

## Deprem Etkisindeki Elastomer Mesnetli Köprü Ayağının Farklı Zemin ve Mesnet Koşullarında Dinamik Davranışı

Fevzi SARITAŞ\*  
Zeki HASGÜR\*\*

### ÖZ

Elastomer mesnetli bir köprü ayağı sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek deprem ivmeleri etkisindeki dinamik davranışı, doğrusal elastik çözümleme ile zaman ve frekans tanım alanındaki (stokastik) yöntemlerle belirlenmekte ve sonuçları olasılık dağılımları ile irdelenmektedir. Bu amaçla durağan ivmeler, zeminleri karakterize eden Kanai-Tajimi güç spektrumu kullanılarak türetilmekte ve daha sonra genlikler, 1992 Erzincan depremi KG bileşeninin genlik değişimi ile uyumlu zarf fonksiyonları aracılığıyla değiştirilerek her zemin türünde yirmişer adet durağandışı ivme kayıtları elde edilmektedir. Türetilen yatay ve düşey ivme bileşenleri, köprü ayağına uygulanarak ayaktaki kesit zorları ile tabliyedeki yatay yerdeğiştirmeler, üst yapının farklı mesnetlenmesi ve değişik zemin koşulları için zaman tanım alanında elde edilmektedir. Ayrıca, frekans tanım alanında durağan stokastik davranış kabulü ile sisteme aynı anda etkiyen ivmelere ait güç yoğunluk ve çapraz güç spektrumları kullanılarak sisteme ait kesit zorlarının varyansları elde edilmektedir. Sonuçlar zaman tanım alanı çözümleri ile değerlendirilerek maksimum tepkiler ve maksimum davranış faktörlerinin değişimleri belirlenmektedir. Dinamik davranıştaki maksimum tepkiler, Rayleigh dağılımları ile ele alınarak %2, %10 ve %50 (ortalama) aşılma olasılıklarına karşı gelen davranışlar zemin tiplerine bağlı olarak tahmin edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Maksimum davranış, elastomer, Kanai-Tajimi, durağandışı, stokastik.

### ABSTRACT

#### Dynamic Behavior of Bridge Pier with Elastomeric Bearings under Earthquake Effects for Different Soil layers and Support Conditions

An isolated bridge pier having elastomeric bearings is modeled by finite element technique and dynamic responses under the effect of earthquake accelerations which are obtained by linear solution methods in time and frequency domain and the results are evaluated by probabilistic distributions. For this purpose, stationary accelerations characterized by

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 27.02.2013 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2014 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Pamukkale Üniversitesi, İnşaat mühendisliği Bölümü, Denizli - fsaritas@pau.edu.tr

\*\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - hasgur@itu.edu.tr

Kanai-Tajimi power spectrum are simulated for different soil types and twenty nonstationary records in each soil group are obtained by modulating the amplitudes in harmony with 1992 Erzincan earthquake NS component. The pier responses and deck displacements are obtained in time domain for different support and soil conditions by using simulated horizontal and vertical accelerations. Furthermore, variances of the responses are obtained in frequency domain by assuming stationary stochastic behavior and by using power density and cross-power spectra of the applied simultaneous motions. The results are evaluated by those of the time domain solutions and peak responses and variations of peak response factors are determined. For dynamic peak responses, the response quantities corresponding to exceedance probabilities of 2%, 10% and 50% (median) are predicted depending upon soil types by use of Rayleigh distribution model.

**Keywords:** Peak responses, rubber, Kanai-Tajimi, nonstationary, stochastic.

## 1. GİRİŞ

Karayolu ve demiryolu ulaşımında nehir ve vadi geçişlerini sağlayan köprü ve viyadüklerin olası bir depremde göçmeden veya büyük hasarlar oluşmadan fonksiyonuna devam etmesi mühendislik tasarımlarında önemli yer tutar. Kuvvetli deprem hareketlerine maruz köprü ayaklarında ortaya çıkan hasarlar incelendiğinde ayak rijitliğinin yanı sıra zemin koşulları ve mesnetlenme durumu da bu yapıların davranışını önemli derecede etkilediği görülmektedir. Zemin koşullarındaki farklılaşma, yüksek ayaklara sahip köprünün sismik davranışında önemli değişimlere neden olmakta ve üniform zemin yapısı yumuşadıkça daha büyük yerdeğiştirmeler oluşabilmektedir [1]. Yapısal tepkilerde zemin büyütme etkisini azaltmak üzere yüksek ayaklar için mesnetleneceği uygun zemin formasyonuna kadar inilmesi ayrıca buna uygun derin temel yapılanmasına da gidilmesi gerekmektedir. Bu durumda büyük açıklıklar arasındaki ayakların oturduğu farklı zeminlerin davranış üzerindeki etkilerinin düşük ölçüde olması amaçlanmaktadır. Diğer taraftan ayak yüksekliğinin değişimi köprü yapısının titreşim frekansını yer hareketinin baskın frekansına yakınlılaştırarak yerdeğiştirmelerin büyümesine iç kuvvetlerin artışına neden olabilir [2]. Ayrıca, sismik izolasyonlu köprülerin davranışında zemin yapısının esnekliği rijit üst yapı davranışına önemli ölçüde tesir edebilmekte ve dolayısıyla maksimum davranışlar büyük ölçüde değişebilmektedir [3]. Diğer taraftan izolatörlerin mekanik özelliklerini ifade eden karakteristik dayanım ve elastik ötesi rijitlik için optimum değerlerin de yer hareketinin frekans içeriğine dolayısıyla zemin koşullarına bağlı olduğu Dicleli ve Karalar [4] tarafından yapılan çalışmada gösterilmiştir.

Deprem etkisine maruz bir köprünün dinamik davranışı, zaman tanım alanında deterministik yöntemlerle ve frekans ortamında ise rasgele titreşim teorisine dayalı stokastik analizlerle belirlenebilmektedir. Betonarme karayolu köprülerinin yatay ve düşey ivme bileşenleri altında dinamik davranışı bazı araştırmacılar [5,6] tarafından sonlu elemanlar yöntemi ile deterministik olarak incelenmiştir. Yer hareketinin doğasında bulunan rasgeleliği hesaba katan stokastik yöntemlerle köprülerin davranışı konusunda önemli bilgiler elde edilebilir. Köprü ve ayakların stokastik analizinde durağandışı yer hareketleri, filtrelenmiş beyaz gürültü modeline dayalı olarak güç spektrumları ve genlikler için zaman değişkenli zarf fonksiyonları kullanımı ile tanımlanmaktadır. Yapısal tepkiler (çıkış işleyimi) frekans davranış fonksiyonları aracılığı ile giriş işleyimine bağlı olarak elde

edilmektedir. Sismik ayırıcılı bir köprü ayağında, durağan Gauss işleyimi ve beyaz gürültü için Kanai-Tajimi modeli ele alınarak yapılan lineer stokastik analizinde yapısal tepkilerin değişimi deprem hareketinin spektral içeriğinden yaklaşık olarak bağımsız olduğu görülmüştür [7]. Jangid [8] durağandıışı yer hareketleri etkisindeki köprülerin maksimum davranışlarını köprü ayaklarının elastik davrandığı kabulü ile incelemiştir. Çalışmada elastomer mesnetlerin optimum akma dayanımlarını eşdeğer lineerleştirilmiş stokastik yöntem kullanarak belirlemiştir. Ayak ve üst yapının doğrusal davrandığı kabulü ile farklı elastomer ve kayıcı mesnet sistemleri için yapılan analizlerden elde edilen maksimum davranışların, ayak ve üst yapı esnekliği ile arttığı tespit edilmiştir [9]. Elastik mesnetli konsol giriş şeklinde göz önüne alınan bir köprü ayağı için filtrelenmiş beyaz gürültü modeli ile yapılan rasgele titreşim analizlerinde, elastik mesnet rijitliği azaldıkça ayağın ilk iki mod davranışının rijit cisim hareketine yakınlığı tespit edilmiştir [10]. Yatay ve düşey ivme bileşenlerine maruz simetrik konsollu, dört serbestlik dereceli gerçek bir köprü ayağının stokastik davranışı incelenerek taban tepkilerine ait varyanslar frekans tanım alanında belirlenmiştir [11]. Köprü davranışında, yer hareketinin doğrusal olmayan ilerleyişi ile dalga-geçişleri ve yerel zemin koşullarını birlikte dikkate alan stokastik çalışmalar da mevcuttur [12]. Askı sistemli uzun açıklıklı bir köprü sistemi için beyaz gürültü ve Kanai-Tajimi modeli ile ele alınan deprem etkileri altında, yapısal tepkiler stokastik analizlerle elde edilerek yöntemin uygun sonuçlar verdiği gösterilmiştir [13].

Durağan yer hareketlerine maruz bir köprünün farklı mesnet/ayak titreşimleri ile yapılan spektral ve frekans analizlerinden yapısal tepkilerin yumuşak zemin durumunda oldukça büyük değerlere ulaşabildiği görülmüştür [14]. Köprülerde yatay deprem etkileri altında zamana bağımlı olarak ortaya çıkan maksimum davranışlar, durağandıışı rasgele süreçler kullanılarak yarı dinamik ve tam integrasyon yöntemlerinin birlikte göz önüne alınması ile de belirlenebilmektedir [15]. Diğer taraftan bir titreşim hareketinde ortaya çıkan maksimum davranış büyüklüklerini ifade eden maksimum davranış katsayıları ( $r$ ), beklenen ortalama değer ( $[E(x_{\max})]$ ) ile karesel değişimlerin karekökü (KDK) arasındaki oran sayesinde ( $r=[E(x_{\max})]/\text{KDK}$ ) belirlenebilmektedir. Bu oran rasgele titreşimler için sabit olmayıp aynı bölgede başka bir cihazda ölçülen ivme kaydı için bile farklı bir değer alır. Maksimum davranış katsayılarının elde edilmesinde Vanmarcke [16] ve Davenport [17] tarafından verilen modeller yaygın kullanım alanı bulmuştur. Yer hareketinin sabit güç spektrum şiddeti ( $S_0$ ), yapının sönüm ve doğal frekans parametreleri ile davranışın spektral momentlerini içeren Vanmarcke modelinde, yapı karakteristiklerinin etkisi az olup farklı sistemler için bile yaklaşık olarak aynı maksimum davranış katsayıları elde edilmektedir.

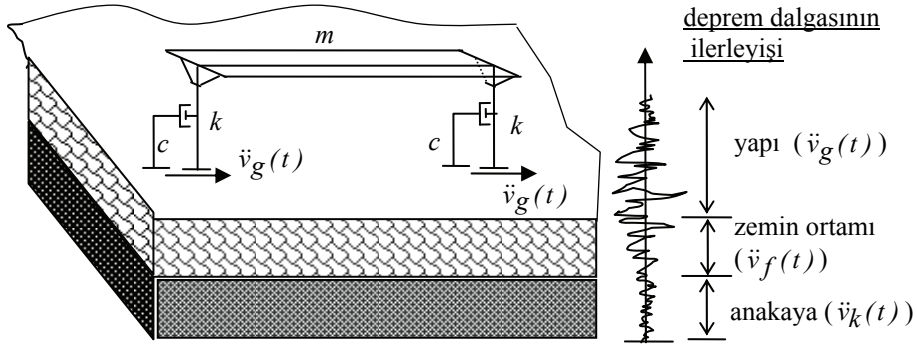
Bu çalışmada, mevcut bir karayolu viyadüğündeki elastomer mesnetli bir ayak sistemi seçilerek deprem hareketi esnasında yerel zemin koşullarının ve üst yapı mesnetlenme biçiminin dinamik davranıştaki etkileri incelenmiştir. Kurşun çekirdekli olarak ele alınan elastomer mesnet, kutu giriş ve ayak kesitinin boyutları genel itibarı ile seçilen köprü sisteminden alınmıştır. Kutu girişli ve çift konsollu, simetrik köprü ayağı sonlu elemanlarla modellenerek durağandıışı rasgele yer hareketleri etkisindeki stokastik davranışları ortalama ve varyans gibi istatistiksel terimler ile belirlenmektedir. Analizlerde kullanılmak üzere, Kanai-Tajimi filtre fonksiyonları ve zamana bağımlı zarf fonksiyonları aracılığı ile farklı zemin türlerinde her biri için 20 adet yapay durağandıışı deprem kaydı türetilmektedir. Gerek yapay yer hareketlerinin türetilmesi gerekse stokastik dinamik davranışların elde edilmesi, lineer stokastik analiz için geliştirilen bir bilgisayar algoritması aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Stokastik dinamik analizlerin ayak sistemi üzerinde uygulanması ile

yöntemin kullanımı gösterilerek kauçuk mesnetlerin doğrusal ve doğrusal olmayan davranış modeli ile tabliyenin mesnetlenme koşulları gibi bazı karakteristiklerin davranış üzerindeki etkileri zemin türlerine bağlı olarak gösterilmiştir. Frekans tanım alanında davranışlar için elde edilen maksimum büyüklükler, zaman tanım alanındaki çözümlerle karşılaştırılarak uyumlu bir ilişki içinde olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, maksimum davranış faktörleri her zemin türü için hesaplanarak ortalama maksimum davranışlar belirlenmiştir. Diğer taraftan maksimum tepkiler için olasılık dağılım ve aşılma olasılık fonksiyonları da farklı zemin koşulları için elde edilerek grafiklerle gösterilmiştir. Elde edilen istatistiksel davranışlar ve olasılık fonksiyonları ile tasarımlarda kullanılabilen yapısal güvenilirlik veya risk değerlendirmesi gibi ileri düzey probabilistik analizler gerçekleştirilebilir.

## 2. BENZEŞTİRİLMİŞ DEPREM İVMELERİNİN FARKLI ZEMİN KOŞULLARINDA ELDE EDİLMESİ

### 2.1 Kanai-Tajimi Modeli

Anakayada oluşan deprem dalgalarının ivme değerleri ( $\ddot{v}_k(t)$ ), yeryüzüne ( $\ddot{v}_g(t)$ ) ulaşmaya kadar Şekil 1'de şematize edildiği gibi ilerlediği ortamlardaki zemin tabakalarının elastik ve sönüm özelliklerine bağlı olarak kırılma ve yansımalarından dolayı büyük değişimlere ( $\ddot{v}_f(t)$ ) uğrar. Ayaklardaki zemin ortamının anakayadan çıkan yer hareketinin frekans içeriğini büyük ölçüde değiştirerek bazı durumlarda köprü yapısının maruz kalacağı sismik kuvvetleri arttırdığı ve köprülerde önemli hasarlara neden olduğu görülmüştür [18]. Zamana bağımlı ve rasgele karaktere sahip deprem hareketleri, yukarıda ifade edilen değişimleri temsil etmek üzere stokastik modellerle dikkate alınabilir.



Şekil 1. Yer hareketinin anakayadan üst yapıya ilerlemesi

Stokastik analizlerde, durağandıysı yer hareketleri genellikle Gauss dağılıma sahip sıfır ortalamalı rasgele bir işleyim ile genlikler için zarf fonksiyonlarının birlikte göz önüne alınmasıyla temsil edilir [19]. Bu çalışmada, durağan yer hareketini temsil etmek üzere sıfır ortalamalı ve Gauss dağılıma sahip işleyim; bütün frekans bileşenlerini eşit şekilde temsil

eden ve  $S_0$  şiddetinde üniform güç spektrumunu ifade eden beyaz gürültü işleyimi (process) ile tanımlanmıştır. Zemin ortamındaki değişimleri yansıtmak üzere, durağan yer hareketleri filtre fonksiyonları ile birlikte göz önüne alınmıştır. Bu durumda işleyimin güç spektrum yoğunluk fonksiyonu,

$$S_{\ddot{y}}(\omega) = S_0 |H_y(i\omega)|^2 |H_d(i\omega)|^2 \quad (1)$$

ile ifade edilebilir. Bu amaçla, Denklem 2a ve 2b'de gösterildiği gibi,  $\omega_y$  civarındaki yüksek frekanslı bileşenleri yükseltgeyen ve bundan daha büyük olan  $\omega > \omega_y$  frekanslarında ise hızla azaltan Kanai-Tajimi ( $|H_y(i\omega)|$ ) ile  $\omega < \omega_d$  düşük frekanslı bileşenlerin geçişini hızla azaltan Penzien'in  $|H_d(i\omega)|$  filtre fonksiyonları kullanılmıştır [20] :

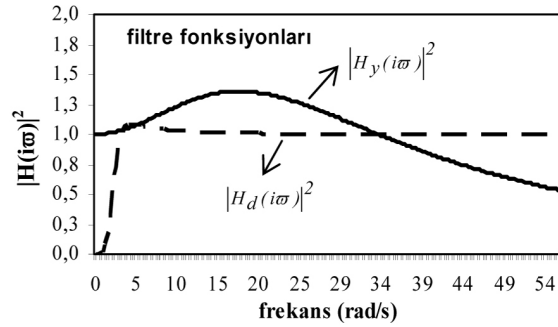
$$|H_y(i\omega)|^2 = \frac{1 + 4\xi_y^2(\omega/\omega_y)^2}{[1 - (\omega/\omega_y)^2]^2 + 4\xi_y^2(\omega/\omega_y)^2} \quad (2a)$$

$$|H_d(i\omega)|^2 = \frac{(\omega/\omega_d)^4}{[1 - (\omega/\omega_d)^2]^2 + 4\xi_d^2(\omega/\omega_d)^2} \quad (2b)$$

Zeminlerin dinamik karakteristikleri olan  $\xi_y$ ,  $\omega_y$  ve  $\xi_d$ ,  $\omega_d$  sırasıyla yüksek ve düşük frekanslı bileşenler için sönüm oranını ve açılal frekansı ifade eder. Bu karakteristiklere ait değerler Çizelge 1'de üç zemin türü için verilmiştir [21]. Filtre fonksiyonlarının değişimi, sağlam zemin için hesaplanarak yukarıda açıklanan işlevleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Filtre parametreleri

Zemin türü	Parametre			
	$\omega_y$ (rad/s)	$\xi_y$	$\omega_d$ (rad/s)	$\xi_d$
sert	15.0	0.6	1.5	0.6
orta	10.0	0.4	1.0	0.6
yumuşak	5.0	0.2	0.5	0.6

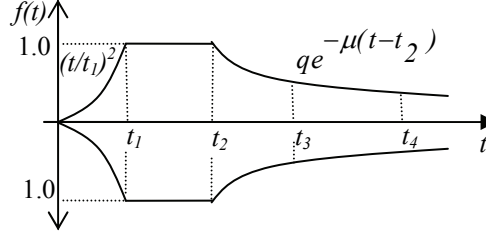


Şekil 2. Sağlam zemin için filtre fonksiyonları

## 2.2 Genlikleri Durağandı Benzeştirilmiş Deprem İvmelerinin Elde Edilişi

Genel olarak yer hareketlerinin değişimi, Şekil 3'de gösterildiği gibi zaman değişkenli bir  $f(t)$  fonksiyonu ile ifade edilmektedir [22]. Bu modelde, genliklerde önce artış bunu takiben sabit bölge ve bir düşüş bölgesi (üssel fonksiyon) olmak üzere üç bölge tanımlanmaktadır.

$f(t)$  fonksiyonunun parametreleri olan  $t_1, t_2, t_3, t_4$  ile üssel fonksiyon sabitleri  $\mu$  ve  $q$ , depremin süresi, kuvvetli yer hareketi süresi ( $t_{eff}$ ) ile bölgenin sismik özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Bu çalışmada ise ilgili parametreler, göz önüne alınan kaydedilmiş yer hareketinin  $t_{eff}$  ve zamana göre genliklerdeki değişimi dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Zaman değişkenli zarf fonksiyonu

Her zemin grubu için sabit güç spektrumu şiddetleri  $S_0$  hesaplanarak Fourier dönüşümleri aracılığıyla güç spektrum yoğunluk fonksiyonları (GSYF) elde edilmektedir. GSYF ile karesel ortalama değişim arasındaki ilişki sayesinde filtrelenmiş güç spektrumları  $S_v(\omega)$ , eşit frekans aralıklarına ( $\Delta\omega$ ) bölünerek integralin alınmasıyla yer hareketinin genlikleri elde edilir:

$$a_{xf}(t) = \sum_k \sqrt{4S_v(k\Delta\omega)\Delta\omega} \cos(k\Delta\omega t + \phi_{kr}) \quad r=1,2,\dots,N \quad k=1,2,\dots,N_s \quad (3a)$$

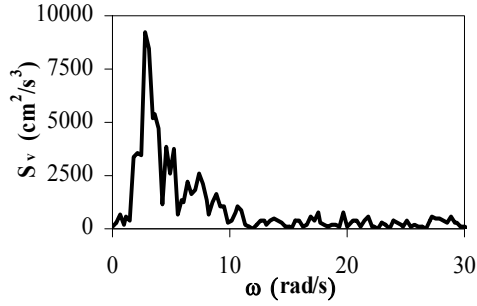
$\phi_{kr}$  üniform olasılık yoğunluk fonksiyonlu rasgele işleyimin  $0-\pi$  aralığındaki faz açısıdır. Güç spektrum yoğunluk fonksiyonunda göz önüne alınan eşit aralıklı toplam alan sayısı  $N_s$  ile ve  $r$ . nci örnek fonksiyon için türetilen rasgele faz açıların sayısı ise  $N$  ile ifade edilmiştir. Türetilmiş olan durağan genlikler Şekil 3' de verilen  $f(t)$  zarf fonksiyonu,

$$\ddot{v}_g(t) = f(t) \cdot a_{xf}(t) \quad (3b)$$

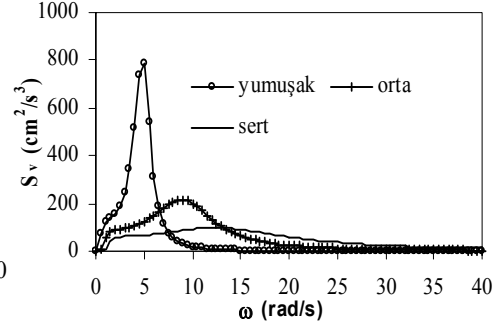
ile birlikte dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada, kaydedilmiş depremlerden Erzincan 1992 KG bileşeninin frekans içeriği ve genlik değişimi ile uyumlu olarak yukarıda açıklanan harmonik model yaklaşımı ile benzeştirilmiş yer hareketleri elde edilmek istenmiştir. Bu amaçla, genlikler Denklem 2'de verilen Kanai-Tajimi spektrumları ve Çizelge 1'deki zemin dinamik karakteristiklerini esas alan filtre fonksiyonları aracılığıyla Denklem 3 ile elde edilmiştir. Zaman değişkenli zarf fonksiyonu  $f(t)$  için literatürde verilen parametreler kullanılarak türetilen yapay depremlerin mevcut kayıtlarla uyumlu olmadığı gözlemlendiği için uygun parametre değerleri araştırılmıştır. Bu amaçla mevcut uyumsuzluğu gidermek üzere ardışık yaklaşım ve regresyon analizleri ile en uygun parametreler belirlenerek yapay yer hareketleri elde edilmiştir. Sabit güç

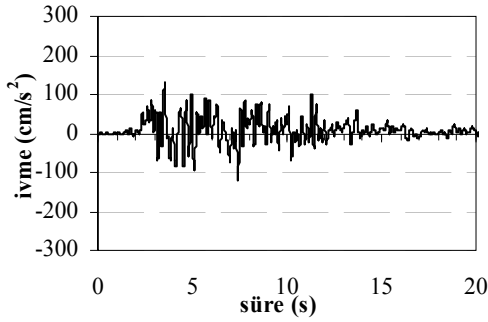
spektrum değerleri sağlam, orta ve yumuşak zeminler için sırasıyla 52,9, 74,4 ve 108,0  $\text{cm}^2/\text{s}^3$  olarak hesaplanmıştır [23]. Erzincan depremi ve zeminler için elde edilen filtrelenmiş güç spektrumları Şekil 4 ve 5’de gösterilmiştir. Elde edilen güç spektrumları aracılığıyla, 4 farklı zemin türünde her biri için 20 adet üretilen yapay ivme kayıtlarından ilgili zemin türü için birer örnek Şekil 6’da gösterilmiştir.



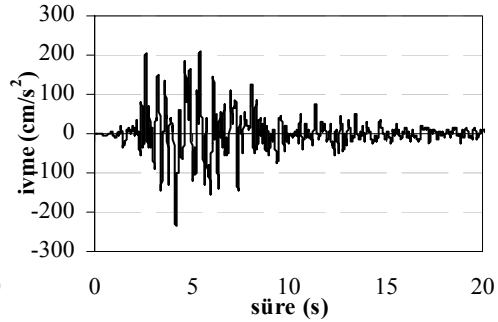
Şekil 4. Güç spektrumu-Erzincan NS 1992



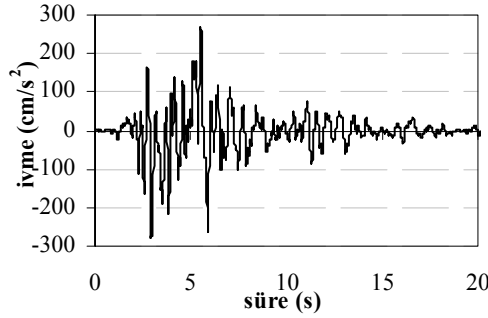
Şekil 5. Zeminler için filtrelenmiş güç spektrumları



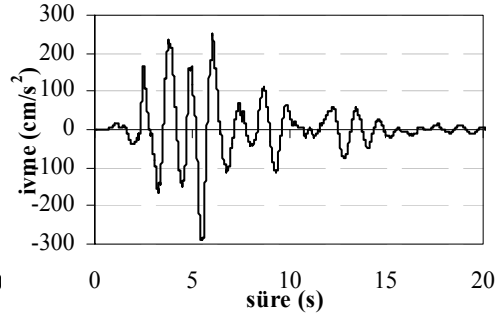
a) anakaya



b) sağlam zemin



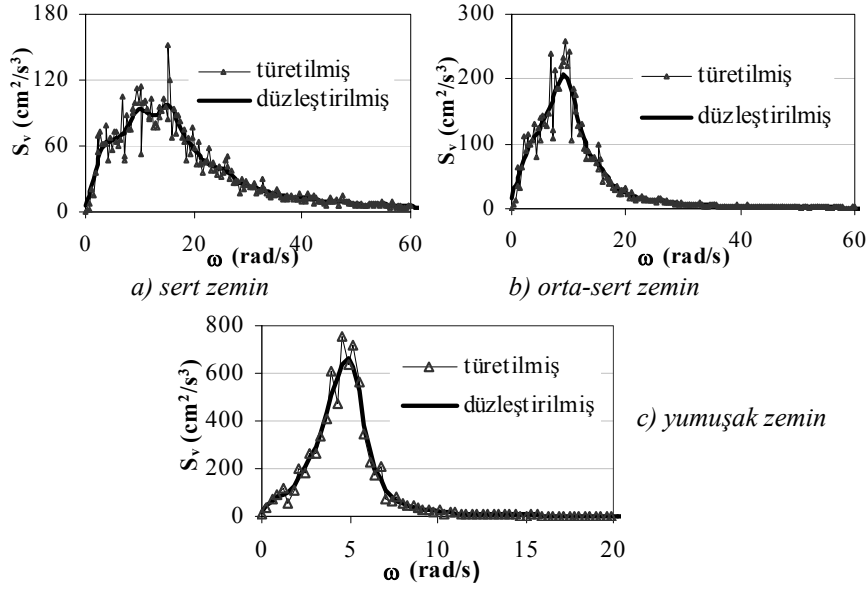
c) orta-sert zemin



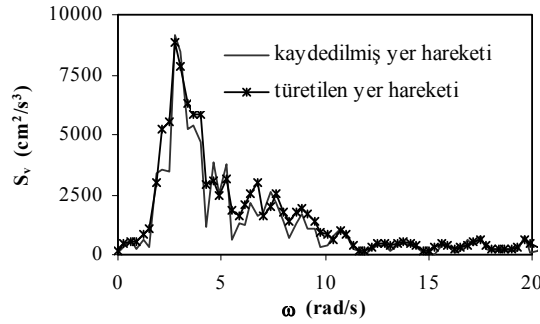
d) yumuşak zemin

Şekil 6. Üretilen yapay deprem hareketlerinden örnek ivme kayıtları

Yapay ivme kayıtlarına karşı gelen güç spektrumlarının ortalama değerleri esas alınarak zemin türleri için elde edilen güç spektrumları ise Şekil 7’de görüldüğü gibi keskin çizgilerle çizilmiştir. Spektrumun daha iyi anlaşılması ve karşılaştırmada kolaylık sağlaması için düzleştirme işlemi yapılarak elde edilen eğri sürekli koyu çizgi ile çizilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Güç spektrumları için düzleştirme işlemi

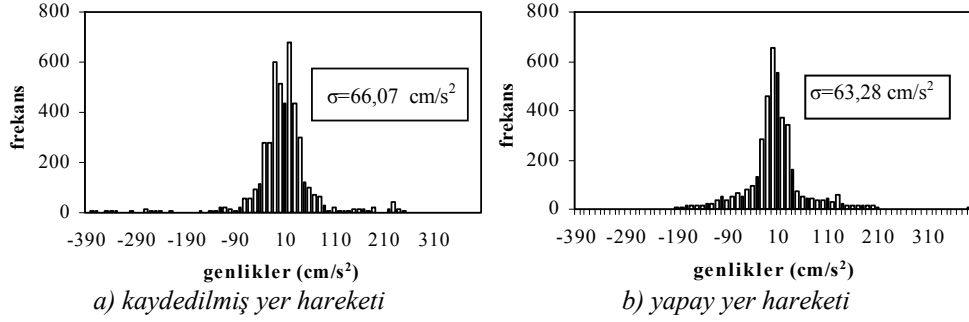


Şekil 8. Güç spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 8’de, uygun parametre değerleri seçilerek kullanılan zarf fonksiyonu ile elde edilen yapay ivmeler için hesaplanan ortalama güç spektrumu, 1992 Erzincan depremi KG bileşeni güç spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekilden görüleceği üzere, elde edilen güç spektrumunun, mevcut yer hareketi ile uyumlu olduğu ve türetilen yapay yer hareketlerinin



kaydedilmiş yer hareketinin gücünü temsil ettiği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, 1992 Erzincan KG gerçek depremi ile yapay depremlerin tutarlılığı, frekans içeriğinin dağılımı ve varyansları bakımından incelenerek ilgili karşılaştırma Şekil 9'da gösterilmiştir. Yapılan karşılaştırmalardan yapay yer hareketlerinin kaydedilmiş yer hareketini, genliklerin frekans dağılımı ve değişimi açısından da temsil edilebildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 9. Kaydedilmiş ve yapay depremler için frekans dağılımı

### 3. KÖPRÜ AYAK MODELİ VE STOKASTİK DAVRANIŞI

Başlığı değişken kesitli olan betonarme köprü ayağı, Şekil 10'da gösterildiği gibi tabliyesi ile birlikte V-tipi kutu kesitli bir başlık kirişi ve yine kutu kesitli boşluklu dikdörtgen kolon elemanından oluşmaktadır. Başlık kirişinin alt kenar kısımlarında ikişer adet kurşun çekirdekli elastomer mesnetler mevcuttur. Ayak sistemi için doğrusal elastik davranış ve elastomer mesnet için ise hem doğrusal hemde doğrusal olmayan davranış ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. Ayak sisteminde %5 sönüm oranı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1 Köprü Ayağının Tanıtımı ve Serbest Titreşimler

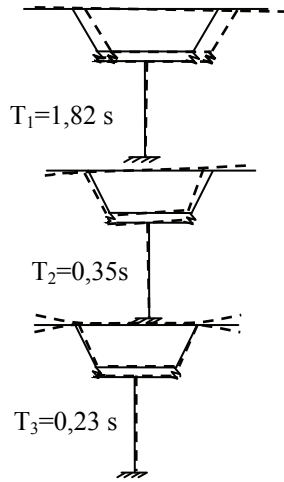
Ayak sistemi yatay ve düşey yönlerde farklı ağ aralıkları ile tanımlanan düğüm noktaları boyunca prizmatik çerçeve tipi sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Stokastik dinamik çözümlerinde hesapları kısaltmak için 12 serbestlik dereceli sistem (SDS), ikinci bir 21 SDS yerine tanımlanmıştır. Yatay ( $a_x(t)$ ) ve düşey ( $a_y(t)$ ) ivmeler etkisinde ayak sistemi için oluşturulan sonlu eleman modelleri, düğümlerde toplanmış kütleler ve göz önüne alınan serbestlikler Şekil 10'da gösterilmiştir. Sistem rijitlik matrisi oluşturularak statik yoğunlaştırma ile titreşim serbestliklerine karşı gelen dinamik rijitlik matrisi elde edilmektedir. Çözümlerinde, elastomer mesnetlerin yatay ( $R_x$ ) ve düşey rijitlikleri ( $R_y$ ) ile birlikte dönme rijitlikleri ( $R_\theta$ ) de hesaba katılarak ilk aşamada tüm sistem için doğrusal çözümler yapılmıştır.



etkili rijitlik ve deplasman değerlerine dayalı olarak Denklem 5'de verilen bağıntı ile 0,128 olarak hesaplanmıştır:

$$\bar{\beta} = \frac{2Q(\delta - \delta_y)}{\pi\delta^2 K_{eff}} \quad (5)$$

Ayak yapısının stokastik dinamik analizleri, geliştirilen bilgisayar programı aracılığıyla ve zaman tanım alanı analizleri ise SAP2000 [27] paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Serbest titreşim analizinden elde edilen mod şekilleri Şekil 12'de gösterilmiştir. 12 SDS'li ayakta, serbestlik derecesinin yeterli düzeyde doğruluğu ilk beş mod için periyotlar ve modların artışı ile etkin kütle katılımı bakımından 21 SDS'li sistemle karşılaştırılarak Çizelge 2'de gösterilmiştir. Düşey rijitliğe göre yatay rijitlikleri oldukça düşük olan elastomer mesnetlerin sisteme yatay yönde sağladığı büyük esneklik, modal davranışlarda belirleyici olmakta ve ilk mod şekli beklendiği gibi yanıl doğrultuda meydana gelmiştir. Etkili rijitlik ( $K_{eff}$ ), toplam yapı ağırlığı ( $W$ ) ve yerçekimi ivmesi ( $g$ ) kullanılarak  $T_{iz} = 2\pi\sqrt{W/K_{eff}g}$  bağıntısı [24] ile hesaplanan izolatör periyodu, örnek, ayak sisteminin birinci periyodu olan  $T_1=1,82$  s değerine yakın şekilde  $T_{iz}=1.76$  s elde edilmiştir.



Şekil 12. Serbest titreşim modları (21 SDS)

Çizelge 2. Periyotlar ve etkin kütle katılımı

Mod no	T-(s) (12-SDS)	T-(s) (21-SDS)	Etkin kütle (12-SDS)	Etkin kütle (21-SDS)
1	1,82	1,82	0,8192	0,8202
2	0,47	0,35	0,8199	0,8202
3	0,34	0,23	0,8199	0,8202
4	0,15	0,13	0,8250	0,8519
5	0,12	0,12	0,9431	0,9390

Genel olarak yapılarda izolatör periyodunun, yapı periyodundan daha büyük olması sözkonusudur. İzolatör periyodu, izolatör karakteristiklerinin seçimine bağlı olmakla birlikte bu örnekte sistemin birinci periyoduna yakın çıkmaktadır.

### 3.2 Durağan Stokastik Modelin Temel Denklemleri

Ayak sisteminin deprem yükleri etkisinde tamamen doğrusal elastik kaldığı durumlarda güç spektrumları elde edilerek rasgele giriş işleyimi  $\{p(t)\}$  tanımlanmakta ve çıkış işleyimi  $\{v(t)\}$ , transfer fonksiyonları  $\{TF_i\}$  aracılığıyla elde edilmektedir. Transfer fonksiyonlardaki rasgelelik, yer hareketlerindeki kıyasla çok daha düşük seviyede olduğu için  $TF_1=TF_2, \dots, TF_n=TF$  kabulü ile tek bir fonksiyon şeklinde hesaplarda göz önüne alınmıştır. Çok serbestlik dereceli bir sistemin  $\ddot{v}_g(t)$  yer hareketi etkisi için dinamik davranışını ifade eden genel hareket denkleminin,

$$[m]\{\ddot{v}(t)\} + [c]\{\dot{v}(t)\} + [k]\{v(t)\} = \{p(t)\} = \{-m \cdot \ddot{v}_g(t)\} \quad (6)$$

lineer çözümünde yük etkileri  $\{p(t)\}$  Fourier dönüşümleri ile harmonik bileşenlere ayrıştırılabilir. Hareket denkleminde  $[m]$  kütle matrisini,  $[c]$  sönümü,  $[k]$  sistemin rijitlik matrisini ve  $\{v\}$  ise sistemdeki görelî yerdeğişirmeyi ifade eder. Frekans tanım alanında ifade edilen harmonik bileşenlerin ters Fourier dönüşümü alınırsa bu durumda davranış,

$$v(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(i\omega) Z(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (7)$$

ile elde edilir.  $H(i\omega)$  kompleks frekans davranış fonksiyonunu,  $Z(i\omega)$  ise kuvvet fonksiyonunun Fourier dönüşümünü ifade eder. Frekans davranış fonksiyonu,

$$H(i\omega) = \frac{1}{k[1 + 2i\xi(\omega/\omega) - (\omega/\omega)^2]} \quad (8)$$

bağıntısı ile elde edilir. Genelleştirilmiş modal kuvvetler elde edilerek modal davranışlar,  $n$  ve  $m$  ayrıık modları için tanımlanan çapraz güç spektrum yoğunluk fonksiyonları  $(S_{p_m p_n})$  ve frekans davranış fonksiyonlarının süperpozisyonu ile ifade edilmiştir. Böylece herhangi bir noktadaki davranışa ait GSYF'nun karesel değışimleri ile varyanslar elde edilmektedir:

$$\sigma_v^2(t) = \sum_m \sum_n B_m B_n S_{p_m p_n} \int_{-\infty}^{+\infty} H_m(i\omega) H_n(-i\omega) d\omega \quad (9)$$

$B_n$  ve  $B_m$  katsayıları, standart yapı statiği çözümlene yöntemleri ile bulunur. Modların yeterince ayrıık olması, istatistiksel yönden birbirinden bağımsız olması durumunda, Denklem 9 aynı modlar için yazılırsa çapraz terimlerin katkısını ihmal eden davranış,

$$\sigma_v^2(t) = \sum_m B_m^2 S_{p_m p_m} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_m(i\omega)|^2 d(\omega) \quad (10)$$

elde edilir. Bu fonksiyon sistemdeki giriş ile çıkış arasındaki ilişkiyi nümerik büyüklüklerle ifade eder. İstatistiksel bağımsızlık durumunda frekans davranış fonksiyonu,

$$|H_m(i\omega)|^2 = \frac{1}{K_m^2 [1 + (4\xi_m^2 - 2)(\omega / \omega_m)^2 + (\omega / \omega_m)^4]} \quad (11)$$

ile genelleştirilmiş rijitlik  $K_m$  kullanılarak hesap edilir. Modların bağımlılığı sözkonusu ise, frekans davranış fonksiyonunun integral hesabı, içerdiği kompleks değişkenler nedeniyle geleneksel yöntemlerle kolaylıkla yapılamaz. Bu zorluğu aşmak için Residü yöntemi kullanılarak sayısal hesaplamalar yapılmaktadır. Yatay ve düşey yöndeki yer hareketlerinin etkilerini ( $p_{\text{eff}}$ ) ifade etmek üzere, ayrık iki mod için genelleştirilmiş kuvvet fonksiyonu,

$$P_n(t)P_m(t) = \{\phi_n^T\} [m] \begin{Bmatrix} a_y(t) \\ a_y(t) \\ \vdots \\ a_x(t) \end{Bmatrix} [a_y(t) a_y(t) \cdots a_x(t)] [m] \{\phi_n\} \quad (12)$$

ile ifade edilir. Depremi yatay yöndeki güç şiddeti durağan bir işleyim modeli olarak  $S_{\ddot{u}_x \ddot{u}_x} = S_o$  olarak seçilirse, diğer şiddetleri bir korelasyon katsayısı ile ifade edilerek  $S_{\ddot{u}_y \ddot{u}_y} = \alpha S_o$  ve  $S_{\ddot{u}_x \ddot{u}_y} = S_{\ddot{u}_y \ddot{u}_x} = \beta S_o$  şeklinde göz önüne alınmıştır. Bu durumda ayrık kuvvet fonksiyonunun çapraz güç spektrum yoğunluğu,  $d$ =düşey serbestlik sayısı ve  $y$ =yatay serbestlik sayısı olmak üzere;

$$S_{P_m P_n}(\omega) = \{\phi_m^T\} [m] S_o \begin{bmatrix} [\alpha]_{d \times d} & [\beta]_{d \times y} \\ [\beta]_{y \times d} & [1, 0]_{y \times y} \end{bmatrix}_{N \times N} [m] \{\phi_n\} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Analizlerde esas alınan deprem kaydı için korelasyon katsayıları  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri göz önüne alınan düşey ve yatay yer hareketlerinin spektrum gücüne bağlı olarak sırasıyla 0.444 ve 0.67 olarak alınmıştır. Kuvvet vektörü genelleştirilmiş deplasman  $Y_n(t)$  ile ifade edilirse,  $N$  toplam serbestlik derecesi sayısı olmak üzere herhangi bir noktadaki moment ( $M_n$ ) ve kesme kuvveti ( $V_n$ ) aşağıda verilen bağıntılarla hesaplanabilir:

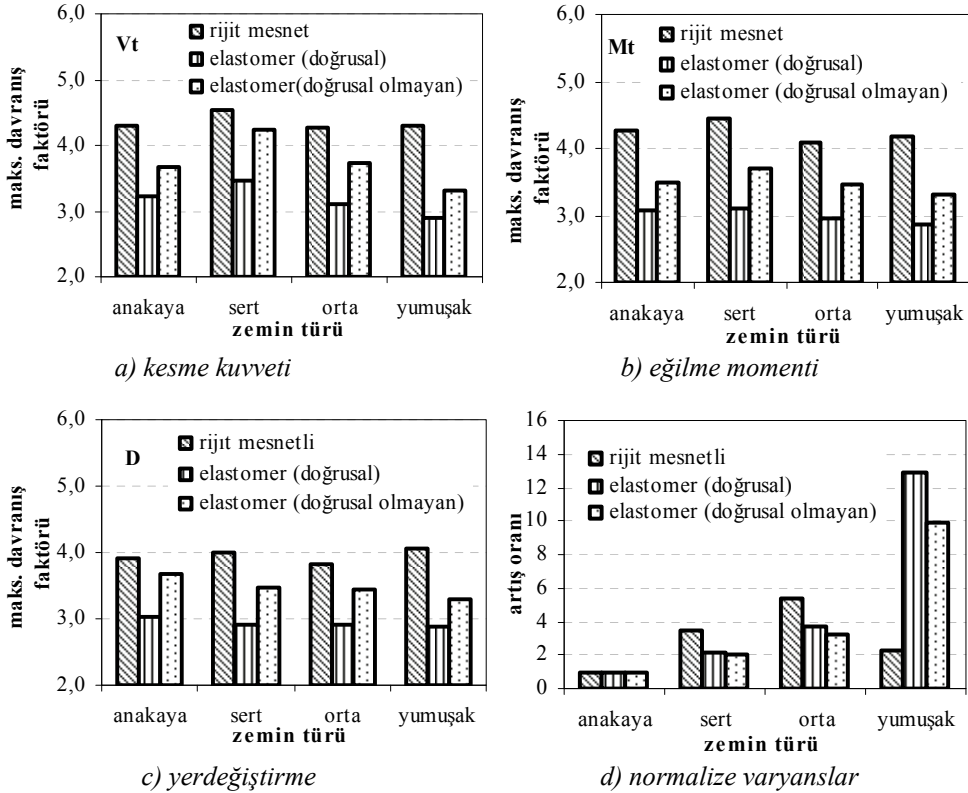
$$M_n(t) = \sum_{n=1}^N B_n \omega^2 [m] \{\phi_n\} Y_n(t) \quad V_n(t) = \sum_{n=1}^N A_n \omega^2 [m] \{\phi_n\} Y_n(t) \quad (14)$$

Denklem 14'deki  $A_n$  ve  $B_n$  katsayısı standart yapı çözümleme tekniği ile belirlenmektedir.

#### 4. ZAMAN TANIM ALANINDA DİNAMİK HESAPLAR VE DAVRANIŞ KATSAYILARI

Durağandı yere hareketleri etkisine maruz ayak sistemindeki maksimum davranış katsayıları, elastomer mesnedin farklı durumları ve zemin türlerine bağlı olarak elde

edilmiştir. Ayak taban tepkileri (V, M) ve tabliye yer değiştirmeleri (D) için elde edilen maksimum davranış faktörleri farklı zemin türleri için Şekil 13'de gösterilmiştir. Maksimum davranış faktörlerinin değişimi tabliye üst yapısı için farklı mesnetlenme durumları (rijit ve elastomer mesnetli durum) ve elastomer mesnedin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak gösterilmiştir. Sistemde tabliyeye mesnetlik eden elastomer mesnet kullanımı yerine rijit bağlantı teşkil edilmesi halinde maksimum davranış faktörleri en büyük değerlere (4-4,5) ulaşmaktadır. Sisteme esneklik kazandıran elastomer mesnetler maksimum davranış faktörlerinin en düşük değerler (2,88-3,4) almasına olanak sağlamaktadır. Gerek yer hareketinin durağandışı özelliği gerekse zeminlerin farklı güç şiddetleri, davranış büyüklüklerini etkilemekte ve dolayısıyla maksimum davranış faktörlerinin bir aralıkta ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Datta [14] asma köprü için durağan yer hareketlerini dikkate alarak yaptığı çalışmada, maksimum davranış faktörlerini 2,81-3,22 aralığında elde etmiştir. Kauçuk malzemenin doğrusal olmayan davranışı şekillerden de görüldüğü gibi bu faktörleri belirgin ölçüde arttırmıştır. Doğrusal olmayan davranışta maksimum davranış faktörlerinin daha büyük olmasının nedeni; doğrusal davranış durumunda yapısal tepkilere ait varyansların belirgin şekilde daha büyük değerlerde ortaya çıkması ve bu durumun küçük davranış faktörlerinin elde edilmesine neden olmasıdır. Taban kesme kuvvetinin varyansları, anakaya yer hareketi sonuçları ile normalize edilerek her zemin türü için artış oranları Şekil 13d'de gösterilmiştir.



Şekil 13. Maksimum davranış faktörleri ve normalize varyanslar

İzolasyonlu sistemde taban kesme kuvveti (V), devrilme momenti (M) ve tabliye yatay yerdeğiştirmelerine (D) ait varyanslarda sert zemin türünden orta zemin sınıfına geçişte artış oranı yaklaşık 1,5 kat civarında iken, yumuşak zeminde artış 5–6 katı kadar olmaktadır. En büyük artış oranları beklendiği gibi rijit mesnetlenme durumunda oluşmakta, ancak yumuşak zemin durumunda sonuçlar ayrışmakta ve tepkilerdeki nominal büyüklükler dolayısıyla varyanslar keskin biçimde düşüőe geçmiştir. Yumuşak zemin yapısı sistem davranışında bütün durumlar için kayda değer değişikliklere neden olmakta ve özellikle izolasyonlu sistemin davranışını olumsuz yönde etkileyerek büyük varyans değerlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

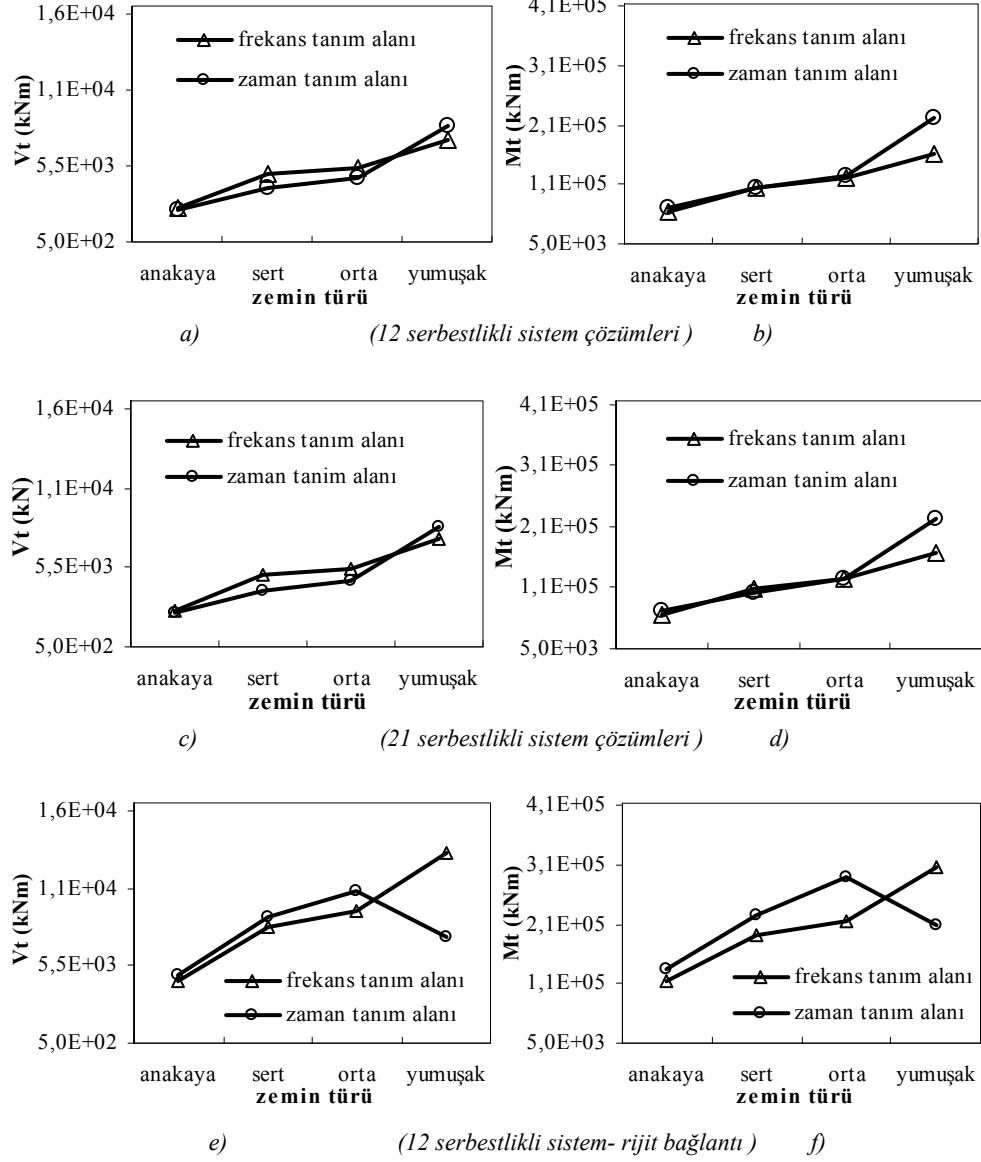
## 5. FREKANS VE ZAMAN TANIM ALANINDAKİ ÇÖZÜMLEMELERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Deprem etkisindeki köprü ayağında oluşan tepkiler; daha önceki bölümlerde elde edilen yapısal karakteristikler, modal davranışlar ve türetilen yapay deprem kayıtları kullanılarak frekans ve zaman tanım alanındaki analizlerle elde edilmektedir. Ayak sisteminde beklenen maksimum davranışlar, aynı anda yatay ve onun 2/3 katı olan düşey yönde etkiyen deprem ivmeleri kullanılarak elde edilen sonuçlar farklı zemin ve mesnetlenme koşulları bakımından ifade edilmiştir. Beklenen maksimum davranışların istatistiksel olarak ifade edilmesinde elastomer mesnedin doğrusal davranışı, doğrusal olmayan davranışı (zaman tanım alanında) ve elastomer mesnetsiz rijit bağlantı hali olmak üzere 3 durum göz önüne alınmıştır. Her zemin türü için frekans ortamında stokastik yöntemle ayak tabanındaki maksimum tepkiler için hesaplanan ortalama değerler, zaman tanım alanı çözümlerine ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Elastomer mesnetli köprü ayağındaki taban tepkileri için elde edilen maksimum büyüklükler zaman tanım alanında çözümlerle kıyaslandığında (Şekil 14), stokastik yöntemin genel olarak oldukça uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ancak, özellikle eğilme momentleri için yumuşak zemin durumunda taban tepkilerinde belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Elastomer mesnetli ayak sisteminin daha küçük ağ aralıkları ile ayrıklaştırılarak 21 adet serbestlik derecesi ile modellenmesi halinde tepkiler için elde edilen maksimum değerler Şekil 14c ve 14d’de gösterilmiştir. Şekil 14a ve 14b ile kıyaslandığında, sistemde tanımlı serbestlik derecesinin artması ile kesme kuvvetleri için kısmen daha yakın sonuçlar elde edilmesine karşın moment değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı ve genel olarak ifade etmek gerekirse, 12 adet serbestlikli ayak sonlu eleman modeli ile yapılan dinamik çözümlerin yeterli olduğu çizilen grafiklerden anlaşılmaktadır.

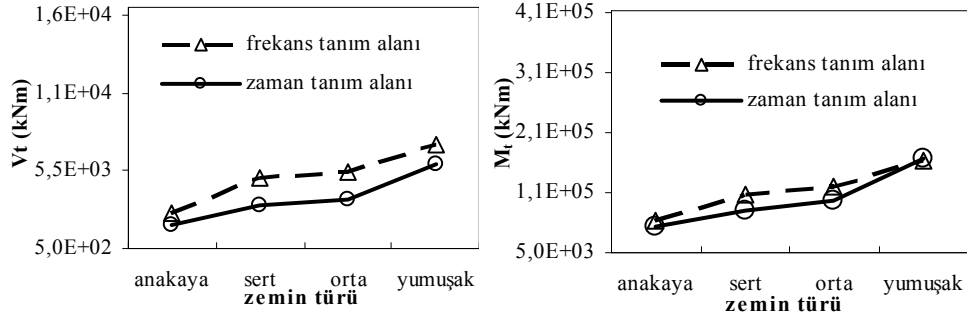
Rijit bağlantılı diğer bir ifade ile tabliyenin ayağa rijit mesnetlenmesi durumunda, beklenen davranış değerleri sert ve orta sınıf zemin türü için hızla artmakta buna karşın yumuşak zemin için bir azalma sözkonusudur. Genel olarak, frekans tanım alanındaki çözümler yumuşak zemin hariç diğer zemin gruplarında zaman tanım alanı çözümlerine kıyasla daha düşük değerler verdiği gözlenmiştir (Şekil 14e,f). Zaman tanım alanı çözümlerinde yumuşak zemin türü için tepkilerde bir azalma sözkonusu iken frekans tanım alanı çözümlerinde artış olduğu görülmektedir. Bu çalışmada göz önüne alınan durağandışı deprem kaydı için frekans alanındaki analizlerle elde edilen genel çözüm, aynı depremin gücü esas alınarak çok sayıda türetilen yapay ivme kayıtları aracılığıyla zaman tanım

alanındaki çözümlerden elde edilmeye çalışılmıştır. Dolayısıyla yaklaşımın daha iyi olması ve uyumlu sonuçların ortaya çıkması bu açıdan beklenmelidir. Durağan yer hareketleri için literatürde yapılan bazı çalışmalarda daha uyumlu sonuçlar elde edilebilmiştir [14].



Şekil 14. Maksimum taban tepkileri için beklenen (ortalama) değerlerin zemin türüne bağlı olarak karşılaştırılması





Şekil 15. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ve frekans tanım alanında elastomerin doğrusal davranışı ile çözümleme

Elastomer mesnedin doğrusal olmayan davranışı göz önüne alınarak zaman tanım alanında elde edilen tepkiler, eşdeğer doğrusal rijitlik esas alınarak frekans tanım alanında doğrusal çözümle elde edilen sonuçlarla Şekil 15’de karşılaştırılmıştır. Frekans ve zaman tanım alanındaki çözüm yöntemlerine ait sonuçlarda gözlenen farklılıklar, şiddetli deprem hareketinde elastomer mesnedin doğrusal olmayan davranışı ile sistem karşılıklarının anakayada çok az iken diğer zeminlerde özellikle V(t) için belirgin farklılık taşıdığını ifade etmektedir.

Stokastik ve zaman tanım alanı çözümlerindeki genel farklılıkların ana nedeni, zaman tanım alanındaki çözümlerde yük etkileri için anlık ivme değerlerinin kullanılmasına karşın stokastik çözümlerin doğrudan GSYF aracılığı ile genel çözümler şeklinde elde edilmesidir. Göz önüne alınan deprem etkileri altında, davranışların doğrusal çözümlemelerle istatistiksel anlamda ifade edilmesinde stokastik yöntemin genel üstünlüğünü belirtmek gerekir. İstatiksel değerlerin elde edilmesi için, zaman tanım alanındaki çözümlerde her zemin türü için çok sayıda yapay deprem kaydına ihtiyaç duyulması ve her kayıt için uzun süren analizlerin yapılmasına karşılık, stokastik yöntemde istatistiksel davranışlar göz önüne alınan zemin türü için tek bir çözümle frekans tanım alanında doğrudan elde edilmektedir.

## 6. MAKSİMUM DAVRANIŞLAR İÇİN AŞILMA OLASILIKLARI

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, kuvvetli hareket ivmeleri altında yapıda göz önüne alınan karşılıklarda ortaya çıkan istem için yapı ömrü boyunca kabul edilebilir bir riskin ya da aşılma olasılıklarının tanımlanması tasarım felsefesi olarak yönetmeliklerde önemli bir yer tutar. Bölüm 5’de durağandıışı etkiler altında elde edilen maksimum davranışlar olasılık esaslı bir dağılım fonksiyonu ile modellenerek yapısal güvenlik, öngörülen bir tasarım veya referans değerinin aşılma olasılığı ile ifade edilmektedir. Bu amaçla, yapının herhangi bir noktasındaki davranışının maksimumunu temsil eden rasgele değişken X tanımlanarak asimptotik dağılım fonksiyonunun Rayleigh dağılımına uyduğu kabul edilmiştir:

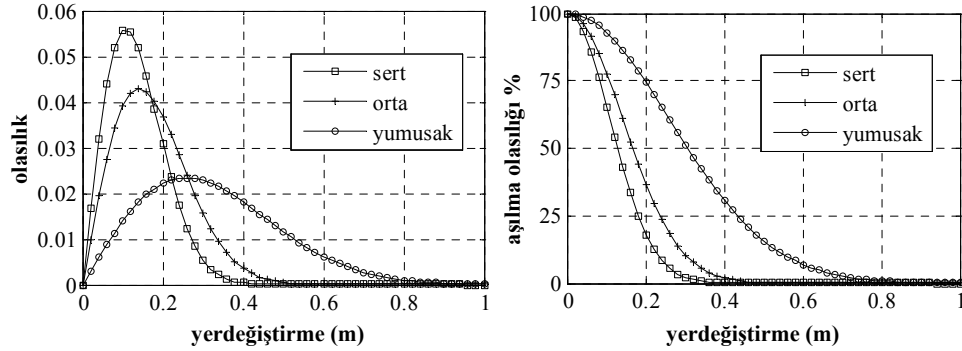
$$f(x) = \frac{x}{\alpha_r^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\alpha_r}\right)^2\right] \quad x \geq 0 \quad (15)$$

Dağılımın ölçek parametresi olan  $\alpha_r$  mevcut verilere dayalı olarak belirlenir. Her zemin türü için 20 adet çözüm yapıldığından, Rayleigh dağılımının parametreleri her örnek toplumu için analizlerden elde edilen sonuçlar vasıtasıyla tahmin edilmektedir. Tabliye kenar uçtaki maksimum yatay yerdeğiştirmeleri için (Şekil 10, A-noktası) hesaplanan ortalama değer ( $\bar{x}$ ), standart sapma ( $\sigma_x$ ) ve dağılım parametresi ( $\alpha_r$ ) Çizelge 3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Tabliye yerdeğiştirmeleri için Rayleigh dağılımı parametreleri

Zemin Türü	$\bar{x}$ (m)	$\sigma_x$ (m)	$\alpha_r$
sert	0,147	0.044	0,108
orta	0,191	0.057	0,141
yumuşak	0,351	0.108	0,259

Maksimum yerdeğiştirmeler için elde edilen olasılık yoğunluk ve aşılma olasılık fonksiyonları zemin türlerine bağlı olarak Şekil 16'da çizilmiştir. Sert ve orta sertlikteki zeminler için, olasılık fonksiyonlarının biçimleri standart sapma değerlerinin yakın olması nedeni ile çok benzer olmakla birlikte yumuşak zemin türünde daha geniş bir saçılma gözlenmektedir. Yüksek aşılma olasılıklarında maksimum yerdeğiştirmeler bütün zemin türleri için birbirine yakın değerler alırken, çok düşük risk seviyelerinde yumuşak zemin türüne ait sistem karşılıkları, belirgin şekilde ayrılarak büyük değerler almaktadır.

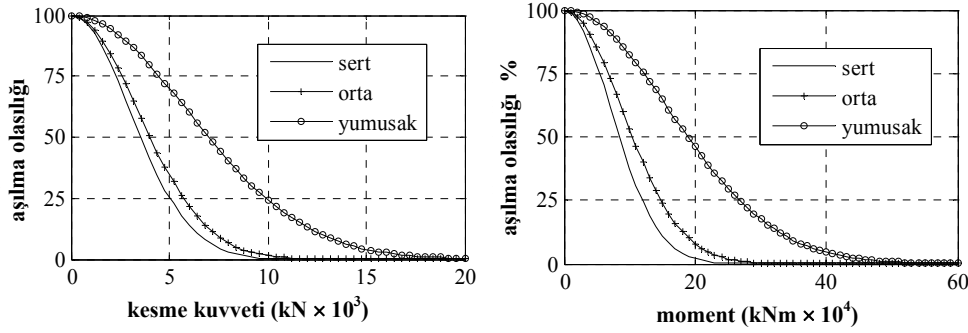


a) olasılık dağılım fonksiyonları b) aşılma olasılık dağılımları  
Şekil 16. Tabliye yerdeğiştirmeleri için olasılık fonksiyonları

Çizelge 4. Maksimum yerdeğiştirmeler (m)

zemin türü	aşılma olasılığı		
	2%	10%	50%
sert	0,302	0,232	0,127
orta	0,394	0,303	0,166
yumuşak	0,726	0,557	0,305

Tabliye maksimum yerdeğiştirmeleri için beklenen değerler, zemin türlerine ve aşılma olasılığı seviyesine göre hesaplanarak Çizelge 4’de gösterilmiştir. Ayrıca, ayak taban tepkileri olan kesme kuvvetleri (V) ve devrilme momentleri (M) için elde edilen aşılma olasılık fonksiyonları Şekil 17’de gösterilmiştir. Tablo ve Grafiklerden anlaşılacağı üzere, yumuşak zemin durumuna ait tepkiler için, azalan aşılma olasılıkları ile üssel formda daha hızlı şekilde artan davranış değerleri gözlenmektedir.



Şekil 17. Taban tepkileri için aşılma olasılık fonksiyonları

Aşılma olasılık fonksiyonları aracılığıyla bazı aşılma olasılıkları için tahmin edilen maksimum tepkiler Çizelge 5’de gösterilmiştir. Boyutsuz büyüklük elde etmek üzere, maksimum yerdeğiştirmeler ve taban tepkileri beklenen ortalama değerler ile normalize edilerek farklı aşılma olasılıkları için davranışlardaki artışlar incelenmiştir. D, V ve M ‘in %50 aşılma olasılık değerleri ile normalize edilen yapısal tepkiler Çizelge 6’da gösterilmiştir. Aşılma olasılığı %10 ve %2 için tepkilerdeki artış oranları, bütün zemin koşullarında sırasıyla 1,82 ve 2,38 katı kadar elde edilmiştir.

Çizelge 5. Maksimum taban karşılıkları

zemin türü	V (kN)			M (kNm)		
	%2	%10	%50	%2	%10	%50
sert	8447	6481	3556	200241	153624	84288
orta	9584	7353	4034	247765	190085	104292
yumuşak	16629	12760	6999	448855	344361	188938

Çizelge 6. Beklenen Ortalama değere göre artış katsayıları

zemin türü	D, V, M		
	%2	%10	%50
sert	2,375	1,823	1,000
orta	2,376	1,823	1,000
yumuşak	2,376	1,823	1,000

Maksimum davranışlar için elde edilen olasılık esaslı değerler ve aşılma/olasılık dağılım fonksiyonları aracılığıyla fiziksel güvenlik, güvenilirlik indeksi veya risk seviyesi gibi probabilistik terimlerle ifade edilebilir. Tasarımlarda kullanılabilen belirli olasılık seviyeleri için elde edilen maksimum davranış büyüklükleri, zemin tipleri için artış oranları ve aşılma olasılık fonksiyonları bu tip ayak sistemin değerlendirilmesinde bir anlam ifade edebilir. Ancak mevcut veya yeni inşa edilecek farklı ayak sistemlerinin tasarımında genel bir çıkarım yapabilmek için parametrik bir çalışma ile çok sayıda analizlere ihtiyaç vardır.

## 7. SONUÇLAR

- Bu çalışmada farklı zemin ve mesnetlenme koşullarının elastomer mesnetli, uygulamadan alınmış belirli bir geometri ve rijitlikteki köprü ayağındaki etkileri, benzeştirilmiş depremler aracılığı ile incelenerek maksimum davranış katsayıları, olasılık esaslı davranış büyüklükleri (kesit zorları, yerdeğiştirmeler) ve aşılma/olasılık dağılım fonksiyonları hesaplanmıştır.
- Durağandı dışı deprem etkileri altında tabliyenin üç farklı mesnetlenme durumu göz önüne alınarak elde edilen maksimum davranış katsayıları (r), zemin türüne bağlı olarak 2,88-4,5 aralığında ortaya çıkmakta ve zemin rijitliğinin artması ile birlikte az da olsa artış eğilimi göstermektedir. Doğrusal davranışlı elastomer mesnetler bu katsayıların en düşük (2,88-3,4) değerleri almasına imkan sağlamıştır. Elastomerin doğrusal olmayan davranışı bu katsayılarda önemli artışlara sebep olmuştur. Tabliye için rijit bağlantı durumunda ise katsayılar en büyük değerlere (4-4,5) ulaşmaktadır. Vanmarcke modelinde, bu çalışmada kullanılan  $t_d=20$  s deprem süresi ve %95 güvenilirlik düzeyinde, maksimum davranış katsayıları her zemin türü için yaklaşık olarak 3.45 olarak elde edilir.
- Yumuşak zemin yapısı, elastomer mesnetli sistemin davranışını olumsuz yönde etkileyerek büyük artış oranları ile varyans değerlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, elastomer mesnetli bir köprü ayağının tasarımında, sistemin periyodu ile zemin hâkim periyotlarının birbiri ile olan etkileşimlerinden kaçınılmalıdır. Rijit sistem durumunda ise yumuşak zemindeki davranışlarda ters yönde bir eğilim görülmekte ve varyans artış oranları önemli derecede düşmektedir.
- Frekans tanım alanında elde edilen davranışların, zaman tanım alanı çözümleri ile uyumlu olduğu ve stokastik yöntemin özellikle elastomer mesnetli sistem için doğrusal davranış durumunda iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Çok doğal ve beklenen bir sonuç olarak, elastomerin doğrusal olmayan davranışı göz önüne alındığında, zaman

tanım alanındaki çözümlere göre frekans tanım alanındaki doğrusal analizler büyük tepki değerleri vermekte ve dolayısıyla stokastik yöntem ile farklı sonuçlar elde edilmektedir.

- Doğrusal elastik çözümler için stokastik yöntemde az bir işlem hacmi ile GSYF aracılığıyla doğrudan davranışa ait istatistiksel büyüklüklerin elde edilmesi yöntemin üstünlüğünü ve pratikliğini ifade eder. Zaman tanım alanında ise davranışın istatistiksel anlamda ifade edilebilmesi için çok sayıda yer hareketinin türetilmesine ve yapısal analizlere ihtiyaç vardır.
- Rayleigh dağılımı ile ele alınan maksimum davranışlar için sert ve orta sertlikteki zemin durumunda, olasılık yoğunluk ve aşılma olasılık fonksiyonlarının birbirine yakın olduğu gözlenmesine karşın yumuşak zemin türüne ait olasılık fonksiyonlarında, daha geniş bir saçılma ile düşük aşılma olasılıklarında bile belirgin ölçüde artış gösteren taban tepkileri ve yerdeğiştirmeler gözlenmektedir.
- Köprü ayağının deprem etkileri altında hasarsız, doğrusal elastik davranışında taban kesme kuvveti, devrilme momenti ve tabliye yerdeğiştirmesi için Rayleigh dağılımının bir özelliği olarak burada elde edilen normalize edilmiş tepkilerin, zemin sınıflarından bağımsız ve aşılma olasılıkları seviyesine ise bağımlı olduğu gözlenmiştir.
- Aşılma olasılığı %50 değerine göre normalize edilen maksimum davranışlar, %10 ve %2 aşılma olasılığı seviyeleri için göz önüne alındığında tepkilerde sırasıyla 1,82 ve 2,38 katı kadar artış olmakta ve bu artış oranları bütün zemin koşulları için aynı olmaktadır. Bu özellik sayesinde bir zemin türü için elde edilen artış oranları kullanılarak diğer zemin grupları için maksimum tepkiler, analiz yapmaya gerek kalmadan göz önüne alınan zemine ait ortalama değer aracılığıyla doğrudan hesaplanabilir.
- Maksimum davranışlar için elde edilen aşılma/olasılık dağılım fonksiyonları ve istatistiksel karakteristikler aracılığıyla yapısal güvenilirlik veya risk analizleri gibi ileri düzey probabilistik analizler gerçekleştirilebilir. Ayrıca elde edilen maksimum davranış katsayıları ile göz önüne alınan ayak sistemi için tasarımlarda kullanılan maksimum tepkiler doğrudan hesaplanabilir. Ancak farklı köprü ve ayak sistemlerinde genel bir çıkarım yapabilmek için parametrik çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır.

### Semboller

$A_n, A_m$	: moment için katsayılar
$a_x(t), a_y(t)$	: yatay ve düşey ivmeler
$a_{x,f}(t)$	: yer hareketi için filtrelenmiş ivme genlikleri
$B_n, B_m$	: kesme kuvveti için katsayılar
$[E(x_{max})]$	: maksimum davranışlar için ortalama değer
$f(t)$	: zarf fonksiyonu
$f(x)$	: Rayleigh dağılım fonksiyonu

*Deprem Etkisindeki Elastomer Mesnetli Köprü Ayağının Farklı ...*

$G$	: kayma modülü
$GSYF$	: güç spektrum yoğunluk fonksiyonları
$ H_y(i\omega) ,  H_d(i\omega) $	:yüksek ve düşük frekanslı bileşenler için filtre fonksiyonları
$H(i\omega)$	: frekans davranış fonksiyonu
KDK	: karesel ortalama değişim
$K_{eff}, K_d$	: elastomer mesnet etkili ve akma sonrası rijitlikleri
$K_m$	: genelleştirilmiş rijitlik
$M_n, V_n$	: ayak tabanındaki moment ve kesme kuvveti karşılıkları
$N_s, N$	: eşit aralıklı alan ve faz açısı sayısı
$[m], [c], [k]$	: kütle, sönüm ve rijitlik matrisi
$Q, F_y$	: karakteristik ve akma dayanımı
$p(t), v(t)$	: giriş işleyimi ve çıkış işleyimi
$\{p(t)\}$	: yük vektörü
$p_{eff}$	: yer hareketi etkileri
$P_n(t), P_m(t)$	: genelleştirilmiş kuvvet fonksiyonları
$q$	: üssel fonksiyon sabiti
$r$	: maksimum davranış katsayısı
$R_x, R_v, R_\theta$	: elastomer mesnet yatay, düşey ve dönme rijitlikleri
$S_o$	: sabit güç spektrumu şiddeti
$Sp_mSp_n$	: çapraz güç spektrum yoğunluk fonksiyonu
$S_{\ddot{u}_x\ddot{u}_x}, S_{\ddot{u}_y\ddot{u}_y}$	: yatay ve düşey yöndeki güç şiddetleri
$S_{\ddot{u}_x\ddot{u}_y}, S_{\ddot{u}_y\ddot{u}_x}$	: çapraz güç şiddetleri
$S_{\ddot{v}}(\omega)$	: güç spektrum yoğunluk fonksiyonu
$t_1, t_2, t_3, t_4$	: zarf fonksiyonu parametreleri
$t_{eff}$	: kuvvetli yer hareketi süresi
$T, T_{iz}$	: ayak sistemi ve izolatör periyotları
$TF_i$	: transfer fonksiyonları
$\{v\}$	: görelî yerdeğiştirme
$\ddot{v}_k(t), \ddot{v}_f(t), \ddot{v}_g(t)$	: anakaya, zemin ortamındaki ve yeryüzündeki ivme

$\bar{x}$	: ortalama değer
$Y_n(t)$	: genelleştirilmiş deplasman
$Z(i\omega)$	: kuvvet fonksiyonunun Fourier dönüşümü
$\alpha, \beta$	: güç şiddetleri için korelasyon katsayıları
$\alpha_r$	: Rayleigh dağılımı parametresi
$\bar{\beta}$	: etkili sönüm oranı
$\Delta\omega$	: frekans aralıkları
$\xi_y, \xi_d$	: yüksek ve düşük frekanslı bileşenler için sönüm oranları
$\varphi_{kr}$	: faz açısı
$\{\phi\}$	: mod şekli
$\delta, \delta_y$	: yerdeğiştirme kapasitesi ve akma yerdeğiştirmesi
$\mu$	: üssel fonksiyon sabiti
$\omega_y, \omega_d$	: yüksek ve düşük frekanslı bileşenler için acısal frekanslar
$\ddot{v}_g(t)$	: durağandıışı ivme genlikleri
$\sigma_v, \sigma_x$	: standart sapma

### Teşekkür

Yazarlar, makaleyi okuyarak düşüncelerini bizimle paylaşan Dr. Barış ERKUŞ'a teşekkür ederler.

### Kaynaklar

- [1] Jia, H. Y., Zhang, D. Y., Zheng, S. X., Xie, W. C., Pandey, M. D., Local Site Effects On a High-Pier Railway Bridge under Tridirectional Spatial Excitations: Nonstationary Stochastic Analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 52, 55–69, 2013.
- [2] Li, Y., Chen N., Zhao, K., Liao, H., Seismic Response Analysis of Road Vehicle-Bridge System for Continuous Rigid Frame Bridges with High Piers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 593-602, 2012.
- [3] Mahmoud, S., Austrell, P. E., Jankowski, R., Simulation of the Response of Base-Isolated Buildings under Earthquake Excitations Considering Soil Flexibility, Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 11(3), 359-374, 2012.

- [4] Dicleli, M., Karalar, M., Optimum Characteristic Properties of Isolators with Bilinear Force–Displacement Hysteresis for Seismic Protection of Bridges Built on Various Site Soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 982–995, 2011.
- [5] Ala Saadeghvaziri, M., Foutch, D. A., Dynamic Behavior of RC Highway Bridges under the Combined Effect of Vertical and Horizontal Earthquake Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20(6), 535-549, 1991.
- [6] Ala Saadeghvaziri, M., Foutch, D. A., Foutch, Behavior of RC Columns under Non-proportionally Varying Axial Load, *Journal of Structural Engineering*, 116(7), 1835-1856, 1990.
- [7] Pagnini, L. C., Solari, G., Stochastic Analysis of the Linear Equivalent Response of Bridge Piers with Aseismic Devices, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 543-560, 1999.
- [8] Jangid, R. S., Equivalent Linear Stochastic Seismic Response of Isolated Bridges, *Journal of Sound and Vibration*, 309, 805-822, 2008.
- [9] Kunde, M. C., Jangid, R. S., Effects of Pier and Deck Flexibility on the Seismic Response of Isolated Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 11(1), 109-121, 2006.
- [10] Gongkang, F., Elastically Supported Cantilever Beam Subjected to Nonstationary Seismic Excitation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 977-995, 1998.
- [11] Hasgür, Z., Stochastic Analysis of Bridge Piers with Symmetric Cantilevers under the Base Accelerations, *Bulletin of the Istanbul Technical University*, 48(3-4) 657-667, 1995.
- [12] Ates, S., Bayraktar, A., Dumaoglu, A. A., The Effect of Spatially Varying Earthquake Ground Motions on the Stochastic Response of Bridges Isolated with Friction Pendulum Systems, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 31-44, 2006.
- [13] Sungur, I., Stochastic Response to Earthquake Forces of a Cable-Stayed Bridge, *Engineering Structure*, 15(5), 307-314, 1993.
- [14] Allam, Said M. Datta, T. K., Response Spectrum Analysis of Suspension Bridges for Random Ground Motion, *Journal of Bridge Engineering*, 7(6), 325-337, 2002.
- [15] Zhang, Z. C., Lin, J. H., Zhang, Y. H., Zhao, Y., Howson, W. P., Williams, F. W., Non-Stationary Random Vibration Analysis for Train–Bridge Systems Subjected to Horizontal Earthquakes, *Engineering Structures* 32, 3571–3582, 2010.
- [16] Vanmarcke, E. H., Lomnitz, C., Rosenbleuth, E., Structural Response to Earthquakes, Chapter 8 in *Seismic Risk and Engineering Decisions*, Elsevier, New York, 1976.
- [17] Davenport, A. G., Note on the Distribution of Largest Values of Random Function with Application to Gust Loading, *Proc. Inst. of Civil Eng.*, 28, 187–196, 1964.
- [18] Mylonakis, G., Syngros, C., Gazetas, G., Tazoh, T., The Role of Soil in the Collapse of Piers of Hanshin Expressway in the Kobe Earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 547-575, 2006.



- [19] Jangid, R. S., Equivalent Linear Stochastic Seismic Response of Isolated Bridges, *Journal of Sound and Vibration*, 309, 805-822, 2006.
- [20] Clough R. W., Penzien, J., *Dynamics of Structures*, Mc-Graw Hill Book Company, Second Edition, New York, 1993.
- [21] Der Kiureghian, A., Neuenhofer, A., *A Response Spectrum Method for Multiple-Support Seismic Excitations*, UCB/EERC-91/08, University of California, Berkeley, 1991.
- [22] Jennings, P.C., Housner, G. W., Tsai, N. C., *Simulated Earthquake Motions for Design Purposes*, Proc. 4th World Conf. Earthquake Engineering, 1(a-1), 145–160, Chile, 1969.
- [23] Sarıtaş, F., *Kutu Kirişli Köprülerin Stokastik Dinamik Analizi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [24] Naeim, F., Kelly, J. M., *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 1999.
- [25] AASHTO, *AASHTO LFRD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Joints and Bearings, Washington D.C, 2007.
- [26] DIN 4141-14, *Structural Bearings, Laminated Elastomeric Bearings Design and Construction*, Deutsche Institut für Normung, 1985.
- [27] SAP2000, *Structural Analysis Program*, Computers and Structures Inc., Berkeley, 1995.