.P., Seismic analyses of long-span cable-stayed bridges subjected to near-fault pulse-type ground motions, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing-China, 2008.
 7. Shrestha B., Tuladhar R., The response of Karnali Bridge Nepal to near-fault earthquakes, *Bridge Engineering*, 165, 223-232, 2012.
 8. Shrestha B., Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 180-187, 2015.
 9. Adanur S., Altunisik A.C., Bayraktar A., Akkose M., Comparison of near-fault and far-fault ground motion effects on geometrically nonlinear earthquake behavior of suspension bridges, *Natural Hazards*, 64, 593-614, 2012.
 10. İsmail M., Casas J.R., Rodellar J., Near-fault isolation of cable-stayed bridges using RNC isolator, *Engineering Structures*, 56, 327-342, 2013.
 11. Li S., Zhang F., Wang J.Q., Alam M.S., Zhang J., Seismic responses of super-span cable-stayed bridges induced by ground motions in different sites relative to fault rupture considering soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, 295-310, 2017.
 12. Soyuluk K., Karaca H., Near-fault and far-fault ground motion effects on cable-supported bridges, *X International Conference on Structural Dynamics, Rome-Italy*, 2017.
 13. Karaca H., Soyuluk K., Effects of near-fault and far-fault ground motions on cable-stayed bridges, *Disaster Science and Engineering*, 4 (1), 12-21, 2018.
 14. Guan Z., You H., Li J., An effective lateral earthquake-resisting system for long-span cable-stayed bridges against near-fault earthquakes, *Engineering Structures*, 196, 2019.
 15. Yan X., Lee G.C., Traveling wave effect on the seismic response of a steel arch bridge subjected to near fault ground motions, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6 (3), 245-257, 2007.
 16. Liu Z., Zhang Z., Fragility analysis of concrete-filled steel tube arch bridge subjected to near-fault ground motion considering the wave passage effect, *Smart Structures Systems*, 19 (4), 415-429, 2017.
 17. Karaca H., Yakın fay yer hareketi etkisindeki uzun açıklıklı köprü sistemlerin dinamik analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 2017.
 18. Karaca H., Soyuluk K., Yakın fay yer hareketi etkisindeki asma köprülerin asinkronize dinamik analizi. *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 155-165, Gaziantep-Türkiye, 2017.
 19. Yılmaz D., Soyuluk K., Dynamic analysis of steel arch bridges for near-fault ground motions travelling with finite wave velocity. *International Civil Engineering and Architecture Conference, ICEARC'19, Trabzon-Türkiye*, 2019.
 20. Stewart J.P., Chiou S.J., Bray J.D., Graves R.W., Somerville P.G., Abrahamson N.A., Ground motion evaluation procedures for performance-based design, *PEER 2001/09, Berkeley-California-USA*, 2001.
 21. Somerville P., Characterizing near fault ground motion for the design and evaluation of bridges, *Proceedings of the 3rd National Seismic Conference and Workshop on Bridges and Highways, Portland-USA*, 2002.
 22. Abrahamson N.A., Spatial variation of multiple support inputs, *Proceedings of the First U.S. Symposium on the Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges, Berkeley-USA*, 1993.
 23. Liao W.I., Loh C.H., Lee B.H., Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions, *Engineering Structures*, 26, 2173-2183, 2004.
 24. PEER Ground Motion Database, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA*, 2013.
 25. Dumanoglu A.A., Severn R.T., Seismic response of modern suspension bridges to asynchronous longitudinal and lateral ground motion, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 2*, 87, 73-86, 1987.
 26. Soyuluk K., Kartal H., Adanur S., Comparison of dynamic behaviour of long-span cable-supported bridges, *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vienna-Austria*, 2013.
 27. Apaydın N., Seismic analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge, *Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 2002.
 28. Dumanoglu A.A., Brownjohn J.M.W., Severn R.T., Seismic analysis of the Fatih Sultan Mehmet (Second Bosphorus) Suspension Bridge, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 881-906, 1992.
 29. Apaydın N.M., Earthquake performance assessment and retrofit investigations of two suspension bridges in Istanbul, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 702-710, 2010.
 30. Apaydın N., Bas S., Harmandar E., Response of the Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge under spatially varying multi-point earthquake excitations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 44-54, 2016.
 31. Cengiz A., Soyuluk K., Sicacik E.A., Dynamic effects induced by traffic loads on cable-stayed bridges, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (1), 243-252, 2011.
 32. Bathe K.J., Wilson E.L., Peterson F.E., *SAP IV: A structural analysis program for static and dynamic response of linear systems*, Report No: EERC-73-11, *Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley-California-USA*, 1974.

33. Chouw N., Hao H., Significance of SSI and nonuniform near-fault ground motions in bridge response I: Effect on response with conventional expansion joint, *Engineering Structures*, 30 (1), 141-153, 2008.