

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÜÇ EĞRİLİKLİ SÜRTÜNMELİ SARKAÇ MESNET SİSTEMİ İLE SİSMİK
İZOLASYONU YAPILAN KARAYOLU KÖPRÜSÜNÜN DEĞİŞEREK YAYILAN
YER HAREKETİ ALTINDA STOKASTİK ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Muhammet YURDAKUL

HAZİRAN 2016

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Muhammet YURDAKUL tarafından hazırlanan

ÜÇ EĞRİLİKLİ SÜRTÜNME Lİ SARKAÇ MESNET SİSTEMİ İLE SİSMİK
İZOLASYONU YAPILAN KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN DEĞİŞEREK YAYILAN
YER HAREKETİ ALTINDA STOKASTİK ANALİZİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 /05/2016 gün ve 1655 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. A. Aydın DUMANOĞLU

Üye : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Üye : Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK

Üye : Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Üye : Doç. Dr. Şevket ATEŞ

A. Aydın Dumanoglu

Alemdar Bayraktar

Kurtuluş Soyuluk

Hasan Gedikli

Sevket Ates

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün değişerek yayılan yer hareketi altında stokastik analizini konu edinen bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmam boyunca ilgi, teşvik ve alakalarını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Şevket ATEŞ'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR ve Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye çalışmalarımındaki katkılarından dolayı saygıyla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK' a, Doç. Dr. Süleyman ADANUR' a, Arş. Gör. Zeliha TONYALI' ya, Yrd. Doç. Dr. Fatih YILMAZ' a, Arş. Gör. Erdal ÖNER' e ve Trabzon ve Bayburt'taki tüm arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü imkan ve desteği sağlayan babam Nizam YURDAKUL olmak üzere ailemin tüm fertlerine teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tüm desteğiyle yanımda olan eşim Solmaz YURDAKUL'a, oğlum Taha Nizam'a ve kızım Zeynep Ela'ya müteşekkir olduğumu belirtir bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Muhammet YURDAKUL

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum 'Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi ile Sismik İzolasyonu Yapılan Karayolu Köprüsünün Değişerek Yayılan Yer Hareketi Altında Stokastik Analizi' başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Şevket ATEŞ'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel çalışma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29/06/2016.

Muhammet YURDAKUL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XXII
SEMBOLLER DİZİNİ	XXIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	4
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	26
1.4. Deterministik Analiz Formülasyonu.....	27
1.5. Stokastik Analiz Formülasyonu.....	33
1.5.1. Dinamik Tepki Bileşeni Varyansı	35
1.5.2. Zahiri-Statik Tepki Bileşeninin Varyansı	36
1.5.3. Zahiri-Statik ve Dinamik Tepki Bileşenleri Arasındaki Kovaryans Fonksiyonu	37
1.5.4. Toplam Tepki Bileşeninin Varyansı	38
1.5.5. Ortalama Maksimum Değer ve Oluşma Frekansı	38
1.6. Sismik İzolasyon Sistemleri	40
1.6.1. Tabakalı Kauçuk Mesnet Sistemi	40
1.6.2. Yeni Zelanda Mesnet Sistemi	40
1.6.3. Elastik Sürtünlü Mesnet Sistemi.....	41
1.6.4. Fransız Elektrik Mesnet Sistemi	41
1.6.5. Kayıcı Elastik Sürtünlü Mesnet Sistemi	41
1.6.6. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Sistemi	41
1.6.7. Sürtünlü Mesnet Sistemi	42
1.6.8. Çapraz Doğrusal Hareket Sistemi	42
1.6.9. Çelik Bilyeli İzolatör Sistemi	43

1.6.10.	Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi	43
1.6.11.	İki Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi	46
1.6.12.	Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi	47
1.6.12.1.	ÜESS Mesnet Sisteminin Kuvvet-Yer Değişirme İlişkisi	49
1.6.12.1.1.	Hareket Durumu 1	51
1.6.12.1.2.	Hareket Durumu 2	52
1.6.12.1.3.	Hareket Durumu 3	54
1.6.12.1.4.	Hareket Durumu 4	55
1.6.12.1.5.	Hareket Durumu 5	57
1.6.12.2.	ÜESS Mesnet Sisteminin Sürtünme Katsayıları.....	59
1.7.	TESS-İESS-ÜESS Mesnet Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	62
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	64
2.1.	Yer Hareketi Modeli	64
2.1.1.	Tutarsızlık Etkisi.....	72
2.1.2.	Dalga Yayılma Etkisi.....	74
2.1.3.	Yerel Zemin Etkisi.....	74
2.2.	Karayolu Köprüsünün Yapısal Özellikleri	75
2.3.	ÜESS Mesnedinin Tasarımı	77
2.3.1.	ÜESS Mesnedinin Geometrik Özelliklerinin Belirlenmesi	77
2.3.2.	ÜESS Mesnedinin Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi	80
2.3.3.	ÜESS Mesnedinin Rijitliği	82
2.3.4.	ÜESS Mesnedinin Yer Değişirme Kapasitesinin Belirlenmesi.....	83
2.4.	Modal Analiz	88
2.5.	Çalışmada Kullanılan Bilgisayar Programı	89
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	92
3.1.	Sismik İzolasyonsuz ve İzolasyonlu Karayolu Köprüsünün Değişerek Yayılan Yer Hareketi İçin Stokastik Analizleri.....	92
3.1.1.	Sadece Dalga Yayılma Etkisine Maruz Köprüsünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	92
3.1.1.1.	Homojen Sert Zemin Durumu	92
3.1.1.2.	Homojen Yumuşak Zemin Durumu	108
3.1.2.	Sadece Tutarsızlık Etkisine Maruz Köprüsünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	123
3.1.2.1.	Homojen Sert Zemin Durumu	123

3.1.2.2.	Homojen Yumuşak Zemin Durumu	138
3.1.3.	Dalga Yayılma ve Tutarsızlık Etkilerinin Birlikte Dikkate Alınması Durumunda Köprünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	153
3.1.3.1.	Ortalama Maksimum Eleman Kuvvetlerinin ve Yer Değiş-tirmelerinin İncelenmesi.....	154
3.1.4.	Dalga Yayılma, Tutarsızlık ve Zemin Etkilerinin Birlikte Dikkate Alınması Durumunda Köprünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	169
3.1.4.1.	Ortalama Maksimum Eleman Kuvvetlerinin ve Yer Değiş-tirmelerinin İncelenmesi.....	170
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	185
5.	KAYNAKLAR	191

Doktora Tezi

ÖZET

ÜÇ EĞRİLİKLİ SÜRTÜNME Lİ SARKAÇ MESNET SİSTEMİ İLE SİSMİK
İZOLASYONU YAPILAN KARAYOLU KÖPRÜSÜNÜN DEĞİŞEREK YAYILAN
YER HAREKETİ ALTINDA STOKASTİK ANALİZİ

Muhammet YURDAKUL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Şevket ATEŞ
2016, 205 Sayfa

Bu doktora tez çalışmasında üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç (ÜESS) mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün değişerek yayılan yer hareketi altında stokastik davranışının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Deprem hareketi gibi kuvvetler rastgele olduklarından bu kuvvetlerin önceden bilinmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle yapı sistemlerinin dinamik analizlerinin, rastgele kuvvetlerin istatistiksel ortalamalar ve olasılık terimleriyle ifade edildiği stokastik analiz yöntemi ile yapılması daha gerçekçi olacaktır. Yapılan stokastik analizlerde deprem yer hareketi rastgele işlem olarak güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilmiştir. Yer hareketinin değişimi dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin şartlarındaki değişim ile dikkate alınmıştır. ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprünün periyodu uzatılarak izolatördeki sürtünmelerin de etkisiyle yapının enerji emme kapasitesi arttırılmıştır. Dolayısıyla köprü tabliyesindeki zahiri-statik, dinamik ve toplam tepkilerde önemli derecede azalma olmuştur.

Çalışma sonucunda değişerek yayılan yer hareketine maruz köprüler gibi uzun açıklıklara sahip yapıların stokastik davranışlarında ÜESS mesnet sisteminin önemli derecede etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte sismik izolasyonlu köprü tabliyesinden elde edilen eleman tepkileri izolasyonsuz duruma kıyasla oldukça küçük olsa da dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin şartlarındaki değişimin sismik izolasyonlu köprülerde dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi, Karayolu Köprüsü, Stokastik Analiz, Filtre Edilmiş Beyaz Gürültü, Dalga Yayılma Etkisi, Tutarsızlık Etkisi, Zemin Etkisi

PhD. Thesis

SUMMARY

STOCHASTIC ANALYSIS OF HIGHWAY BRIDGE ISOLATED WITH TFP BEARING
SYSTEM UNDER SPATIALLY VARYING GROUND MOTION

Muhammet YURDAKUL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Şevket ATEŞ
2016, 205 Pages

The aim of this study is to identify of stochastic behaviors of isolated highway bridge with triple friction pendulum (TFP) bearing system subjected to spatially varying ground motion. Since the forces such as earthquake ground motion are random, it is impossible to estimate such forces beforehand. Therefore, it will be more realistic to perform the dynamic analyses of structural systems by means of stochastic analysis method which random forces are demonstrated in terms of averages and probability. In the stochastic analyses that were carried out, earthquake ground motion has been expressed with power spectral density function as a random transaction. Spatially varying effects of the ground motion includes the effects of wave passage, incoherence and site response. The fundamental period of isolated bridge with the TFP bearing system has been lengthened and energy absorption capacity of the structure has been increased with the effect of frictions in the isolation device. Therefore, there have been a significantly reduction in quastatic, dynamic and total response of the deck.

As a result of the study, it has been emphasized that the TFP bearing system is substantially effective in stochastic behaviors of the structures having long span such as bridges subjected to spatially varying ground motion. In addition to this, even so element responses obtained from stochastic analysis of seismically isolated bridge have been significantly small values, the effects of wave passage, incoherency, site response should be taken into account in seismically isolated highway bridges.

Key Words: Triple Friction Pendulum System Bearing System, Highway Bridge, Stochastic Analysis, Filtered White Noise, Wave Passage Effect, Incoherency Effect, Site Response Effect

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Basit bir sarkaç hareketinden TESS mesnet sistemine geçişin gösterimi	44
Şekil 1.2. Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi	45
Şekil 1.3. İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi	46
Şekil 1.4. ÜESS mesnet sisteminden bir kesit	48
Şekil 1.5. ÜESS mesnet sistemi en kesiti	48
Şekil 1.6. ÜESS mesnet sisteminin çeşitli aşamalardaki hareket durumları.....	49
Şekil 1.7. ÜESS mesnet sistemi parametreleri.....	59
Şekil 2.1. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydı	65
Şekil 2.2. 1979 Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydı.....	65
Şekil 2.3. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydına ait güç ivme spektral yoğunluk fonksiyonu.....	67
Şekil 2.4. 1979 Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydına ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu	68
Şekil 2.5. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu.....	69
Şekil 2.6. Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu	70
Şekil 2.7. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu.....	71
Şekil 2.8. Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu	71
Şekil 2.9. Analizlerde kullanılan karayolu köprüsünün iki boyutlu analitik modeli	76
Şekil 2.10. ÜESS mesnet sistemi parametreleri.....	78
Şekil 2.11. Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin (yükleme döngüsü) şematik gösterimi	82

Şekil 2.12.	Sistemin yükleme döngüsü	83
Şekil 2.13.	Tek modlu hesap yöntemi akış diyagramı	85
Şekil 2.14.	Alt sınır durumu için azaltılmış tepki spektrumu	87
Şekil 2.15.	Üst sınır durumu için azaltılmış tepki spektrumu.....	88
Şekil 2.16.	Kullanılan programın akış diyagramı	91
Şekil 3.1.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli	95
Şekil 3.2.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik normal kuvvetleri	96
Şekil 3.3.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik normal kuvvetleri.....	96
Şekil 3.4.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	97
Şekil 3.5.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	97
Şekil 3.6.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	98
Şekil 3.7.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	98
Şekil 3.8.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik kesme kuvveti	96
Şekil 3.9.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik kesme kuvveti	99
Şekil3.10.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti	100
Şekil 3.11.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti	100
Şekil 3.12.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti	101

Şekil 3.13.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti	101
Şekil 3.14.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri	102
Şekil 3.15.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri	102
Şekil 3.16.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	103
Şekil 3.17.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	103
Şekil 3.18.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	104
Şekil 3.19.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	104
Şekil 3.20.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	105
Şekil 3.21.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	105
Şekil 3.22.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	106
Şekil 3.23.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	106
Şekil 3.24.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	107
Şekil 3.25.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	107
Şekil 3.26.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli	110

Şekil 3.27.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik normal kuvvetleri	111
Şekil 3.28.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik normal kuvvetleri.....	111
Şekil 3.29.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	112
Şekil 3.30.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	112
Şekil 3.31.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	113
Şekil 3.32.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	113
Şekil 3.33.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik kesme kuvveti	114
Şekil 3.34.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik kesme kuvveti	114
Şekil 3.35.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti	115
Şekil 3.36.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti	115
Şekil 3.37.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti	116
Şekil 3.38.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti	116
Şekil 3.39.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri- statik eğilme momentleri	117

Şekil 3.40.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri	117
Şekil 3.41.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	118
Şekil 3.42.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	118
Şekil 3.43.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	119
Şekil 3.44.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	119
Şekil 3.45.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	120
Şekil 3.46.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	120
Şekil 3.47.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	121
Şekil 3.48.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	121
Şekil 3.49.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	122
Şekil 3.50.	Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	122
Şekil 3.51.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli	125
Şekil 3.52.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri	126
Şekil 3.53.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri	126

Şekil 3.54.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	127
Şekil 3.55.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	127
Şekil 3.56.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	128
Şekil 3.57.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	128
Şekil 3.58.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri	129
Şekil 3.59.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri	129
Şekil 3.60.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri	130
Şekil 3.61.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri	130
Şekil 3.62.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri	131
Şekil 3.63.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri	131
Şekil 3.64.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri	132
Şekil 3.65.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri	132
Şekil 3.66.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	133

Şekil 3.67.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	133
Şekil 3.68.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	134
Şekil 3.69.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	134
Şekil 3.70.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	135
Şekil 3.71.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	135
Şekil 3.72.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	136
Şekil 3.73.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	136
Şekil 3.74.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	137
Şekil 3.75.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	137
Şekil 3.76.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli	140
Şekil 3.77.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri	141
Şekil 3.78.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri	141
Şekil 3.79.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri	142
Şekil 3.80.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri	142

Şekil 3.81.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	143
Şekil 3.82.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	143
Şekil 3.83.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri	144
Şekil 3.84.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri	144
Şekil 3.85.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri	145
Şekil 3.86.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri	145
Şekil 3.87.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri	146
Şekil 3.88.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri	146
Şekil 3.89.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri	147
Şekil 3.90.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri	147
Şekil 3.91.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	148
Şekil 3.92.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri	148
Şekil 3.93.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	149

Şekil 3.94.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri	149
Şekil 3.95.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	150
Şekil 3.96.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri	150
Şekil 3.97.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	151
Şekil 3.98.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri	151
Şekil 3.99.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	152
Şekil 3.100.	Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri	152
Şekil 3.101.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli.....	156
Şekil 3.102.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri.....	157
Şekil 3.103.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri.....	157
Şekil 3.104.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	158
Şekil 3.105.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri.....	158
Şekil 3.106.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	159
Şekil 3.107.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri.....	159
Şekil 3.108.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri.....	160
Şekil 3.109.	Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri.....	160

Şekil 3.110. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri	161
Şekil 3.111. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri	161
Şekil 3.112. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri	162
Şekil 3.113. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri	162
Şekil 3.114. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri	163
Şekil 3.115. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri	163
Şekil 3.116. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik eğilme momentleri	164
Şekil 3.117. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik eğilme momentleri	164
Şekil 3.118. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri	165
Şekil 3.119. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri	165
Şekil 3.120. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri	166
Şekil 3.121. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri	166
Şekil 3.122. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik yer değiştirmeleri	167
Şekil 3.123. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik yer değiştirmeleri	167
Şekil 3.124. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam yer değiştirmeleri	168
Şekil 3.125. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam yer değiştirmeleri	168
Şekil 3.126. Homojen ve homojen olmayan zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli	172
Şekil 3.127. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik normal kuvvetleri	173
Şekil 3.128. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik normal kuvvetleri	173

Şekil 3.129. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik normal kuvvetleri	174
Şekil 3.130. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik normal kuvvetleri	174
Şekil 3.131. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam normal kuvvetleri	175
Şekil 3.132. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam normal kuvvetleri	175
Şekil 3.133. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik kesme kuvvetleri	176
Şekil 3.134. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik kesme kuvvetleri	176
Şekil 3.135. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik kesme kuvvetleri	177
Şekil 3.136. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik kesme kuvvetleri	177
Şekil 3.137. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam kesme kuvvetleri	178
Şekil 3.138. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam kesme kuvvetleri.....	178
Şekil 3.139. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri	179
Şekil 3.140. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri.....	179
Şekil 3.141. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik eğilme momentleri	180
Şekil 3.142. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik eğilme momentleri.....	180
Şekil 3.143. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri	181
Şekil 3.144. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri.....	181
Şekil 3.145. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri	182
Şekil 3.146. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri.....	182
Şekil 3.147. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik yer değiştirmeleri	183

- Şekil 3.148. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik yer değıştirmeleri..... 183
- Şekil 3.149. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam yer değıştirmeleri 184
- Şekil 3.150. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam yer değıştirmeleri..... 184



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Durum 1-5'deki ÜESS mesnet sisteminin davranışı	58
Tablo 1.2. SSM sistemlerinin periyotlarının karşılaştırılması	62
Tablo 1.3. SSM sistemlerinin ivme ve yer değiştirmelerinin karşılaştırılması	63
Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan yer hareketleri bileşenleri.....	64
Tablo 2.2. Çeşitli zemin türleri için spektral yoğunluk fonksiyonu filtre parametreleri	66
Tablo 2.3. Çeşitli zemin türleri için hesaplanan Φ değerleri	69
Tablo 2.4. Çeşitli zemin türleri için hesaplanan beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonu genlik, S_0 , değerleri.....	69
Tablo 2.5. Karayolu köprüsü elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri.....	77
Tablo 2.6. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin konkav plakalarının tipik geometrileri.....	79
Tablo 2.7. Tüm durumlardaki izolatörlerin özellikleri	81
Tablo 2.8. Tek modlu hesap yöntemi ile elde edilen değerler	88
Tablo 2.9. Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprünün periyotları	89

SEMBOLLER DİZİNİ

ÇBİ	:Çelik bilyeli izolatör
ÇDH	:Çapraz doğrusal hareket
ESM	:Elastik sürtünmeli mesnet
FEM	:Fransız elastik mesnet
İESS	:İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç
KESM	:Kayıcı elastik sürtünmeli mesnet
SM	:Sürtünmeli mesnet
TKM	:Tabakalı kauçuk mesnet
TESS	:Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç
ÜESS	:Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç
YKSM	:Yüksek sönümlü kauçuk mesnet
YZM	:Yeni Zelanda mesnet
B	:Sönüm azaltma faktörü
c_b	:İzolasyon sisteminin sönüm katsayısı
c_e	:İzolasyon sisteminin eşdeğer sönüm katsayısı
D	:Tasarım yer değiştirme
D_C	:1. ve 4. yüzeylerin çapları
D_D	:İzolatörün yer değiştirme
d_i^*	:i. yüzeyin gerçek yer değiştirme kapasitesi
d_{lm}	:Mesnetler arasındaki mutlak yatay uzaklık
D_R	:Kayıcının çapı
D_S	:2. ve 3. yüzeylerin çapları
g	:Yer çekim ivmesi
h_i	:i. plakanın yüksekliği
q	:Sıfır seviyesinin ortalama geçiş sayısının fonksiyonu olan maksimum büyüklük faktörü
k_{ass}	:Alt sınır sürtünme katsayısı
k_b	:Sürtünmeli sarkaç mesnedin eşdeğer rijitliği
K_d	:Elastik sonrası rijitlik
k_e	:Sürtünmeli sarkaç mesnedinin kaymaya başlamadan önceki rijitliği

K_{eff}	:Efektif rijitlik
$k_{eş}$:Sürtünmeli sarkaç mesnedinin kaymaya başlamadan önceki rijitliği
kN	:Kilo newton
kPa	:Kilo paskal
$k_{üss}$:Üst sınır sürtünme katsayısı
k_{1ds}	:Birinci döngüdeki sürtünme katsayısı
k_{3ds}	:Üç döngülü sürtünme katsayısı
M	:Birim boy kütlesi
m_b	:İzolasyon sisteminin kütlesi
mm	:Milimetre
n	:Mod sayısı
p	:Yer hareket ivmesinin fonksiyonu olan maksimum büyüklük faktörü
Q_d	:Karakteristik dayanım
r	:Yer hareket ivmesinin etkidiği mesnet serbestlik derecesi sayısı
R	:Eğrilik yarıçapı
R_e	:Reel kısım
R_{effi}	:i. yüzeyin etkili yarıçapı
s	:Saniye
S_a	:Spektrum ivmesi
S_D	:Tasarım ivme yer değiştirmesi
S_o	:Spektral yoğunluk fonksiyonu genlik değeri
T	:Hareket süresi
T_{eff}	:Efektif periyot
W	:Sürtünmeli sarkaç mesnedinin taşıdığı ağırlık
Y	:Akma yer değiştirmesi
β_{eff}	:Efektif sönüm
$[R_{rg}]$:Zahiri-statik etki katsayısı
$\{F_{eff}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerini etkileyen etkili kuvvet vektörü

ω_b	:Sürtünmeli sarkaç mesnedinin doğal frekansı
ξ_b	:Sürtünmeli sarkaç mesnedinin sönümü
$\sigma_{\dot{v}_b}$:Sürtünmeli sarkaç mesnedine ait hız varyansının ortalama karekökü
μ_s	:Sürtünme katsayısı
v_b	:Sürtünmeli sarkaca ait yer değiştirme
\dot{v}_b	:Sürtünmeli sarkaca ait hız
v_e	:Sıfır seviyesinin indirgenmiş ortalama geçiş sayısı
ν_0	:Oluşma frekansı
\ddot{v}_b	:Sürtünmeli sarkaca ait ivme
μ	:Ortalama maksimum değer
μ_{ib}	:Birleştirilmiş sistemin sürtünme katsayısı
μ_e	:Eş değer sürtünme katsayısı
[A]	:Mesnet noktalarının birim hareketinin neden olduğu statik yer değiştirme veya eleman kuvvetleri matrisi
[C]	:Sönüm matrisi
$Cov(z^{qs}, z^d)$:Zahiri-statik ve dinamik bileşenler arasındaki kovaryans fonksiyonu
[C _{rr}]	:Bilinmeyen serbestlik dereceleri ile ilgili sönüm matrisi
[C _{rr}]	:İzolasyonlu yapı sisteminin bilinmeyen serbestlik dereceleri ile ilgili sönüm matrisi
[M]	:Kütle matrisi
[K]	:Rijitlik matrisi
{v}	:Toplam yer değiştirme vektörü
{\dot{v}}	:Toplam hız vektörü
{\ddot{v}}	:Toplam ivme vektörü
{F}	:Dış kuvvet vektörü
{v _g }	:Bilinen serbestlik derecelerinin toplam yer değiştirme vektörü
{v _r }	:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin toplam yer değiştirme

	vektörü
$[M_{rr}]$:Bilinmeyen serbestlik dereceleri ile ilgili kütle matrisi
$[K_{rr}]$:Bilinmeyen serbestlik dereceleri ile ilgili rijitlik matrisi
$[M_{rg}]$, $[C_{rg}]$, $[K_{rg}]$:Bilinen serbestlik derecelerinin birim hareketinden dolayı bilinmeyen serbestlik derecelerinde meydana gelen tesir katsayı matrisleri
$[M_{gg}]$, $[C_{gg}]$, $[K_{gg}]$:Bilinen serbestlik derecelerinin birim hareketinden dolayı bilinen serbestlik derecelerinde meydana gelen tesir katsayı matrisleri
$\{\ddot{v}_r\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin toplam ivme vektörü
$\{\dot{v}_r\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin toplam hız vektörü
$\{v_r\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin toplam yer değiştirme vektörü
$\{\ddot{v}_g\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin toplam ivme vektörü
$\{\dot{v}_g\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin toplam hız vektörü
$\{v_g\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin toplam yer değiştirme vektörü
v_s	:Zahiri-statik yer değiştirme
v_d	:Dinamik yer değiştirme
$\{\ddot{v}_{dg}\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin dinamik ivme vektörü
$\{\dot{v}_{dg}\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin dinamik hız vektörü
$\{v_{dg}\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin dinamik yer değiştirme vektörü
$\{\ddot{v}_{sg}\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin zahiri-statik ivme vektörü
$\{\dot{v}_{sg}\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin zahiri-statik hız vektörü
$\{v_{sg}\}$:Bilinen serbestlik derecelerinin zahiri-statik yer değiştirme vektörü
$\{\ddot{v}_{dr}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin dinamik ivme vektörü
$\{\dot{v}_{dr}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin dinamik hız vektörü

$\{v_{dr}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin dinamik yer değiştirme vektörü
$\{\ddot{v}_{sr}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin zahiri-statik ivme vektörü
$\{\dot{v}_{sr}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin zahiri-statik hız vektörü
$\{v_{sr}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerinin zahiri-statik yer değiştirme vektörü
$\{F_{eff}\}$:Bilinmeyen serbestlik derecelerini etkileyen etkili kuvvet vektörü
$[R_{rg}]$:Zahiri-statik etki katsayısı
ω	:Açısal frekans
$\{Y\}$:Modal genlik
$[\phi]$:Mod şekilleri matrisi
ξ	:Sönüm oranı
$\{\Gamma\}$:Modal katkı faktörü
$z(t)$:Herhangi bir yapı davranışı
$z^{qs}(t)$:Yapı davranışına ait zahiri-statik bileşen
$z^d(t)$:Yapı davranışına ait dinamik bileşen
$[R_z(\tau)]$:Yapı davranışına ait öz ilişki fonksiyonu
$[R_z^d(\tau)]$:Yapı davranışına ait dinamik bileşenin öz ilişki fonksiyonu
$[R_z^{qs}(\tau)]$:Yapı davranışına ait zahiri-statik bileşenin öz ilişki fonksiyonu
$[R_z^d \text{ } z^{qs}(\tau)]$:Yapı davranışına ait dinamik ve zahiri-statik bileşenlerinin çapraz ilişki fonksiyonu
$[R_z^{qs} \text{ } z^d(\tau)]$:Yapı davranışına ait zahiri-statik ve dinamik bileşenlerinin çapraz ilişki fonksiyonu
$[S_z(\omega)]$:Yapı davranışına ait spektral yoğunluk fonksiyonu
$[S_z^d(\omega)]$:Yapı davranışına ait dinamik bileşenin spektral yoğunluk fonksiyonu
$[S_z^{qs}(\omega)]$:Yapı davranışına ait zahiri-statik bileşenin spektral yoğunluk fonksiyonu
$[S_z^d \text{ } z^{qs}(\omega)]$:Yapı davranışına ait dinamik ve zahiri-statik bileşenleri

	arasındaki çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu
$[S_Z^{qs\ d}(\omega)]$:Yapı davranışına ait zahiri-statik ve dinamik bileşenleri arasındaki çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu
$[\Psi]$:Eleman kuvvetleri matrisi
$S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega)$: l ve m mesnet noktalarındaki yer hareket ivmelerinin karşıt güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$H(\omega)$:Frekans davranış fonksiyonu
σ_z	:Yapı tepkisinin standart sapması
$\sigma_{\dot{z}}$:Yapı tepkisinin türevinin standart sapması
σ_z^2	:Yapı tepkisinin varyansı
$\sigma_z^{2\ qs}$:Yapı tepkisinin zahiri-statik bileşen varyansı
$\sigma_{z_i}^{2\ d}$:Yapı tepkisinin dinamik bileşen varyansı
$\sigma_{\ddot{v}_g}^2$:Yer hareket ivmesinin varyansı
ω_j	: j . moda ait doğal frekans
ξ_j	: j .moda ait sönüm oranı
μ	:Ortalama maksimum değer
ν_e	:Sıfır seviyesinin indirgenmiş ortalama geçiş sayısı
ν_0	:Oluşma frekansı
$\ddot{z}(t)$:Stasyonery olmayan işlem için yer hareketi ivmesi
$\ddot{u}(t)$:Stasyonery işlem için yer hareket ivmesi
$e(t)$:Deterministik çarpım faktörü
$Y_j(t)$: j . mod için genelleştirilmiş yerdeğiştirme tepkisi
$h_j(t)$: j . mod için impuls tepki fonksiyonu
$H_j(\omega, t)$:Stasyonery olmayan davranış için frekans davranış fonksiyonu
$H_j(\omega)$:Stasyonery davranış için frekans davranış fonksiyonu
$S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega)$: l ve m mesnet noktaları arasındaki yer hareketinin çapraz güç

	spektral yoğunluk fonksiyonu
$\gamma_{lm}(\omega)$:Korelasyon fonksiyonu
$ \gamma_{lm}(\omega) ^k$:Korelasyon etkisi
$\gamma_{lm}(\omega)^d$:Dalga yayılma etkisi
$\gamma_{lm}(\omega)^z$:Mesnetlerdeki farklı zemin etkisi
$H_f(\omega)$:Zemine ait birinci filtre fonksiyonu
$H_g(\omega)$:Zemine ait ikinci filtre fonksiyonu
$h_{lm}(\omega)$:Düzlem dalga faktörü
$H_l(\omega)$: l mesnedindeki zemin filtre fonksiyonu
ω_f	:Birinci filtreye ait doğal frekans
ξ_f	:Birinci filtreye ait sönüm oranı
ω_g	:İkinci filtreye ait doğal frekans
ξ_g	:İkinci filtreye ait sönüm oranı
α	:Boyutsuz parametre
v_s	:Kayma dalgası hızı
$\theta_{lm}(\omega)^d$:Yer hareketi yayılma etkisi
$\theta_{lm}(\omega)^z$:Zemin etkisi
V_{app}	:Görünen dalga yayılma hızı
$\gamma_{lm}(\omega)^z$:Yerel zemin etkisi
$H_l(\omega), H_m(-\omega)$: l ve m mesnetlerindeki filtre davranış fonksiyonları
Im	:Sanal kısım
Re	:Reel kısım

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kuvvetli yer hareketleri meydana geldiğinde can ve mal kayıplarına sebep olabileceği bilinen bir gerçektir. Deprem ve depremin yapıyı nasıl etkilediği hakkında bilgiler arttıkça can ve mal kayıplarını önlemek amacıyla depreme daha dayanıklı yapılar yapma fikri ön plana çıkmıştır. Bu nedenle depremin arzu edilmeyen bu etkisini azaltmak için farklı yöntemleri geliştirme ihtiyacı duyulmuştur. Yapılan araştırmalar sonucunda zemin ile yapı arasındaki etkileşimin azaltılmasıyla depremlerin yapılar üzerindeki etkilerinin azaltılabileceği görüşüne varılmıştır. Bu amaçla, zemin ve yapıyı kısmen birbirinden ayıran deprem izolatörleri geliştirilmiştir.

Son yıllarda depreme karşı kullanılan bu sistemler deprem mühendisliği alanında kabul edilebilir bir teknik olmuştur. Bu sistemler bina, köprü, deniz platformu, önemli kimyasal sıvı depoları ve nükleer güç santrali gibi yapılarda depreme karşı dayanımı arttırmak amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Deprem izolasyon sistemleri yapıların periyotlarını arttırmaktadır. Buna bağlı olarak ivme spektrumunun azalan bölgesine ulaşılmaktadır. Bu durum, genellikle depremden dolayı yapıya aktarılan ivmenin azalmasına neden olmaktadır. Böylece yapıda oluşan tepki kuvvetleri de azalmaktadır. Diğer bir fayda ise yer değiştirmeler daha çok deprem izolatörlerinde meydana geldiği için üst yapı rölatif olarak rijit kalmakta ve yapının depreme karşı dayanımı oldukça artmaktadır.

Mühendislik yapılarının analizlerinde deterministik ve stokastik olmak üzere iki çeşit analiz mevcuttur. Deterministik analizde, yapıya gelen önceden belirlenmiş yükler ile yapının analizi yapılmaktadır. Deterministik olarak ele alınan yapı dinamiği problemlerinde sistemin başlangıç koşullarının, zorlayıcı etkilerinin ve tüm dinamik parametrelerinin tam olarak bilindiği kabul edilmektedir. Bütün parametrelerin tam olarak bilinmesinden dolayı sistem davranışında herhangi bir belirsizlik olmadan hesaplar yapılabilmektedir. Stokastik analizde, yapıya gelen yük önceden belirlenememekte ancak istatistiksel olarak ifade edilebilmektedir.

Deprem hareketi gibi dinamik yükler rastgele olduğundan dinamik yüklerin önceden belirli olduğu deterministik yaklaşım ile dinamik analiz yapılması çok gerçekçi olmayabilir. Deprem hareketinin belirsizliğinin dikkate alındığı istatistik ve olasılık

terimleriyle ifade edilen stokastik analiz bu bağlamda daha gerçekçi bir yaklaşım olabilmektedir. Stokastik analiz, yapı tepkileri için istatistiksel bir değerlendirme olanağı sağlamakta ve gelecekte olması muhtemel yer hareketlerinin de düşünülmesi gereken projelendirme aşamasında oldukça önemli bir yer almaktadır.

Rastgele etkiler altındaki dinamik sistemleri konu alan rastgele titreşim teorisi, rastgele meydana gelen yüklere karşı koymaya çalışan malzeme, araç ve yapıların güvenliğini arttırmaya yönelik bir zemin oluşturmaktadır. Bu teorideki problemlerin çözülmesindeki zorluk, rastgele etkilerin olasılık özellikleri hakkındaki yeterli olmayan bilgilerden kaynaklanmaktadır. Deprem yer hareketinin rastgele olmasının iki sebebi vardır. İlki, her bir deprem birbirinden farklı rastgele olaylardır. Yani her bir depremin çıkış süresi, açığa çıkardığı enerji, merkez üssü ve odak derinliği gibi parametrelerin kendine özgü olmasıdır. Diğeri ise deprem yer hareketinin düzgün olmayan faylar boyunca değişik kaymalar sonucunda meydana gelmesi ile ortaya çıkan yer değiştirme dalgalarının sayısız yansıma ve kırılmalardan geçmesidir.

Bir yapının deprem hareketinden kaynaklanan dinamik davranışını belirlemek için yapılan analizde yer hareketi, genellikle yapının tüm mesnet noktalarına aynı anda aynı etkiyi gösterdiği kabulü yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan analiz klasik dinamik analize karşılık gelmekte ve deprem dalgalarının dalga boyları yapının boyutları yanında büyük olduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşımda deprem hareketinin hızları sonsuz hızla yayıldığı kabul edilmekte ve yayılma esnasında yer hareketindeki değişim dikkate alınmamaktadır. Ancak karayolu köprüleri gibi uzun açıklıklı yapılarda mesnet noktalarına etki eden yer hareketleri birbirinden farklıdır. Diğeri bir ifade ile deprem dalgasının sonsuz hızla yayılması durumunda dahi yer hareketleri mesnet noktalarının bulunduğu zemin ve topolojik özelliklerine bağlı olarak farklılıklar gösterecektir. Dolayısıyla deprem dalgasının yayılması anında frekansı ve içeriği değişmekte, farklı mesnet noktalarına farklı zamanlarda ulaşmaktadır. Bu değişimin, yapının dinamik davranışı üzerinde etkili olup olmayacağı veya etkisinin ne düzeyde olacağı yapı-zemin etkileşim noktalarının yerine bağlıdır.

Stokastik analizlerde deprem yer hareketi rastgele işlem olarak spektral yoğunluk fonksiyonu ile temsil edilmektedir. Stokastik analizde deprem yer hareketindeki değişim dikkate alınmaktadır. Yer kürenin homojen olmamasından ve karmaşık yapısından dolayı yapı sistemlerinin dinamik analizinde farklı noktalardaki yer hareketleri için dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin etkisi dikkate alınmalıdır. Deprem yer hareketi

etkilerinden biri olan dalga yayılma etkisi, deprem yer hareketinin bir mesnetten diğer mesnede ulaşmaya kadar geçen zaman farkından dolayı kaynaklanmaktadır. Tutarsızlık etkisi, düzgün olmayan faylar boyunca farklı kaymalar sonucunda meydana gelen deprem yer hareketi ve bu hareketin oluşturduğu dalgaların rastgele sayısız yansıma ve kırılmalardan geçmesi ile açıklanabilir. Diğer etkilerden birisi olan zemin etkisi ise, farklı mesnetlerin oturduğu yerel zemin koşullarının farklılığından kaynaklanmaktadır.

Sismik izolasyon sistemi, uygulandığı yapıların toplam maliyetini projeye bağlı olarak arttırmaktadır. Ancak kullanılacak yapıların (köprüler, hastaneler, okullar, bilgi işlem merkezleri, laboratuvarlar, fabrikalar, vb.) önemi, deprem sonrası hasarları ve fonksiyon kayıpları düşünüldüğünde bu maliyet artışı önemini kaybetmemektedir. Bu durumla ilgili geçmiş depremlerden bazı maddi kayıp örnekleri verilebilmektedir. 17 Ocak 1994 Northridge depremi 6.7 Mw büyüklüğünde olup 15 s. sürmüştür. Toplam hasar 30 milyar dolar olmuştur. Bu depremde Olive View Hastanesinde 400 milyon dolar değerinde ekipman ve alet hasarı olmuştur. Buna karşın aynı depremde USC Hastanesinde yapısal ve yapısal olmayan hasarlar olmamıştır. Diğer bir deprem, 17 Ocak 1995 Kobe depremi, 6.9 Mw büyüklüğünde olup 20 s. sürmüştür. Toplam hasar 150-200 milyar dolar arasındadır. Bu depremde sismik izolasyonlu Batı Japonya Posta Ofisi İdareleri Bilgisayar Merkezi binasında yapısal ve yapısal olmayan hasar olmamıştır (URL-1,2016). Bu binanın Kobe depremi sırasında gösterdiği mükemmel davranışından dolayı Japonya'da sismik izolasyonlu bina talebinde ciddi artışlar olmuştur (Bozorgnia ve Bertero, 2004). Ülkemizde ilk sismik izolasyon uygulamaları 1999 depremi öncesinde köprüler ve viyadüklerde yapılmıştır. Eğilmeli çelik sönümleyici ile sismik izolasyonu yapılan Bolu viyadüğü 17 Ağustos 1999 depreminde beklenen performansı göstermiştir. Ancak 12 Kasım 1999 depreminin 360 mm. olan maksimum yer değiştirmesi izolasyonun maksimum tasarım yer değiştirme kapasitesi olan 320 mm. den büyük olduğu için 2 nolu viyadük beklenen performansı gösterememiştir.

Önemli mühendislik yapılarından biri olan karayolu köprülerinin deprem sırasında yıkılmaları deprem sonrası ulaşımı etkilediği gibi birçok olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla karayolu köprüleri gibi uzun açıklıklı yapıların projelendirilmesinde taban izolasyonu ile birlikte dalga yayılma, tutarsızlık ve zemin etkilerini de dikkate alan stokastik yaklaşımların kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Sismik izolasyonlu yapılar, yapının temeli ve tabanı arasına yerleştirilen yatay yönde esnek, düşey yönde rijit olan aygıtlarla yapılabilmektedir. Bu aygıtlar izolasyon aletleri veya sismik izolasyon sistemleri olarak bilinmektedir.

Sismik izolasyon sistemleri, depreme dayanıklı yapı tasarımları için etkili bir tekniktir. Taban izolasyonunda esnek bir tabaka veya izolatör bu seviyede göreceli yer değiştirmelere müsaade edilmesi için yapı ile temeli arasına yerleştirilmiştir. İzolatör esnek olduğundan periyodu yapının periyoduna oranla nispeten daha uzundur. İzolatörün periyodu, izolatörlü yapının periyoduna hâkim olmaktadır.

Davranış bakımından izolatörler iki ana büyük gruba ayrılırlar: Bunlar kauçuk ve sürtünme özelliklerini kullanan izolatörlerdir. Bu izolatör türlerinden biri olan kauçuk izolatörler, yapıların sismik izolasyonunda ilk defa Makedonya'nın Üsküp kentinde 1969 yılında tamamlanan üç katlı betonarme bir ilkokul binasında kullanılmıştır. Mesnet sistemi olarak doğal kauçuk bloklardan faydalanılmıştır. Bu yıllarda kauçuk içine çelik plakalar yerleştirilmediğinden düşey yönde istenilen rijitlik elde edilememiştir. Bunun yanı sıra, mesnette yanlara doğru şişmeler de görülmüştür. Bunun sonucu olarak bina depremin etkisiyle deprem sırasında sağa-sola veya ileri geri hareket etmiş ve yukarı doğru sıçramıştır. Kauçuk mesnet arasına çelik levhalar konularak yukarıda bahsedilen olumsuz durumların önüne geçilmek istenmiştir.

Sismik izolasyonda önemli olan kauçuk izolatörlerin özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Kadir, 1982; Stanton ve Roeder, 1982; Roeder ve Stanton, 1983). Bazı araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak kauçuk mesnetleri test etmişlerdir (Simo ve Kelly, 1984; Stanton vd., 1990).

Lee ve Medland (1979), Yeni Zelanda kauçuk mesnet sistemini kullanarak El-Centro depremine maruz iki boyutlu çok katlı bir kayma çerçevesinin davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada izolasyon sisteminin önemli parametreleri belirlenmiş ve bunların yapı davranışları üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Yaptıkları çalışma izolasyon sistemli yapının çok güçlü depremlerde uygun elastik sınırlar içinde kalarak inşa edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca çalışma, izolasyon sistemli yapının kesme kuvvetlerini ve taban yer değiştirmelerini uygulanan depremin elastik tepki spektrumlarından isabetli bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Abdel-Ghaffar ve Rubin (1982), farklı yer hareketlerine maruz asma köprüleri düşey doğrultuda rastgele titreşim teorisine göre incelemişlerdir. Bu tür yapıların açıklıkları ile aynı mesafelerde kaydedilen yer hareketlerini dikkate alarak spektral yoğunluk fonksiyonlarını elde etmişlerdir. Elde ettikleri spektral yoğunluk fonksiyonlarını köprü sisteminin mesnet noktalarına uygulamışlardır. Çalışma sonucunda korelasyon etkisinin önemini vurgulamışlardır.

Ahmadi (1983), hareketli mesnetler üzerine oturan yapıların stokastik davranışlarını incelemiştir. Hareketli mesnette üst yapının rijit bir kütle olarak davrandığını ve Coulomb sürtünmesinin var olduğunu kabul etmiştir. Deprem yer hareketi olarak da durağan (stasyoner) olmayan beyaz gürültü modelini kullanmıştır. Sistem davranışını eşdeğer doğrusallaştırma yöntemini kullanarak incelemiş ve sonuçları durağan sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Abdel-Ghaffar ve Rubin (1983), mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki asma köprülerin yatay doğrultudaki davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada frekans alanında rastgele titreşim yöntemi kullanılarak hem yer hareketlerindeki farklılıklar hem de yer hareketleri arasındaki korelasyon etkileri dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda sadece uniform yer hareketi için deprem analizlerinin bu tür köprüler için yeterli olmadığı sonucuna varmışlardır.

Constantinou ve Tadjbakhsh (1984a), sürtünmeli sarkaç ve kauçuk mesnetlerden oluşan sismik izolasyonlu iki boyutlu kayma çerçevelerinin analizlerini yapmışlardır. Çalışmada birinci titreşim modu için doğrusal olmayan hareket denklemlerini çözmüşlerdir. Sismik izolasyon sistemi olarak yaylar ve sönümleyiciler kullanılmıştır. Kullandıkları bu söndürücülerin yatay yönde doğrusal ve viskoz bir sönüm sağlamadıklarını kabul etmişlerdir.

Constantinou ve Tadjbakhsh (1984b), Monte-Carlo tekniğini kullanarak sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan rijit bir yapının stokastik davranışını incelemişlerdir.

Constantinou ve Tadjbakhsh (1985), rastgele yer hareketine maruz kauçuk mesnet ile sismik izolasyonu yapılan iki boyutlu bir kayma çerçevesinin dinamik analizlerini yapmışlardır. Sistemin karesel ortalama tepkisini elde etmek için frekans alanında spektral analizi kullanmışlardır.

Constantinou (1987), esnek bir zemin üzerine mesnetlenen sismik izolasyonlu yapıların analizi için basitleştirilmiş bir yöntem sunmuştur. Bu yöntemde yapı sistemi tek

katlı üst yapıdan, rijit bir tabandan ve visko-elastik yarı homojen zemin üzerine oturan bir temelden oluşmaktadır. Sismik izolasyon sistemi olarak kauçuk mesnet sistemi kullanılmıştır. Basitleştirilmiş bu yöntemde rijit zemin üzerinde bulunan sönümlü tek serbestlik dereceli sistem gerçek bir yapı sistemini temsil etmiştir. Yapının dinamik davranışları için gerekli olan doğal frekans ve sönüm faktörü tek serbestlik dereceli sistemden elde edilmiştir.

Garevski vd. (1988), belirli bir hızda yayılan asinkronize yer hareketine maruz bir kablolu köprünün dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan çeşitli deterministik yöntemler ile yapının dinamik davranışını belirlemişlerdir. Çalışma sonunda, kablolu köprülerin yüzlerce metre uzunluğunda olmasından dolayı yer hareketinin bir mesnetten diğerine saniyeler sonra ulaşacağı ve böylece yapının dinamik etkileri yanında zahiri-statik etkilere de maruz kalacağı belirtilmiş ve her iki etkinin de analizlerde dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Harichandran ve Wang (1988, 1990), değişen yer hareketi etkisindeki bir ve iki açıklıklı kirişlerin stokastik davranışı üzerinde bir çalışmalar yapmışlardır. Mesnetlerdeki yer hareketleri arasındaki korelasyon ve deprem dalgası yayılma hızını dikkate alan deprem yer hareketi modelini kullanmışlardır. Sonuçları çeşitli basitleştirilmiş yer hareketi modelleri ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda yer hareketindeki değişimin uzun açıklıklı kirişler için önemli etkilere sebep olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, uniform yer hareketi etkisi için bulunan sonuçların bazı kiriş tepki değerleri için küçük, bazıları için ise büyük değerler verdiğini belirtmişlerdir.

Siddiqui ve Constantinou (1989), Constantinou (1987)'nin sunduğu basitleştirilmiş yöntemi çok katlı yapılarda kullanmışlardır. Bu yöntem ile elde edilen yer değiştirmeleri ve taban kesme kuvvetlerini çok serbestlik dereceli sistemlerden elde etmeleri sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda sonuçların yeterli uyumda olduğunu göstermişlerdir.

Li (1989), kauçuk mesnet ve sönümleyici içeren sismik izolasyonlu bir köprünün dinamik davranışını incelemiştir. Doğrusal olmayan hareket denklemleri birinci mod titreşiminden elde edilmiştir. Filtre edilmiş beyaz gürültü veya beyaz gürültü yer ivmesine göre stokastik tepki eşdeğer doğrusallaştırma metodu kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçları kullanılan sönümleyicilerin etkili olduğunu göstermiştir. Ancak sönümleyicili yapının esnekliğinin artması durumunda sönümleyicinin etkisi azalmaktadır. Bununla

birlikte hesaplanan izolatör yer değiştirmesi ne kadar büyük olursa izolasyon sisteminin de o derece etkili çalıştığı vurgulanmıştır.

Novak ve Henderson (1989), zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak bir yapının analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu analizde, sismik izolasyon sisteminin esnekliğini zemin esnekliğinden 10 kat veya daha fazla alarak hesaba katmışlardır. Analiz sonucunda zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının sismik kuvvetleri ve modal özellikleri etkili bir şekilde değiştirmedini gözlemişlerdir. Ancak sismik izolasyon sisteminin ve zemin özelliklerinin esneklikleri yakın olması durumunda zeminin yapı davranışı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Koh ve Balendra (1989), mesnetlerdeki P- Δ etkilerini dikkate alan sismik izolasyonlu yapıların analizlerini yapmışlardır. Çalışmada mesnet üzerindeki basıncın etkisi ilave edildiğinden tabandaki dönme serbestlik derecesini de analize ilave etmişlerdir. Üst yapı ve temel için olan hareket denklemlerini ayrı ayrı elde etmişlerdir. Sistemin tepki analizini adım adım sayısal integrasyon tekniğini kullanarak elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda izolatörün burkulma güvenlik katsayısının küçük olması durumunda P- Δ etkisinin ihmal edilmesinin önemli hatalara yol açabileceğini göstermişlerdir.

Koh ve Kelly (1990), kauçuk mesnetlerin kuvvet-yer değiştirme davranışını tanımlamışlardır. Sismik izolasyonlu yapılara ait hareket denklemlerinin çözümü için sayısal integrasyon yöntemlerini kullanmışlar ve sayısal algoritma geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda yaptıkları sayısal örneklerle geliştirdikleri algoritmanın iyi bir yaklaşım olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte sarsma tablası üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalarda Kelvin modelinin kabul edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Fan ve Ahmadi (1990a), rastgele yer hareketine maruz sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan bir sistemin davranışını incelemişlerdir. Stokastik ortalama ve eşdeğer doğrusallaştırma yöntemlerini kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizler sonucunda stokastik ortalama ve eşdeğer doğrusallaştırma yöntemleri ile elde edilen sonuçların birbiriyle uyum içinde olduklarını göstermişlerdir. Bununla birlikte stokastik ortalama ve eşdeğer doğrusallaştırma yöntemleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Spanos, 1981; Crandall ve Zhu, 1983; Nigam, 1983; Roberts, 1984; Roberts ve Spanos, 1986).

Fan ve Ahmadi (1990b), sinusoidal ve sismik yer hareketi altında sismik izolasyonlu çok katlı bir yapıda kat seviyesindeki spektrum tepkilerini inceleyen bir çalışma yürütmüşlerdir. Sismik izolasyon sistemi olarak çeşitli izolasyon sistemlerini

kullanmışlardır. Kattaki spektrum tepkilerini sinusoidal ve birçok deprem kaydı kullanarak incelemiştirlerdir. Farklı izolasyon sistemlerinin kullanılmasıyla elde edilen tepkiler sismik izolasyonsuz yapı ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda yapısal tepkiler, uygun şekilde tasarlanmış sismik izolasyon sistemleri kullanımı ile yapının depremlere karşı korunabileceği gösterilmiştir.

Swedian (1990) çalışmasında, değişen yer hareketi etkisindeki kemer köprülerin stokastik analizi üzerinde durmuştur. Çalışmada yer hareketi olarak mesnet noktalarındaki yer hareketleri arasındaki korelasyon etkilerini ve deprem dalgasının yayılma hızını dikkate alan bir model kullanmıştır. Yapı davranışını sonlu eleman yöntemi dikkate alınarak geliştirilen rasgele titreşim teorisi ile çözmüştür. Mesnetlere etkiyen yer hareketlerini çeşitli özel durumlarına göre çözümler yaparak karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, yer hareket değişiminin yapı davranışı üzerinde önemli etkileri olduğunu ifade ederken, yer hareketi parametrelerinin ve yer hareketi yayılma hızının da sonuçları etkilediğini vurgulamıştır. Bununla birlikte kemer köprülerin durağan olmayan davranışını incelemiş olup durağan duruma yakın sonuçlar bulduğunu belirtmiştir.

Zerva (1990), değişen yer hareketi etkisindeki sismik izolasyonsuz sürekli kirişlerin davranışını incelemiştir. Çalışmada mesnetlere etkiyen yer hareketlerini stokastik olarak ifade etmiş ve korelasyon etkisini incelemiştir. Çalışma sonucu üniform yer hareketi yapının dinamik özelliklerine, yapının doğal frekansı ile yer hareketinin doğal frekansı arasındaki ilişkiye, hesaplanacak olan tepki büyüklüğüne, tepki büyüklüğünün hesaplanacağı noktaya ve mesnet hareketleri arasındaki korelasyonun derecesine bağlı olarak korelasyon etkisinin dikkate alındığı duruma oranla daha küçük veya daha büyük tepki değerleri verebileceğini göstermiştir.

Bradford vd. (1991), köprüler için sismik izolasyon sistemini sarsma tablasında test etmişlerdir. Kullandıkları sismik izolasyon sistemi teflon disklerden ve yer değiştirme kontrollü aygıtlarından oluşmaktadır. Bu aygıtlar deprem titreşimlerinde köprüde tekrar merkezlenme kuvveti, fazladan enerji emilimi ve servis yüklerinde yapıya rijitlik sağlamaktadırlar. Çalışmadaki deneyleri frekans içerikli geniş bir aralıktaki güçlü deprem kayıtlarına ve 0.6g CALTRANS tasarım spektrumu ile uyumlu benzetilmiş yer hareketlerine maruz 227 kN' luk bir modeli kullanarak yapmışlardır. Ayrıca çalışmada, izolasyon sisteminin özelliklerini, tabliye esnekliğini, köprü ayaklarının esnekliğini, izolasyon elemanlarının dağılımını ve deprem etkilerini incelemiştirlerdir. Çalışmanın

sonucunda, sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprüler için basitleştirilmiş kod tipi analiz yöntemini sunmuşlar ve değerlendirmişlerdir.

Sismik izolasyonlu yapıların dinamik analizlerinde burulma etkilerini dikkate alan pek çok çalışma yapılmıştır (Jangid ve Data, 1992; Jangid ve Data, 1993; Dumanoglu ve Ateş, 1999).

Der Kiureghian ve Neuenhofer (1991, 1992), değişen yer hareketi etkisindeki çok serbestlik dereceli sistemlerin dinamik analizi için rastgele titreşim teorisine dayalı yeni bir davranış spektrumu yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntem iki açıklıklı bir kiriş sisteminde kullanılmıştır. Çalışmada dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve zemin etkisi dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, değişen yer hareketi durumunda elde edilen tepki değerlerinin üniform harekete oranla daha küçük olduğunu ifade etmişlerdir. Rijit yapılarda ve ani korelasyon kaybının olduğu durumlarda zahiri-statik bileşenlerdeki artış dolayısıyla farklı sonuçların elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Zerva (1991), değişen yer hareketi etkisindeki sürekli kiriş sistemleri üzerinde çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, mesnetlerdeki yer hareketleri arasındaki korelasyon ve dalga yayılma hızını dikkate alan bir stokastik yer hareketi modeli kullanmıştır. Çalışma sonucunda dalga yayılma hızının üniform harekete oranla küçük ya da büyük tepki değerleri verebileceğini göstermiştir.

Chen ve Ahmadi (1992), kauçuk mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan kesme kirişi olarak modellenen bir yapı sisteminde ikincil sistemlerin stokastik tepkilerini araştırmışlardır. Çalışmada eşdeğer doğrusallaştırma tekniğini kullanmışlardır. Birincil ve ikincil yapının tepkisini elde etmek için kareler toplamının karekökünü kullanmışlardır. Yaptıkları analiz sonucunda ikincil sistemlerin tepkilerinde azalmaların oldukça etkili olduğunu göstermişlerdir.

Nazmy ve Abdel-Ghaffar (1992), üç boyutlu uzun açıklıklı köprü sistemlerinin değişerek yayılan yer hareketi etkisinde dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Birbirinden farklı yer hareketlerini eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan mesnet hareketi olarak köprüye uygulamışlardır. Çalışmada üniform ve üniform olmayan yer hareketi etkilerinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda üniform olmayan yer hareketinin uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik analizinde dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Hawwari (1992), Golden Gate Asma Köprüsünün stokastik davranışını incelemiştir. Deprem hareketi olarak mesnetlerdeki yer hareketleri arasındaki korelasyon etkilerini ve

deprem dalgasının yayılma etkisini dikkate alan bir model kullanmıştır. Mesnetlere etkiyen yer hareketlerini çeşitli özel durumları için çözümler yaparak karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, üniform yer hareketi dikkate alınarak yapılan çözümlerin köprünün bazı bölgelerinde büyük tepki değerleri oluşmasına neden olurken, bazı bölgelerinde küçük tepki değerlerinin oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Dalga yayılma hızının dikkate alındığı durumlarda özellikle merkez açıklıkta büyük farklılıkların ortaya çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca belirli bir hareket süresince durağanlık kabulünün, kenar açıklıklarda büyük tepki değerlerinin oluşmasına neden olduğu gözlenmiştir.

Zerva (1992), yapı sistemlerinin mesnetlerine etkiyen yer hareketleri arasındaki korelasyon etkisini görmek için iki farklı model kullanıp sonuçlardaki farklılıkları karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda iki model için elde ettiği tepkilerin farklı olduğunu belirterek uzaklık ve frekansın sonuçlar üzerinde etkili olduğunu vurgulamıştır.

Mokha vd. (1993), sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan altı katlı çeyrek ölçekli bir yapıyı sarsma tablasında farklı deprem ivmelerine maruz bırakmışlardır. Çalışma sonucunda taban yer değiştirmelerinin epeyce azalmış olduğunu ve yapının güçlü depremlere karşı koyabileceğini göstermişlerdir.

Constantinou vd. (1993), köprülerde kullanılan sürtünmeli sarkaç mesnet sisteminin davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deprem simülasyon deneylerini sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan bir köprü modelinde yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, sismik izolasyonlu köprünün deprem dayanım kapasitesinin arttığını gözlemlemişlerdir. Sistemin davranışını tahmin etmek amacıyla kullandıkları analitik yöntemlerden elde edilen sonuçların deneysel çalışmayla oldukça benzer olduğunu belirtmişlerdir.

Sungur (1993), üniform yer hareketi etkisindeki kablolu köprülerin stokastik analizini yapmıştır. Çalışmada stokastik analiz ile elde edilen ortalama maksimum tepki değerleri ile deterministik yöntemlerle belirlenen mutlak maksimum değerleri karşılaştırmıştır. Ayrıca çalışmada yer hareketi için idealleştirilmiş bir model olan beyaz gürültü işlemine göre çözümler yapmış ve uyumlu sonuçların elde edildiğini gözlemlemiştir.

Hwang ve Sheng (1993, 1994), AASHTO (1991)'ya göre merkezi çekirdekli kauçuk mesnetli bir köprünün eşdeğer elastik sistemi için eşdeğer bir sönüm oranı ve bu sönüm oranının etkisini incelemişlerdir. AASHTO (1991) kullanılarak belirlenen sönüm oranının

merkezi çekirdekli kauçuk mesnedin doğrusal olmayan şekil değiştirmesinin artmasına göre azalabileceğini göstermişlerdir.

Wang ve Gould (1994), iki açıklıklı sürekli tabliyeli ve sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan bir köprüde köprü ayaklarının yukarı kalkmasını inceleyen çalışmalar yapmışlardır.

Tsopelas vd. (1994), köprülerin sismik izolasyonunda sönümleyici sıvıları, düz kayıcı mesnetleri ve merkezlenmeyi sağlayan kauçukları kullanarak çeşitli deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü modelleri üzerinde deprem simülasyon testleri yapmışlardır. Bununla birlikte analitik sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, sismik izolasyonlu köprünün depreme dayanımının arttığını ve analitik sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermişlerdir.

Jangid ve Banerji (1995), en basit kayıcı izolasyon sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprünün boyuna doğrultusundaki tepkisini incelemişlerdir. Çalışmada, en basit kayıcı izolasyon sisteminin davranışı rijit-plastik olarak modellenmiştir. Çalışma sonucu alt yapı ile üst yapı arasına yerleştirilen bu izolasyon aygıtlarının köprü ayaklarındaki taban kesme kuvvetlerini oldukça azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte çalışma sonucunda bu sistemin esas dezavantajının yeniden merkezlenme kuvvetinin olmayışı ve bunun sonucu olarak büyük kalıcı yer değiştirmelerin meydana geldiğini göstermişlerdir.

Monti vd. (1995) çalışmalarında, değişerek yayılan yer hareketi etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla altı açıklıklı, sürekli tabliyeli ve sismik izolasyonlu bir köprü modelini seçmişlerdir. Çalışmada, köprünün her bir mesnedini farklı yer hareketine maruz bırakmışlardır. Köprüleri izolasyonlu ve izolasyonsuz, senkronize yer hareket için mevcut mühendislik uygulamalarına göre değişken rijitlik ve süneklikte tasarlamışlardır. Çalışma sonucunda analizlerde eşzamanlı olmayan yer hareketlerinin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Çok mesnetli titreşimlere maruz köprülerin doğrusal olmayan tepkileri üzerine kapsamlı sayısal bir çalışma Monti vd. (1996) tarafından yapılmıştır. Eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan hareketler için değişken rijitlikte ve süneklikte köprüler tasarlamış ve analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, köprü yapılarının en büyük elastik olmayan tepkisi ve tasarım için kuvvet azaltma faktörünün (q faktörü) geçerlilik boyutu etkilerinin hesaplanmasını amaçlamışlardır. Çalışmanın sonuçları çok mesnetli titreşimler için q faktörü metodu ile yapılan köprü tasarımındaki yer değiştirme sünekliği gereksinimleri,

seçilen q değeri ile iyi uyum içinde olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte eş zamanlı hareketler için tasarlanan ve daha sonra eş zamanlı olmayan hareketler için kontrol edilen köprülerin orta ayakları aşırı dayanım gösterirken orta ayaklara yakın kenar ayaklarda bunu tersi olduğunu göstermişlerdir. Bu da eş zamanlı olmayan yer hareketi eş zamanlı yer hareketinden daha büyük yer değiştirme sünekliği gereksinimine sahip olabileceğini göstermektedir.

Harichandran vd. (1996), deprem hareketindeki değişimin araştırıldığı kemer köprülerin rastgele titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada deprem hareketini filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile modellemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda uzun açıklıklı köprü sistemlerinde yer hareketi değişiminin köprünün dinamik davranışlarını önemli derecede etkilediğini göstermişlerdir.

Tsopelas vd. (1996), sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz bir köprünün dinamik tepkilerini sarsma tablasında deneysel olarak incelemişlerdir. Sismik izolasyonlu köprüde sürtünme katsayısı 0.07 ile 0.12 arasında değişen 4 adet sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi kullanılmıştır. Köprüyü sarsma tablasında maksimum ivmeleri 0.1g ve 1.1g arasında değişen deprem değerleri için test etmişlerdir. Deney sonuçları, elastik durumlar altında sismik titreşimlerin tüm seviyelerinde göçmeyi engelleme açısından sismik izolasyonlu köprü kabiliyetinde önemli bir gelişim olduğunu göstermiştir.

Soyluk (1997), kablolu bir köprünün dinamik davranışını belirlemek için köprüde stokastik analiz gerçekleştirmiştir. Stokastik yöntemin etkinliğini vurgulamak için uygulamalarda tabii periyodu büyük olan kablolu ve asma köprüler kullanmıştır. Ayrıca çalışmada stokastik analiz ile deterministik analiz sonuçlarını karşılaştırmış ve stokastik yaklaşımın geçerliliğini göstermeye çalışmıştır.

Jangid ve Banerji (1998), sismik izolasyonlu binaların doğrusal olmayan stokastik davranışları üzerinde izolatör aygıtlarının sönüm oranlarının etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, sürtünmeli kayıcı izolatördeki sönüm oranlarını dikkate alarak ve stokastik eşdeğer doğrusallaştırma tekniğini kullanarak ivme tepkilerini en aza indireyecek izolatör sönüm oranını belirlemeye çalışmışlardır.

Almazan vd. (1998), sismik izolasyonlu yapıların farklı modellenme biçimlerini sürtünmeli sarkaç mesnet sistemlerini kullanarak yapmışlardır. Dört katlı ve tek katlı çerçeveler için sürtünmeli sarkaç sistemlerinin farklı yapısal modellerini geliştirerek test etmişlerdir. Bununla birlikte sürtünmeli sarkaç sistemlerindeki kuvvet-yer değiştirme ilişkisini temsil eden formülasyonlar sunmuşlardır.

Zembaty ve Rutenberg (1998a,1998b) çalışmalarında, yerel zemin etkisinin yapı davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. Bu amaçla iki mesnet noktasının her biri ayrı ve aynı zemine oturduğu düşünülen tek serbestlik dereceli bir köprünün rastgele titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Yer hareketi için Kanai-Tajimi spektral yoğunluk fonksiyonu ile Der Kiureghian tarafından önerilen zemin etkisini içeren bir korelasyon modelini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda farklı zemin cinsleri için elde edilen tepki değerlerinin doğal frekansa ve zemin türüne bağlı olarak arttığını gözlemlemişlerdir.

Sismik izolasyonlu köprülerin tasarımı ve analizlerinde kullanılan parametreler hakkında çalışmalar Constantinou vd. (1999) tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında genellikle sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ve kauçuk mesnet sistemini kullanmışlardır. Ayrıca yüklemenin etkisi, izolasyon sisteminin yorulması ve çevresel şartlar gibi özellikleri göz önünde bulundurmışlardır.

Allam ve Datta (1999), yer hareketleri arasındaki korelasyon etkilerinin dikkate alındığı rastgele yer hareketi etkisindeki kablolu köprülerin stokastik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında rastgele yer hareketini, spektral yoğunluk fonksiyonu ve korelasyon etkisi ile ifade etmişlerdir. Bunun yanında kablolu köprülerin dinamik davranışını belirlemek amacıyla kapsamlı bir parametrik çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda korelasyon etkilerinin kablolu köprüler için dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Karayolu köprülerinde sismik izolasyon sisteminin üstünlüğünü göstermek için sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü davranışlarının karşılaştırıldığı pek çok çalışma yapılmıştır (Tongaokar ve Jangid, 2000, 2002, 2003; Mutobe ve Cooper, 1999; Park vd., 2002; Chaudhary vd., 2001, 2002). Bu çalışmalarda karayolu köprülerinde sismik izolasyonun önemi vurgulanmıştır.

Dumanoğlu ve Soyluk (2000), mesnetlerinde farklı dinamik etkilere maruz sismik izolasyonsuz kablolu köprülerin stokastik analizi üzerinde çalışmışlardır. Soyluk ve Dumanoğlu (2000), bu konuda benzer bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında yer hareketi olarak Clough-Penzien tarafından geliştirilen filtre edilmiş beyaz gürültü modelini kullanmışlardır. Zemin şartlarındaki değişim dikkate alınmak sureti ile aralarında korelasyon etkisi olmayan farklı yer hareketleri için söz konusu köprünün stokastik analizini yapmışlardır. Çalışma sonucunda farklı yer hareketlerinin köprünün dinamik davranışı üzerinde önemli etkilere sebep olduğunu gözlemişlerdir.

Soyluk (2001), yer hareketinin yayılma ve değişim etkilerini dikkate almak suretiyle kablolu bir köprünün stokastik analizini gerçekleştirmiştir. Stokastik analizde yer hareketini rastgele spektral yoğunluk fonksiyonu olarak ifade etmiştir. Yer hareketinin değişiminde korelasyon etkisi, dalga yayılma etkisi ve zemin şartlarındaki değişimi dikkate almıştır. Yaptığı çalışma sonucunda yer hareketindeki değişime neden olan dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkilerinin her birinin sonuçlar üzerinde önemli etkileri olduğunu ve bunlardan zemin etkisinin diğer etkilere oranla daha belirgin olduğunu gözlemlemiştir.

Buckle vd. (2002), kauçuk mesnetlerin kararlılığını belirlemek için analitik ve deneysel çözümleri karşılaştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma ile kauçuk mesnetlerin kararlılığında etkili olan kritik aksenal yükü belirlemek ve bu aksenal yükü değiştirerek büyük şekil değiştirmeleri hesaba katacak yaklaşık bir düzeltme faktörü elde etmeyi amaçlamışlar ve bunu deneysel olarak test etmişlerdir. Yaptıkları deneysel ve analitik karşılaştırma sonucunda kritik yükleme üzerinde etkili olan yatay yer değiştiriminin doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermişlerdir.

Kulkarni ve Jangid (2002), sismik izolasyonlu yapılarda üst yapının izolasyon sistemine oranla epeyce rijit olduğunu ifade etmişlerdir. Bundan dolayı üst yapıyı rijit kabul edip sismik izolasyonlu yapıyı tek serbestlik dereceli bir sistem gibi düşünerek hesaplamalarda büyük kolaylıklar sağlamışlardır. Böylece çok serbestlik dereceli bir yapıyı hem rijit hem de esnek kabul ederek çözüm yapmışlardır. Çalışmalarında sismik izolasyon sistemi olarak kauçuk ve sürtünmeli sarkaç mesnet sistemlerini kullanmışlardır. Yaptıkları analiz sonuçlarında üst yapının esnek ve rijit olması durumlarında kauçuk ve sürtünmeli sarkaç mesnetlerindeki yer değiştirmelerin yaklaşık olarak aynı çıktığını göstermişlerdir. Ayrıca sismik izolasyonlu rijit yapının kat ivmelerinin kauçuk mesnetler kullanılması halinde esnek yapı kat ivmelerine yakın sonuçlar verirken sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi kullanılması durumunda yakın sonuçlar elde edememişlerdir.

Ateş ve Dumanoğlu (2003), zemin esnekliğinin sismik izolasyonlu yapının dinamik davranışı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan iki boyutlu yedi katlı bir çerçeve sisteminin dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analiz sonuçlarında geleneksel ankastre mesnetli çerçeve modellerinde zemin eğilebilirliğinin etkisi önemli olurken sismik izolasyonlu çerçeve modellerinde zemin eğilebilirliği etkisinin önemli değişmelere neden olmadığını belirtmişlerdir.

Sextos vd. (2004), eş zamanlı olmayan yer hareketi etkisindeki iki açıklıklı eğrisel bir köprü sisteminin dinamik tepkilerini incelemişlerdir. Değişerek yayılan yer hareketi ile ilgili olarak gerçek yer hareketi ve Eurocode 8 spektrumu ile uyumlu üç farklı senaryo oluşturan parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Ateş (2004), sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprülerinin değişerek yayılan yer hareketi altında stokastik analizini gerçekleştirmiştir. Yapılan stokastik analizlerde yer hareketi rastgele işlem olarak güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilmiş ve en büyük tepkilerin olduğu saniyeler boyunca istatistiksel özelliklerin zamandan bağımsız olduğu durağanlık kabulü yapılmıştır. Yer hareketi modelinde dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin şartlarındaki değişim dikkate alınmıştır. Stokastik analizlerde Clough ve Penzien (1993) tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modelini kullanmıştır. Çalışmada filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modelinin gerçek yer hareketini oldukça iyi temsil ettiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda üniform yer hareketi için izolasyonlu ve izolasyonsuz köprünün stokastik analizlerinden elde edilen yatay yer değiştirme değerlerinin genellikle en büyük olduğunu göstermiştir. Ayrıca dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin etkilerinin izolasyonsuz ve izolasyonlu köprü tabliye yer değiştirme ve eleman kuvvetleri üzerinde etkili olmakla beraber, en büyük etki zemin şartlarındaki değişimden kaynaklandığını gözlemlemiştir.

Ateş vd. (2004) yapmış oldukları çalışmalarında, sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprülerin sismik davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla üç açıklıklı bir köprü modeli seçmişlerdir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca istasyonu kayıtlarını köprünün boyuna ve enine doğrultusunda kullanmışlardır. Çalışmalarında sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü modellerinin analiz sonuçlarından elde edilen periyotları, ivmeleri, yer değiştirmeleri ve kesme kuvvetlerini karşılaştırmışlardır. Analiz sonuçlarında sismik izolasyonlu köprünün periyotlarının izolasyonsuzlara göre epeyce arttığını, ivme ve taban kesme kuvvetlerinin ise epeyce azaldığını göstermişlerdir.

Ateş vd. (2005), değişerek yayılan yer hareketine maruz sürtünmeli sarkaç mesnet sistem ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprülerinin stokastik davranışlarını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarındaki değişerek yayılan yer hareketi tutarsızlık etkisi, dalga yayılma etkisi ve zemin etkilerini içermektedir. Tutarsızlık etkisini Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile incelemişlerdir. Dalga yayılma etkisini

çeşitli dalga yayılma hızları ile araştırmışlardır. Köprünün inşa edildiği yerde homojen yumuşak, orta ve sert zemin koşullarını seçerek zemin etkisini hesaba katmışlardır. Yer hareketini filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi ile tanımlayarak her bir mesnet noktasına uygulamışlardır. Sürtünmeli sarkaç mesnet sisteminin konkav yüzeyindeki sürtünmeden dolayı hareket denklemi doğrusal değildir. Doğrusal olmayan hareket denklemini doğrusal olmayan stokastik analizin eşdeğer doğrusallaştırma tekniklerini kullanarak çözmüşlerdir. Sürtünmeli sarkacın davranışını FORTRAN dilinde programlamış ve SVEM programına eklemişlerdir. Değişerek yayılan yer hareketine maruz izolasyonlu ve izolasyonsuz köprülerin stokastik analizlerinden elde edilen sonuçları yer hareketlerinin her birinin özel durumları için karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda sürtünmeli sarkaç sisteminin değişerek yayılan yer hareketine maruz köprülerin stokastik davranışları üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Lou ve Zerva (2005), çalışmalarında değişerek yayılan yer hareketine maruz otuz derece eğimli kısa açıklıklı bir betonarme karayolu köprüsünün dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada köprünün doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu eleman modellerini oluşturarak doğrusal elastik ve doğrusal olmayan elastik zaman tanım alanındaki analizleri yürütmüşlerdir. Çalışma sonucunda değişerek yayılan yer hareketlerinin köprü mesnetlerinde uygulanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Lupoi vd. (2005), yaptıkları çalışmada değişerek yayılan yer hareketinin köprü davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmadaki değişerek yayılan yer hareketi dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin etkileri bileşenlerini içermektedir. Çalışma sonucunda değişerek yayılan yer hareketi köprü davranışlarını etkilediğini ve analizlerde hesaba katılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Soneji ve Jangid (2006), yapmış oldukları çalışmada kablolu köprülerdeki sismik davranışın kontrolü için elastomerik ve kayma tipli izolasyon sistemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında Illinois'deki Quincy Bay-view köprüsünün basitleştirilmiş iki boyutlu kütle yığılımlı sonlu eleman modelini incelemişlerdir. Kablolu köprünün sismik izolasyonlu analizlerini üç farklı izolatör kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu izolatörler; sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi, kurşun çekirdekli kauçuk mesnet sistemi ve yüksek sönmümlü kauçuk mesnet sistemidir. Köprünün zaman tanım alanında analizini köprü boyuna doğrultusunda Newmark metodunu kullanarak dört farklı deprem kaydı ile gerçekleştirmişlerdir. Sismik izolasyonlu köprünün sismik davranışını izolasyonsuz köprü ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçları sismik izolasyonun köprü kulesinin taban

kesme tepkilerinde ve mutlak ivmelerinin azalmasında etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca kullanılan mesnet sistemlerinin sönüm oranları, akma dayanımları ve sürtünme katsayıları değişimlerinin köprünün sismik tepkisi üzerine olan etkilerinin araştırılması için çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar böyle bir çalışmadan köprü davranışlarının azaltılması için optimum izolatör değerlerinin bulunabileceğini vurgulamışlardır.

Kim ve Yun (2007), değişen deprem titreşimleri altındaki basit bir köprü üzerinde yeniden merkezlenme özelliklerini ve değişken sürtünme değerleri olan iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç (İESS) mesnet sisteminin etkilerini incelemiştir. İESS mesnet sistemi farklı sürtünme katsayıları ve eğrilik yarıçaplarından oluşmaktadır. Yapılan analiz sonuçlarında İESS sisteminden dolayı köprü ayaklarındaki taban kesme kuvvetlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Soneji ve Jangid (2007), gerçek deprem yer hareketine maruz kalan kablolu köprünün depremden korunması için pasif hibrit karma sistemlerinin performansını araştırmışlardır. Araştırma için Illinois'da inşa edilen Quincy Bay-view Köprüsünün basitleştirilmiş toplu kütleli sonlu eleman modelini kullanmışlardır. Çalışmada viskoz sıvı sönümleyiciyi, pasif hibrit kontrol sistemini oluşturmak için kayıcı ve elastomer sistemler ile birlikte pasif tamamlayıcı enerji emilim aygıtı olarak kullanmışlardır. Sismik izolasyonlu kablolu köprünün sismik davranışına doğrusal olmayan viskoz sönümleyicinin etkilerini sönümleyicideki farklı hız değerleri ve sönüm katsayılarını kullanarak ele almışlardır. Pasif hibrit sistemli köprünün sismik tepkisini, izolasyonsuz köprünün yanı sıra sadece sismik izolasyon sistemlerinin tepkileri ile de karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda doğrusal olmayan viskoz sönümleyicinin sismik izolasyonlu köprünün kulelerindeki taban kesmesini kısıtlarken maksimum izolatör yer değiştirmesini kontrol etmede daha etkili olduğunu göstermişlerdir.

Marano ve Sgobba (2007), sismik izolasyonlu bir köprünün stokastik enerji emilimini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Analizler histeretik enerji davranışı ve ayak tabliye maksimum yer değiştirmelerinin iki stokastik parametreleri açısından yürütülmüştür. İzolasyonlu köprüyü basit iki serbestlik dereceli bir Bouc-Wen histeretik model ile tanımlamışlardır. Çalışma sonuçları yapının depremden korunmasının doğal periyodun değişimi ve aygıtların enerji emilimi özelliği sayesinde başarılı olduğunu göstermiştir.

Purnachandra ve Jangid (2008), çalışmalarında farklı izolasyon sistemleriyle sismik izolasyonu yapılan kablolu köprünün deprem davranışını araştırmışlardır. Seçilen

izolasyon sistemleri yüksek sönümlü kauçuk mesnet, kurşunlu kauçuk mesnet, sürtünmeli sarkaç sistemi ve esnek sürtünmeli taban izolatör sistemlerinden oluşmaktadır. Bütün mesnetlere aynı anda boyuna yönde etki eden yer hareketi uygulamışlardır. Köprünün sismik tepkisini Newmark'ın adım adım integrasyon yöntemi ile köprünün temel hareket denklemini çözerek elde etmişlerdir. Çalışmada ayrıca izolatör parametre çeşitliliğinin etkinliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda devrilme momentinde azalmalar, taban kesmesinde önemli azalmalar ve yer değiştirmelerin sismik izolatörler vasıtasıyla kontrol altına alındığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, esnek sürtünmeli taban izolatör sistemleri ve kurşunlu kauçuk mesnedin performansları, yüksek sönümlü kauçuk mesnet ve sürtünmeli sarkaç mesnet sistemlerinin performanslarından daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Üstelik yüksek sönümlü kauçuk mesnedin ve kurşunlu kauçuk mesnedin sönüm oranındaki artışlar söz konusu mesnetlerin taban kesmesini ve yer değiştirmelerini azalttığını göstermiştir.

Jangid (2008), sismik izolasyonlu köprülerin stokastik davranışlarını inceleyen bir çalışma yapmıştır. Sismik izolasyon aygıtı olarak doğrusal olmayan davranışa sahip kurşun çekirdekli kauçuk mesnet sistemini kullanmıştır. Deprem titreşimini durağan olmayan rastgele bir süreç olarak modellemiştir. Çalışmada sismik izolasyonlu köprünün stokastik davranışını zamana bağlı eşdeğer doğrusallaştırma tekniğini kullanarak elde etmiştir. Ayrıca izolasyonlu köprünün durağan olmayan davranışını, deprem hareketinin durağan olmayan özelliklerinin etkilerini incelemek için durağan davranışinkilerle karşılaştırmıştır. Bunlarla birlikte araştırmacı çalışmada deprem titreşim yoğunluğu, frekans içeriği, kurşun çekirdekli kauçuk mesnedin sönüm oranı ve izolasyon periyodu gibi önemli değişken parametreler altında kurşun çekirdekli kauçuk mesnedin optimum akma dayanımını incelemiştir. İzolasyonlu sistemin ilgili davranışları ve kurşun çekirdekli kauçuk mesnedin optimum akma dayanımı için kapalı biçim ifadelerini öne sürmüştür. Bu ifadeleri durağan beyaz gürültü titreşimine maruz rijit tabliye ve ayaklı köprü modellerine dayanarak türetmiştir. Çalışma sonucunda öne sürdüğü ifadelerin sismik izolasyonlu köprü sisteminin başlangıç optimum tasarımı için kullanılabileceğini göstermiştir.

Ateş vd. (2009), değişerek yayılan yer hareketlerine maruz iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan kablolu köprünün stokastik tepkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada Güney Kore'de inşa edilen Jindo Köprüsü'nü seçmişlerdir. Sismik izolasyon işlemini gerçekleştirmek için iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç aygıtlarını tabliyenin mesnet noktalarının her birine yerleştirmişlerdir.

Böylece iki küresel konkav yüzeye sahip kayıcı bir aygıt olan iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemini kullanarak kablolu köprünün tabliyesini kulelerden izole etmişlerdir. Çalışmada kullandıkları değişerek yayılan yer hareketi modeli dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerini içermektedir. Analiz sonuçlarında değişerek yayılan yer hareketine maruz izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü modellerinin maksimum ortalama tepkilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucu değişerek yayılan yer hareketine maruz taban izolasyonlu kablolu köprü modelinin tabliye ve kule tepkilerinde önemli derecede azalmalar olduğunu göstermiştir.

Lupoi (2009), değişerek yayılan yer hareketinin izolasyonlu köprünün davranışı üzerine olan etkilerini inceleyen bir çalışma yapmıştır. Değişerek yayılan yer hareketi tutarsızlık, dalga yayılma ve yerel zemin etkilerini içermektedir. Bu yüzden yazar çalışmada köprünün biçimindeki ve yer hareketi değişkenliğindeki belirsizlikleri temsil etmesi için istatistiksel bir yaklaşım benimsemiştir. Değişerek yayılan yer hareketi altında standart bir hareket veri girişi için tasarlanan izolasyonlu köprünün, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizini yapmıştır. Sistemin performansını yer değiştirme talepleri ile ölçmüştür. Çalışma sonuçları, değişerek yayılan yer hareketinin yapının davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Zhang vd. (2009), değişerek yayılan yer hareketine maruz uzun açıklıklı yapıların rastgele titreşim analizleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında değişerek yayılan yer hareketine maruz çok mesnetli yapıların sismik analizleri için gerçekçi olmayan titreşim metoduna dayalı bir rastgele titreşim yöntem bilimini formüle etmişlerdir. Değişerek yayılan yer hareketi dalga yayılma, tutarsızlık ve zemin etkilerini içermektedir. Öne sürdükleri metodun avantajı hesaplama işlemlerinin az olmasıdır. Çalışmada yerel zemin etkileri, dalga yayılma etkileri ve tutarsızlık etkilerinden dolayı gerçek bir uzun açıklıklı köprünün rastgele sismik tepkilerini ayrıntılı olarak araştırmışlardır. Çalışma sonucu tüm bu etkilerin köprünün sismik davranışı üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermiştir.

Chouw vd. (2009), değişerek yayılan yer hareketine maruz köprüdeki çok yönlü darbenin köprünün yapısal davranışlarına olan etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Ayrıca kirişlerin doğrusal olmayan mesnet desteklerinin ek etkilerini de hesaba katmışlardır. Yer hareketlerini Newmark-Hall spektrumuna göre stokastik olarak simule etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucu, darbe ve kirişlerin yerinden çıkma ihtimali yanı sıra mesnet kuvvetlerini tahmin etmek için gerçeğe uygun üniform olmayan bir yer hareketini

göz önüne almayı, uç kısıtlama etkisinin ve doğrusal olmayan kiriş mesnetlerinin gerekliliğini göstermiştir.

Bai vd. (2010), çelik kemer köprülerin değişerek yayılan yer hareketi etkisi altında dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Yer hareketini köprüye yatay ve düşey doğrultuda etki ettirmişlerdir. Yer hareketindeki değişimi korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkileri ile dikkate almışlardır. Analiz sonuçlarında değişerek yayılan yer hareketi ve üniform yer hareketi etkileri altında elde ettikleri yapı davranışlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda yer hareketindeki değişimin yerel zemin koşullarındaki farklılık ile birlikte dikkate alındığı durumda tepkilerin arttığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte yer hareketindeki değişim bileşenlerinin her birinin yapısal tepkiler üzerinde etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Bi vd. (2010), değişerek yayılan yer hareketine maruz vadiye inşa edilmiş bir köprünün davranışlarını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Değişerek yayılan yer hareketinde tutarsızlık etkisi ve yerel zemin koşulları etkilerini dikkate almışlardır. Önerdikleri yaklaşımda değişen yer hareketlerini iki adımda modellemişlerdir. Değişerek yayılan yer hareketlerinin farklı durumları için köprü modellerinin dinamik, yarı statik ve toplam tepkilerini hesaplamışlardır. Karşılaştırma için üniform yer hareketi davranışları, yerel zemin etkilerini hesaba katmayan değişerek yayılan yer hareketi davranışları ve tutarsızlık etkisi olmayan değişerek yayılan yer hareketi davranışları hesaplanmıştır.

Soyluk ve Avanoğlu (2011), değişerek yayılan yer hareketi ve zemin-yapı etkileşiminin kablolu köprülerin dinamik davranışlarına olan etkilerini belirleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla zaman tanım alanında yer hareketini, bileşenleri tutarsızlık etkisi, dalga yayılma etkisi ve yerel zemin koşulları olan değişerek yayılan yer hareketine göre simule etmişlerdir. Deprem yer hareketinin değişerek yayılma etkisinin önemini vurgulamak için köprü davranışlarını zemin-yapı etkileşimi içeren köprü modeli ve ankastre köprü modeli olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda kablolu köprülerin dinamik analizlerinde değişerek yayılan yer hareketi ve zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Konaklı (2011), tepki spektrumu ve zaman tanım alanında analiz yaklaşımlarının her ikisini hesaba katan değişerek yayılan yer hareketine maruz köprülerin analizleri için doğru ve pratik araçlar geliştirmiştir. Değişerek yayılan yer hareketinde dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve yerel zemin koşulları etkisini dikkate almıştır. Geliştirdikleri analiz araçlarını değişerek yayılan yer hareketinin çeşitli durumlarının farklı yapısal özelliklere

sahip gerçek köprü modellerin davranışlarına olan etkilerini araştırmak için kullanmışlardır. Yaptığı çalışma sonucunda geliştirdiği araçların etkinliğini vurgulamıştır.

Ateş (2012a), tutarsızlık etkisi, dalga yayılma etkisi ve zemin etkisini içeren değişerek yayılan yer hareketine maruz sismik izolasyonlu köprülerin stokastik analizini yapmıştır. Çalışmada tutarsızlık etkisini Harichandran and Vanmarcke uygunluk modeli kullanarak elde etmiştir. Dalga yayılma etkisi değişken dalga hızlarını kullanarak ele almıştır. Köprü ayaklarının inşa edildiği yerdeki zemin etkisi zeminin homojen sert, orta ve yumuşak durumlarını seçerek dikkate almıştır. Yer hareketini filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile tanımlamış ve her bir mesnet noktasına uygulamıştır. İzolasyon sisteminde konkav yüzeydeki sürtünmeden dolayı hareket denklemi doğrusal değildir. Doğrusal olmayan bu hareket denklemini doğrusal olmayan stokastik analizlerin eşdeğer doğrusallaştırma tekniğini kullanarak çözmüştür. Çalışmada yer hareketi modelinin özel durumları için değişerek yayılan yer hareketlerine maruz izolasyonlu ve izolasyonsuz köprülerin stokastik analizlerinden elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Yaptığı karşılaştırma sonuçlarında bir ve iki eğrilikli yüzeylere sahip sürtünmeli sarkaç mesnet sistemlerinin değişerek yayılan yer hareketine maruz köprülerin stokastik davranışları üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu vurgulamıştır.

Ateş (2012b) tarafından dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin etkileri ile karakterize edilen rastgele sismik titreşime maruz iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan bir karayolu köprüsünün davranışlarını inceleyen bir çalışma yapılmıştır. Köprünün sismik izolasyon sürecini gerçekleştirmek için altı adet iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi köprü ayakları ile tabliye arasına yerleştirilmiştir. Çalışmada deprem veri hareketinin durağan olmayan davranışının etkilerini incelemek için izolasyonlu köprünün durağan olmayan davranışı ile durağan davranışı karşılaştırılmıştır. Değişerek yayılan yer hareketleri filtre edilmiş güç spektral yoğunluk fonksiyonu ve ampirik tutarsızlık fonksiyonuna dayanarak stokastik olarak tanımlanmıştır. Zemin etkisi bir boyutlu dalga yayılma teorisinden türetilen transfer fonksiyonu ile hesaba katılmıştır. Çalışma sonucu durağanlık kabulünün yer hareketi süresince dikkate alındığında makul olduğunu göstermiştir.

Avanoğlu ve Soyluk (2012), dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerini içeren değişerek yayılan yer hareketine maruz kablolu köprülerin dinamik karakteristiklerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Değişerek yayılan yer hareketi bileşenlerinin kablolu köprünün dinamik davranışı üzerindeki göreceli etkilerini incelerken homojen sert, orta ve yumuşak

zemin durumlarını analizlere dâhil etmişlerdir. Bu amaçla değişerek yayılan yer hareketi bileşenlerinden tutarsızlık ve dalga yayılma etkilerine göre zaman tanım alanında yer hareketleri üretmek için Hao tarafından önerilen simülasyon metodunu kullanmışlardır. Deprem yer hareketinin değişerek yayılma etkilerinin önemini vurgulamak için köprü davranışlarını zemin-yapı etkileşimi içeren köprü modeli ve ankastre köprü modeli olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda tutarsızlık etkisi, sert zemin durumu için yapısal davranışlara hükmederken dalga yayılma etkisi zayıf zemin durumu için tutarsızlık etkisinden daha etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Bi ve Hao (2012), değişerek yayılan yer hareketi altındaki köprüde darbe zararlarının sayısal simülasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada değişerek yayılan yer hareketlerini stokastik olarak simüle edip değişerek yayılan sismik yükler altında köprünün hasar mekanizmasını incelemişlerdir. Sayısal sonuçlar bu çalışmada kabul edilen metodun köprü yapılarındaki sismik kaynaklı hasarı gerçekçi bir şekilde yansıttığını göstermiştir.

Li vd. (2012), değişerek yayılan yer hareketi etkisinin üç bitişik komşu köprü bölümünün darbe davranışı üstündeki etkilerini inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmayı üç adet sarma tablası kullanarak yürütmüşlerdir. Çalışmada, değişerek yayılan yer titreşimlerini bir ampirik tutarsızlık fonksiyonu kullanarak sert kaya, sığ zemin ve yumuşak zemine göre Yeni Zelanda tasarım spektrumu esas alınarak simüle etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonuçları değişerek yayılan yer hareketlerinin darbe kuvvetlerini ve bitişik köprü tabliyelerinin göreceli yer değiştirmelerini arttırdığını doğrulamıştır.

Konakli ve Kiureghian (2012), tutarsızlık, dalga yayılma ve yerel zemin koşulları etkilerini içeren değişerek yayılan yer hareketinin simülasyonunu içeren bir metod üzerinde çalışmışlardır. Durağan olmayan hareketlerin durağan kısımlardan oluştuğunu düşünerek hesaplamışlardır. Çalışmada iki yaklaşım geliştirmişlerdir. Her iki yaklaşımda örnek simülasyon hareketlerini sunmuşlardır. Mevcut bir köprü modelinde yerel zemin davranışları için iki alternatif uygulamışlardır. Bu alternatifler; tek serbestlik dereceli salıncı olarak zemin kolon normalleştirilmesi ve ana kaya üzerindeki tek zemin tabakasındaki düşey dalga yayılma teorisinin kullanımınıdır. Çalışmada simülasyon sürecinde parametrelerin seçimi ve parametrelerin üretilen hareketlerin özelliklerine olan etkilerini tartışmışlardır. Çalışmada önerdikleri metodu amaçlanan teorik model ile sentetik istatistiksel karakteristiklerin karşılaştırılması ile doğrulamışlardır. Ayrıca her bir mesnetteki simüle edilen hareketlerin tepki spektrumlarını incelemişlerdir.

Jia vd. (2013), zemin etkilerini dikkate alın üç yönde değişerek yayılan yer hareketleri altında uzun açıklıklı yüksek ayaklı bir demiryolu köprüsünün sismik analizi için gerçek olmayan titreşim metodunu kullanarak teorik durağan olmayan bir stokastik analiz planı üzerinde çalışmışlardır. Önemli ve karmaşık yapıların stokastik analizinde önerilen teorik yaklaşımı kolayca uygulamak için plan yerine yetirilmiş ve genel sonlu eleman platformunda doğrulanmıştır. Daha sonra durağan olmayan yer hareketi ve yerel zemin etkilerini dikkate alarak değişerek yayılan yer hareketi altında yüksek ayaklı demiryolu köprüsünün analizini yapmışlardır. Sonuçlar üç yönlü durağan olmayan çoklu titreşimler altında yüksek ayaklı demiryolu köprülerinin analizinde ve mevcut sismik tasarımında önerilen metodun uygulanabileceğini göstermiştir.

Jiao vd. (2013), değişerek yayılan yer hareketinin çift katlı uzun açıklıklı karayolu köprüsünün sismik davranışlarına olan etkilerini incelemiştir. Çalışmalarındaki statik ve dinamik analizlerde uzun açıklıklı çift katlı kablolu karayolu köprüsü olan Shanghai Minpu köprüsünü kullanmışlardır. Analiz sonuçları sönümleyicilerin alçak kulelerde kesme kuvveti ve momenti azalttığını fakat yüksek kulelerde nispeten küçük etki gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Çalışma sonucunda köprü giriş uçlarının yukarı kalkması köprülerde büyük zararlara sebep olabileceğinden uzun açıklıklı kablolu köprülerin sismik analizinde kabloların kuvvet dalgalanmalarına yeterince önem verilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Zhang vd. (2013), gerçek olmayan titreşim metodunu kullanarak üç yönde değişerek yayılan yer hareketine maruz içi beton dolu çelik borulu kemer köprünün karşılaştırmalı teorik analizleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında değişen zemin koşullarında üç yönlü değişerek yayılan yer hareketlerini modellemek için formülasyonlar türetmişlerdir. Kemer köprüdeki stokastik analizi kalibre edilmiş sonlu eleman modeli ile gerçekleştirmişlerdir. Stokastik analizde dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve yerel zemin koşullarını dikkate almışlardır. Çalışma sonuçları kullanılan metodun üç doğrultuda çoklu titreşimler altındaki kemer köprünün mevcut sismik tasarımında uygulanabileceğini göstermiştir.

Tian ve Lou (2014), uzun açıklıklı bir kablolu köprünün köprü boyunca yayılan dalga titreşimi ve uniform titreşim altında sismik davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonuçları, görünürdeki dalga hızının azalmasından dolayı köprünün en büyük sismik davranışlarının anlamlı bir şekilde değişime uğradığını göstermiştir. Bu yüzden uzun açıklıklı köprülerin sismik tasarımında yayılan dalga etkilerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Shrestha vd. (2014), yaptıkları çalışmada değişerek yayılan yer hareketlerine maruz köprü yapılarında kauçuk tampon ve sınırlayıcı kullanımının darbe azaltıcı ve bunların yerinden çıkmasına olan etkinliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada şok emici aygıtlar olan biçim bellek alaşımli kauçuk tamponların veya çelik kablolu sınırlandırıcıli kauçuk tamponların etkinliklerini incelemişlerdir. Çalışmada değişerek yayılan yer hareketlerine maruz bu sınırlandırıcı aygıtları yalnız veya birlikte kullanarak köprü yapılarının davranışlarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonuçları biçim bellekli sınırlandırıcılara sahip kauçuk tamponların büyük darbe kuvvetlerini ve ek yeri açılmalarını küçülttüğünü göstermiştir.

Yurdakul vd. (2014) TESS (tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç) ve ÜESS (üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç) mesnet sistemleri ile sismik izolasyonu yapılan uzun açıklıklı bir karayolu köprüsünün yapısal davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Yaptıkları analiz sonuçlarında sismik izolasyonsuz, TESS mesnet sistemli ve ÜESS mesnet sistemli köprünün hakim periyodu sırasıyla 0.849Hz., 0.497Hz. ve 0.338Hz. olarak elde edilmiştir. Köprü tabliyesinin maksimum düşey yer değiştirmesi izolasyosuz köprüde 57 cm., TESS mesnetli köprüde 54 cm. ve ÜESS mesnetli köprüde 44 cm. olarak elde edilmiştir. ÜESS mesnetli köprünün tabliyesindeki maksimum düşey yer değiştirme TESS mesnetli köprüdekine göre %23 azalmıştır. Sismik izolasyonsuz köprünün, TESS mesnetli köprünün ve ÜESS mesnetli köprünün maksimum aksenal kuvvetleri sırasıyla 60619kN, 18728kN ve 7382kN, maksimum kesme kuvvetleri sırasıyla 23408kN, 17913kN ve 16249kN ve maksimum burulma momentleri sırasıyla 24020kNm, 7619kNm ve 3840kNm olarak elde edilmiştir.

Eem ve Jung (2015), stokastik davranış veri tabanını kullanarak izolasyonlu yapıların ani sismik davranış dağılımlarını tahmin eden bir çalışma yapmışlardır. İzolasyonlu yapıların sismik performanslarını incelemek için sayısız doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirmek gerekir. Bundan dolayı izolasyonlu yapıların sismik davranış dağılımlarını elde eden stokastik davranış veri tabanını tanımlayarak hesaplama işlemlerini epeyce azaltmışlardır. Çalışmalarında izolasyonlu bir yapının eşdeğer modelinde kullandıkları veri tabanının uygulanabilirliğini ve pratikliğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışma sonuçları veri tabanının etkinliğini doğrulamıştır.

Wang vd. (2015), çok uzun açıklıklı asma köprülerde dalga yayılma etkisinin sismik performansına olan etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla, uygulamada dünyanın en büyük asma köprüsü olan Taizhou köprüsünü seçmişlerdir. Yapısal dinamik

karakteristiklerini belirlemek için köprünün üç boyutlu sonlu eleman modelini ABAQUS ve LANCZOS programlarında oluşturmuşlardır. Yaptıkları analiz sonuçlarında, hızın 2000 m/s den daha düşük olduğunda etkilerin düzensiz dalgalandığını ve hızın bu değerden daha büyük olduğunda istikrarlı duruma döndüğünü göstermişlerdir. Bu sonuçlara ek olarak dalga ilerleyişinin etkileri spektral karakteristiklerle ve dalga yayılmasıyla yakından ilişkili olduğunu ve kaynağa daha yakın bileşenlerin sismik davranışlarının nispeten daha büyük olduğunu göstermişlerdir.

Bo vd. (2015), çok mesnetli ve uzun açıklıklı yapıların rastgele titreşim etkisi altında tepkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada yer hareketinin dalga yayılma ve tutarsızlık etkileri bileşenleri dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda uzun açıklık yapılarda çok mesnetli titreşimlerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Tonyalı vd. (2015), mesnetlerinden farklı yer hareketlerine maruz kablolu köprülerin stokastik analizini incelemişlerdir. Yer hareketindeki değişimlerden dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin etkisi bileşenleri dikkate alınmıştır. Uygulama olarak Quincy Bayview köprüsünü SAP2000 programında modellenmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda kulede ve tabliyede oluşan yer değiştirmelerin üniform yer hareketine göre daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca farklı zeminlere mesnetlenen köprüde oluşan yer değiştirmeler incelendiğinde sert zemine mesnetli zemine mesnetli köprü tabliyesinde ve kulesinde oluşan yer değiştirmelerin yumuşak zemine mesnetli köprüye göre epeyce az olduğunu göstermişlerdir.

Loghman vd. (2015), ÜESS mesnetli bir yapıyı iki boyutlu tek katlı olarak idealize edip eşleştirilmiş hareket denklemleri türettiler ve bunları durum uzayı denklemlerini kullanılarak çözmüşlerdir. Bu denklemlere dayanarak depremin düşey bileşenin, ÜESS mesnetli bir yapıdaki izolatör yer değiştirmesini ve taban kesme kuvvetine olan etkisini incelemek için bir bilgisayar programı geliştirdiler.

Fallahian vd. (2015), yakın fay etkisine maruz ÜESS ve İESS mesnet sistemleri ile sismik izolasyonu yapılan burulma bağlantılı bir yapının tepkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ÜESS mesnet sistemli yapının İESS mesnetli yapıya göre daha iyi performans gösterdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca ÜESS mesnet sistemi, yapının periyodunu İESS mesnet sistemine göre daha fazla arttırdığını göstermişlerdir. Bu durum; ÜESS mesnedinin yapının burulma tepkilerini azaltmada diğer mesnet sistemine göre daha iyi bir davranış sergilediğini göstermiştir.

Apaydın vd. (2016), değişerek yayılan yer hareketi altındaki Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal tepkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, köprünün her bir mesnedi için üç doğrultuda değişerek yayılan yer hareketi üretmişlerdir. Yer hareketlerinin simule edilmesi için değiştirilmiş sonlu fay tekniği kullanılmıştır. Değişerek yayılan yer hareketinden elde edilen sonuçlar ile üniform yer hareketi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda köprüler gibi uzun açıklıklı yapılarda değişerek yayılan yer hareketinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Adanur vd. (2016), çeşitli rastgele titreşim yöntemleri için Boğaziçi Köprüsü'nün çok mesnetli titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde yer hareketinin dalga yayılma, tutarsızlık ve zemin etkileri dikkate alınmıştır. Rastgele titreşim analizlerindeki güç spektral yoğunluk fonksiyonu ve tepki spektrumu 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi kayıtları kullanılarak elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında her bir rastgele titreşim analizi için yapısal tepkilerin, güç spektral yoğunluk fonksiyonlarının frekans içeriklerine ve yoğunluklarına büyük ölçüde bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Doktora tez çalışmasında, değişerek yayılan yer hareketine maruz ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizleri yapılarak dinamik davranışının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla oluşturulan tezin bölüm içerikleri aşağıda kısaca sunulmuştur:

Birinci bölümde genel bilgiler verilmekte olup konunun önemi ve konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmalar verilmiştir. Yapıların sismik izolasyonunda kullanılan izolasyon sistemleri hakkında genel bilgiler verilerek çalışmada kullanılacak olan ÜESS mesnet sisteminin tasarımı üzerinde durulmuştur. Değişerek yayılan yer hareketi için stokastik analiz formülasyonu bu bölümde verilmiştir. Stokastik analiz için gerekli olan güç spektral yoğunluk fonksiyonu, varyans ve kovaryans ifadeleri ile tepki bileşenlerine ait ortalama maksimum değer ve oluşma frekansı bu bölüm kapsamında ele alınmıştır. Sürtünmeli sarkaç mesnet sisteminin konkav yüzeyindeki sürtünmeden dolayı hareket denklemi doğrusal olmamaktadır. Doğrusal olmayan hareket denklemi eşdeğer doğrusallaştırma teknikleri kullanılarak doğrusal hale getirilmiştir.

İkinci bölümde stokastik analizlerde kullanılacak olan yer hareketi modeli ile yer hareketindeki değişimi ifade eden tutarsızlık etkisi, dalga yayılma etkisi ve zemin etkileri

için gerekli ifadeler verilmiştir. Bununla birlikte bu bölümde analizler için seçilen karayolu köprüsünün özellikleri ve analitik modeli verilmiştir. Köprünün modal analizi ile elde edilen periyotlar bu bölümde sunulmuştur.

Üçüncü bölümde değişerek yayılan yer hareketine maruz ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz karayolu köprüsünün stokastik analizlerinden elde edilen eleman kuvvetleri ve tabliye yer değiştirmeleri üzerinde durulmuştur. Sadece dalga yayılma etkisi, sadece tutarsızlık etkisi, tutarsızlık ve dalga yayılma etkileri birlikte, dalga yayılma-tutarsızlık-zemin etkileri birlikte alınarak sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprünün stokastik analizleri ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan bu analizlerde yer hareketinin değişerek yayıldığı ve uniform olduğu kabul edilerek ayrı ayrı karşılaştırılarak incelenmiştir.

Dördüncü bölümde çalışmadan çıkarılacak sonuçlar ve öneriler verilmiştir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş takip etmiştir.

1.4. Deterministik Analiz Formülasyonu

N serbestlik dereceye sahip taban izolasyonsuz bir yapı sisteminin hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{v}\} + [C]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} = \{F\} \quad (1.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{v\}$, $\{\dot{v}\}$ ve $\{\ddot{v}\}$ sırasıyla yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini; $\{F\}$ dış kuvvet vektörünü göstermektedir. Sistemin hareket denkleminde sisteme doğrudan doğruya uygulanan dış kuvvet olmadığında $\{F\}$ sıfır vektörü olmaktadır.

Sistemin serbestlik derecelerini bilinen ve bilinmeyen olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Bilinen serbestlik dereceleri, yer hareketinin bilindiği yapı-zemin etkileşim yüzeyi ile ilgili serbestlik derecelerinin ivme, hız ve yer değiştirmeleridir. Bilinmeyen serbestlik dereceleri ise yapı-zemin sisteminin diğer noktaları ile ilgili serbestlik derecelerinin ivme, hız ve yer değiştirmeleridir. Denklem (1.1)'deki bilinen ve bilinmeyen serbestlik derecelerini birbirinden ayrı göstermek için bilinen serbestlik dereceleri $\{v_g\}$, bilinmeyen serbestlik dereceleri ise $\{v_r\}$ vektörleri ile alt matrislere bölünerek,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{rr} & \mathbf{M}_{rg} \\ \mathbf{M}_{gr} & \mathbf{M}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{v}}_r \\ \ddot{\mathbf{v}}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{rr} & \mathbf{C}_{rg} \\ \mathbf{C}_{gr} & \mathbf{C}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_r \\ \dot{\mathbf{v}}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{rr} & \mathbf{K}_{rg} \\ \mathbf{K}_{gr} & \mathbf{K}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{v}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

biçiminde yazılabilir (Clough ve Penzien, 1993). Burada; $[\mathbf{M}_{rr}]$, $[\mathbf{C}_{rr}]$ ve $[\mathbf{K}_{rr}]$ bilinmeyen serbestlik dereceleri ile ilgili sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini temsil etmektedir. $[\mathbf{M}_{rg}]$, $[\mathbf{C}_{rg}]$ ve $[\mathbf{K}_{rg}]$ her bir bilinen serbestlik derecesinin birim hareketinden dolayı bilinmeyen serbestlik derecelerinde meydana gelen sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini temsil etmektedir. $[\mathbf{M}_{gg}]$, $[\mathbf{C}_{gg}]$ ve $[\mathbf{K}_{gg}]$ ise her bir bilinen serbestlik derecesinin birim hareketinden dolayı bilinen serbestlik derecelerinde meydana gelen kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini temsil etmektedir. $[\mathbf{M}_{gr}]$, $[\mathbf{C}_{gr}]$ ve $[\mathbf{K}_{gr}]$ ifadeleri ise sırasıyla $[\mathbf{M}_{rg}]$, $[\mathbf{C}_{rg}]$ ve $[\mathbf{K}_{rg}]$ ifadelerinin transpozelerine (devrik) karşılık gelmektedir. $\{\ddot{\mathbf{v}}_r\}$, $\{\dot{\mathbf{v}}_r\}$ ve $\{\mathbf{v}_r\}$ sırasıyla bilinmeyen serbestlik derecelerinin ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini göstermektedir. (1.2) denkleminde, bilinmeyen serbestlik derecelerine karşılık gelen ilk satır çıkartılıp bilinenler sağ tarafa atılırsa,

$$[\mathbf{M}_{rr}]\{\ddot{\mathbf{v}}_r\} + [\mathbf{C}_{rr}]\{\dot{\mathbf{v}}_r\} + [\mathbf{K}_{rr}]\{\mathbf{v}_r\} = -[\mathbf{M}_{rg}]\{\ddot{\mathbf{v}}_g\} - [\mathbf{C}_{rg}]\{\dot{\mathbf{v}}_g\} - [\mathbf{K}_{rg}]\{\mathbf{v}_g\} \quad (1.3)$$

eşitliği elde edilir. (1.3) denklemini biraz daha basit hale getirmek için, toplam yer değiştirme, \mathbf{v}_r , iki bileşenin toplamı olarak yazılabilir. Bunlardan biri, bilinen serbestlik derecelerinin farklı hareketinden diğeri ise atalet kuvvetlerinin etkisinden kaynaklanmaktadır. Birinci yer değiştirme bileşenlerinin hesaplanmasında kütle etkisi dikkate alınmadığından, söz konusu yer değiştirme zahiri-statik yer değiştirme olarak isimlendirilmekte ve \mathbf{v}_s ile gösterilmektedir. Atalet kuvvetleri, ivme ve kütle çarpımından ibaret olduğu için, ikinci yer değiştirme bileşeni dinamik yer değiştirme olarak tanımlanmakta ve \mathbf{v}_d ile gösterilmektedir. Bu durumda, (1.2) denklemindeki yer değiştirme vektörleri,

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{v}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_{sr} \\ \mathbf{v}_{sg} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_{dr} \\ \mathbf{v}_{dg} \end{Bmatrix} \quad (1.4)$$

biçiminde yazılabilir (Dumanoğlu ve Severn, 1987). Burada v_{dg} sifira eşit, v_{sg} ise v_g 'ye eşittir. v_{dr} ve v_{sr} ise sırasıyla dinamik ve zahiri-statik yer değıştirmeleri göstermektedir. (1.4) denklemini, (1.3) denkleminde yerine yazılıp zahiri-statik bileşenlerle ilgili terimler sağ tarafta toplanırsa,

$$[M_{rr}]\{\ddot{v}_{dr}\} + [C_{rr}]\{\dot{v}_{dr}\} + [K_{rr}]\{v_{dr}\} = \{F_{eff}\} \quad (1.5)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\{F_{eff}\}$, bilinmeyen serbestlik derecelerini etkileyen etkili kuvvet vektörünü göstermekte olup;

$$\{F_{eff}\} = -[M_{rr} \ M_{rg}] \begin{Bmatrix} \ddot{v}_{sr} \\ \ddot{v}_{sg} \end{Bmatrix} - [C_{rr} \ C_{rg}] \begin{Bmatrix} \dot{v}_{sr} \\ \dot{v}_{sg} \end{Bmatrix} - [K_{rr} \ K_{rg}] \begin{Bmatrix} v_{sr} \\ v_{sg} \end{Bmatrix} \quad (1.6)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır (Bayraktar, 1995; Soyluk, 2001). Dinamik denge denklemleri, statik denge denklemlerini içerdğinden, (1.6) nolu denklem büyük ölçüde basitleştirilebilir. Eğer (1.6) denkleminde zamana bağıli terimler çıkartılırsa, sadece (1.6) denkleminin rijitlikle ilgili terimi kalmakta ve bu terimde sifira eşit olmaktadır. Böylece (1.6) denklemini;

$$\{F_{eff}\} = -[M_{rr} \ M_{rg}] \begin{Bmatrix} \ddot{v}_{sr} \\ \ddot{v}_{sg} \end{Bmatrix} - [C_{rr} \ C_{rg}] \begin{Bmatrix} \dot{v}_{sr} \\ \dot{v}_{sg} \end{Bmatrix} \quad (1.7)$$

şeklinde yazılabilir. Sönüm matrisi rijitlik matrisi ile orantılı ise (1.7) denkleminde sönümle ilgili terimler sifir olmaktadır (Clough ve Penzien, 1993). Sönümün rijitlikle orantılı olmaması durumunda bile sönüm kuvvetleri, rijitlik ve atalet kuvvetleri ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmakta ve ihmal edilebilmektedir. Bu durumda (1.7) denklemini tekrar düzenlendiğinde,

$$\{F_{eff}\} = -[M_{rr} \ M_{rg}] \begin{Bmatrix} \ddot{v}_{sr} \\ \ddot{v}_{sg} \end{Bmatrix} \quad (1.8)$$

eşitliği elde edilmektedir. (1.8) denklemindeki \ddot{v}_{sg} bilinen serbestlik derecelerine uygulanan ivmeleri gösterdiğinden bilinmektedir. Fakat \ddot{v}_{sr} ise bilinmemektedir. Daha önce belirtildiği gibi, (1.6) denkleminin rijitlik terimi sıfıra eşit olduğundan,

$$[K_{rr}]\{v_{sr}\} = -[K_{rg}]\{v_{sg}\} \quad (1.9)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden $\{v_{sr}\}$, zahiri-statik yer değiştirme,

$$\{v_{sr}\} = -[K_{rr}]^{-1}[K_{rg}]\{v_{sg}\} = [R_{rg}]\{v_{sg}\} \quad (1.10)$$

olarak belirlenmektedir (Harichandran, 1992; Clough ve Penzien, 1993; Harichandran, 1993; Kuramasena ve Stroh, 1995). Burada $[R_{rg}]$, $[K_{rr}]^{-1}$ ve $[K_{rg}]$ alt matrislerinin çarpımından elde edilmekte olup zahiri-statik etki katsayısı ismiyle adlandırılmaktadır.

Birçok durumda $[M_{rg}]$ matrisinin sıfırdan farklı terimleri çok azdır. Dolayısıyla, depremden dolayı meydana gelen etkili kuvvet vektörüne katkısı çok az olacağından ihmal edilebilir (Clough ve Penzien, 1993). Özellikle diyagonal kütle matrisler için $[M_{rg}]$ matrisi sıfır olmaktadır. Yukarıda yapılan açıklamalardan sonra (1.10) denklemi, (1.8) denkleminde yerine yazılır ve tekrar düzenlenirse,

$$[M_{rr}]\{\ddot{v}_{dr}\} + [C_{rr}]\{\dot{v}_{dr}\} + [K_{rr}]\{v_{dr}\} = -[M_{rr}][R_{rg}]\{\ddot{v}_{sg}\} \quad (1.11)$$

ifadesi yazılabilir (Burdizzo ve Singh, 1987; Clough ve Penzien, 1993). Buradaki $\{\ddot{v}_{sg}\}$ her bir bilinen serbestlik derecesine uygulanan ivme vektörünü göstermektedir.

Köprünün depreme karşı sismik izolasyonlu yapılması halinde, izolasyon sisteminin hareket denklemi;

$$m_b \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + \mu_s W \text{sign}(\dot{v}_b) + k_b v_b = -m_b \ddot{v}_{sg} \quad (1.12)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Lin vd., 1989; Fan ve Ahmadi, 1990b; Jangid ve Banerji, 1998; Kulkarni ve Jangid, 2002). Burada m_b , c_b ve k_b sırasıyla izolasyon sisteminin kütesini, sönümünü ve rijitliğini; \ddot{v}_b , \dot{v}_b ve v_b sırasıyla izolatör olarak kullanılan sürtünmeli sarkaca ait ivme, hız ve yer değiştirmeleri; μ_s , sürtünmeli sarkaç mesnedinin sürtünme katsayısını; W ise sürtünmeli sarkaç mesnedinin taşıdığı ağırlığı göstermektedir. (1.12) denklemi sürtünmeli sarkaçtaki sürtünme ifadesinden dolayı doğrusal değildir. Sürtünmeli sarkaç mesnedi ile oluşturulan izolasyon sistemi için (1.12) ifadesi verilen hareket denkleminin yer hareketine maruz kalması durumunda eşdeğer doğrusallaştırılmış biçimi;

$$m_b \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -m_b \ddot{v}_{sg} \quad (1.13)$$

halini almaktadır.

$$c_e = c_b + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\mu_s W}{\sigma_{\dot{v}_b}} \quad (1.14)$$

olarak tanımlanmaktadır (Jangid ve Banerji, 1998). Burada c_b , izolasyon sisteminin sönüm katsayısını ifade etmektedir. $\sigma_{\dot{v}_b}$ ise sürtünmeli sarkaç mesnedine ait hız varyansının ortalamasının ortalama karekökü olup

$$\sigma_{\dot{v}_b} = \frac{\mu_s g}{2\pi \sqrt{2\pi \xi_b \omega_b}} \left(\sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \xi_b S_o}{(\mu_s g)^2}} - 1 \right) \quad (1.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Jangid ve Banerji, 1998). (1.15) denkleminde ξ_b ve ω_b sırasıyla sürtünmeli sarkaç mesnedinin sönüm oranını ve doğal frekansını; S_o beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonunun genlik değerini göstermektedir. (1.13) denklemi yapının ilgili bilinmeyen serbestlik derecelerine karşılık gelecek şekilde (1.11) denklemi ile toplanarak aşağıdaki matris biçimi elde edilebilir.

$$\left[\overline{\mathbf{M}}_{rr} \right] \{ \ddot{\mathbf{v}}_{dr} \} + \left[\overline{\mathbf{C}}_{rr} \right] \{ \dot{\mathbf{v}}_{dr} \} + \left[\overline{\mathbf{K}}_{rr} \right] \{ \mathbf{v}_{dr} \} = - \left[\overline{\mathbf{M}}_{rr} \right] \left[\overline{\mathbf{R}}_{rg} \right] \{ \ddot{\mathbf{v}}_{sg} \} \quad (1.16)$$

elde dileyebilir. Burada $\left[\overline{\mathbf{M}}_{rr} \right] = \left[\mathbf{M}_{rr} + \mathbf{m}_b \right]$, $\left[\overline{\mathbf{C}}_{rr} \right] = \left[\mathbf{C}_{rr} + \mathbf{c}_b \right]$ ve $\left[\overline{\mathbf{K}}_{rr} \right] = \left[\mathbf{K}_{rr} + \mathbf{k}_b \right]$ izolasyonlu yapı sisteminin bilinmeyen serbestlik dereceleri ile ilgili sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $\overline{\mathbf{v}}_{dr}$, $\dot{\overline{\mathbf{v}}}_{dr}$ ve $\ddot{\overline{\mathbf{v}}}_{dr}$ ifadeleri sırasıyla izolasyonlu yapı sisteminin dinamik ivmesini, hızını, yer değiştirmesini gösterir. $\ddot{\overline{\mathbf{v}}}_{sg}$ ise bilinen serbestlik derecelerine uygulanan ivmeyi göstermektedir. (1.16) denkleminin çözümünde modların süperpozisyonu yöntemi kullanılmaktadır (Paz, 1991; Celep ve Kumbasar, 1992; Clough ve Penzien, 1993; Chopra, 2001). Açısal frekans ω_i ve mod vektörleri $\{ \Phi_i \}$

$$\left[\overline{\mathbf{M}}_{rr} \right] \{ \ddot{\overline{\mathbf{v}}}_{dr} \} + \left[\overline{\mathbf{K}}_{rr} \right] \{ \overline{\mathbf{v}}_{dr} \} = 0 \quad (1.17)$$

ifadesi ile verilen sönümsüz serbest titreşim denklemlerinden elde edilmektedir. İzolasyonlu yapı sistemi bilinmeyen serbestlik derecelerinin dinamik yer değiştirme bileşeni denklem (1.18) ile ifade edilmektedir.

$$\{ \overline{\mathbf{v}}_{dr} \} = \left[\Phi \right] \{ \mathbf{Y} \} \quad (1.18)$$

Burada $\{ \mathbf{Y} \}$ modal genliği, $\left[\Phi \right]$ ise mod şekilleri matrisini göstermektedir. (1.18) denklemi, (1.17) denkleminde yerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\ddot{\mathbf{Y}}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{\mathbf{Y}}_i = - \frac{\mathbf{P}_i}{\mathbf{M}_i} \quad (1.19)$$

bağıntısı elde edilmektedir (Clough ve Penzien, 1993; Chopra 2001). Burada; ξ_i sönüm oranını, \mathbf{P}_i genelleştirilmiş yükü göstermekte olup;

$$\xi_i = \frac{\mathbf{C}_i}{2\sqrt{\mathbf{K}_i \mathbf{M}_i}}, \quad \omega_i = \sqrt{\frac{\mathbf{K}_i}{\mathbf{M}_i}} \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_i &= \{\phi_i\}^T \left[\overline{\mathbf{M}}_{rr} \right] \{\phi_i\} \\
\mathbf{C}_i &= \{\phi_i\}^T \left[\overline{\mathbf{C}}_{rr} \right] \{\phi_i\} \\
\mathbf{K}_i &= \{\phi_i\}^T \left[\overline{\mathbf{K}}_{rr} \right] \{\phi_i\}
\end{aligned} \tag{1.21}$$

$$\mathbf{P}_i = \{\phi_i\}^T \left[\overline{\mathbf{M}}_{rr} \right] \left[\overline{\mathbf{R}}_{rg} \right] \{\ddot{\mathbf{v}}_{sg}\} \tag{1.22}$$

eşitlikleri yazılabilir. $\{\ddot{\mathbf{v}}_{sg}\} = \{\ddot{\mathbf{v}}_g\}$ eşitliği kullanılır ve modal katkı faktörü,

$$\Gamma_i = \left\{ \overline{\mathbf{M}}_{rr} \right\} \left[\overline{\mathbf{R}}_{rg} \right] \{\phi_i\} \tag{1.23}$$

şeklinde tanımlandığında \mathbf{P}_i ,

$$\mathbf{P}_i = \{\Gamma_i\}^T \{\mathbf{v}_g\} \tag{1.24}$$

\mathbf{P}_i vektör şeklinde, modal katkı faktörleri ise matris biçiminde gösterilirse (1.24) denklemi,

$$\{\mathbf{P}\} = \{\Gamma\}^T \{\ddot{\mathbf{v}}_g\} \tag{1.25}$$

şeklinde elde edilebilir.

1.5. Stokastik Analiz Formülasyonu

$z(t)$, herhangi bir yapının davranışını göstermek üzere, $z(t)$ otokorelasyon (hataların ardışık bağımlılığı) fonksiyonu,

$$\left[\mathbf{R}_z(\tau) \right] = \mathbf{E} \left[\{z(t)\} \{z(t+\tau)\} \right] \tag{1.26}$$

biçiminde ifade edilir (Newland, 1983; Augisti vd., 1984; Yang, 1986; Peebles; 1987). $z(t)$, dinamik ve zahiri–statik bileşenlere ayrılırsa,

$$z(t)=z^d(t)+z^{qs}(t) \quad (1.27)$$

elde edilir. Burada $z^d(t)$ ve $z^{qs}(t)$, sırasıyla dinamik ve zahiri-statik tepki bileşenlerini göstermektedir. (1.27) denklemi (1.26) denkleminde yerine yazılırsa,

$$[R_z(\tau)] = E \left[\left\{ \left\{ z^d(t) \right\} + \left\{ z^{qs}(t) \right\} \right\} \left\{ \left\{ z^d(t+\tau) \right\} + \left\{ z^{qs}(t+\tau) \right\} \right\} \right] \quad (1.28)$$

ifadesi elde edilir. (1.28) denklemi düzenlenirse,

$$[R_z(\tau)] = [R_z^d(\tau)] + [R_z^{qs}(\tau)] + [R_z^d \text{ } z^{qs}(\tau)] + [R_z^{qs} \text{ } z^d(\tau)] \quad (1.29)$$

bağıntısı elde edilir. Burada, $[R_z^d(\tau)]$ ve $[R_z^{qs}(\tau)]$ sırasıyla dinamik ve zahiri-statik bileşenlerin otokorelasyon fonksiyonunu, $[R_z^d \text{ } z^{qs}(\tau)]$ ve $[R_z^{qs} \text{ } z^d(\tau)]$ sırasıyla dinamik ve zahiri-statik bileşenleri arasındaki karşıt korelasyon (çapraz ilişki) fonksiyonunu göstermektedir.

(1.29) denkleminin Fourier dönüşümü alınırsa $z(t)$ tepkisinin spektral yoğunluk fonksiyonu,

$$[S_z(\omega)] = [S_z^d(\omega)] + [S_z^{qs}(\omega)] + [S_z^d \text{ } z^{qs}(\omega)] + [S_z^{qs} \text{ } z^d(\omega)] \quad (1.30)$$

elde edilir. Burada, $[S_z^d(\omega)]$ ve $[S_z^{qs}(\omega)]$ sırasıyla dinamik ve zahiri-statik tepki bileşenlerinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu gösterirken, $[S_z^d \text{ } z^{qs}(\omega)]$ ve $[S_z^{qs} \text{ } z^d(\omega)]$ sırasıyla dinamik ve zahiri-statik tepki bileşenleri arasındaki güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir. Dinamik ve zahiri-statik tepki bileşenleri arasındaki güç spektral yoğunluk fonksiyonu için denklem (1.31) yazılabilir.

$$\left[S_z^d \text{ }^q s_z^d(\omega) \right] = \left[S_z^* \text{ }^q s_z^d(\omega) \right] \quad (1.31)$$

Burada, * simgesi kompleks eşleniği ifade etmektedir (Sweidan, 1990).

1.5.1 Dinamik Tepki Bileşeni Varyansı

Herhangi bir yapı tepkisinin dinamik bileşeni $z^d(t)$,

$$\{z^d(t)\} = [\psi]\{Y\} \quad (1.32)$$

denklemleri ile elde edilmektedir. (1.32) denkleminde, yer değiştirme bileşeni için, $[\psi] = [\phi]$ modal vektörlere eşit olurken, eleman uç kuvvetleri için $[\psi] = [K][\phi]$, öz vektörlerin neden olduğu eleman kuvvetlerine eşit olmaktadır.

(1.26) denklemi ile gösterilen otokorelasyon fonksiyonu (1.32) denklemi ile ifade edilen dinamik tepki bileşenine uygulanırsa, elde edilecek otokorelasyon fonksiyonunun Fourier dönüşümü (Kreyszig, 1993) dinamik tepki bileşeninin spektral yoğunluk fonksiyonuna eşit olmakta ve

$$S_{z_i}^d(\omega) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \psi_{ij} \psi_{ik} \Gamma_{lj} \Gamma_{mk} H_j(-\omega) H_k(\omega) S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) \quad (1.33)$$

bağıntısı ile tanımlanmaktadır (Harichandran ve Wang, 1990). Burada n dikkate alınan mod sayısını gösterirken, r yer hareketi ivmesinin etkidiği mesnet sayısını, Γ_{lj} modal katkı faktörünün l . elemanını, ψ_{ij} j . modun neden olduğu z_i tepki kuvvetini, $S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega)$ l ve m mesnet noktalarındaki yer hareket ivmelerinin karşıt güç spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Ayrıca bu ifadede tanımlanan $H_j(\omega)$ ise frekans davranış fonksiyonu olup,

$$H_j(\omega) = \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i \xi_j \omega_j \omega} \quad (1.34)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Burada ω_j ve ξ_j sırası ile j. moda ait doğal frekans ve sönüm oranını göstermektedir.

Dinamik tepki bileşeni $z^d(t)$ 'nin varyansı (1.33) nolu denklemin integrasyonu alınarak hesaplanmakta ve (1.35) denklemi ile ifade edilmektedir (Hawwari, 1992).

$$\begin{aligned} \sigma_{z_i}^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{z_i}^d(\omega) d\omega \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \Psi_{ij} \Psi_{ik} \Gamma_{lj} \Gamma_{mk} \int_{-\infty}^{\infty} H_j(-\omega) H_k(\omega) S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) \end{aligned} \quad (1.35)$$

1.5.2. Zahiri-Statik Tepki Bileşenin Varyansı

Zahiri-statik tepki bileşeni,

$$\{z^{qs}(t)\} = [A] \{v_g\} \quad (1.36)$$

ile elde edilmektedir. Yer değiştirme için, $[A] = [R_{rg}] = -[K_{rr}]^{-1} [K_{rg}]$ statik yer değiştirmeleri ifade ederken, eleman uç kuvvetleri için $[A]$, mesnet noktalarının birim hareketinden ötürü meydana gelen eleman kuvvetlerini ifade etmektedir.

Zahiri-statik otokorelasyon fonksiyonunun Fourier dönüşümü alınarak bu bileşene ait spektral yoğunluk fonksiyonu hesaplanır ve

$$S_{z_i}^{qs}(\omega) = \frac{1}{\omega^4} \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r A_{il} A_{im} S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) \quad (1.37)$$

bağıntısı ile ifade edilir (Swedian, 1990). Burada, A_{il} , l mesnedine ait serbestlik derecesinin birim hareketinden dolayı meydana gelen z_i tepki kuvvetini göstermektedir.

Zahiri-statik tepki bileşeni $z^{qs}(t)$ 'nin varyansı, (1.37) denkleminin integrali alınarak,

$$\sigma^2_{z_i^{qs}} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{z_i^{qs}}^{qs}(\omega) d\omega = \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r A_{il} A_{im} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega^4} S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) d\omega \quad (1.38)$$

olarak bulunur.

1.5.3. Zahiri-Statik ve Dinamik Tepki Bileşenleri Arasındaki Kovaryans Fonksiyonu

(1.29) denkleminde ifade edilen dinamik ve zahiri-statik tepki bileşenleri arasındaki karşıt korelasyon fonksiyonu, (1.32) ve (1.36) denklemleri kullanılarak elde edilmektedir. Elde edilen karşıt korelasyon fonksiyonunun Fourier dönüşümü alınarak dinamik ve zahiri-statik tepki bileşenleri arasındaki karşıt spektral yoğunluk fonksiyonu,

$$S_{z_i^{qs} z_i^d}(\omega) = \frac{1}{\omega^2} \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \psi_{ij} A_{il} \Gamma_{mj} H_j(\omega) S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) \quad (1.39)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir (Swedian, 1990).

Zahiri-statik ve dinamik bileşenler arasındaki kovaryans fonksiyonu, (1.39) denkleminin integre edilmesiyle elde edilmekte ve

$$\begin{aligned} \text{Cov}(z_i^{qs}, z_i^d) &= \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_{z_i^{qs} z_i^d}(\omega) d\omega \right] \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \psi_{ij} A_{il} \Gamma_{mj} \left(- \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega^2} H_j(\omega) S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) d\omega \right) \end{aligned} \quad (1.40)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır (Harichandran ve Wang, 1988). Kovaryans iki rastgele değişkenin beraber değişimleridir.

1.5.4. Toplam Tepki Bileşeninin Varyansı

i.tepki bileşeninin toplam varyans değeri, zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin varyansları ile zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenleri arasındaki kovaryans tepki bileşenlerinin toplanmasıyla elde edilir. Elde edilen toplam tepkiye ait varyans değeri,

$$\sigma_{z_i}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{z_i}^{qs}(\omega) d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} S_{z_i}^d(\omega) d\omega + 2\text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_{z_i}^{qs, d}(\omega) d\omega \right] \quad (1.41)$$

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma_{z_i}^{2, qs} + \sigma_{z_i}^{2, d} + 2\text{Cov}(z_i^{qs}, z_i^d) \quad (1.42)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir (Swedian, 1990). Burada, Re gerçel kısmı, $\sigma_{z_i}^{2, qs}$ ve $\sigma_{z_i}^{2, d}$ sırasıyla zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin varyansını göstermektedir. $\text{Cov}(z_i^{qs}, z_i^d)$ ise zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenleri arasındaki kovaryansı ifade etmektedir.

1.5.5. Ortalama Maksimum Değer ve Oluşma Frekansı

Stokastik analizde ortalama maksimum değer, maksimum büyüklük faktörüne ve $z(t)$ tepki bileşeninin standart sapmasına bağlı olarak,

$$\mu = p\sigma_z \quad (1.43)$$

biçiminde ifade edilmektedir (Button vd., 1981; Button, 1981; Dumanoglu ve Severn, 1990).

Standart sapma varyansın karekökü alınarak hesaplanmaktadır. Ortalama maksimum değere ait standart sapma ise,

$$\sigma = q\sigma_z \quad (1.44)$$

biçiminde ifade edilmektedir (Button, 1981; Der Kiureghian, 1980). Burada p ve q sırası ile yer hareketi ivmesinin ve sıfır seviyesinin ortalama geçiş sayısının fonksiyonu olan maksimum büyüklük faktörleri olup aşağıdaki ifadelerle tanımlanabilir (Der Kiureghian, 1980; Wung ve Der Kiureghian, 1989).

$$p = \sqrt{(2 \ln \nu_e T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{(2 \ln \nu_e T)}} \quad (1.45)$$

$$q = \frac{1.2}{\sqrt{(2 \ln \nu_e T)}} - \frac{5.4}{13 + \sqrt{(2 \ln \nu_e T)^{3.2}}} \quad (1.46)$$

Burada,

$$\nu_e = (1.9\xi^{0.15} - 0.73)\nu_0 \quad (1.47)$$

sıfır seviyesinin indirgenmiş ortalama geçiş sayısıdır. (1.45) ve (1.46) ifadelerindeki T hareket süresini, ξ sönüm oranını ν_0 oluşma frekansını göstermektedir. ν_0 değerini

$$\nu_0 = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\dot{z}}}{\sigma_z} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_z(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} S_z(\omega) d\omega} \right)^{0.5} \quad (1.48)$$

ifadesi ile tanımlamak mümkündür. Burada $S_z(\omega)$, $z(t)$ tepki işleminin spektral yoğunluk fonksiyonunu, σ_z ve $\sigma_{\dot{z}}$ ise sırasıyla $z(t)$ işleminin ve türevinin standart sapmasını göstermektedir (Lee ve Penzien, 1980; 1983).

1.6. Sismik İzolasyon Sistemleri

Sismik izolasyon sistemleri yapının temeli ve kolonları arasına yerleştirilen yatay yönde esnek düşey yönde rijit taşıyıcılar olarak bilinmektedir. Bu taşıyıcılara izolasyon aletleri ya da izolasyon sistemleri denir. Uygulamada kullanılan sismik izolasyon sistemleri kauçuk ve sürtünmeye dayalı izolatörler olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1.6.1. Tabakalı Kauçuk Mesnet Sistemi

Bu sistemin temel bileşenleri, tabakalar halinde kullanılan çelik ve kauçuk plakalardır. Sönümün ve rijitliğin paralel etkileri bu sistemin en önemli özelliğidir. Genellikle tabakalı kauçuk mesnet (TKM) sistemi yatayda esnek hareket edebilen ve düşeyde rijit olan yüksek sönüm gösteren sismik izolasyon sistemidir. TKM sisteminin doğal frekans ve sönüm sabiti olmak üzere iki karakteristik özelliği vardır.

1.6.2. Yeni Zelanda Mesnet Sistemi

Bu sistem ilk olarak 1975 yılında Yeni Zelanda'da kullanılmaya başlandığından dolayı ismi Yeni Zelanda mesnet (YZM) sistemi olarak adlandırılmaktadır. TKM sisteminin benzeri olan YZM sisteminin farkı merkezine enerji dağılımında ilave bir rijitlik sağlamak amacıyla yerleştirilen kurşun çekirdek kullanılmasıdır. Kurşun çekirdeğin depremden dolayı oluşan enerjiyi emebilme kabiliyeti izolatörün yatay yönde yer değiştirme miktarını azaltmaktadır. YZM sistemi prensipte histeretik bir sönümleyici olarak çalışmaktadır (Skinner vd., 1975). Histeretik sönümleyici aygıtın kuvvet-yer değiştirme özelliği gerçeğe yakın olarak doğrusal olmayan diferansiyel denklemler kullanarak elde edilir (Constantinou ve Tadjbakhsh, 1985). YZM sisteminin en önemli sakıncası deprem kaynaklı güçlü yer hareketinin kurşun çekirdeğe verdiği zararın görünüp tespit edilememesidir.

1.6.3. Elastik Sürtünmeli Mesnet Sistemi

Elastik sürtünmeli mesnet (ESM) sistemi Mostaghel ve Khodaverdian (1987) tarafından önerilen bir sürtünmeli mesnet sistemidir. ESM sistemi birbirleriyle sürtünmeli şekilde teflon ile kaplanmış eşit merkezli daireler halindeki plakalardan ve merkezi bir kauçuk çekirdekten oluşmaktadır. Plaka birleşimlerindeki sürtünmeden dolayı sönüm artmaktadır. Bu sistemin karakteristik özellikleri sürtünme katsayısı, sönüm sabiti ve doğal frekansıdır.

1.6.4. Fransız Elektrik Mesnet Sistemi

Sismik izolasyon sistemlerinden bir diğeri olan Fransız elastik mesnet (FEM) sistemi Fransız Elektrik Kurumu'nun desteği ile geliştirilmiştir. Bu sistem, depremin yıkıcı etkilerinden nükleer güç santrallerini korumak amacıyla deprem bölgelerinde standartlaştırılmıştır. TKM sisteminin kesiti ile aynı olan FEM sistemi işlem ömrü boyunca sürtünme katsayısı 0,2 olarak tasarlanmıştır.

1.6.5. Kayıcı Elastik Sürtünmeli Mesnet Sistemi

Su vd. (1991) tarafından ileri sürülen kayıcı elastik sürtünmeli mesnet (KESM) sistemi, ESM ve FEM sistemlerinin özelliklerini içermektedir. ESM sisteminin üst yüzüne sürtünmeli bir tabaka yerleştirilerek KESM sistemi oluşturulur. Bu sistem, FEM sisteminde olduğu gibi yapı temeli üzerinde kayabilmektedir. Sismik hareketlerin küçük olduğu zaman ESM gibi davranır. Depremin oluşturduğu sismik hareketin büyük olduğu durumlarda ise de üst yüzeydeki sürtünmeli tabakada hareket gözlemlenir.

1.6.6. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Sistemi

Yüksek sönümlü kauçuk mesnet (YSKM) sistemi ile izole edilmiş sismik izolasyon sistemi, stratejik önem arz eden yapılar ve anıtsal yapılarda depremin zararlı etkisini azalttığı için önem kazanmıştır (Ceccoli vd, 1999). Genelde kullanılan depremden korunma stratejisi, binanın temeli ile kolonu arasına yerleştirilen kauçuk mesnet

kullanımlarında, binanın temel frekansının deprem kaydındaki hakim frekans aralığından daha düşük olarak düşünülmesidir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, yakın çevredeki uyarım ve depremden dolayı oluşan yer hareketleri üst yapı ile temel arasına yerleştirilmiş sismik izolasyon aygıtlarında kabul edilemez ölçüde büyük yer değiştirmelere sebep olmaktadır. YSKM kullanımı, doğrusal aralıkta istenilen sonuç elde edilir iken yüksek enerji yitimi sağladığı için büyük ölçüde tavsiye edilmektedir (Ceccoli vd., 1999). Jangid ve Datta (1995), doğal kauçuktan yapılmış YSKM sistemi, yüksek sönümlü elastik bir maddenin karışımı olan KL301 adı verilen bir maddeden yapılmıştır. Bu madde Japonya'da Bridgestone firması tarafından üretilmektedir. KL301'in çok küçük şekil değiştirmelerinde kesme modülü 4.300 kPa, %50 şekil değiştirmelerde 650 kPa, %100 şekil değiştirmede 430 kPa ve %150 şekil değiştirmede 340 kPa'dır. Mesnet 2 mm kalınlığında 20 adet kauçuk tabakadan oluşmaktadır. Üst tarafta 2 mm kalınlığında birer çelik levha bulunmaktadır.

1.6.7. Sürtünmeli Mesnet Sistemi

Prensip olarak sürtünmeli mesnet (SM) sistemi sürtünmeli kayan bir mekanizmadır (Su vd., 1989; Jangid, 1997). Bu sistem yatay sürtünme kuvvetlerinden dolayı harekete karşı koyarak ve oluşan enerjiyi emmektedir. SM bina temelinde bir silindir veya kum tabakası kullanımı ile en iyi şekilde örneklendirilebilmektedir. Bu sistem Çin'de depremin yıkıcı etkilerinden korunmak için az katlı binalarda kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir.

1.6.8. Çapraz Doğrusal Hareket Sistemi

Çapraz doğrusal hareket (ÇDH) sistemi, birbirine dik olarak yerleştirilmiş iki tane doğrusal yaya monte edilen iki tane düşük sürtünmeli doğrusal hareket eden bloktan oluşmaktadır. ÇDH sistemi üzerinde yer alan tampon bloklar çok düşük sürtünme kuvvetine sahiptir. Bundan dolayı düşük kesme kuvvetlerini karşılamaktadır. Bu sistem çok düşük yanıl etkilerde dahi hareket etmektedir. ÇDH sisteminin farklı bir özelliği ise basınç kuvveti yanı sıra çekme kuvvetine karşı çalışabilmesidir. ÇDH tipi izolatörler kurşun çekirdekli izolatörler ve diğer izolatör tipleri ile de birlikte kullanılmaktadır (Türker, 2005).

1.6.9. Çelik Bilyeli İzolatör Sistemi

Çelik bilyeli izolatör (ÇBİ) sistemi düşük sürtünme katsayısına sahip iki adet çelik levha arasına yerleştirilmiş çok sayıda çelik bilyelerden oluşmaktadır. Bilyelerin sayısı binanın düşey yüklerini karşılayacak şekilde ve izolatörlerin tasarımı sırasında ayarlanmaktadır. ÇBİ sistemi ÇDH sistemi gibi kurşun çekirdekli izolatörler ve diğer izolatör tipleri ile de birlikte kullanılmaktadır.

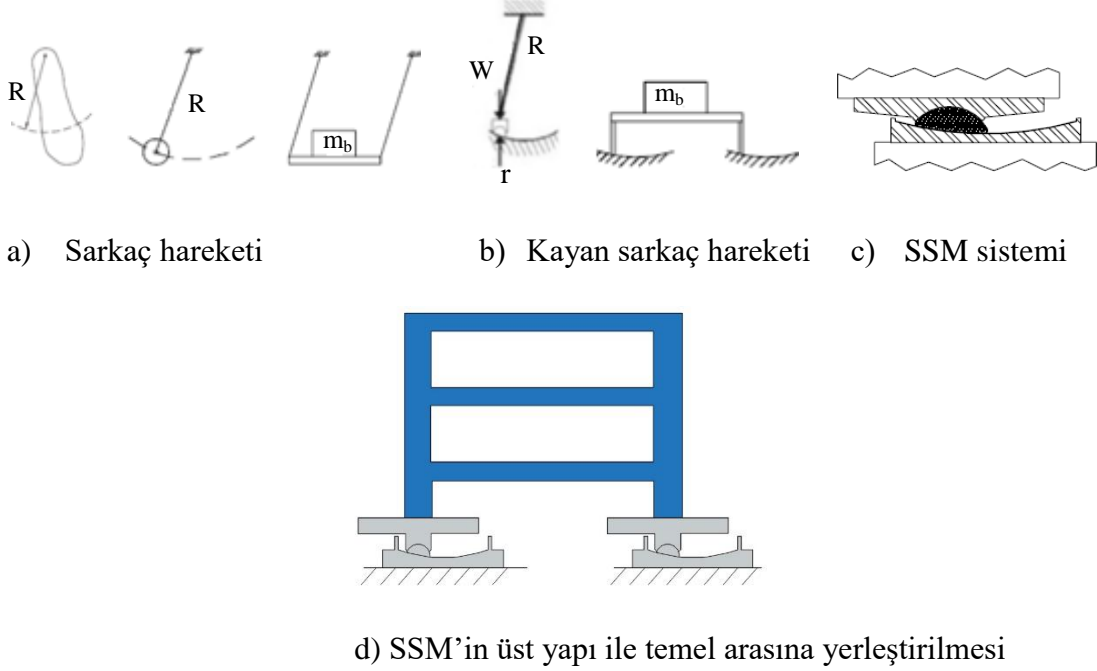
1.6.10. Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi

Zayas vd. (1987) tarafından üretilen tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi yukarıda bahsedilen sistemlere göre üretimi kolay ve dayanıklıdır. TESS mesnet sisteminden istenilen sismik izolasyon sonuçlarını elde etmek için mesnedin taşıdığı ağırlıktan ve sarkacın geometrisinden faydalanılır. Çevresel etkilere karşı dayanıklı ve uzun ömürlüdür (Zayas, 1990).

TESSM sisteminin mühendislik prensiplerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu sistem ile deprem izolasyonu yapılan yapı deprem hareketlerine karşı küçük genlikli sarkaç hareketi ile tepki vermektedir. Bu nedenle TESS mesnet sisteminden istenilen sismik izolasyon sonuçlarını elde etmek için sarkacın taşıdığı ağırlıktan ve sarkacın geometrisinden faydalanılmaktadır. Kayıcı üzerindeki kompozit malzeme ile kaplı mafsallı kayıcı ile yüzey arasında hıza bağlı bir sürtünme bulunmaktadır. Bu sürtünme yapıya iletilen sismik enerjiyi emmede faydalı olduğu birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır (Zayas vd. 1989, 1990).

Zayas vd. (1989), Mokha vd. (1990a, 1990b) TESS mesnet sisteminin prensiplerini belirlemiş olup bu prensiplerin bütün sürtünmeli küresel kayıcı mesnetler için geçerli olduğunu vurgulamışlardır. Bu mesnetler, depremden dolayı binaya iletilen yatay yükleri ve titreşim hareketlerini büyük ölçüde azaltmaktadır (Zayas vd., 1987 Tsai, 1997). Sarkaç hareketinin ilkelerini ve yapılacak malzemenin özelliğinin iyi bilinmesiyle uzun ömürlü ve çevresel kirlenmelere karşı korumalı bir sistem tasarlanabilmektedir. TESS mesnet sistemi kayıcı bir sistem olup silindirik içbükey yüzey üzerinde kayabilen mafsallı kayıcıdan oluşmaktadır. Kayma tipindeki izolatörler genellikle paslanmaz çelik tabakalardan ve polytetrafluoroethylene karışımı olan kompozit malzemedan oluşmaktadır (Kim ve Yun, 2007).

Sarkaç hareketi prensibine dayanan TESS mesnet sisteminin sarkaç hareketinden TESS mesnet sistemine geçişi Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Basit bir sarkaç hareketinden TESS mesnet sistemine geçişin gösterimi

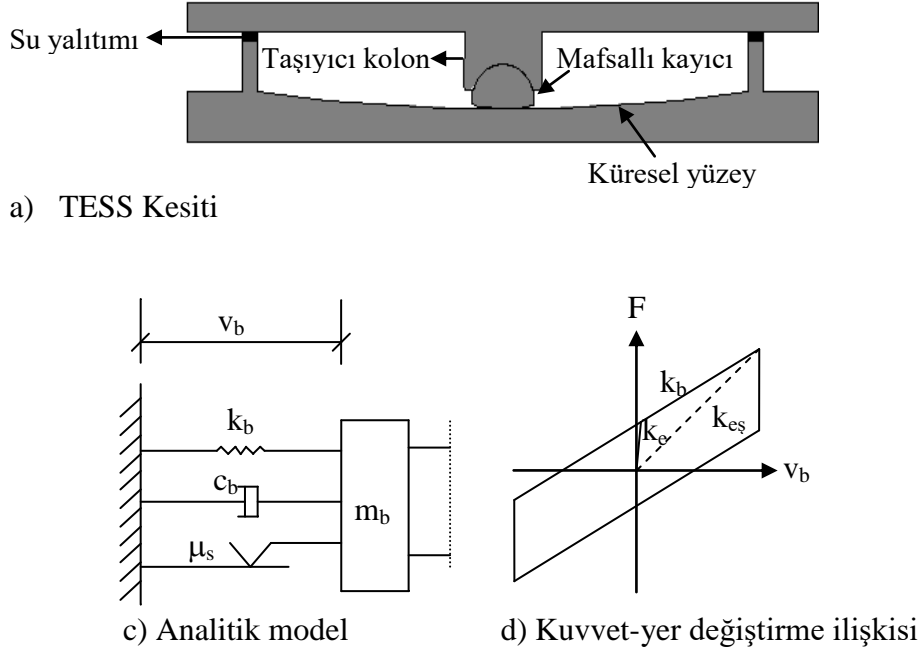
TESS mesnet sistemleri, izolasyonlu yapının doğal periyodunu arttırmak için sarkaçın özelliklerini kullanır. Yüzeyin eğrilik yarıçapı seçilerek mesnedin periyodu belirlenir. Periyot mesnedin taşıdığı ağırlıktan bağımsızdır. Bu ifade denklem (1.48)’de gösterilmektedir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1.48)$$

Burada g yerçekimi ivmesini ve R eğrilik yarıçapını göstermektedir. Bu denklemde hesaplanan periyot izolatörün hareketli periyodu ve sürtünmeli sarkaç ile desteklenen yapının periyodudur. Sürtünmeli sarkaç mesnet geometrisinin önemini vurgulamak için denklem (1.48) aşağıdaki denklem (1.49) gibi düzenlenip periyot, T, 2 s alınırsa sürtünmeli sarkaç mesnet sisteminin eğrilik yarıçapı 100 cm olmaktadır.

$$R=25T^2 \quad (1.49)$$

TESS mesnet sistemi elemanları, en kesiti, analitik modeli ve kuvvet-yer değiştirme ilişkisi Şekil 1.2' de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Tek eğrilikli sürtülmeli sarkaç mesnet sistemi

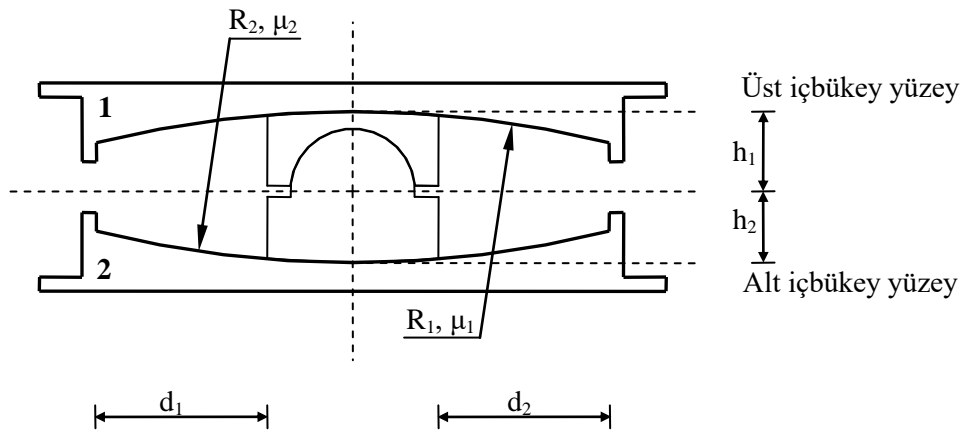
Mafsallı kayıcı eğri yüzey üzerinde hareket edince üstü yapı yukarı doğru yükselip tekrar eski haline gelirken bir merkezlenme kuvveti oluşur. Mafsallı kayıcı ile küresel yüzey arasında sürtünmeden dolayı oluşan bu kuvvet deprem enerjisini sönmümler. Eğrilik yüzeyinin üste veya altta olması kinematığı ve uygulamayı etkilememektedir.

Yapıya gelen deprem kuvveti sürtünme kuvvetinden küçük ise izolatörde herhangi bir hareket gerçekleşmemektedir. Yapı sismik izolasyonsuz gibi tepki verir ve periyodu sismik izolasyonsuz yapının periyodu ile aynı olmaktadır. Depremden gelen yatay kuvvetin değeri sürtünme kuvvetinden daha fazla olduğunda izolatör harekete geçer ve yapı sismik izolasyonlu bir yapı olarak davranış gösterir. Böylece izolatörün periyodu sismik izolasyonlu yapının periyoduna eşit olur. TESS mesnet sistemi tasarımcıya çeşitli imkânlar sunar. Bunlar; kayma periyodu arttırıldığında tabandaki kesme kuvvetinin azalması ve izolatördeki yer değiştirmenin artmasıdır. Eğrilik yüzeyindeki sürtünme kuvveti azaltıldığında tabandaki kesme kuvveti azalır ve izolatördeki yer değiştirme artar. İzolatör mesnetlerinin taşıdığı binanın kütle merkezi ile mesnetlerin rijitlik merkezi üst üste geldiği için binanın burulma hareketleri küçültülmüş olur.

Sismik izolasyon sisteminin işleyişinde daha sık olan küçük genlikli hareketler tasarımcılar tarafından genel olarak hesaba katılmaz. Düşük seviyeli sarsıntılar yer değiştirme veya dayanıklılık bakımından bir tasarım sorunu olmamasına rağmen verim açısından bir sorun olabilir. Daha büyük depremler için yeterli sönüm ve esneklik ile birlikte tasarımı yapılmış izolasyon sistemleri küçük titreşimlerde aktif olmayabilir. Bu durum yapıda taşıyıcı olmayan elemanlar için ters etki yapabilir. İzolasyon sistemi aktif olmasa tekrar merkezlenme bir sorun teşkil edebilir.

1.6.11. İki Eğrilikli Sürtüneli Sarkaç Mesnet Sistemi

İki tane küresel içbükey yüzeyden ve bunların arasına yerleştirilmiş kayıcı mafsaldan oluşan iki eğrilikli sürtüneli sarkaç (İESS) mesnet sistemi Tsai vd. (2003) tarafından ileri sürülmüştür. Bu sistemin kullanımı ile yapının depreme karşı verimliliği artmaktadır. İESS mesnet sistemi iyi bilinen TESS mesnet sisteminden alıntı olarak yapılmıştır. Çalışma mekanizması TESS mesnet sistem ile aynıdır. Esas özelliği yer değiştirme kapasitesinin özdeş plan boyutlarındaki TESS mesnet sisteminden daha fazla olmasıdır. Ayrıca kaymanın gerçekleştiği yüzeylerde değişik sürtünme katsayıları ve eğrilik yarıçapları kullanılabilme özelliğine de sahiptir (Fenz ve Constantinou, 2006). İESS mesnet sistemi Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3 İki eğrilikli sürtüneli sarkaç mesnet sistemi

İESS mesnet sistemi adından da anlaşıldığı gibi iki tane paslanmaz çelik yüzeyden oluşmaktadır. Alt ve üst küresel yüzeyler sırasıyla R_1 ve R_2 eğrilik yarıçapına sahiptir.

Bunlar eşit veya farklı olabilmektedir. Küresel yüzeylerin sürtünme katsayıları sırasıyla μ_1 ve μ_2 'dir. Bu sürtünme katsayıları birbirine eşit olacağı gibi farklı da olabilmektedir. Farklı sürtünmeler, eğrilik yarıçapları ve yer değiştirmeler kullanılarak uygulamada istenilen faydaları elde edebilmek mümkündür. Alt ve üst yüzeylerin nominal yer değiştirme kapasiteleri sırasıyla d_1 ve d_2 'dir. İESS mesnet sisteminde alt ve üst içbükey eğrilik yüzeylerinde eş zamanlı kayma oluşur. Mesnedin tümünün toplam yer değiştirme kapasitesi $d_1 + d_2$ 'dir. TESS mesnet sisteminde toplam yer değiştirme kapasitesi d_1 ya da d_2 'dir. İESS mesnet sistemin TESS mesnet sisteminin boyutundan daha küçük olup daha fazla yer değiştirme kapasitesine sahiptir. Gerçek yer değiştirme kapasitesi, kayıcının dönmesinden ve yükseklik etkilerinden dolayı nominal yer değiştirme kapasitesinden çok az farklıdır (Fenz ve Constantinou, 2006; Fenz, 2008).

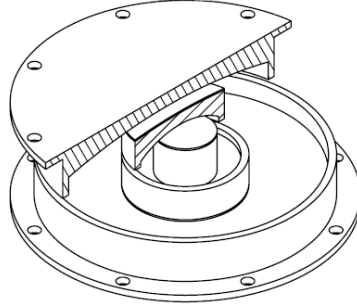
Mesnedin yükseklikleri h_1 ve h_2 'dir. Bu yükseklikler sırasıyla eksen noktası ile üst ve alt içbükey yüzeylere olan dik mesafedir. Sistemin etkili eğrilik yarıçapı $R_{eff1}=R_1-h_1$ ve $R_{eff2}=R_2-h_2$ ile belirlenir.

1.6.12. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemi

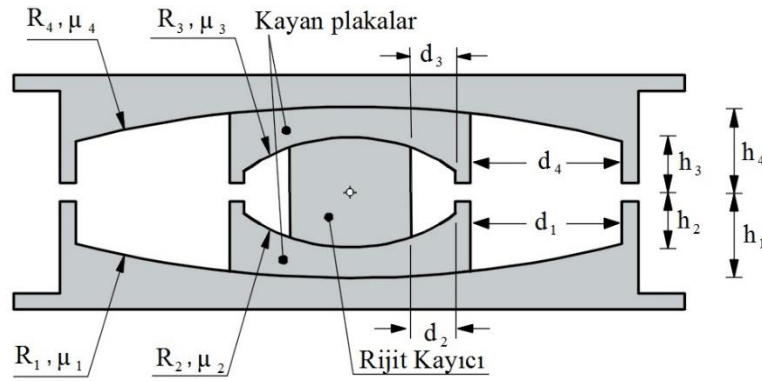
ÜESS mesnet sistemi, sönüm ve rijitliği belirlenebilen tamamen pasif bir aygıttır. Hesaplanabilen ve kontrol edilebilen yer değiştirme değerleri rijitlik ve sürtünmenin değiştirilmesiyle elde edilir. Bu davranış, mesnedin doğasından kaynaklanmakta olup harici bir kuvvet uygulanarak yapılmaz. Üstelik mesnedin her bir değişkeni geleneksel sürtünmeli sarkaç mesnedin bilinen ve anlaşılan sismik koruyucu teknolojilerinden türetilir (Fenz ve Constantinou, 2008a). Uygun bir şekilde yapılmış ÜESS mesnet sistemi, artan yer değiştirme talepleri ile birlikte rijitlik ve sönümde arzu edilir davranış sergilemektedir (Fenz ve Constantinou, 2008b).

ÜESS mesnet sistemi geleneksel sürtünmeli sarkaç mesnet sisteminden farkı, artan yer değiştirme büyüklüklerindeki rijitlik ve dayanımda çok farklılık sergilemesidir (Fadi ve Constantinou, 2009). Geleneksel izolatör sistemlerine kıyasla İESS mesnet sisteminde olduğu gibi ÜESS mesnet sisteminde de değişik sürtünme katsayıları ve eğrilik yarıçapları kullanılabilir. ÜESS mesnet sisteminin kesiti ve en kesiti sırasıyla Şekil 1.4 (Fenz, 2008) ve 1.5'te gösterilmektedir. Şekil 1.5'ten de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sistemi paslanmaz çelikten yapılmış iki tane eğrisel içbükey küresel plakadan ve aynı şekilde onun

içine yerleştirilmiş kayma düzeneğinden oluşmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi dış taraftaki eğrilik yüzeyleri sırasıyla $R_{eff1}=R_1-h_1$ ve $R_{eff4}=R_4-h_4$ etkili eğrilik yarıçaplarına sahiptir. Burada, R_i i. küresel yüzeyin eğrilik yarıçapını ve h_i i. küresel yüzey ile mafsallı kayıcının eksen noktası arasındaki dik mesafeyi göstermektedir. Mafsallı kayıcı, rijit kayıcının ikiye ayırdığı paslanmaz iki tane içbükey küresel yüzeyden oluşmaktadır.



Şekil 1.4. ÜESS mesnet sisteminden bir kesit



Şekil 1.5. ÜESS mesnet sistemi en kesiti

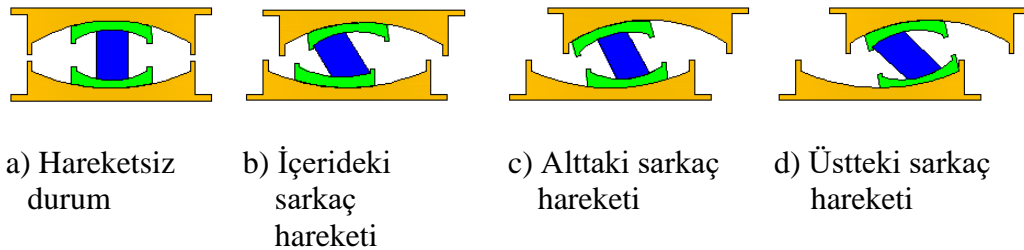
En içteki kayıcı rijit olmasına rağmen düzenek bütün olarak üst ve alt tabakalarda farklı yönlerde dönebilmeye özelliğine sahiptir. Kaymanın gerçekleştiği dıştaki 1 ve 4 yüzeyi metal olmayan kayıcı malzeme ile kaplanmıştır. Bu yüzeylerdeki sürtünme katsayıları sırası ile μ_1 ve μ_4 tür. Bu sürtünme katsayıları aynı olduğu gibi farklı da olabilmektedir. İç taraftaki kayan iki küresel yüzey $R_{eff2}=R_2-h_2$ ve $R_{eff3}=R_3-h_3$ etkili yarıçaplarına sahiptirler. Rijit kayıcının dışındaki 2 ve 3 yüzeyi metal olmayan kayıcı malzeme ile kaplanmıştır. Bu yüzeylerin sürtünme katsayıları sırasıyla μ_2 ve μ_3 dür. Yukarıda verilen özelliklerle rijit kayıcı, içteki paslanmaz çelikten oluşan kayma tabakalarının üzerinde hareket etmektedir.

1-4 yüzeylerindeki nominal yer değiştirme kapasiteleri d_1 , d_2 , d_3 ve d_4 ile gösterilmektedir. İESS mesnet sisteminde olduğu gibi ÜESS mesnet sisteminde de kayıcının yüksekliğinden ve dönmesinden dolayı gerçek yer değiştirme kapasitesi nominal yer değiştirme kapasitesi ile tam olarak aynı değildir. ÜESS mesnet sisteminin bu özgün davranışı hareketi boyunca çeşitli kayma yüzeylerinde yatay yer değiştirme kapasiteleri sayesinde gerçekleşir. Bu yüzden d_1 , d_2 , d_3 ve d_4 yer değiştirme kapasiteleri tasarım parametreleri olarak gösterilmelidir. Bu parametreler sadece tüm yer değiştirme kapasitesini sınırlandırmakla kalmaz genel davranışı da önemli derecede etkilemektedir.

ÜESS mesnet sisteminin en büyük avantajlarından biri de küçük genlikli depremlerde dış yüzeylerde kayma olmaz iken kayma sadece iç yüzeylerde meydana gelmesidir. Dış yüzeylerde hareket sadece kuvvetli depremlerde gerçekleşmektedir. ÜESS mesnedinin bu temel kuralı sayesinde şiddetli olmayan depremlerde bu yüzeylerde herhangi bir aşınma olmadığından yıpranma olmaz. Bundan dolayı ÜESS mesnedi, TESS ve İESS mesnedine kıyasla daha uzun ömürlü olan sismik izolasyon aygıtları olarak bilinmektedir. İESS mesnedinde olduğu gibi ÜESS mesnedinin küresel yüzeylerinde eşzamanlı kayış olduğundan dolayı aynı yer değiştirme kapasitesini koruyarak daha küçük boyutlarda imalatı yapılabilir. Ekonomik açıdan bakıldığında İESS mesnet sistemi ile ÜESS mesnet sistemi arasında, ebatlar da göz önüne alındığında fark edilebilir bir fiyat farkı bulunmaktadır (Fenz, 2008).

1.6.12.1. ÜESS Mesnet Sisteminin Kuvvet-Yer Değiştirme İlişkisi

ÜESS mesnet sisteminin kuvvet–yer değiştirme ilişkisinin işleyişi esas olarak Fenz ve Constantinou (2008b)'ye dayanmaktadır. Şekil 1.6'da çeşitli aşamalardaki ÜESS mesnedinin en kesitleri görülmektedir.



Şekil 1.6. ÜESS mesnet sisteminin çeşitli aşamalardaki hareket durumları

Şekil 1.6a mesnedin sıfır yer değiştirmesini yani merkezlenmiş durumunu, Şekil 1.6b servis yükleri durumunda içerideki sarkaç hareketini, Şekil 1.6c tasarım esaslı deprem seviyesinde alttaki sarkaç hareketini ve Şekil 1.6d düşünülen en şiddetli depremde üstteki sarkaç hareketini göstermektedir. Şekil 1.6'da verilen adlandırmalara dayanarak ÜESS mesnet sistemi aşağıda verilen bilgileri dikkate alarak yapılandırılmaktadır.

- Dış yüzeyler için büyük ve eşit eğrilik yarıçapları ve iç yüzeyler için küçük ve eşit eğrilik yarıçapları kullanılır. Yani $R_{eff2} = R_{eff3} \leq R_{eff1} = R_{eff4}$ 'dür. Bu şekilde olması durumunda uygun sürtünme katsayıları ile birleştirildiği zaman hareket süresince rijitlikte istenilen sonuçlar elde edilmektedir. Bu eğrilik yarıçapları farklı olabilir ancak denklemlerin çıkartılabilmesi için eşit alınmalıdır. Üretim kolaylığı için çoğu durumlarda bu eğrilik yarıçapları birbirine eşit alınmaktadır.

- Mesnedin yüksek rijitlik sergilemesi için sürtünme katsayıları kullanılmaktadır. Başlangıç olarak, düşük sürtünme seçildiğinde rijitlik azalır. Bunun sonucu olarak yer değiştirme artar daha sonra sürtünme katsayısı biraz daha arttırılır. Bu durum, $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$ verilen sürtünme katsayıları sıralaması kullanılarak elde edilmektedir.

- Kayıcı, yer değiştirme sınırlayıcısına 2 ve 3 yüzeyinden evvel 1 ve 4 yüzeyinde temas etmesi gerekir. Hareketin 1 ve 4 yüzeyinden önce 2 ve 3 yüzeyinde gerçekleşmesi sağlanır. Bu da $F_{f1} < F_{dr2}$ ve $F_{f4} < F_{dr3}$ sağlandıkça gerçekleşir. Yer değiştirme açısından bu durum $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$ ve $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$ sağlandıkça gerçekleşir.

- $F_{f4} < F_{dr1}$ olduğu durumda, herhangi bir yüzeyde sertleşme başlamadan önce sürtünmenin en yüksek olduğu yüzeyde kaymanın başlaması gerekir. Yer değiştirme açısından bu durum $d_1 > (\mu_4 - \mu_1)R_{eff1}$ sağlanarak yerine getirilir. Bu olgu, mesnedin gerginleşip yumuşaması ve tekrar gerginleşmesi durumundan kaçınmak için sağlanır. Bu durum $F_{f4} > F_{dr1}$ olur ise ortaya çıkmaktadır. Mesnet, 1 yüzeyindeki yer değiştirme sınırlayıcısı ile temas ettiğinde gerginleşme, kayma 4 yüzeyinde başladığı zaman gevşeme ve sonra tekrar 4 yüzeyi yer değiştirme sınırlayıcısı ile temas ettiğinde gerginleşmek ister.

Alınan bu yaklaşımlarla varsayımları kullanarak en genel yapılanma biçiminde kuvvet-yer değiştirme denklemleri elde edilir. Bu varsayımları kullanarak ÜESS mesnedinin 5 farklı hareket durumu incelenir (Fenz, 2008; Fenz ve Constantinou, 2008b). Bu hareket durumları;

Hareket durumu 1: Hareket sadece 2 ve 3 yüzeyinde gerçekleşir.

Hareket durumu 2: 2 yüzeyinde hareket durur ve 1 ve 3 yüzeyinde başlar.

Hareket durumu 3: Hareket 2 ve 3 yüzeyinde durur sonra 1 ve 4 yüzeyinde başlar.

Hareket durumu 4: Kayıcı 1 yüzeyindeki yer değiştirme sınırlayıcısı ile temas ettiğinde 3 yüzeyinde hareketsizlik devam eder ve hareket 2 ve 4 yüzeyinde başlar.

Hareket durumu 5: Kayıcı 1 ve 4 yüzeyindeki yer değiştirme sınırlayıcısına dayanır ve hareket 2 ve 3 yüzeyinde başlar.

1.6.12.1.1. Hareket Durumu 1

Hareket durumu 1'de hareket sadece 2 ve 3 yüzeylerinde oluşmaktadır. Uygulanan yatay kuvvet sürtünmenin küçük olduğu 2 ve 3 yüzeylerindeki sürtünme kuvvetine eşit ve bu kuvveti geçtiğinde, yani $F \geq F_{f2} = F_{f3}$ olduğunda, 2 ve 3 yüzeylerinde hareket başlamaktadır. 2 ve 3 yüzeylerindeki hareket durumu göz önüne alınırsa düşey ve yatay yöndeki dengelerden aşağıdaki denklem (1.50) ve (1.51) elde edilir.

$$S_1 + F_{f2} \sin \theta_2 - S_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (1.50)$$

$$F_{f2} \cos \theta_2 + S_2 \sin \theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (1.51)$$

Burada S_1 1 nolu plaka ile 2 nolu plaka arasındaki normal kuvveti; S_2 2 nolu plaka ile rijit kayıcı arasındaki normal kuvveti; θ_2 ise 2 nolu plaka ile rijit kayıcı arasındaki düşey açıyı göstermektedir.

1 nolu kayma plakasındaki dengelerden aşağıdaki denklem (1.52) ve (1.53) ifadeleri elde edilir.

$$F = F_1 \quad (1.52)$$

$$W = S_1 \quad (1.53)$$

Burada F uygulanan yatay kuvveti göstermektedir. Geometriden 2 yüzeyindeki göreceli yer değiştirme, u_2 , aşağıdaki denklem (1.54) ile elde edilir.

$$u_2 = R_{\text{eff}2} \sin \theta_2 \quad (1.54)$$

(1.50) ve (1.54) denklemleri birleştirilip ve $\cos \theta_2 \cong 1$ olarak göreceli yer değiştirme, u_2 , etkili yarıçap $R_{\text{eff}2}$ ' ye kıyasla epeyce küçük olduğu düşünülürse aşağıdaki denklem (1.55) elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2}} u_2 + F_{f2} \quad (1.55)$$

Zayas vd. (1987) göre, (1.50) ve (1.55) denklemleri geleneksel TESS mesnet sisteminin denge denklemlerinin aynısıdır (Fenz, 2008).

4 nolu kayma plakası ve 3 nolu kayma plakası göz önüne alınıp aynı dengelerden 3 yüzeyi için aşağıdaki denklem (1.56) elde edilmektedir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}3}} u_3 + F_{f3} \quad (1.56)$$

Hareket durumu 1 boyunca kuvvet–toplam yer değiştirme ilişkisi denklem (1.55) ve (1.56) birleştirilerek elde edilir. Toplam yer değiştirme u , $u_1 = u_4 = 0$ olduğu için u_2 ve u_3 yer değiştirmelerinin toplamına eşittir. Kuvvet-toplam yer değiştirme ilişkisi aşağıdaki denklem (1.57) ile elde edilmektedir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f2} R_{\text{eff}2} + F_{f3} R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} \quad (1.57)$$

1.6.12.1.2. Hareket Durumu 2

$F = F_{f1}$ olduğunda, 1 yüzeyinde hareket başlar ve kayma durumu 2 başlamış olur.

Aşağıdaki denklem (1.58) ile verilen u^* yer değiştirmesinde değişme oluşur.

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{\text{eff}2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{\text{eff}3} \quad (1.58)$$

Denklem (1.58), $F = F_{f1}$ olduğu anda yer değiştirmeden dolayı denklem (1.57) çözümlenerek elde edilir. Alt içbükey plakaya göre alt kayar plakasının dönmesi θ_1 ve alt kayar plakaya göre rijit kayıcının dönmesi θ_2 'dir. Açılar bu yolla tanımlandığı zaman göreceli yer değiştirme u_1 ve u_2 denklem (1.59) ve (1.60) elde edilmektedir.

$$u_1 = R_{\text{eff}1} \sin \theta_1 \quad (1.59)$$

$$u_2 = R_{\text{eff}2} \sin \theta_2 \quad (1.60)$$

TESS mesnet sisteminin denge denklemlerinden 1 yüzeyindeki harekete hükmeden kuvvet, denklem (1.61)'deki gibi elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} u_1 + F_{f1} \quad (1.61)$$

Rijit kayıcının boyutu küçük olmasına rağmen 1 yüzeyinde kayma oluşuyor iken alttaki kayma tabakasındaki dönmenin davranış üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülür. Rijit kayıcının düşey yönde yaptığı açı, θ_1 ve θ_2 'nin toplamına eşittir. 2 nolu kayma plakasındaki yatay ve düşey dengelerden (1.62) - (1.63) denklemleri elde edilir.

$$S_1 \cos \theta_1 + F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin \theta_1 = 0 \quad (1.62)$$

$$S_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) - S_1 \sin \theta_1 - F_{f1} \cos \theta_1 = 0 \quad (1.63)$$

(1.59) ve (1.63) denklemlerini kullanarak $\cos \theta_1 \cong \sin \theta_1$ ve $\sin \theta_1 \times \sin \theta_2 \cong 0$ olması suretiyle θ_1 ve θ_2 'yi çok küçük varsayarak 2 yüzeyi için kuvvet denklem (1.64)'deki gibi elde edilir.

$$F = W \left(\frac{u_1}{R_{\text{eff}1}} + \frac{u_2}{R_{\text{eff}2}} \right) + F_{f2} \quad (1.64)$$

Denklem (1.61)'i denklem (1.64)'de yerine koyarsak denklem (1.65) elde edilir.

$$u_2 = (\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff}2} \quad (1.65)$$

Kayma durumu 2 için kuvvet-toplam yer değiştirme ilişkisi denklem (1.66) ile ifade edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}} \quad (1.66)$$

1.6.12.1.3. Hareket Durumu 3

$F = F_{f4}$ olduğunda 4 yzeyinde hareket başlar ve hareket durumu 3 başlamış olur ve denklem (1.67) ile verilen u^{**} yer değiştirmesi oluşur.

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}) \quad (1.67)$$

Denklem (1.67), $F = F_{f4}$ olduğu zaman yer değiştirme nedeniyle denklem (1.66) zlerek elde edilir. u_1 , u_2 yer değiştirmeleri ve θ_1 , θ_2 aılları hareket durumu 2 de belirlenmişti. 3 nolu kayma plakasının 4 nolu kayma plakasına göre dönme açısı θ_4 ve 3 nolu kayma plakasının rijit kayıcıya göre dönme açısı θ_3 'tür. Aıllar bu yolla tanımlandığı zaman göreceli yer değiştirme u_3 ve u_4 denklem (1.68) ve (1.69) olarak elde edilmektedir.

$$u_3 = R_{\text{eff}3} \sin \theta_3 \quad (1.68)$$

$$u_4 = R_{\text{eff}4} \sin \theta_4 \quad (1.69)$$

Mesnedin alt parçaları için hareket durumu 2 ve hareket durumu 3'de u_1 yer değiştirmesindeki artış hariç hiçbir değişiklik yoktur. Bundan dolayı 1 yzeyindeki harekette denklem (1.61) ve 2 yzeyindeki harekette denklem (1.64) geçerliliğini korur. 4

nolu kayma plakası ile 3 nolu kayma plakası arasındaki yatay ve düşey denge denklemlerinden 3 ve 4 yüzeyi için kuvvet sırasıyla denklem (1.70) ve (1.71) olarak elde edilmektedir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}4}} + F_{f4} \quad (1.70)$$

$$F = W \left(\frac{u_3}{R_{\text{eff}3}} + \frac{u_4}{R_{\text{eff}4}} \right) + F_{f3} \quad (1.71)$$

$$u_3 = (\mu_4 - \mu_3) R_{\text{eff}3} \quad (1.72)$$

Denklem (1.72) 4 yüzeyindeki kayma başlar başlamaz 3 yüzeyinde kaymanın durduğunu gösterir. Bu, $F = F_{f4}$ olduğu zaman u_3 yer değiştirmesi nedeniyle denklem (1.56) çözümlere sağlanmaktadır. 1 ve 4 yüzeylerindeki kayma, hareket durumu 3 için toplam kuvvet yer değiştirme ilişkisi aşağıdaki denklem (1.73) olarak elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3} + F_{f4}(R_{\text{eff}4} - R_{\text{eff}3})}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}} \quad (1.73)$$

1.6.12.1.4. Hareket Durumu 4

Hareket durumu 4, hareketin 2 ve 4 yüzeylerinden 1 ve 4 yüzeylerine geçmesiyle başlar. Bu durum yüzey 1'deki yer değiştirme sınırlayıcısı ile temas olunca gerçekleşmektedir. Bu temasta 1 yüzeyindeki yer değiştirme $u_1 = d_1$ olur ve yatay kuvvet $F_{\text{dr}1}$ denklem (1.74) ile elde edilmektedir.

$$F_{\text{dr}1} = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1} \quad (1.74)$$

Hareket durumları arasındaki toplam yer değiştirmede denklem (1.75) ile verilen u_{dr1} geçişi gerçekleşmektedir.

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (1.75)$$

Yer değiştirme sınırlayıcısı 1 yzeyindeki kayıcı ile temas ettiğinde kayıcı üzerinde, ek bir kuvvet olan F_{r1} oluşmaktadır. Yer değiştirme sınırlayıcısının rijit olduğu dūřunulerek denklem (1.76)'daki kuvvet-yer değiştirme ilişkisi 1 yzeyindeki harekete hūkmetmektedir.

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \quad (1.76)$$

1 yzeyinde ek bir yer değiştirme olmaz ve uygulanan yatay kuvvetin (F) artmasıyla sınırlayıcıdaki F_{r1} kuvvetinde artış gerçekleşerek denge korunmuş olur. 1 ve 2 nolu kayma plakası gōz ۆnune alınarak 2 yzeyindeki kuvvet-yer değiştirme ilişkisi denklem (1.77) ile elde edilmektedir.

$$F = W \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \frac{u_2}{R_{eff1}} \right) + F_{f2} \quad (1.77)$$

Yer değiştirme sınırlayıcısı 1 yzeyi ile temas ettiğinde 2 yzeyinde hareketin devam ettiği denklem (1.77)'dan gōr÷lmektedir. 2 ve 4 yzeyinde kayma ile oluşan toplam kuvvet-yer değiştirme ilişkisi denklem (1.78) ile elde edilmektedir.

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} \quad (1.78)$$

1.6.12.1.5. Hareket Durumu 5

2 ve 4 yüzeyindeki kayma hareketi 2 ve 3 yüzeyine geçtiği zaman hareket durumu 5 başlar. Bu durum yer değiştirme sınırlayıcısı 4 yüzeyi ile temas ettiğinde gerçekleşir. Durum 4'den durum 5'e geçiş noktasında 4 yüzeyindeki göreceli yer değiştirme $u_4 = d_4$ olduğunda yatay kuvvet F_{dr4} denklem (1.79) ile verilmektedir.

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (1.79)$$

Hareket durumları arasındaki geçişlerde u_{dr4} toplam yer değiştirmesi ortaya çıkar ve denklem (1.80) ile gösterilmektedir.

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4}) \quad (1.80)$$

4 ve 3 nolu kayma plakalarındaki dengeden 4 ve 3 yüzeyleri için yatay kuvvetler sırasıyla denklem (1.81) ve (1.82) ile elde edilmektedir.

$$F = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} + F_{r4} \quad (1.81)$$

$$F = W \left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \frac{u_3}{R_{eff3}} \right) + F_{f3} \quad (1.82)$$

1–4 yüzeylerindeki kuvvet-yer değiştirme ilişkileri birleştirilirse denklem (1.83) elde edilir.

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (1.83)$$

Tablo 1.1'de tüm hareket durumlarında ÜESS mesnet sisteminin davranışları özetlenmiştir (Fenz, 2008).

Tablo 1.1. Durum 1-5'deki ÜESS mesnet sisteminin davranışı

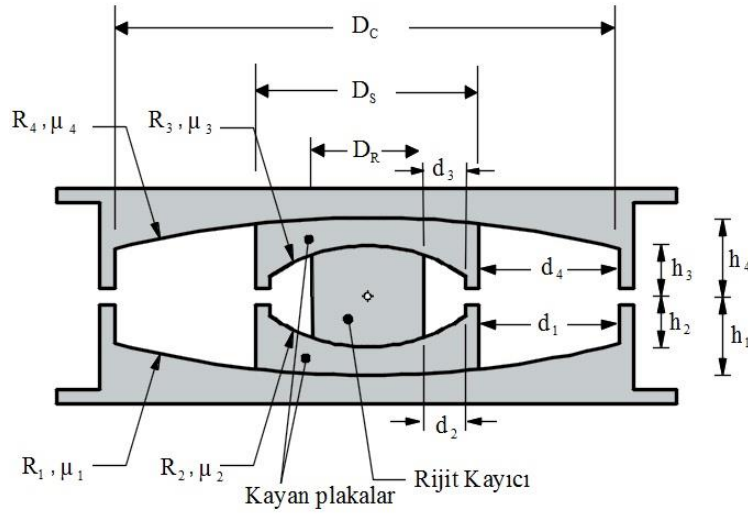
DURUM	Durumların tarifi	Kuvvet-yer değiştirme ilişkisi
1	Hareket sadece 2 ve 3 yüzeylerinde olmaktadır.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}}$ $F = F_1 \text{ ve } u = u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff}2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{\text{eff}3} \text{ olduğu sürece geçerlidir.}$
2	Kayma hareketi 1 ve 3 yüzeylerinde başlar, 2 yüzeyinde durur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3}}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}}$ $F = F_4 \text{ ve } u = u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}3}) \text{ olduğu sürece geçerlidir.}$
3	Hareket 2 ve 3 yüzeylerinde durur, 1 ve 4 yüzeylerinde olur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff}1} - R_{\text{eff}2}) + F_{f2}R_{\text{eff}2} + F_{f3}R_{\text{eff}3} + F_{f4}(R_{\text{eff}4} - R_{\text{eff}3})}{R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}}$ $F = F_{\text{dr}1} = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1} \text{ ve } u = u_{\text{dr}1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{\text{eff}4}}{R_{\text{eff}1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4}) \text{ olduğu sürece geçerlidir.}$
4	Kayıc1 1 yüzeyindeki sınırlayıcıyla temas eder; 3 yüzeyinde hareket durmaya devam eder, 2 ve 4 yüzeylerinde hareket olur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}4}} (u - u_{\text{dr}1}) + \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1}$ $F = F_{\text{dr}4} = \frac{W}{R_{\text{eff}4}} d_4 + F_{f4} \text{ ve } u = u_{\text{dr}4} = u_{\text{dr}1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{\text{eff}4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{\text{eff}1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}4})$ $\text{olduğu sürece geçerlidir.}$
5	Kayıc1 1 ve 4 yüzeylerindeki sınırlayıcılara dayanır. Hareket 2 ve 3 yüzeylerinde olur.	$F = \frac{W}{R_{\text{eff}2} + R_{\text{eff}3}} (u - u_{\text{dr}4}) + \frac{W}{R_{\text{eff}4}} d_4 + F_{f4}$ $F = F_{\text{dr}1} = \frac{W}{R_{\text{eff}1}} d_1 + F_{f1} \quad u = u_{\text{dr}1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{\text{eff}4}}{R_{\text{eff}1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff}1} + R_{\text{eff}4})$
Varsayımlar: 1- $R_{\text{eff}1} = R_{\text{eff}4} \gg R_{\text{eff}2} = R_{\text{eff}3}$, 2- $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$, 3- $d_1 > (\mu_4 - \mu_1)R_{\text{eff}1}$, 4- $d_4 > (\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff}2}$, 5- $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{\text{eff}3}$		

1.6.12.2. ÜESS Mesnet Sisteminin Sürtünme Katsayıları

Bu tez çalışmasında Constantinou vd. (2011) tarafından tanımlanan örnek bir tasarım kullanılarak Şekil 1.7’de görülen ÜESS mesnet sisteminin parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. ÜESS mesnet sisteminin 1-4 ve 2-3 yüzeylerindeki mesnet basınçları birbirilerinden farklı olmaktadır. Her bir yüzeyin mesnet basıncı denklem (1.84) ile elde edilebilir.

$$P = \frac{W}{\pi (D/2)^2} \quad (1.84)$$

Burada P mesnedin basıncını, W mesnedin üzerine gelen düşey yükü, D ise mesnet basıncı hesaplanacak yüzeyin genişliğini göstermektedir.



Şekil 1.7 ÜESS mesnet sistemi parametreleri

Sistemin üç döngülü sürtünme katsayısı (k_{3ds}) denklem (1.85) ile elde edilmektedir.

$$k_{3ds} = 0.122 - 0.01 P \quad (1.85)$$

Birinci döngüdeki sürtünme katsayısı (k_{1ds}) denklem (1.86) ile elde edilmektedir.

$$k_{1ds} = 0.2 \times 3k_{ass} \quad (1.86)$$

Sistemin eskimesi, kirlenmesi ve 2000 m hareket etmesi hali sırasıyla 1.10, 1.05 ve 1.20 katsayıları ile belirlenmiştir. Bu katsayıların çarpımları λ_{\max} olarak ifade edilmektedir. Sistemin yüzeylerindeki λ_{\max} 1.386 olarak elde edilmektedir. Üst sınırdaki sürtünme katsayısı ($k_{\text{üss}}$) denklem (1.87) ile elde edilmektedir.

$$k_{\text{üss}} = \lambda_{\max} \times k_{1\text{ds}} \quad (1.87)$$

Birleştirilmiş sistemin sürtünme katsayıları sürtünmelerin ağırlıklı ortalamaları ile aşağıdaki denklem (1.88) ile elde edilmektedir.

$$\mu_{\text{ib}} = \frac{2W_1\mu_{1i} + 2W_2\mu_{2i}}{2W_1 + 2W_2} \quad (1.88)$$

Burada; μ_{ib} birleştirilmiş durumdaki i. yüzeyin sürtünme katsayısını, μ_{1i} düşey yükün W_1 olması durumunda i. yüzeydeki sürtünme katsayısını ve μ_{2i} düşey yükün W_2 olması durumunda i. yüzeydeki sürtünme katsayısını göstermektedir.

İESS mesnet sistemi için efektif sürtünme katsayısı Ateş (2011) tarafından elde edilmiştir. Benzer şekilde ÜESS mesnet sisteminin efektif sürtünme katsayısı aşağıdaki verilen denklem (1.89) ile elde edilmektedir.

$$\mu_e = \frac{\mu_1(R_1 - h_1) + \mu_2(R_2 - h_2) + \mu_3(R_3 - h_3) + \mu_4(R_4 - h_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - h_1 - h_2 - h_3 - h_4} \quad (1.89)$$

Sismik izolatörler yapının periyodunun değiştirilmesinde önemli rol oynamaktadırlar. SSM sisteminin doğal periyodu denklem (1.48)'de verilmektedir. Denklemden de görüleceği gibi titreşim periyodu kütleden bağımsız olmasına rağmen eğrilik yarıçapı ile doğru orantılıdır. Bu sebeple sismik izolatöre sahip bir yapının periyodunun değiştirilmesi oldukça kolay olmaktadır. Bununla birlikte yapının ağırlığının değişmesiyle yapının ilk periyodu değişmeyecektir. Bu periyot, hem sismik izolasyon sisteminin periyodu hem de sismik izolasyon sistemi ile desteklenen yapının izolasyonlu periyodudur. İzolasyonlu periyot sürtünme kuvveti aşıldığında hakim olmaya başlamaktadır. Deprem kuvveti sürtünme kuvvetinden küçük olduğu sürece sismik izolasyonlu yapının periyodu sismik izolasyonsuz bir yapının periyodu gibi olmaktadır.

Deprem kuvveti sürtünme kuvvetini aştığı zaman dinamik tepkiler sismik izolasyon sistemi tarafından kontrol edilmektedir. Herhangi bir doğrultuda sismik izolasyon sisteminin kuvvet-yer değiştirme ilişkisi denklem (1.90) ile verilmektedir.

$$F = \frac{W}{R} v_b + \mu_s W \text{Sign}(\dot{v}_b) \quad (1.90)$$

Burada μ_s , W , R , v_b , ve \dot{v}_b sırası ile sürtünmeli sarkaç yüzeyindeki sürtünmeyi, mesnedin taşıdığı ağırlığı, sürtünmeli sarkacın yarıçapını, sarkacın yer değiştirmesini ve sarkacın hızını göstermektedir. Sign ise -1 ile +1 arasında değişen işaret fonksiyonudur. SSM sisteminin kayma esnasındaki yatay rijitliği denklem (1.91) ile verilmektedir.

$$k_b = \frac{W}{R} \quad (1.91)$$

Denklemden de görüldüğü gibi rijitlik taşınan ağırlık ile doğru orantılıdır. Mesnedin eşdeğer rijitliği ise denklem (1.92) ile verilmektedir (Scheller ve Constantinou, 1999).

$$k_{eş} = \frac{W}{R_{eff}} + \frac{f_{min} W}{(v_b)_{max}} \quad (1.92)$$

Burada $(v_b)_{max}$ SSM sistemindeki maksimum yer değiştirme kapasitesini göstermektedir. SSM sisteminin kaymaya başlamadan önceki rijitliği denklem (1.93) ile verilmektedir.

$$k_e = \frac{f_{min} W}{v_b} \quad (1.93)$$

Burada v_b mesnedin yer değiştirmesidir. SSM sisteminin doğal açısal frekansı denklem (1.94) ile verilmektedir.

$$\omega_b = \frac{2\pi}{T_b} = \sqrt{\frac{k_b g}{W}} \quad (1.94)$$

Sönüm oranı ise denklem (1.95) ile verilmektedir.

$$\xi_b = \frac{c_b g}{2W} \quad (1.95)$$

1.7. TESS-İESS-ÜESS Mesnet Sistemlerinin Karşılaştırılması

Yurdakul ve Ateş (2011) TESS, İESS ve ÜESS mesnet sistemlerini kullanarak sismik izolasyonu yapılan bir yapının çeşitli deprem kayıtları altında dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan analiz sonuçlarından elde edilen yapının ilk 5 periyodu Tablo 1.2’de gösterilmiştir. Tablo 1.2’den de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin periyodu diğer izolasyon sistemlerine göre daha uzundur. İESS mesnet sisteminin periyodu ise TESS mesnet sisteminden daha uzundur. 1999 Kocaeli depremi GBZ000 bileşenine maruz sismik izolasyonlu yapının dinamik davranışından elde edilen ivme ve yer değiştirmeler Tablo 1.3’de gösterilmiştir. Tablo 1.3’den görüldüğü gibi ÜESS mesnet sistemli yapının kat seviyelerindeki ivmeler TESS ve İESS mesnet sistemlerinden daha küçüktür. Dolayısıyla kesit tesirleri de daha küçük olacaktır. Yer değiştirmeler karşılaştırıldığında ÜESS mesnet sisteminin yer değiştirmesinin daha büyük olduğu görülmektedir.

Tüm bu sonuçlara dayanarak kuvvetli depremlere maruz sismik izolasyonlu yapılarda ÜESS mesnet sisteminin kullanımı TESS ve İESS mesnet sistemlerinin kullanımına kıyasla daha faydalı olacağı görülmektedir.

Tablo 1.2. SSM sistemlerinin periyotlarının karşılaştırılması

	Periyot (s)			
	Sismik İzolasyonlu			Sismik İzolasyonsuz
	TESS	İESS	ÜESS	
1	2.286	2.986	3.219	0.885
2	0.464	0.473	0.482	0.306
3	0.224	0.225	0.228	0.169
4	0.140	0.141	0.159	0.119
5	0.112	0.112	0.158	0.106

Tablo 1.3. SSM sistemlerinin ivme ve yer değiştirmelerinin karşılaştırılması

	TESS		İESS		ÜESS	
	İvme (m/sn ²)	Yer değiştirme (mm)	İvme (m/sn ²)	Yer değiştirme (mm)	İvme (m/sn ²)	Yer değiştirme (mm)
1.kat	4.406	106.30	3.715	139.50	3.713	416.10
2.kat	4.824	117.30	3.696	146.80	3.719	424.90
3.kat	4.374	129.80	4.158	154.60	3.771	424.10
4.kat	4.293	141.60	4.139	161.90	3.670	441.90
5.kat	4.228	152.20	3.870	168.50	3.638	448.30
6.kat	4.949	163.80	4.360	175.40	3.812	454.60
7.kat	5.757	172.30	4.378	180.40	3.920	458.80
8.kat	6.099	177.40	4.356	183.30	4.091	461.20

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Yer Hareketi Modeli

Doktora çalışması kapsamında yapılan stokastik analizlerde, yer hareketi olarak Tablo 2.1'deki deprem kayıtları kullanılmıştır (PEER, 2016). Söz konusu deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 2.1-2.2'de verilmiştir. Bu ivme kayıtları analizi gerçekleştirilecek olan köprü'nün boyuna doğrultusunda uygulanmıştır.

Tablo 2.1 Çalışmada kullanılan yer hareketleri bileşenleri

Deprem	Zemin cinsi	Büyüklik	İstasyon	Bileşen
San Fernando (1971)	Sert	6.61	Pacoima Barajı	PUL164
Imperial Valley-06 (1979)	Yumuşak	7.51	El Centro Array #3	H-E03230

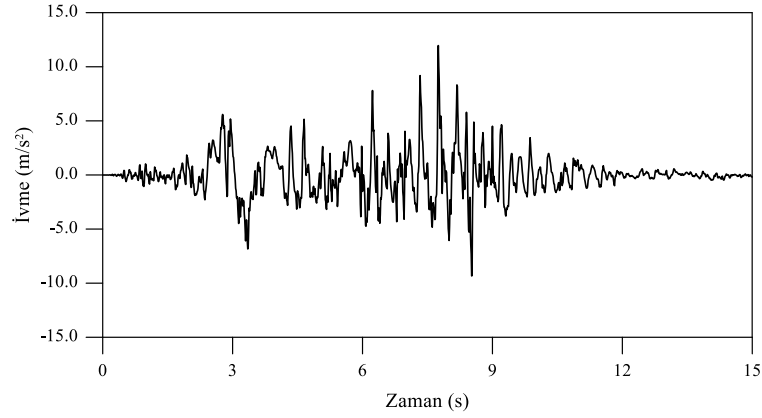
Stokastik analizlerde yapı sisteminin mesnetlerine etkiyen yer hareketi; tutarlılık fonksiyonu ile l ve m mesnet noktaları arasındaki yer hareketi ivmesinin çapraz güç spektral yoğunluk fonksiyonlarına bağlı olarak;

$$S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) = \gamma_{lm}(\omega) \sqrt{S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_l}}(\omega) S_{\ddot{v}_{g_m} \ddot{v}_{g_m}}(\omega)} \quad (2.1)$$

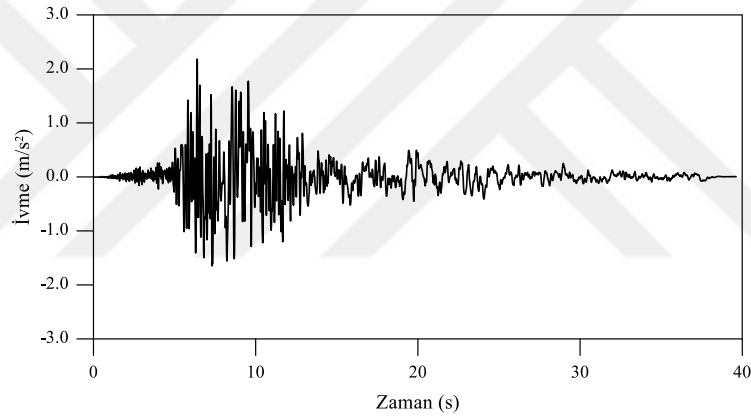
şeklinde tanımlanmaktadır (Oliveira vd., 1991; Abrahamson vd., 1991; Schneider vd., 1992; Abrahamson, 1993; Heredia-Zavoni ve Vanmarcke, 1994). Burada $\gamma_{lm}(\omega)$ tutarlılık (korelasyon) fonksiyonunu göstermektedir. Zeminin homojen olması halinde;

$$S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_l}}(\omega) = S_{\ddot{v}_{g_m} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) = S_{\ddot{v}_g}(\omega) \quad (2.2)$$

olmaktadır. Bu durumda (2.1) denklemi;



Şekil 2.1. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydı



Şekil 2.2. 1979 Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydı

$$S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) = \gamma_{lm}(\omega) S_{\ddot{v}_g}(\omega) \quad (2.3)$$

şekline dönüşebilir. Burada $S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega)$, l ve m mesnet noktaları arasındaki yer hareket ivmelerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ve $S_{\ddot{v}_g}(\omega)$ yer hareket ivmesinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Bu tez çalışmasında, Clough ve Penzien (1993) tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon,

$$S_{\ddot{v}_g}(\omega) = S_0 \left| H_f(\omega) \right|^2 \left| H_g(\omega) \right|^2 \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, S_0 , beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonu genlik değerini $H_f(\omega)$ ve $H_g(\omega)$ zemine ait birinci ve ikinci filtre fonksiyonlarını göstermekte olup,

$$\left| H_f(\omega) \right|^2 = \frac{\omega^4 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \quad (2.5)$$

$$\left| H_g(\omega) \right|^2 = \frac{\omega^4}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \quad (2.6)$$

(2.5) ve (2.6) denklemleri ile hesaplanmaktadır (Hindy ve Novak, 1980; Datta ve Mashaly, 1986; Der Kiureghian ve Neuenhofer, 1991; Alam ve Datta, 1999; 2000). Burada; ω_f , ξ_f ve ω_g , ξ_g sırasıyla birinci ve ikinci filtreye ait doğal frekansı ve sönüm oranını göstermektedir.

Der Kiureghian ve Neuenhofer (1991) tarafından önerilen sert, orta ve yumuşak zemin için filtre parametreleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Çeşitli zemin türleri için spektral yoğunluk fonksiyonu filtre parametreleri

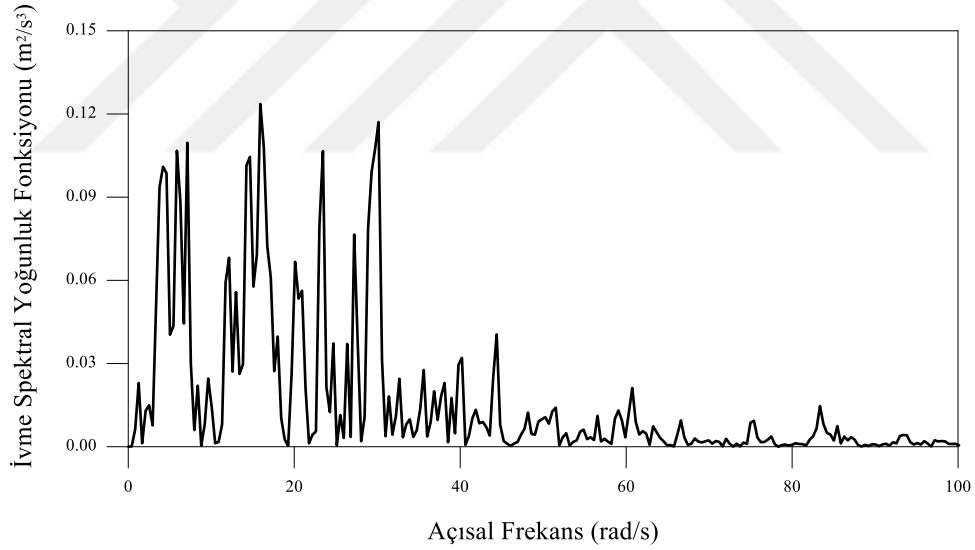
Zemin Cinsi	ω_f (rad/s)	ξ_f	ω_g (rad/s)	ξ_g
Sert	15.0	0.6	1.5	0.6
Orta	10.0	0.4	1.0	0.6
Yumuşak	5.0	0.2	0.5	0.6

Bu tez çalışmasında zemin cinsi olarak sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri seçilmiş olup Der Kiureghian ve Neuenhofer (1991) tarafından önerilen spektral yoğunluk fonksiyonu filtre parametreleri kullanılmıştır.

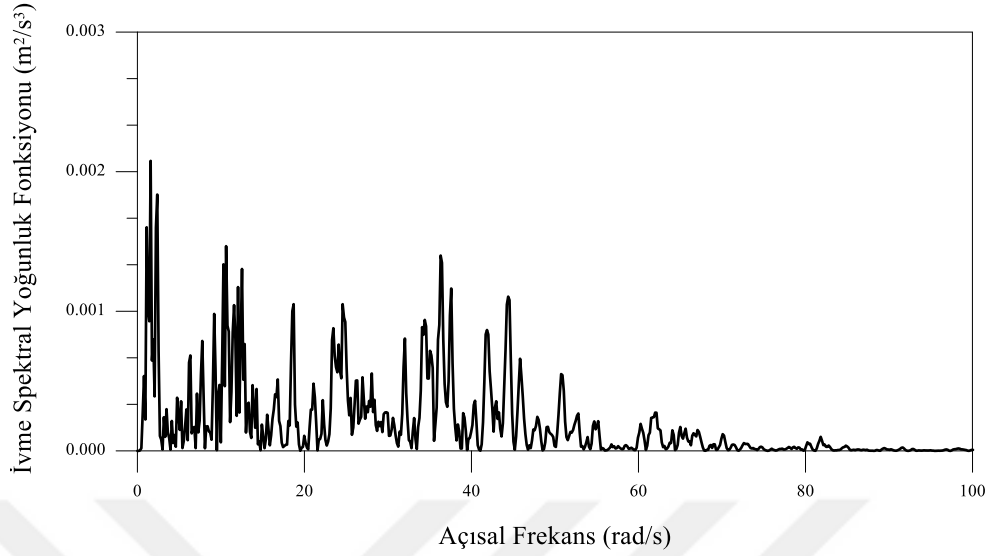
Beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonu genlik değeri, S_0 ,

$$S_0 = \frac{\sigma_{\ddot{v}g}^2}{\int_0^{\infty} |H_f(\omega)|^2 |H_g(\omega)|^2 d\omega} = \frac{\sigma_{\ddot{v}g}^2}{\Phi} \quad (2.7)$$

denklemleri ile elde edilmektedir (Hindy ve Novak, 1980; Datta ve Mashaly, 1986; Der Kiureghian ve Neuenhofer, 1991; Alam ve Datta, 1999; 2000). $\sigma_{\ddot{v}g}^2$, yer hareket ivmesinin varyansını (ivme spektral yoğunluk fonksiyonunun alanını) göstermektedir. Denklem (2.7)'de verilen S_0 , her bir zemin cinsi için yer hareket ivmesinin spektral yoğunluk fonksiyonu, seçilen deprem kayıtlarının enerjisine ayrı ayrı eşitlenerek bulunmaktadır. Tablo 2.1'de verilen deprem bileşenlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.3-2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.3. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydına ait güç ivme spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 2.4. 1979 Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydına ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu

STOCAL-II (Wung ve Der Kiureghian, 1989) bilgisayar programı kullanılarak sert zeminlerde kaydedilen 9 Şubat 1971 San Fernando depreminin ve yumuşak zeminlerde kaydedilen 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 depreminin bileşenlerine ait varyans ifadeleri sırasıyla $\sigma_{\ddot{v}g}^2 = 1.7606 \text{ m}^2/\text{sn}^4$ ve $\sigma_{\ddot{v}g}^2 = 0.02002 \text{ m}^2/\text{sn}^4$ olarak elde edilmiştir.

Der Kiureghian ve Neuenhofer (1991) tarafından önerilen sert, orta ve yumuşak zeminler için Tablo 2.2'deki filtre parametreleri kullanılarak Φ değerleri bu üç farklı türdeki zeminler için Tablo 2.3'deki gibi bulunmuştur.

Denklem (2.7) kullanılarak 9 Şubat 1971 San Fernando depremi bileşeni ve 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 depremi bileşeni varyans değerleri, farklı zemin türleri için elde edilen Φ değerlerine bölünmek suretiyle beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonu genlik, S_0 , değerleri Tablo 2.4'deki gibi elde edilmiştir.

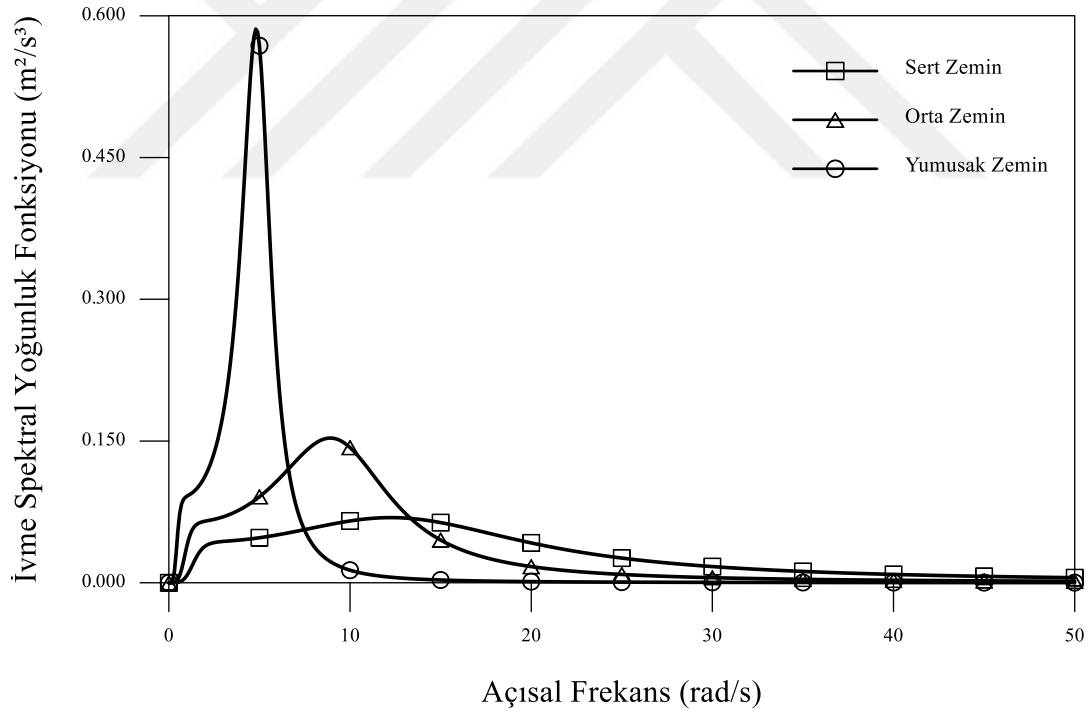
Clough ve Penzien (1993) tarafından önerilen deprem yer hareketi modeli (2.4) denklemi kullanılarak Tablo 2.1'deki deprem kayıtları için hesaplanmış ivme spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.5-2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.3. Çeşitli zemin türleri için hesaplanan Φ değerleri

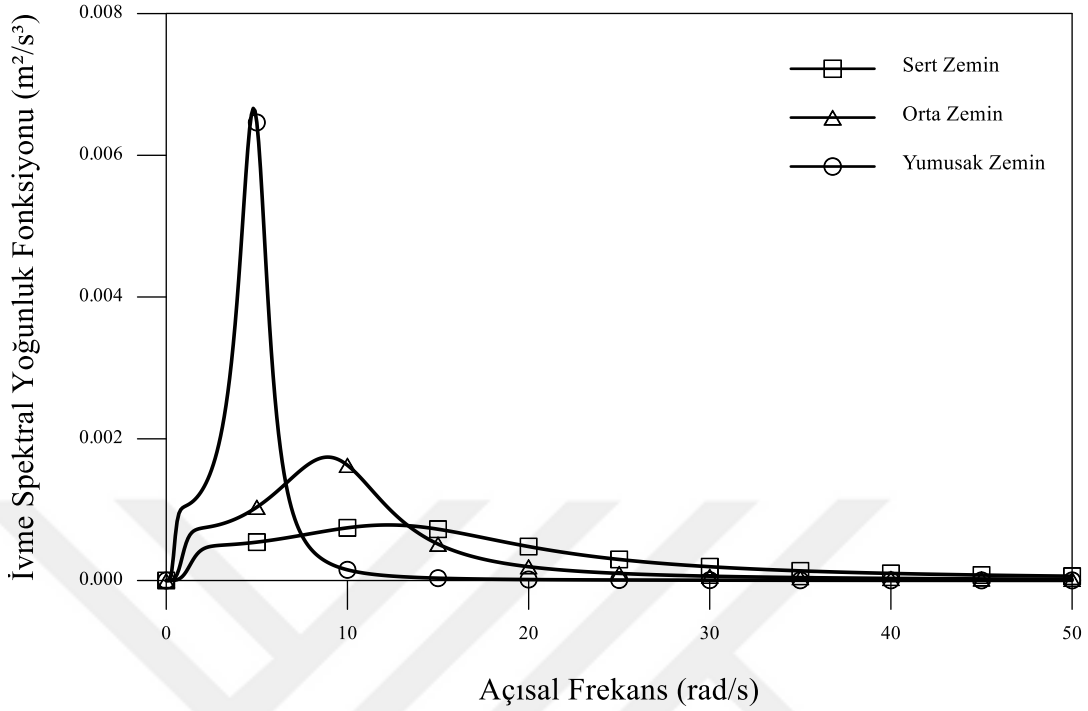
Zemin Cinsi	Φ (1/s)
Sert	47.109
Orta	31.703
Yumuşak	22.581

Tablo 2.4. Çeşitli zemin türleri için hesaplanan beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonu genlik, S_0 , değerleri

Zemin Cinsi	S_0 (m^2/s^3)	
	San Fernando depremi	Imperial Valley-06 depremi
Sert	0.037373	0.000425
Orta	0.055534	0.000631
Yumuşak	0.077968	0.000887



Şekil 2.5. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu



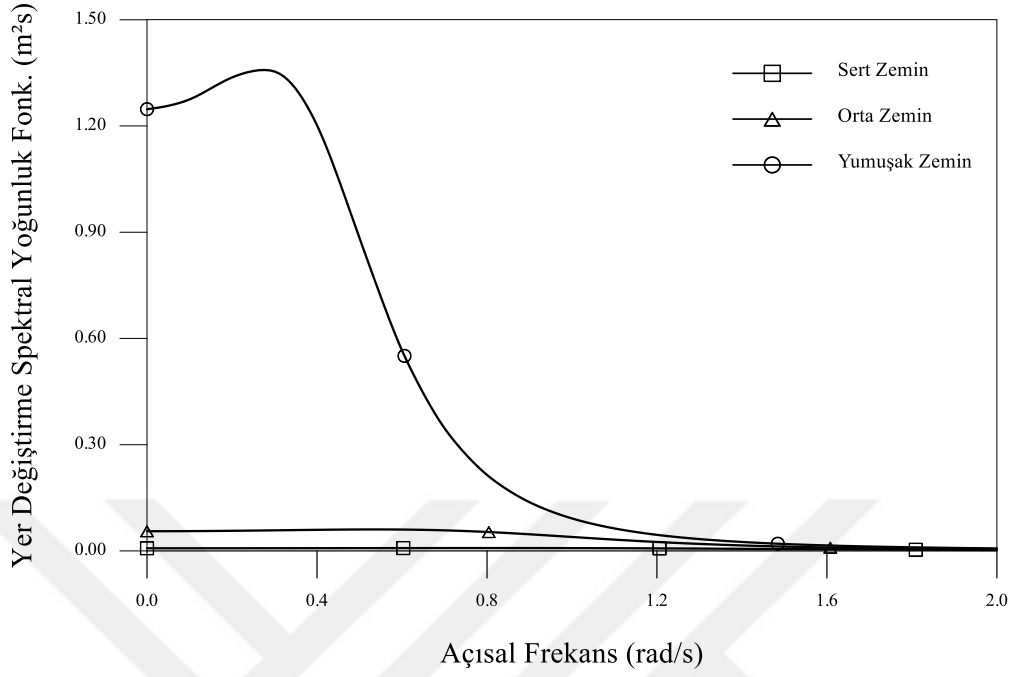
Şekil 2.6. Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu

Yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu ise ivme spektral yoğunluk fonksiyonuna bağlı olarak;

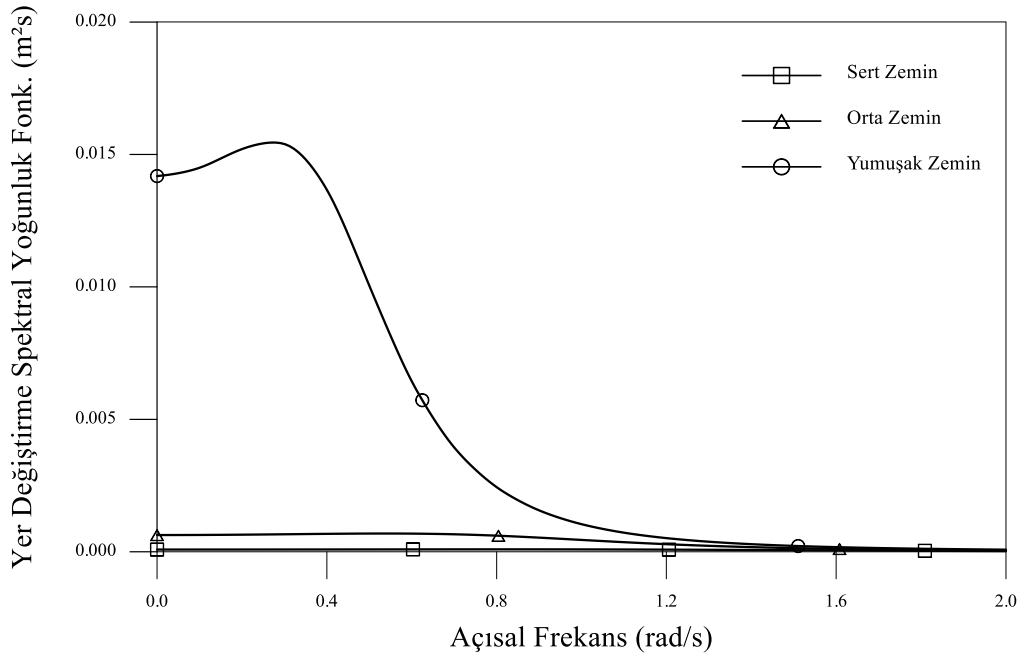
$$S_{v_g} = \frac{S_{\ddot{v}_g}}{\omega^4} \quad (2.8)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Zerva, 1992). Denklem (2.8) kullanılarak elde edilen 9 Şubat 1971 San Fernando ve 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 depremlerin kayıtlarının yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.7-2.8'de verilmiştir.

İvme kayıtlarına ait varyans değeri ivme spektral yoğunluk fonksiyonunun alanından, yer değiştirme varyans değeri ise yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu alanından hesaplanmaktadır.



Şekil 2.7. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 2.8. Imperial Valley-06 depremi El Centro Array #3 istasyonu H-E03230 bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketine ait yer değiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu

(2.1) bağıntısında verilen tutarlılık (korelasyon) fonksiyonu, $\gamma_{lm}(\omega)$, yer hareketi değişimini frekans alanında tanımlamakta olup;

$$\gamma_{lm}(\omega) = \left| \gamma_{lm}(\omega) \right|^k \gamma_{lm}(\omega)^d \gamma_{lm}(\omega)^z = \left| \gamma_{lm}(\omega) \right|^k \exp \left[i \left(\theta_{lm}(\omega)^d + \theta_{lm}(\omega)^z \right) \right] \quad (2.9)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir (Der Kiureghian, 1996). Tutarlılık fonksiyonu boyutsuz ve karmaşık bir ifade olup $0 \leq \left| \gamma_{lm}(\omega) \right| \leq 1$ aralığında değerler almakta ve $\ddot{v}_l(t)$ ve $\ddot{v}_m(t)$ işlemleri arasındaki istatistiksel bağımlılığı ifade etmektedir. $\gamma_{lm}(\omega)=1$, iki işlem arasındaki lineer bağımlılığı, $\gamma_{lm}(\omega)=0$ ise iki işlem arasındaki istatistiksel bağımsızlığı ifade etmektedir. (2.9) bağıntısında $\left| \gamma_{lm}(\omega) \right|^k$ mesnetlere etkiyen yer hareketleri arasındaki korelasyon etkisini, $\gamma_{lm}(\omega)^d$ dalga yayılma etkisini ve $\gamma_{lm}(\omega)^z$ mesnetlerdeki farklı zemin etkisini ifade etmektedir.

2.1.1. Tutarsızlık Etkisi

Tutarsızlık 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 geçmesidir. Bu çalışmada (2.9) bağıntısındaki mesnetlere etkiyen yer hareketleri arasındaki tutarsızlık etkisi, $\left| \gamma_{lm}(\omega) \right|^k$, olarak literatürde kullanılmakta olan iki farklı tutarsızlık modeli dikkate alınmaktadır. Birinci tutarsızlık modeli;

Tayvan'daki SMART-1 deprem kayıtlarının analizi ile Harichandran ve Vanmarcke (1986) tarafından belirlenen tutarsızlık modeli,

$$\left| \gamma_{lm}(\omega) \right|^k = A \exp \left[- \frac{2d_{lm}}{\alpha \theta(\omega)} (1-A+\alpha A) \right] + (1-A) \exp \left[- \frac{2d_{lm}}{\theta(\omega)} (1-A+\alpha A) \right] \quad (2.10)$$

bağıntısı ile tanımlanmaktadır. Burada d_{lm} mesnetler arasındaki mutlak yatay uzaklığı göstermektedir. Ayrıca $\theta(\omega)$ ise,

$$\theta(\omega) = k \left[1 + \left(\frac{\omega}{2\pi f_0} \right)^b \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

şeklinde açıklanmaktadır. (2.10) ve (2.11) denklemlerinde A , α , k , f_0 ve b ampirik sabitlerdir. Bu sabitler, $A=0.636$; $\alpha=0.0186$; $k=31200$; $f_0=1.51$ Hz. ve $b=2.95$ olarak Harichandran vd. (1996) tarafından önerilmektedir. Bu çalışmada da bu değerler kullanılmaktadır. İkinci tutarsızlık modeli; rastgele ortamda kayma dalgalarının yayılmalarını dikkate alınarak belirlenen ve Uscinski (1977) tarafından geliştirilen tutarsızlık modeli olup;

$$|\gamma_{lm}(\omega)|^k = \exp \left[\left(\frac{\alpha d_{lm} \omega}{v_s} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Bu model ilk defa Luco ve Wong (1986) tarafından kullanıldığı için literatürde genellikle Luco ve Wong modeli olarak bilinmektedir. (2.12) bağıntısında α boyutsuz bir tutarsızlık parametresini, v_s kayma dalgası hızını

göstermektedir. Bu çalışmada $\frac{\alpha}{v_s} = 2 \times 10^{-4} \text{ s/m}$ değeri kullanılmaktadır (Luco ve Wong,

1986; Luco ve Mita, 1987). Harichandran ve Vanmarcke (1986) tarafından önerilen tutarsızlık modelinde açısal frekansın sıfır değeri için dahi kısmi tutarsızlık söz konusu olmaktadır. Uscinski (1977) tutarsızlık modelinde ise, düşük frekanslarda tam tutarsızlık gözlenmektedir. Ayrıca, tutarsızlık etkisi frekansın ve mesafenin artması ile azalmaktadır.

Uniform yer hareketinde, tutarsızlık etkisi tüm frekans ve mesafeler için $|\gamma_{lm}(\omega)|^k = 1$ alınmaktadır.

2.1.2. Dalga Yayılma Etkisi

(2.9) bağıntısında yer hareketinin dalga yayılma etkisi;

$$\gamma_{lm}(\omega)^d = \exp^{i\theta_{lm}(\omega)^d} \quad (2.13)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Burada;

$$\theta_{lm}(\omega)^d = -\frac{\omega d_{lm}^L}{V_{app}} \quad (2.14)$$

olarak tanımlanmaktadır. Dalga yayılma etkisi; deprem hareketinin yapının bir mesnetinden diğerine ulaşmaya kadar geçen zaman farkından kaynaklanmaktadır (Zerva, 1991; Zerva, 1999). (2.14) bağıntısında V_{app} görünen dalga yayılma hızını, d_{lm}^L dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay iz düşüm uzaklığını göstermektedir.

2.1.3. Yerel Zemin Etkisi

(2.9) denklemindeki yerel zemin etkisi;

$$\gamma_{lm}(\omega)^z = \exp^{i\theta_{lm}(\omega)^z} \quad (2.15)$$

ile ifade edilmektedir. Burada;

$$\theta_{lm}(\omega)^z = \tan^{-1} \frac{\text{Im} [H_l(\omega) H_m(-\omega)]}{\text{Re} [H_l(\omega) H_m(-\omega)]} \quad (2.16)$$

ile tanımlanmaktadır. Zemin etkisi farklı mesnet noktalarındaki yerel zemin şartlarının farklılığından kaynaklanmaktadır (Der Kiureghian, 1996; Der Kiureghian vd., 1997).

$H_l(\omega)$ ve $H_m(-\omega)$ l ve m mesnetlerindeki filtre davranış fonksiyonlarını, Im ve Re sırasıyla fonksiyonun sanal ve reel kısımlarını göstermektedir. l mesnedindeki zemin filtre fonksiyonu için;

$$H_l(\omega) = \frac{\omega_l^2 + 2i\xi_l\omega_l\omega}{\omega_l^2 - \omega^2 + 2i\xi_l\omega_l\omega} \quad (2.17)$$

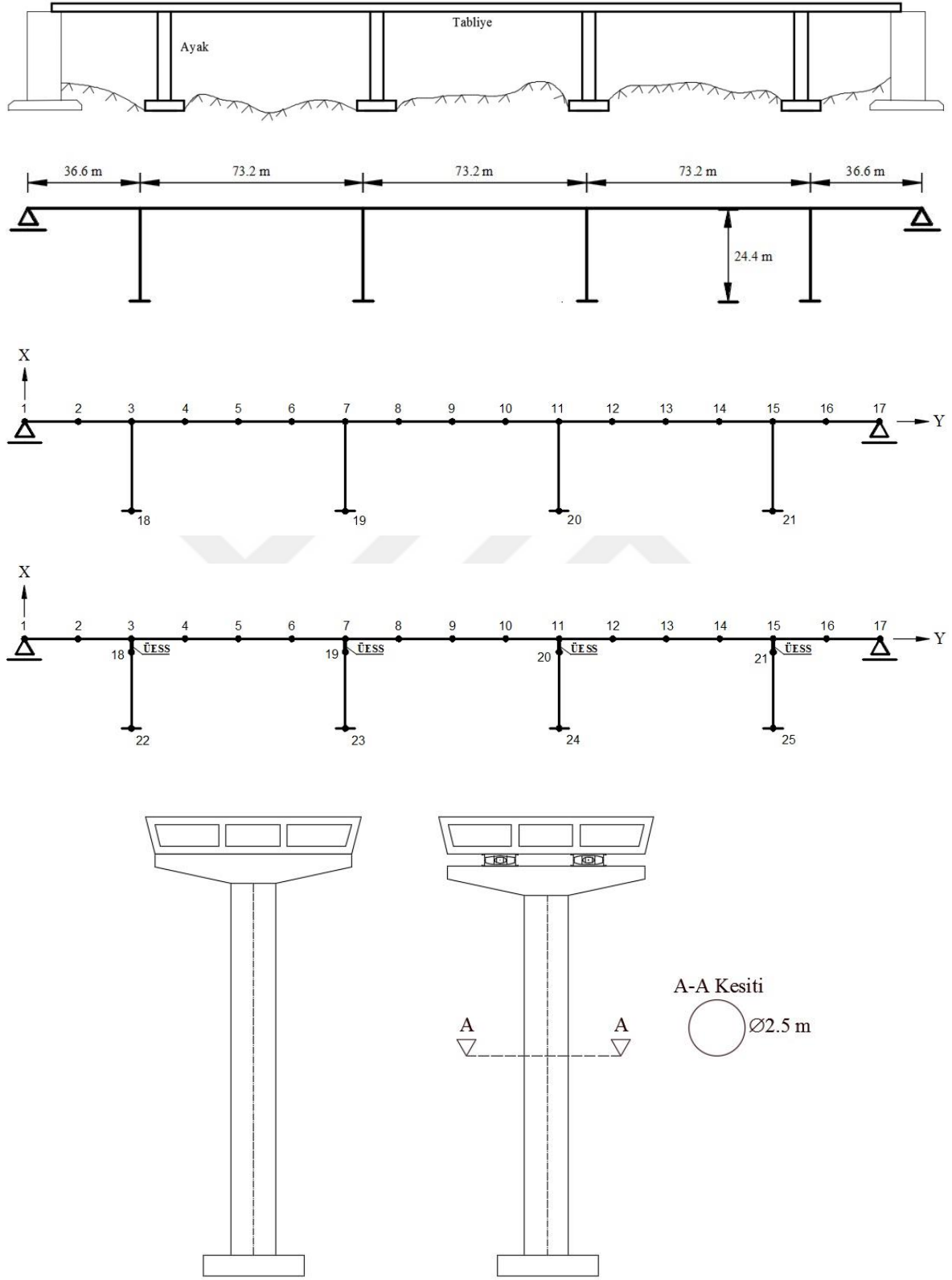
bağıntısı kullanılmaktadır. Burada ω_l ve ξ_l , sırasıyla l mesnedindeki filtreye ait doğal frekans ve sönüm oranını göstermektedir. Zemin özellikleri arasındaki farklılık arttıkça zemin özellikleri daha etkili olmaktadır. Ayrıca, farklı mesnetlerde zemin cinslerinin aynı olması durumunda zemin etkisi bire eşit olacaktır.

Köprüler gibi uzun açıklıklı yapı sistemlerine ait açısal frekansların 5-15 rad/sn arasında önemli modlara sahip olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, köprü tipindeki mühendislik yapılarının dinamik analizlerinde göz önüne alınan yer hareket modelleri zemin etkisini içermelidir.

2.2. Karayolu Köprüsünün Yapısal Özellikleri

Bu çalışmada uygulama olarak Ateş (2004) tarafından kullanılmış olan bir karayolu köprü modeli seçilmiştir. Köprü; beş açıklıktan oluşmakta olup toplam uzunluğu 292.8 m.'dir. Kenar açıklıkları 36.6 m., orta açıklıkları ise 73.2 m.'dir. Köprü ayakları 24.4 m. yüksekliğinde dairesel kesitli olup çapı 2.5 m.'dir. Köprü tabliyesi kutu kesitlidir. İzolasyonsuz durumdaki iki boyutlu köprü modelinin 21 düğüm noktası bulunmaktadır. İzolasyonlu olması durumunda ise iki boyutlu köprü modelinin 25 düğüm noktası ve 4 adet ÜESS mesnet sistemi bulunmaktadır (Şekil 2.9).

Seçilen iki boyutlu analitik model, izolasyonsuz durumda 53 izolasyonlu durumda 61 serbestlik derecesi ile temsil edilmektedir. Köprü elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri Tablo 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.9. Analizlerde kullanılan karayolu köprüsünün iki boyutlu analitik modeli

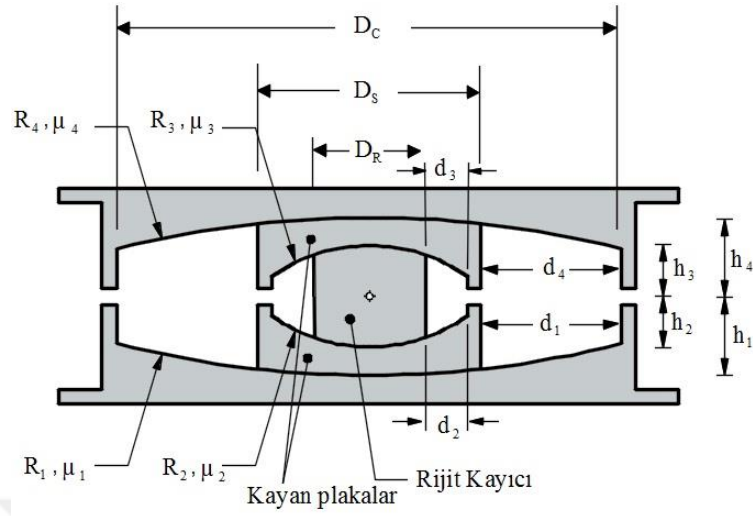
Tablo 2.5. Karayolu köprüsünün elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri

Eleman	Değişken	Değer
Tabliye	Elastisite Modülü (E)	32000000 kN/m ²
	Kesit alanı (A)	6.9000 m ²
	Düşey eğilmedeki atalet momenti (I ₃₃)	4.2459 m ⁴
	Yanal eğilmedeki atalet momenti (I ₂₂)	79.1824 m ⁴
	Burulma atalet momenti (I ₁₁)	14.1824 m ⁴
	Poisson oranı (ν)	0.25
	Birim ağırlığı (γ _c)	25 kN/m ³
	Birim boyunun ağırlığı (W _c)	165.60 kN/m
Ayaklar	Elastisite Modülü (E)	32000000 kN/m ²
	Kesit alanı (A)	4.9087 m ²
	Düşey eğilmedeki atalet momenti (I ₃₃)	1.9175 m ⁴
	Yanal eğilmedeki atalet momenti (I ₂₂)	1.9175 m ⁴
	Burulma atalet momenti (I ₁₁)	3.835 m ⁴
	Poisson oranı (ν)	0.25
	Birim ağırlığı (γ _c)	25 kN/m ³
	Birim boyunun ağırlığı (W)	122.75 kN/m

2.3. ÜESS Mesnedinin Tasarımı

2.3.1. ÜESS Mesnedinin Geometrik Özelliklerinin Belirlenmesi

ÜESS mesnedinin toplam 16 adet parametresi vardır. Bunlardan 12 tanesi geometrik 4 tanesi sürtünme parametreleridir. Bu değerlerin bir optimizasyon çalışmasında belirlenmesi çok zordur. Ekonomi ve güvenilirlik için en iyi olanı daha önce denenmiş ve kullanılmış standart mesnet parametrelerini ve biçimlerini kullanmaktır. Bu nedenle en iyi yol, ÜESS mesnedini üreten firma ile iletişime geçerek uygulamaya yönelik olan en uygun mesnet biçimlerini talep etmektir. Daha sonra mühendis talep karşılığında gönderilenler arasında bir değerlendirme yaparak uygun mesnedi belirler. Tez çalışmada Constantinou vd. (2011) tarafından tanımlanan bir örnek tasarım kullanılarak Şekil 2.10'da görülen ÜESS mesnet sisteminin parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Genelde $R_1=R_4$ ve $R_2=R_3$ olarak belirlenir. Bununla birlikte genelde yer değiştirme kapasitelerinde de $d_1=d_4$ ve $d_2=d_3$ olarak seçilmiştir.



Şekil 2.10. ÜESS mesnet sistemi parametreleri

Sürtülmeli sarkaç mesnetlerinin konkav plakalarının tipik geometrileri Tablo 2.6’da verilmektedir. Tablo 2.6’da verilen geometriler bir, iki ve üç eğrilikli sürtülmeli sarkaç mesnet sistemlerinde kullanılırlar. Genelde $R_1=R_4$ olan konkav plakaların yarıçapı 2235 mm. veya 3048 mm. olarak seçilir. Ancak kullanılan deprem ve köprü ayaklarının farklı zeminlere mesnetlenmesi durumunda yer değiştirme büyük olduğu için bu yüzeylerin yarıçapları 3092 mm. olarak seçilmiştir. Zira daha büyük yarıçap seçilmesi durumunda denklem (2.18)’e göre tasarım depremi için kontrol edildiğinde tekrar merkezlenme kuvveti büyük ihtimalle yetersiz olacaktır.

$$T \leq 28 \left(\frac{0.05}{\mu} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{D}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

Burada; μ karakteristik dayanımın izolatör üzerine gelen düşey yüke oranını göstermektedir. D ise tasarım yer değiştirmesini göstermektedir. Başlangıç olarak konkav plakaların çapı D_C 1778 mm. seçilmiştir (Tablo 2.6). Basitleştirilmiş prosedüre dayanan hesaplamalar bu boyutun yeterli olduğunu göstermektedir. Bu çap dinamik analizlere göre daha büyük veya daha küçük seçilebilir. Seçilen çaplar istenilen sürtünme özelliklerine ve mesnedin üzerindeki düşey yüke bağlı olarak değiştirilebilir. Çalışmada $W_1=9094$ kN ve

$W_2=12122$ kN olan yüklere göre boyutlandırma yapılacaktır. Kayıcıların çapları (Şekil 2.10) $D_S=584$ mm. ve $D_R=457$ mm. olarak seçilmiştir.

Tablo 2.6. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin konkav plakalarının tipik geometrileri

Konkav Plakaların Standart Boyutları	
Eğrilik Yarı Çapı, mm	Konkav Yüzeyin Çapı, mm
1555	356
	457
	559
	787
	914
2235	686
	787
	914
	991
	1041
	1118
	1168
	1295
3048	1422
	686
3962	1422
	1600
	1778
	2692
6045	3150
	1981
	2388
	2692
	3327
	3632

Kayıcılarının yükseklikleri $h_1+h_4=406$ mm. ve $h_2+h_3=305$ mm. olarak seçilmiştir. Bu değerler üretici firma ile görüşülerek farklı boyutlarda da üretilebilmektedir. Ancak bu değerlerin mesnedin davranışına etki etmeyeceği için tekrar hesaplanmasına gerek yoktur.

Mesnedin 1 ve 4 yüzeylerinin eğrilik yarıçapı (R_1 ve R_4) 3962 mm., 2 ve 3 yüzeylerinin eğrilik yarıçapı (R_2 ve R_3) 1555 mm., 1 ve 4 plakalarının yükseklikleri (h_1 ve h_4) 203 mm., 2 ve 3 plakalarının yükseklikleri (h_2 ve h_3) 152 mm. olarak seçilmiştir. Denklem (2.19) ile i . yüzeydeki gerçek yer değiştirme kapasitesi belirlenmektedir.

$$d_i^* = d_i \frac{R_{effi}}{R_i} \quad (2.19)$$

Burada d_i^* i . yüzeydeki gerçek yer değiştirme kapasitesini, d_i i . yüzeyin yer değiştirme kapasitesini, R_{effi} i . yüzeyin etkili eğrilik yarıçapını, R_i i . yüzeyin eğrilik yarıçapını göstermektedir.

Seçilen boyutlar için 1. ve 4. yüzeylerin gerçek yer değiştirme kapasitesi 566 mm ve 2. ve 3. yüzeylerin gerçek yer değiştirme kapasitesi 57 mm olarak belirlenmiştir.

2.3.2. ÜESS Mesnedinin Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi

İzolatörün taşıdığı ağırlığın 9091 kN olması durumunda sürtünme katsayıları aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

Mesnedin 1. ve 4. yüzeylerindeki mesnet basıncı denklem (1.84) kullanılarak 33894 kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Mesnedin 1. ve 4. yüzeylerindeki üç döngülü sürtünme katsayısı (k_{3ds}) denklem (1.85) kullanılarak 0.073 olarak elde edilmiştir. Yüksek hıza göre ayarlama yapıldığında alt sınır sürtünme katsayısı (k_{ass}) 0.058 olarak belirlenmiştir. Mesnedin 1 ve 4 yüzeylerindeki birinci döngüdeki sürtünme katsayısı (k_{1ds}) denklem (1.86) kullanılarak 0.069 olarak bulunmuştur. Mesnedin 1. ve 4. yüzeylerindeki üst sınır sürtünme katsayısı ($k_{üss}$) denklem (1.87) kullanılarak 0.096 olarak elde edilmiştir.

Yukarıdaki ilgili denklemler kullanılarak mesnedin 2. ve 3. yüzeylerindeki mesnet basıncı 55425 kN/m^2 , k_{3ds} 0.042, k_{ass} 0.037, k_{1ds} 0.044 ve $k_{üss}$ 0.061 olarak elde edilmiştir.

İzolatörün taşıdığı ağırlığın 12122 kN olması durumunda sürtünme katsayıları aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

Mesnedin 1. ve 4. yüzeylerdeki mesnet basıncı denklem (1.84) kullanılarak 45192 kN/m^2 bulunmuştur. Mesnedin 1. ve 4. yüzeylerindeki k_{3ds} denklem (1.85) kullanılarak 0.056 olarak bulunmuştur. Yüksek hıza göre ayarlama yapıldığında k_{ass} 0.041 olarak belirlenmiştir. Mesnedin 1. ve 4. yüzeylerindeki k_{1ds} denklem (1.86) kullanılarak 0.050 olarak bulunmuştur. Mesnedin 1 ve 4 yüzeylerinin $k_{üss}$ denklem (1.87) kullanılarak 0.069 olarak elde edilmiştir.

Yukarıdaki ilgili denklemler kullanılarak mesnedin 2. ve 3. yüzeylerindeki mesnet basıncı 73901 kN/m^2 , $3d_{sk} 0.015$, $k_{ass} 0.010$, $k_{lds} 0.012$ ve $k_{üss} 0.016$ olarak elde edilmiştir.

Birleştirilmiş sistemin sürtünme katsayıları sürtünmelerin ağırlıklı ortalamaları ile denklem (2.20) ile elde edilmektedir.

$$\mu_{ib} = \frac{2W_1\mu_{1i} + 2W_2\mu_{2i}}{2W_1 + 2W_2} \quad (2.20)$$

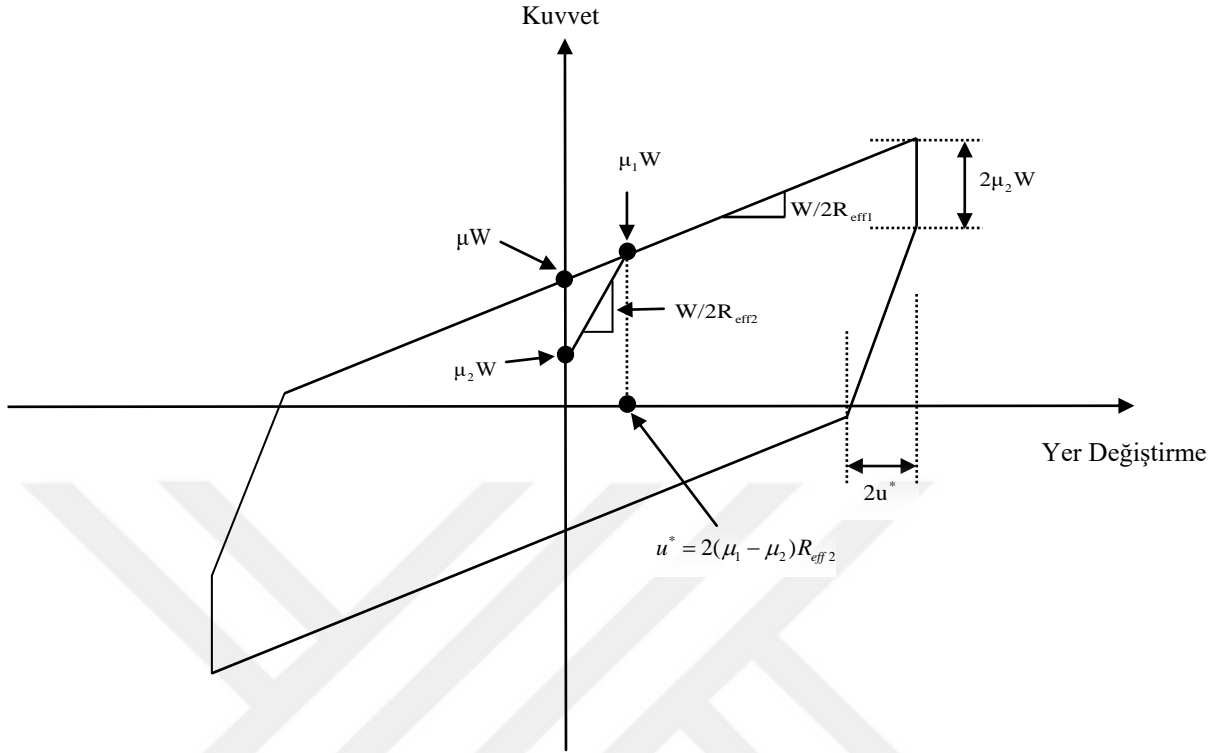
Burada; μ_{ib} birleştirilmiş durumdaki i. yüzeyin sürtünme katsayısını, μ_{1i} düşey yükün W_1 olduğunda i. yüzeydeki sürtünme katsayısını ve μ_{2i} düşey yükün W_2 olduğunda i. yüzeydeki sürtünme katsayısını göstermektedir. İki farklı yük durumunda ve birleştirilmiş durumdaki mesnetlerin özellikleri Tablo 2.7’de verilmektedir.

Tablo 2.7’deki μ , yer değiştirmenin sıfır olduğu durumda kuvvetin normal yüke bölünmesi ile elde edilen değer olup Şekil 2.11’de gösterilmektedir. μ değeri denklem (2.21) ile elde edilmektedir.

$$\mu = \mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \quad 2.21$$

Tablo 2.7. Tüm durumlardaki izolatörlerin özellikleri

Özellik	$W_1=9094 \text{ kN}$	$W_2=12122 \text{ kN}$	Birleştirilmiş sistem
$R_{eff1}=R_{eff4} \text{ (mm)}$	3759	3759	3759
$R_{eff2}=R_{eff3} \text{ (mm)}$	1403	1403	1403
$d_1^*=d_4^* \text{ (mm)}$	566	566	566
$d_2^*=d_3^* \text{ (mm)}$	58	58	58
$\mu_1=\mu_4$ Alt sınır	0.058	0.041	0.048
$\mu_2=\mu_3$ Alt sınır	0.037	0.010	0.021
μ Alt sınır	0.050	0.030	0.038
$\mu_1=\mu_4$ Üst sınır	0.096	0.069	0.081
$\mu_2=\mu_3$ Üst sınır	0.061	0.016	0.035
μ Üst sınır	0.083	0.049	0.064



Şekil 2.11 Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin (yükleme döngüsü) şematik gösterimi

ÜESS mesnet sisteminin efektif sürtünme katsayısı aşağıda verilen denklem (2.22) ile elde edilmektedir.

$$\mu_e = \frac{\mu_1(R_1 - h_1) + \mu_2(R_2 - h_2) + \mu_3(R_3 - h_3) + \mu_4(R_4 - h_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - h_1 - h_2 - h_3 - h_4} \quad (2.22)$$

Denklem (2.22)'den W_1 ve W_2 düşey yükleri için izolatörlerin efektif sürtünme katsayıları sırasıyla 0.087 ve 0.055 olarak elde edilmiştir.

2.3.3. ÜESS Mesnedinin Rijitliği

Sistemin kayma esnasındaki rijitliği, kaymanın gerçekleştiği yüzeye ve taşıdığı ağırlığa bağlı olarak (1.91) denklemi ile hesaplanmaktadır. İzolatörün eşdeğer rijitliği Scheller ve Constantinou (1992) tarafından elde edilen (1.92) denklemi ile elde

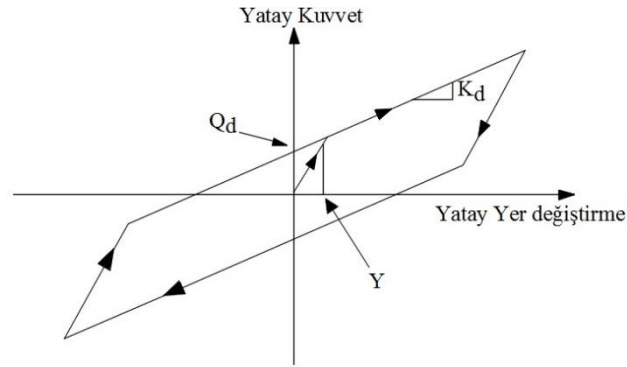
edilmektedir. İzolatörün kaymaya başlamadan önceki rijitliği ise (1.93) ile elde edilmektedir.

2.3.4. ÜESS Mesnedinin Yer Değiştirme Kapasitesinin Belirlenmesi

ÜESS mesnet sisteminin yer değiştirme kapasitesinin belirlenmesi için tasarım depreminde tek modlu hesap yöntemi, spektrum analizi ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemleri kullanılmıştır (Constantinou vd., 2011). Analizler SAP2000 (Computers and Structures Inc. 2007) programında gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak ÜESS mesnet sistemine izin verilen yer değiştirme kapasitesi belirlenmiştir.

Tek modlu hesap yöntemi kullanılarak yürütülen analizler tasarım depremine göre yapılmaktadır. Üst sınır durumu için izolasyonlu sistemin bilineer histeretik modeli kullanılarak yürütülen analiz prosedürü aşağıda verilmiştir.

Sistemin yükleme döngüsü Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Şekildeki K_d elastik sonrası rijitliği, Q_d karakteristik dayanımı, Y ise akma yer değiştirmesini göstermektedir.



Şekil 2.12 Sistemin yükleme döngüsü

Elastik sonrası rijitlik, K_d , denklem (2.23) ile ifade edilmektedir.

$$K_d = \frac{W}{2R_{eff1}} \quad (2.23)$$

Elastik sonrası rijitlik 10441 kN/m olarak elde edilmiştir. Karakteristik dayanım, Q_d , denklem (2.24) ile verilmektedir.

$$Q_d = \mu W \quad (2.24)$$

Burada μ birleştirilmiş sistemin sürtünme katsayısını, W ise izolatörlerin üzerine gelen toplam düşey yükü göstermektedir. (2.24) ifadesi kullanılarak karakteristik dayanım 2705 kN olarak bulunmuştur. Akma yer değiştirmesi, Y , denklem (2.25) ile verilmektedir.

$$Y = (\mu_1 - \mu_2) R_{\text{eff}2} \quad (2.25)$$

Akma yer değiştirmesi (2.25) ifadesi ile 0.0634 m. olarak elde edilmiştir.

Tek modlu hesap yönteminde izolatörün yer değiştirmesi aşağıda tanımlanan tekrarlı yöntem ile tahmin edilebilmekte ve Şekil 2.13'deki akış diyagramında gösterilmektedir.

- 1) İzolatörün yer değiştirmesi, $D_D = 0.278$ m. seçilmiştir.
- 2) Efektif rijitlik denklem (2.26) ile elde edilmektedir.

$$K_{\text{eff}} = K_d + \frac{Q_d}{D_D} \quad (2.26)$$

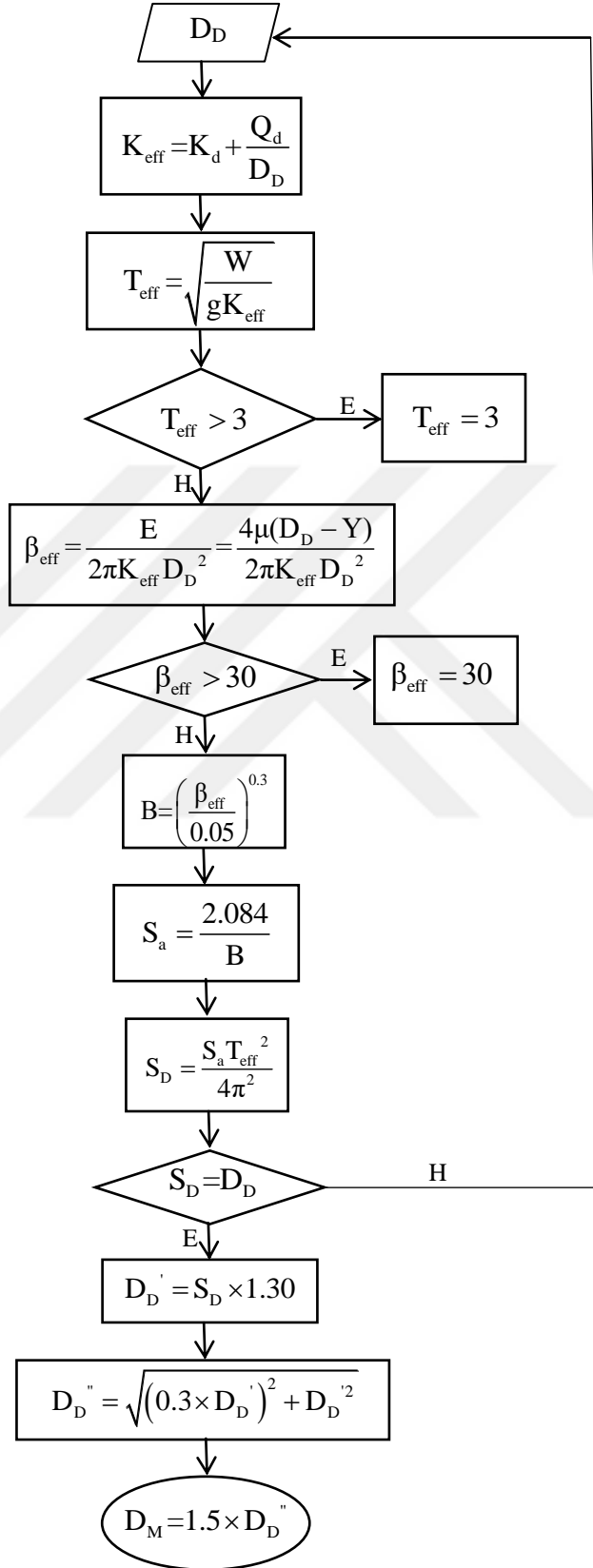
denklem (2.26) ile efektif rijitlik 15375 kN/m olarak bulunmuştur.

- 3) Efektif periyot denklem (2.27) ile elde edilmektedir.

$$T_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{W}{gK_{\text{eff}}}} \quad (2.27)$$

denklem (2.27) ile efektif periyot 3.0 s olarak bulunmuştur.

- 4) Efektif sönüm denklem (2.28) ile elde edilmektedir.



Şekil 2.13 Tek modlu hesap yöntemi akış diyagramı

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{E}{2\pi K_{\text{eff}} D_D^2} = \frac{4\mu(D_D - Y)}{2\pi K_{\text{eff}} D_D^2} \quad (2.28)$$

Denklem (2.28) ile efektif sönüm 0.311 olarak bulunmuştur. Fakat tekrar merkezlenmenin olabilmesi için tasarım depreminde efektif sönüm 0.30 ile sınırlandırılmıştır.

5) Sönüm azaltma faktörü denklem (2.29) ile verilmektedir.

$$B = \left(\frac{\beta_{\text{eff}}}{0.05} \right)^{0.3} \quad (2.29)$$

Denklem (2.29) ile sönüm azaltma faktörü 1.712 olarak bulunmuştur.

6) %5 sönüm için 9 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni kaydının tepki spektrumu elde edilmiştir (Şekil 2.13). Tepki spektrumunda efektif periyoda karşılık gelen değer 2.084 m/s^2 olarak bulunmuştur. Denklem (2.30) ile tasarım ivme yer değiştirmesi belirlenmektedir.

$$S_D = \frac{S_a T_{\text{eff}}^2}{4\pi^2 B} \quad (2.30)$$

Tasarım ivme yer değiştirmesi, S_D , 0.272 m. olarak bulunmuştur.

Benzer şekilde alt sınır durumuna göre izolasyonlu sistemin bilinear histeretik modeli kullanılarak tekrarlı yöntem yapılmıştır. Tek modlu hesap yöntemi ile alt sınır ve üst sınır durumu için kullanılan izolatör özellikleriyle elde edilen analiz sonuçları Tablo 2.8'de verilmiştir.

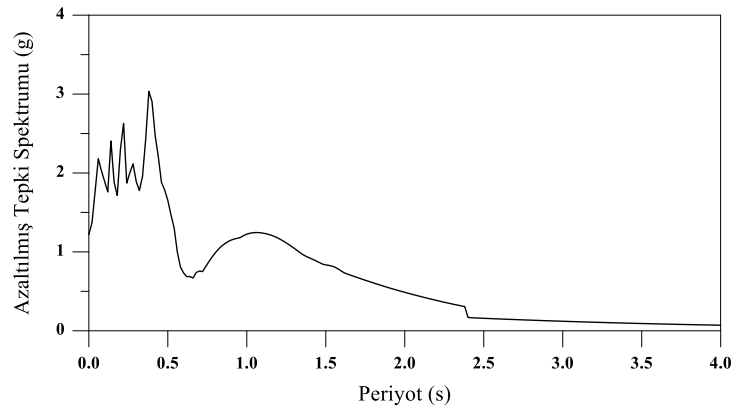
Tablo 2.8 Tek modlu hesap yöntemi ile elde edilen değerler

	Tasarım esaslı deprem		Düşünülen en büyük deprem	
	Alt sınır	Üst sınır	Alt sınır	Üst sınır
ÜESS Yer değiştirme (mm)	284	278	578	565
β_{eff}	%28	%30	%28	%30

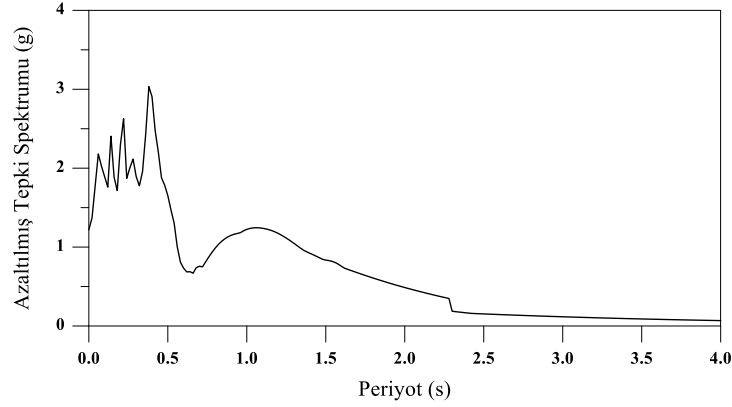
Spektrum analiz yöntemi genelde tepki spektrum analizi yapabilen bir bilgisayar programında yapılmaktadır. Her bir izolatör tek modlu hesap yöntemine dayanarak hesaplanan etkili yatay rijitlikler ile temsil edilmektedir. Bir sönüm oranına göre tepki spektrumu elde etmek, orijinal tepki spektrumundan farklıdır. Bunun için denklem (2.35) kullanılmaktadır (ASCE 41-06 denklem 1.13).

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln(100\beta_{\text{eff}})} \quad (2.35)$$

Burada β_{eff} etkili sönüm katsayısını, B ise %5 sönümlü spektrum eğrisini çarpan katsayısını göstermektedir. Burada tek modlu hesap yönteminden elde edilen β_{eff} ve T_{eff} değerleri kullanılmaktadır. β_{eff} değerleri alt sınır ve üst sınır için sırasıyla %28 ve %30 olarak tek modlu hesap yönteminden elde edilmiştir. Denklem (2.35) kullanılarak çarpım faktörü B alt sınır ve üst sınır için sırasıyla 1.759 ve 1.819 olarak bulunmuştur. Değiştirilmiş tepki spektrum oranları sadece izolasyon modları için kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle $0.8T_{\text{eff}}$ değerinden daha büyük periyotlar için %5 sönümlü spektrumun ordinatları B değeri ile azaltılmaktadır. Azaltılmış spektrum eğrileri alt sınır ve üst sınır durumları için Şekil 2.14-2.15'de gösterilmiştir. 9 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni kaydının %5 sönümlü tepki spektrumu kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarında izolatörün en büyük yer değiştirmesinin 314 mm. olduğu görülmüştür.



Şekil 2.14 Alt sınır durumu için azaltılmış tepki spektrumu



Şekil 2.15 Üst sınır durumu için azaltılmış tepki spektrumu

Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemi; sistem stabilite kontrolü ve yapısal elemanların performansının değerlendirilmesi yanı sıra izolatörün maksimum yer değiştirmesinin tahmini için de kullanılmaktadır. Zaman tanım alanında analiz yönteminde 9 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonunun PUL164 bileşeni kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında izolatörün en büyük yer değiştirmesinin 400 mm. olduğu görülmüştür.

ÜESS mesnet sisteminde yer değiştirme kapasitesinin belirlenmesi için tasarım depreminde tek modlu hesap yöntemi, spektrum analizi ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonuçlarında izolatörün maksimum yer değiştirmesinin 578 mm. olduğu belirlenmiştir. Bu yer değiştirme kapasitesi, izolatörün maksimum yer değiştirme kapasitesinden küçük olduğu için seçilen izolatör boyutlarının yeterli olduğunu göstermiştir.

2.4. Modal Analiz

Dinamik analizlerde yapının davranışını tam olarak belirlemek için yeterli sayıda mod sayısının dikkate alınması gerekmektedir. Binalarda ilk üç mod, Barajlarda ise ilk altı modun dikkate alınması yeterli olmaktadır. Köprü gibi yapılar değişik davranış gösterdikleri için diğer yapılara göre fazla mod sayısının dikkate alınması gerekmektedir (Dumanoglu ve Severn, 1987). Bu nedenle çalışmada ilk 15 mod dikkate alınmıştır.

Çalışmada sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz karayolu köprüsünün iki boyutlu modeli SVEM programında oluşturularak stokastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprü SAP2000 programında modellenerek analizi yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonuçlarında elde edilen ilk 15 modun periyotları Tablo 2.9’da gösterilmiştir.

Tablo 2.9. Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprünün periyotları

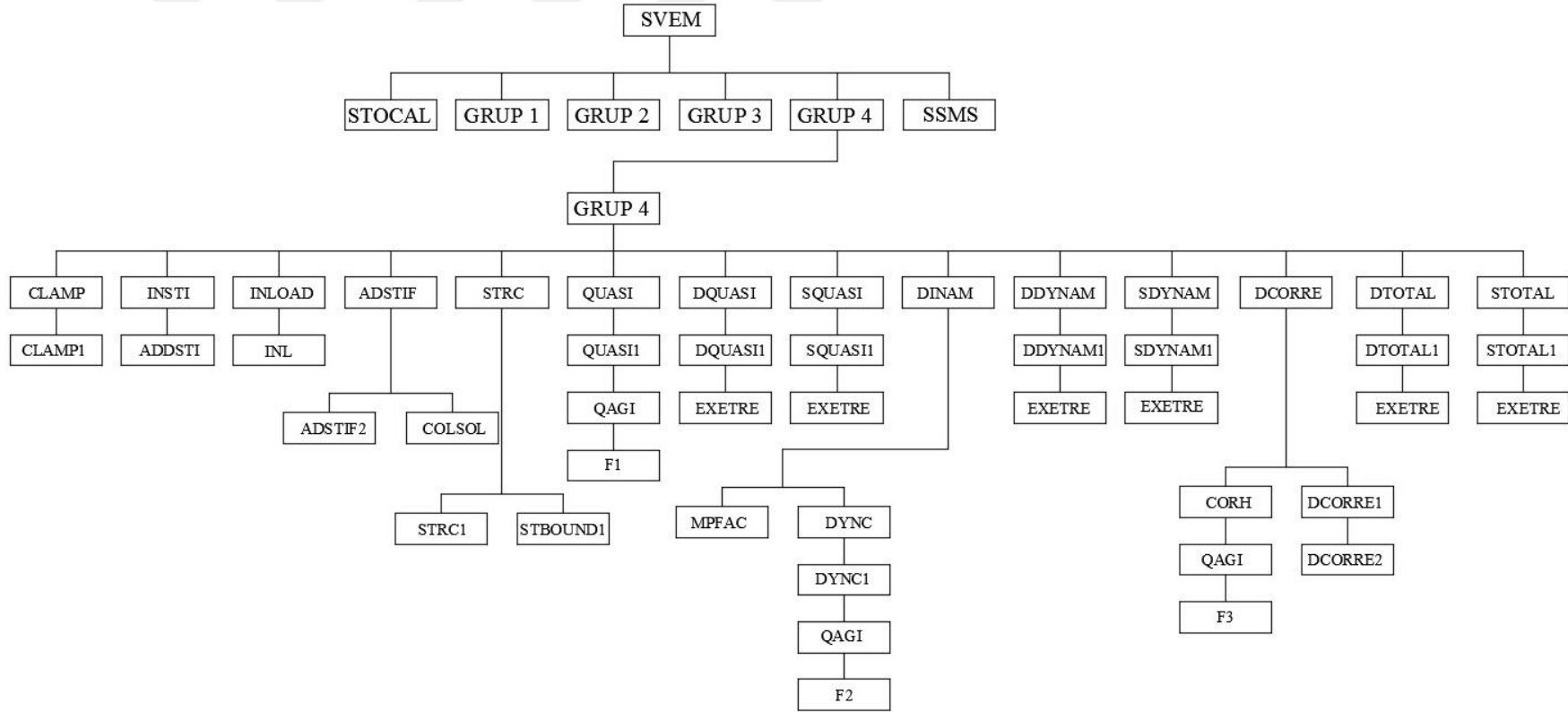
Mod	İzolasyonsuz Köprü Periyodu (s)		İzolasyonlu Köprü Periyodu (s)	
	SVEM	SAP2000	SVEM	SAP2000
1	1.1929	1.2279	3.6607	3.7473
2	0.8144	0.8516	1.0310	1.0700
3	0.6844	0.7197	0.7700	0.8090
4	0.5784	0.6124	0.5964	0.6354
5	0.2739	0.2959	0.3028	0.5914
6	0.262	0.2842	0.2799	0.5900
7	0.2354	0.2582	0.2419	0.5665
8	0.2136	0.2368	0.2123	0.5645
9	0.205	0.2283	0.2003	0.3235
10	0.1698	0.1731	0.1718	0.3026
11	0.1357	0.1566	0.1378	0.2672
12	0.1301	0.1512	0.1297	0.2398
13	0.1258	0.147	0.1239	0.2291
14	0.0862	0.0878	0.0866	0.1653
15	0.0583	0.0593	0.0585	0.1592

2.5. Çalışmada Kullanılan Bilgisayar Programı

Yapı sistemlerinde deprem hareketinin değişim bileşenlerinden dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkilerini içeren stokastik analiz SVEM programı (Dumanoğlu ve Soyluk, 2002) ile yapılabilmektedir. Fakat ismi geçen bilgisayar programında ÜESS mesnet sistemli bir yapının deprem yer hareketinin değişim bileşenlerini de dikkate

alabilen stokastik analizi yapılamamaktadır. Yalnız Ateş (2004) TESS mesnetli bir köprünün stokastik analizini yapmıştır. Deprem hareketinin değişim bileşenlerini dikkate alarak ÜESS mesnedinin davranışını dikkate alınması ile ilgili ilaveler SVEM programına yapılmıştır. İlaveler yapılarak geliştirilen bu bilgisayar programı ile ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan bir karayolu köprü sisteminin değişerek yayılan yer hareketi etkilerindeki stokastik analizi yapılabilmektedir. Geliştirilen bilgisayar programı Fortran Visual Workbench ortamında çalışmaktadır.

SVEM programının akış diyagramı aşağıdaki Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Şekilde 2.16'da tanımlanan GRUP1, GRUP2, GRUP3 ve GRUP4 alt programları Dumanoğlu ve Soyluk (2002) tarafından tanımlanmaktadır. SSM alt programı ÜESS mesnet sistemini içermektedir. Bu alt programda ÜESS mesnet sistemi LINK eleman olarak modellenmiştir. Bu LINK elemanın eleman rijitlik matrisi ÜESS mesnet sisteminin durum 5'deki davranışını içerecek şekilde elde edilerek programa eklenmiştir.



Şekil 2.16 Kullanılan programın akış diyagramı

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Sismik İzolasyonsuz ve İzolasyonlu Karayolu Köprüsünün Değişerek Yayılan Yer Hareketi İçin Stokastik Analizleri

Durağanlık kabulü yapılarak dalga yayılma, tutarsızlık ve zemin etkilerini içeren değişerek yayılan yer hareketleri için sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu karayolu köprüsünün stokastik analizleri bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Durağanlık, istatistiksel özelliklerin zamandan bağımsız olmasıdır. Farklı zamanlarda farklı istatistiklere sahip deprem hareketleri tüm hareket süresi boyunca durağan değildir. Ancak yapı tepkilerinin en büyük olduğu zamanlarda durağanlık kabulü yapılabilmektedir. Bu kabul işlemleri büyük ölçüde kolaylaştırdığı gibi bulunan sonuçları da daha gerçekçi hale getirmektedir (Yang, 1986; Peebles, 1987). Durağan işlemi için denklem (1.34) ile ifade edilen frekans davranış fonksiyonu kullanılmıştır. Yapılan stokastik analizler sonucunda köprü tabliyesinin ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve ortalama maksimum yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçlarının incelemesinde köprü tabliyesini oluşturan çubuk elemanların düğüm noktalarında elde edilen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve ortalama maksimum yatay yer değiştirmeler dikkate alınmıştır. İncelenen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve yatay yer değiştirmeler zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenlerden meydana gelmektedir.

3.1.1. Sadece Dalga Yayılma Etkisine Maruz Köprünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

3.1.1.1. Homojen Sert Zemin Durumu

Bu alt bölümde karayolu köprüsünün mesnetlendiği zeminin homojen ve sert zemin olduğu kabulü yapılarak tutarsızlık etkisi ihmal edilip sadece dalga yayılma etkisi dikkate alınan sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnedi ile sismik izolasyonu yapılan köprünün stokastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu durum, denklem (2.9)'da tutarsızlık etkisinin

$|\gamma_{/m}(\omega)|^k = 1$, zemin etkisinin $\gamma_{/m}(\omega)^z = 1$, ve dalga yayılma etkisinin $\gamma_{/m}(\omega)^d \neq 1$ olması durumuna karşılık gelmektedir. Sert zemin durumu için dalga yayılma hızları sırasıyla 1000 m/s, 2000 m/s, 3000 m/s (DBYBHY, 2007) alınarak elde edilen analiz sonuçları hem birbirleriyle hem de dalga yayılma hızının sonsuz olduğu üniform yer hareketi durumunda bulunan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yer hareketi olarak sert zeminlerde kaydedilen 9 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı'ndaki istasyonun PUL164 bileşeni kullanılmıştır. Şekil 3.1'de sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen karayolu köprüsü gösterilmiştir.

Sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizleri sonucunda karayolu köprüsünün tabliyesinde elde edilen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler Şekil 3.2-3.25'te gösterilmiştir. Gösterilen grafikler eleman kuvvetleri ve yer değiştirmelerin zahiri-statik, dinamik ve toplam değerlerinden oluşmaktadır.

Şekil 3.2-3.7'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam normal kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %89, %57 ve %71 oranında azaltmıştır. Şekil 3.2-3.3'te görüldüğü gibi zahiri-statik normal kuvvetler köprü uzunluğunun ortasında artarken kenar ayaklara doğru azalmaktadır. Şekil 3.2-3.7'de dalga yayılma hızının artması ile hem sismik izolasyonlu hem de izolasyonsuz köprülerin tabliyelerindeki zahiri-statik ve toplam normal kuvvetler azalırken dinamik normal kuvvetlerin arttığı görülmektedir. Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının sonsuz olması durumundaki toplam normal kuvvetlerinin maksimum değerinde, hızın 1000 m/s olması durumundakine göre %10 azalma olmuştur. Benzer durumda sismik izolasyonsuz köprüde %38 azalma olmuştur.

Şekil 3.8-3.13'te görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam kesme kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %97, %47 ve %97 oranında azaltmıştır. Şekil 3.8-3.13'te dalga yayılma hızının artması ile hem sismik izolasyonlu hem de izolasyonsuz köprülerin tabliyelerindeki zahiri-statik ve toplam kesme kuvvetleri azalırken dinamik kesme kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 3.8'den görüldüğü gibi zahiri-statik kesme kuvvetleri köprü tabliyesinin ortasında oldukça küçük değerlerde olmasına karşın kenar ayaklarda en büyük değerlere ulaşmaktadır. Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının sonsuz olması durumundaki toplam kesme kuvvetlerinin maksimum değerinde,

hızın 1000 m/s olması durumundakine göre %0.8 artış olmuştur. Benzer durumda sismik izolasyonsuz köprüde %2 azalma olmuştur.

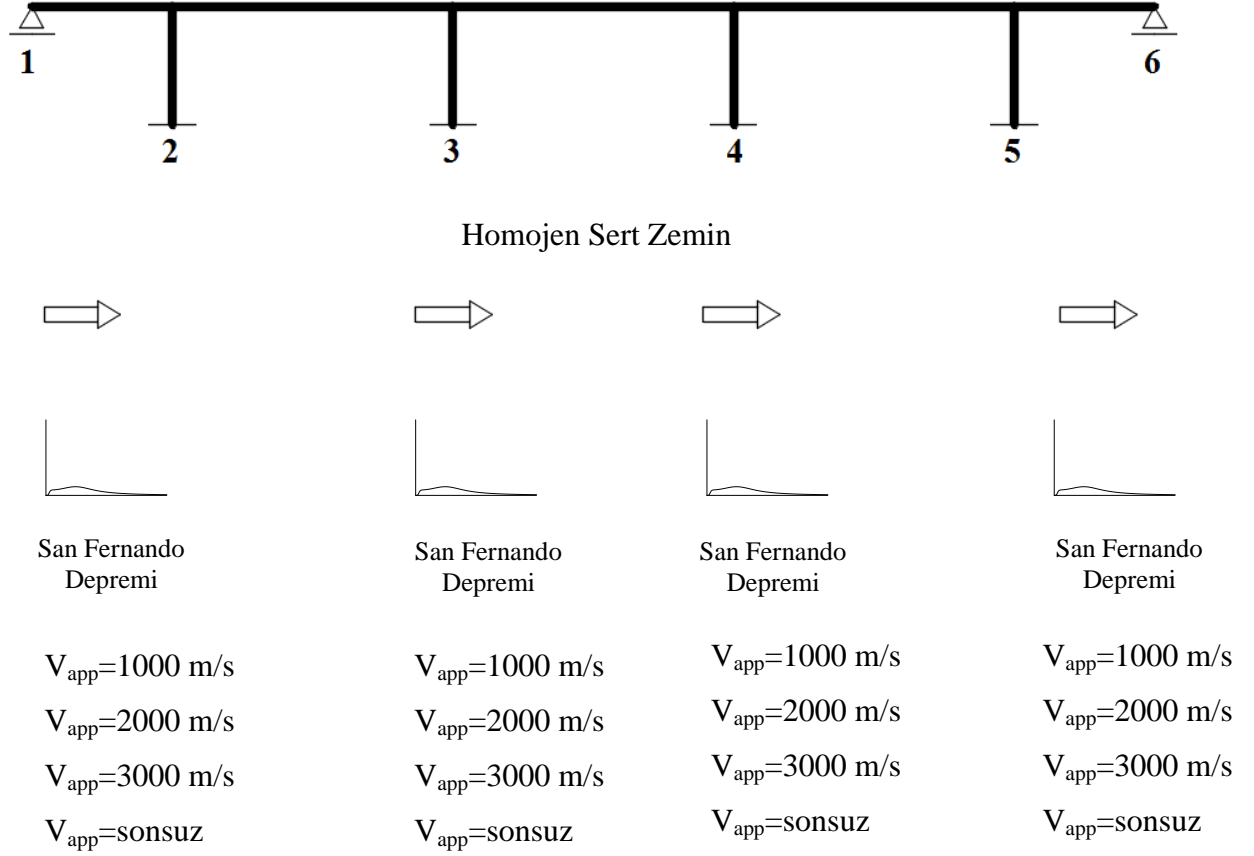
Şekil 3.14-3.19'da görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %97, %58 ve %59 oranında azalmıştır. Şekil 3.16 ve Şekil 3.18'den görüldüğü gibi dalga yayılma hızının artması ile sismik izolasyonsuz köprünün her bir açıklık ortasındaki dinamik ve toplam eğilme momentlerinde artma meydana gelirken her bir mesnetteki dinamik ve toplam eğilme momentlerinde bir azalma gözlenmiştir. Buna karşılık Şekil 3.17-3.19'da görüldüğü gibi sismik izolasyonlu köprü tabliyesinde dinamik ve toplam eğilme momentlerinde belirgin bir şekilde değişim görülmemiştir. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi zahiri-statik eğilme momentleri köprü tabliyesinin ortasında küçük değerlerde iken kenar ayaklarda daha büyük değerlere ulaşmaktadır. Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının sonsuz olması durumundaki toplam eğilme momentlerinin maksimum değerinde, hızın 1000 m/s olması durumundakine göre %0.9 artış olmuştur. Benzer durumda sismik izolasyonsuz köprüde %3 azalma olmuştur.

Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de görüldüğü üzere sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprüdeki zahiri-statik yer değiştirmeler birbirine çok yakındır. Şekil 3.22-3.25'te görüldüğü gibi sismik izolasyonlu köprü tabliyesinde oluşan dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama değerleri, sismik izolasyonsuz durumdakinden sırasıyla %101 ve %263 daha büyük olmaktadır. Bu durum ÜESS mesnet sistemine izin verilen yer değiştirme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Dalga yayılma hızının artması ile hem sismik izolasyonlu hem de izolasyonsuz köprülerin tabliyelerindeki zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmeler artmıştır. Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının sonsuz olması durumundaki toplam yer değiştirmelerin maksimum değerinde, hızın 1000 m/s olması durumundakine göre %2.7 artış olmuştur. Benzer durumda sismik izolasyonsuz köprüde %4.8 artış olmuştur.

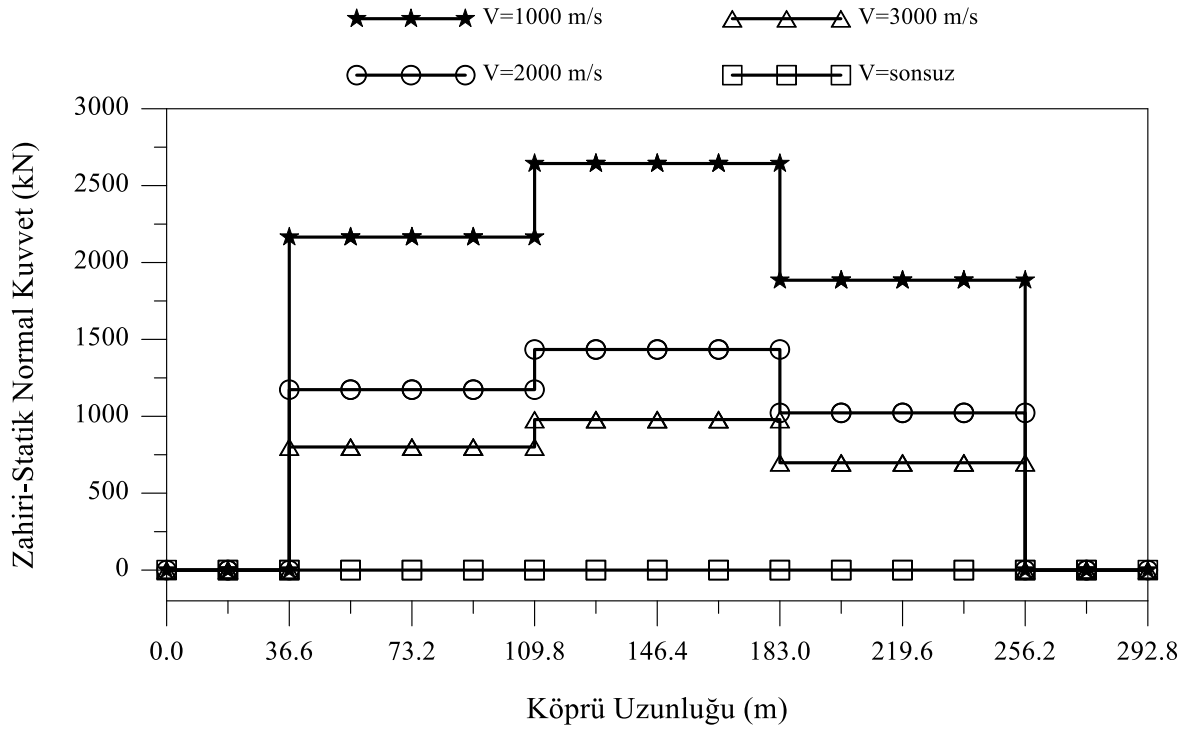
Şekil 3.2-3.3, Şekil 3.8-3.9 ve Şekil 3.14-3.15'te hızın sonsuz olmasında durumunda köprü tabliyesinde meydana gelen zahiri-statik normal kuvvetlerin, zahiri-statik kesme kuvvetlerin ve zahiri-statik eğilme momentlerin sıfır olduğu görülmektedir. Bu durum yapılan analiz sonuçlarının doğruluğu hakkında bilgi vermektedir (Ateş, 2004).

Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu köprünün stokastik analizinde dalga yayılma hızının değişimi tepkileri normal kuvvetler hariç neredeyse değiştirmemektedir. Normal kuvvet için hız değişimindeki

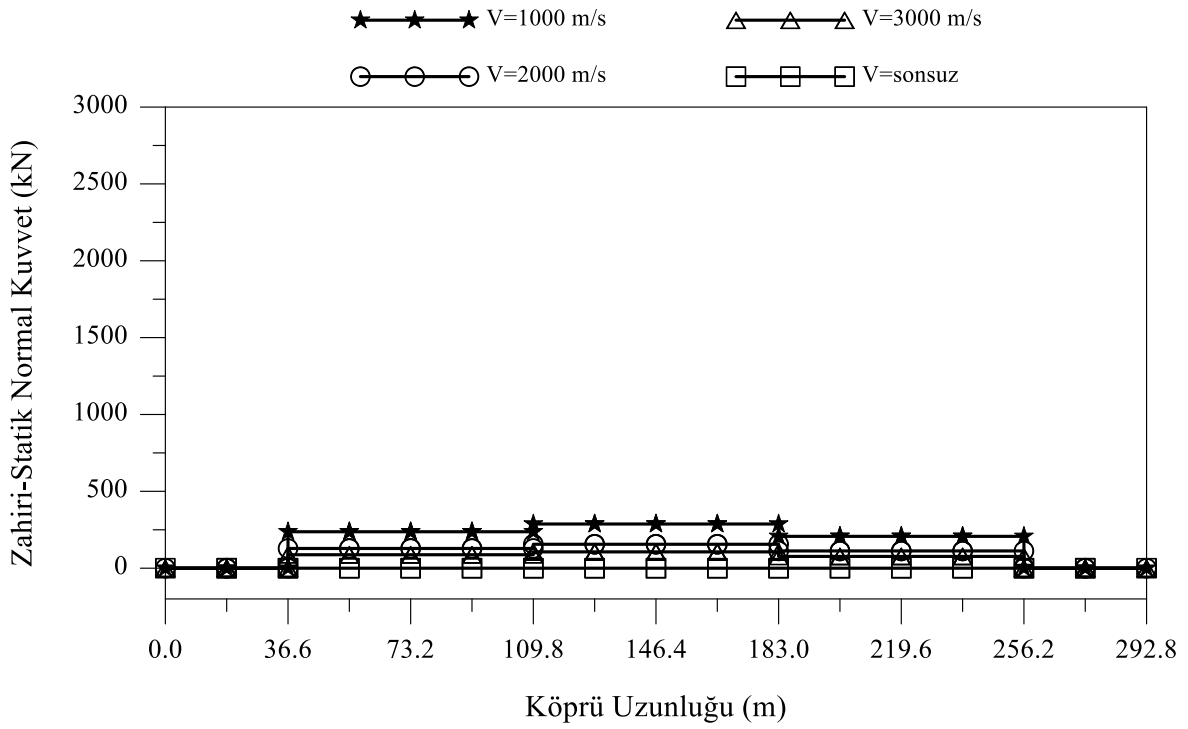
%10'luk artış köprü tabliyesi aksel doğrultuda oldukça rijit olduğu için gözardı edilebileceği düşünülmektedir.



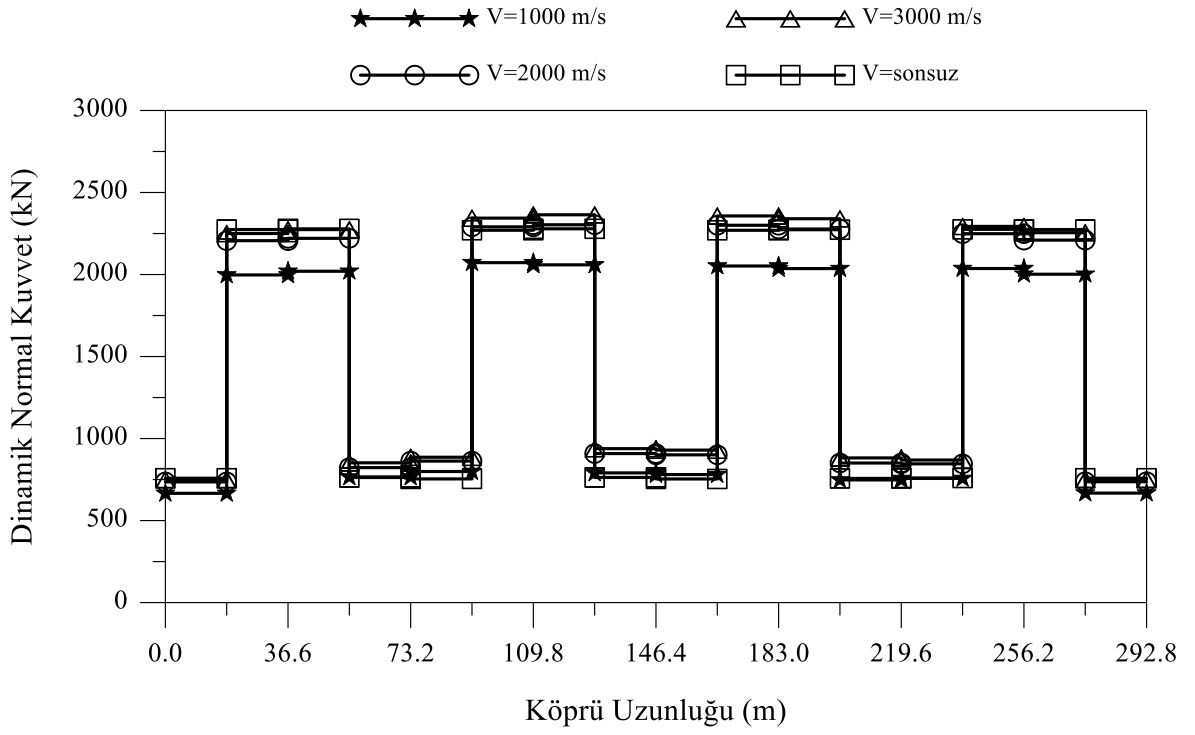
Şekil 3.1. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli



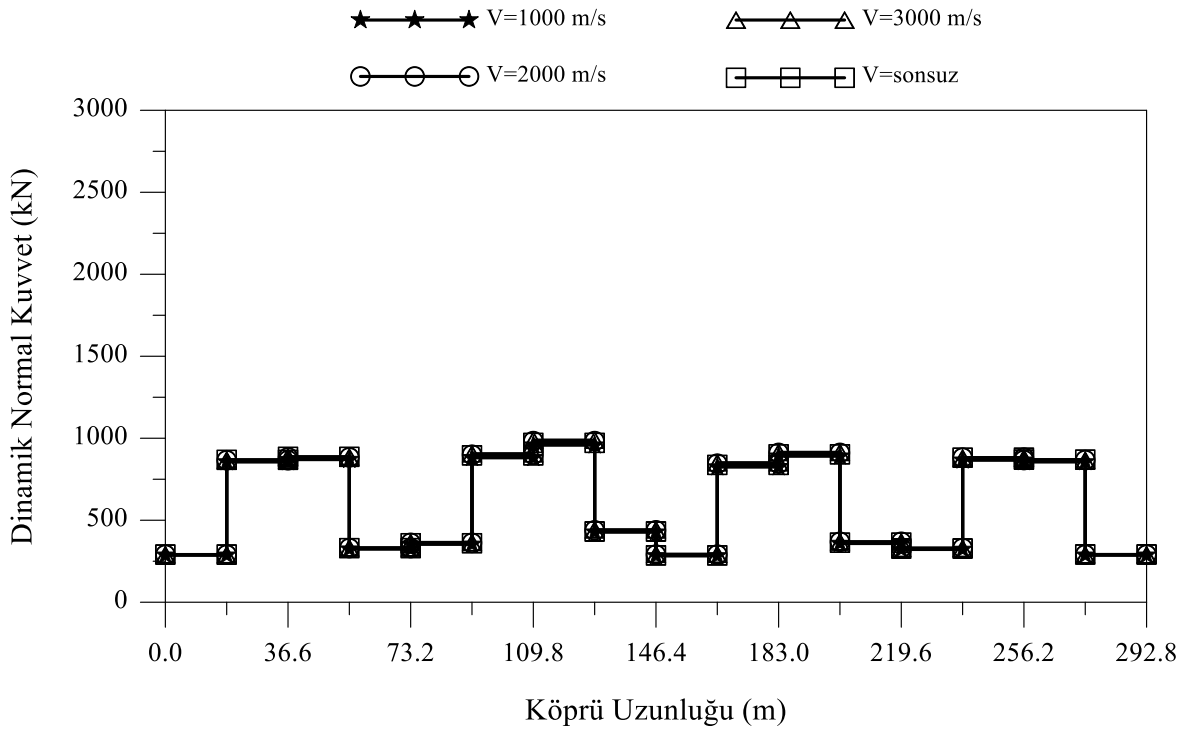
Şekil 3.2. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



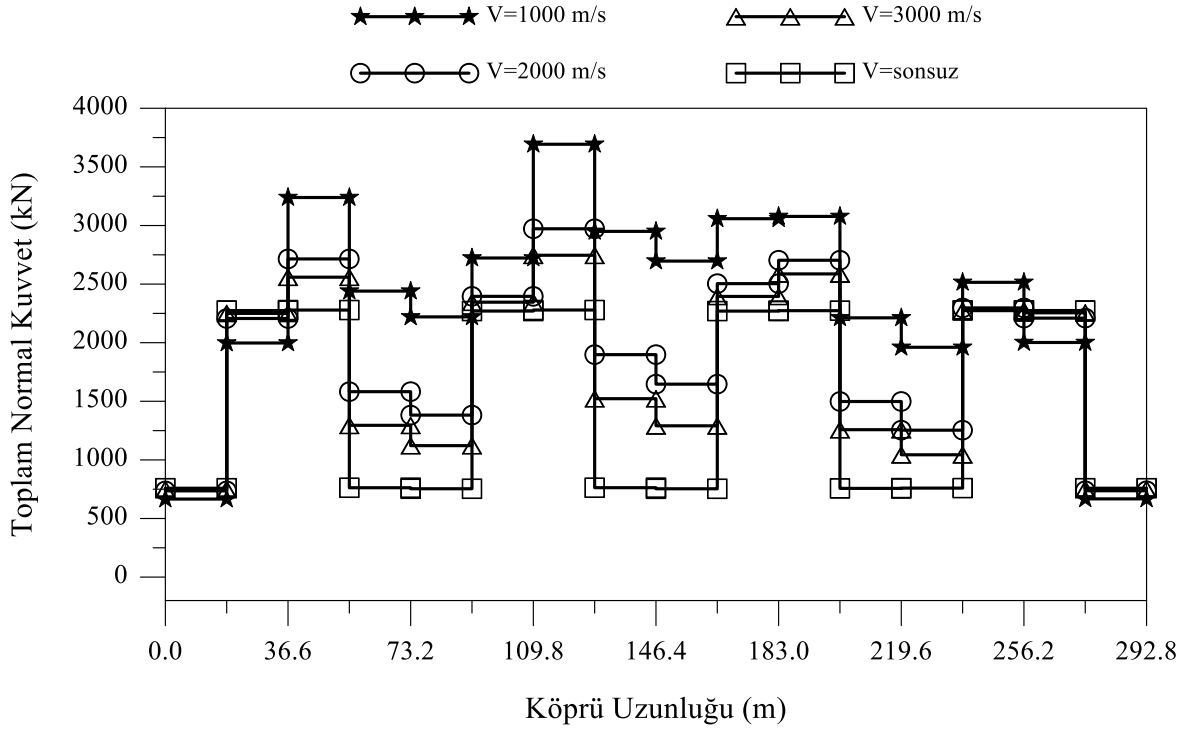
Şekil 3.3. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



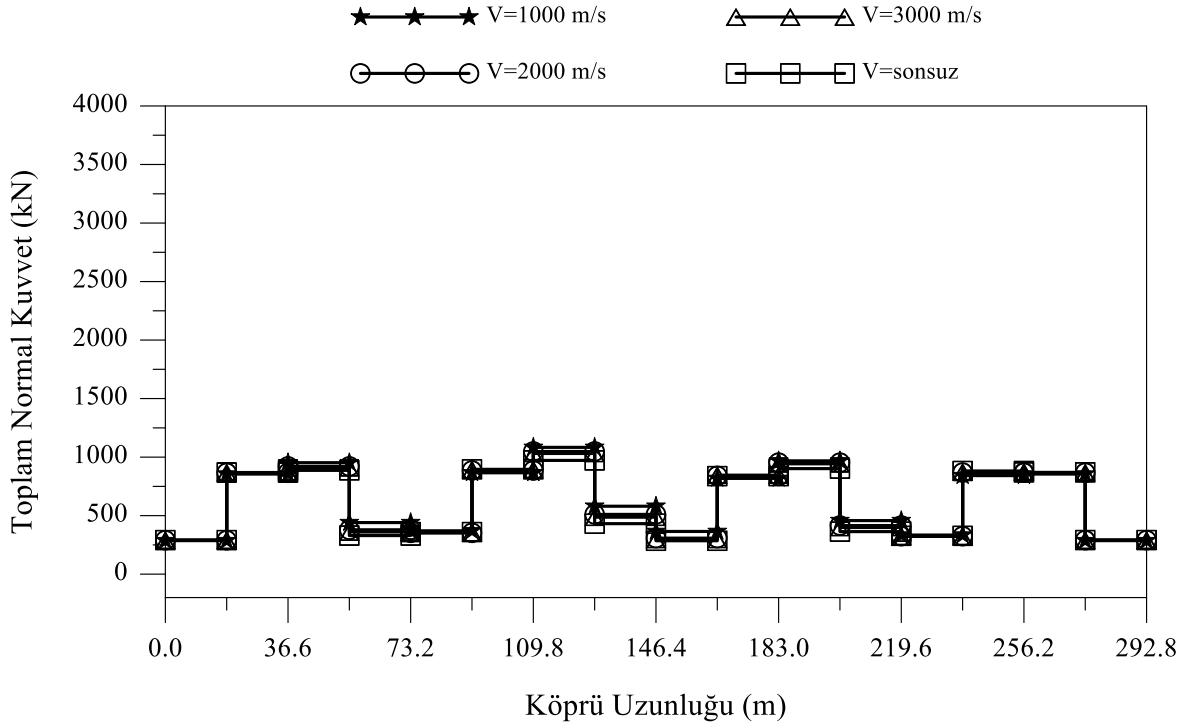
Şekil 3.4. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



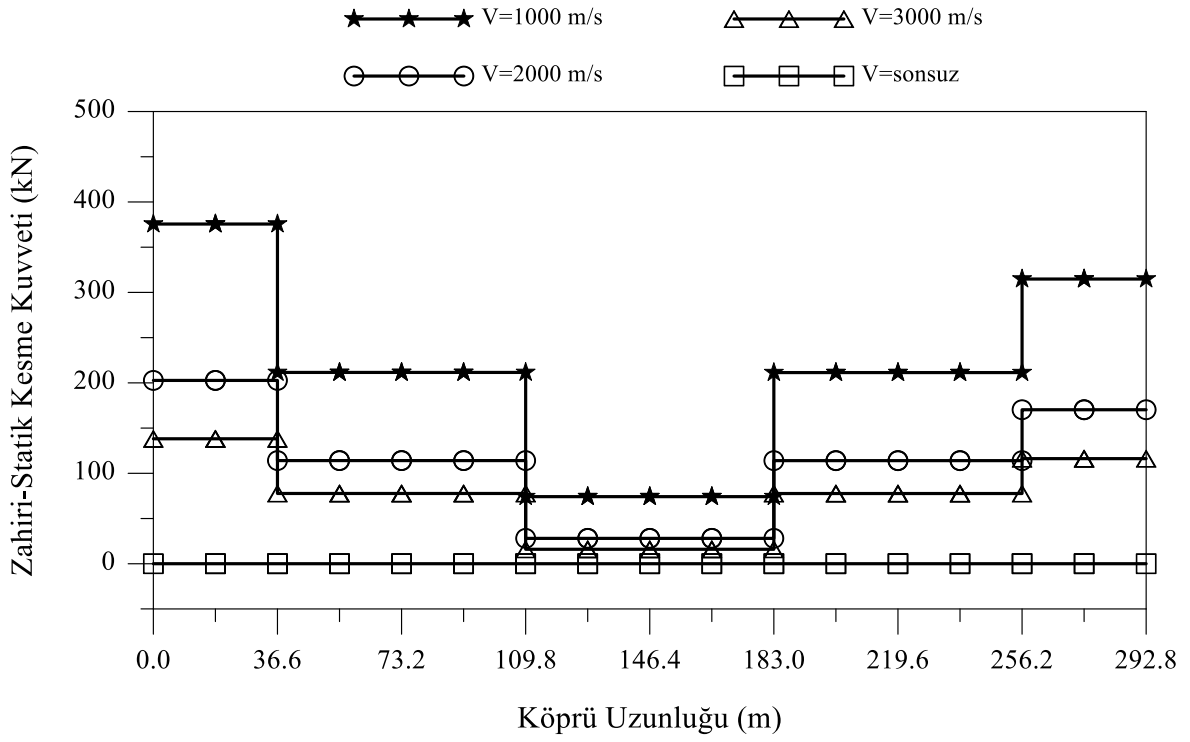
Şekil 3.5. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



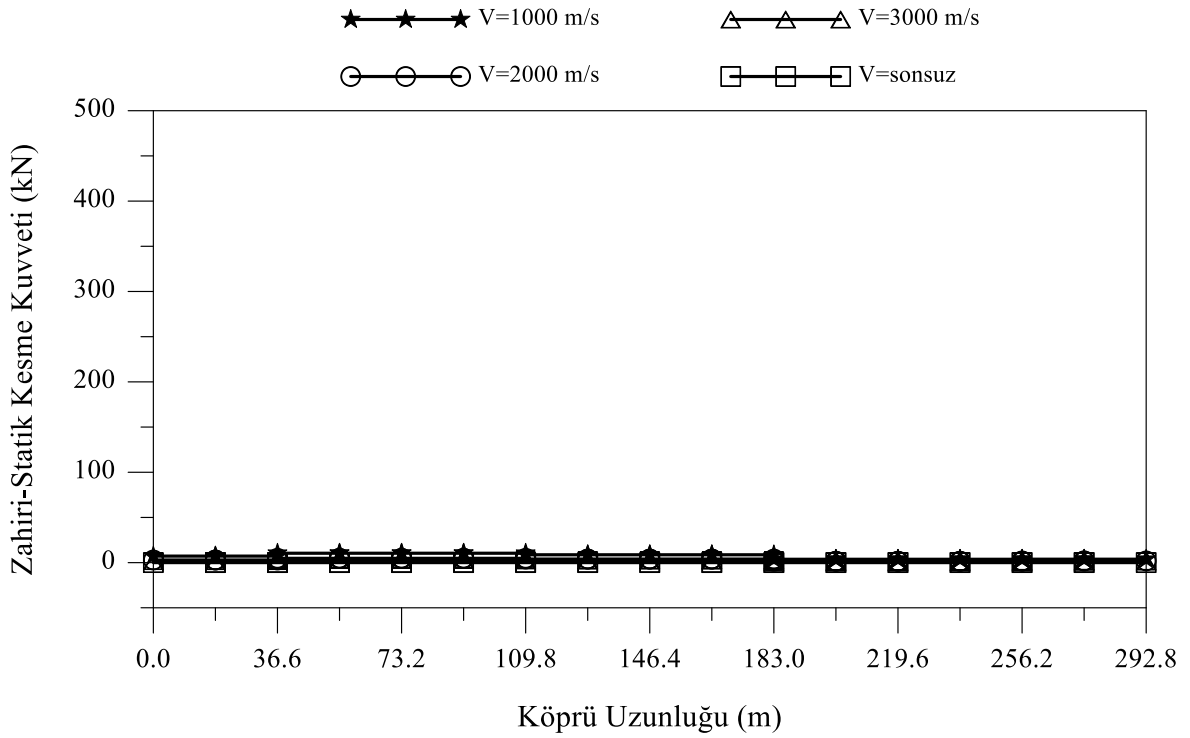
Şekil 3.6. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



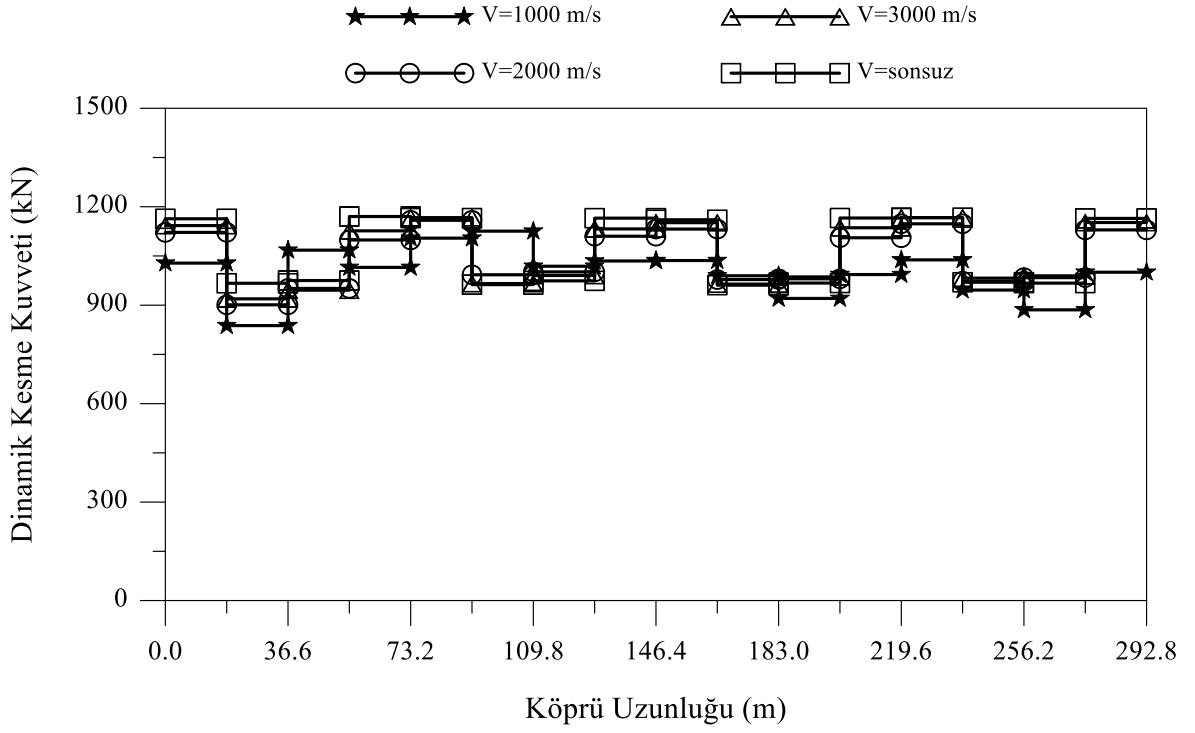
Şekil 3.7. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



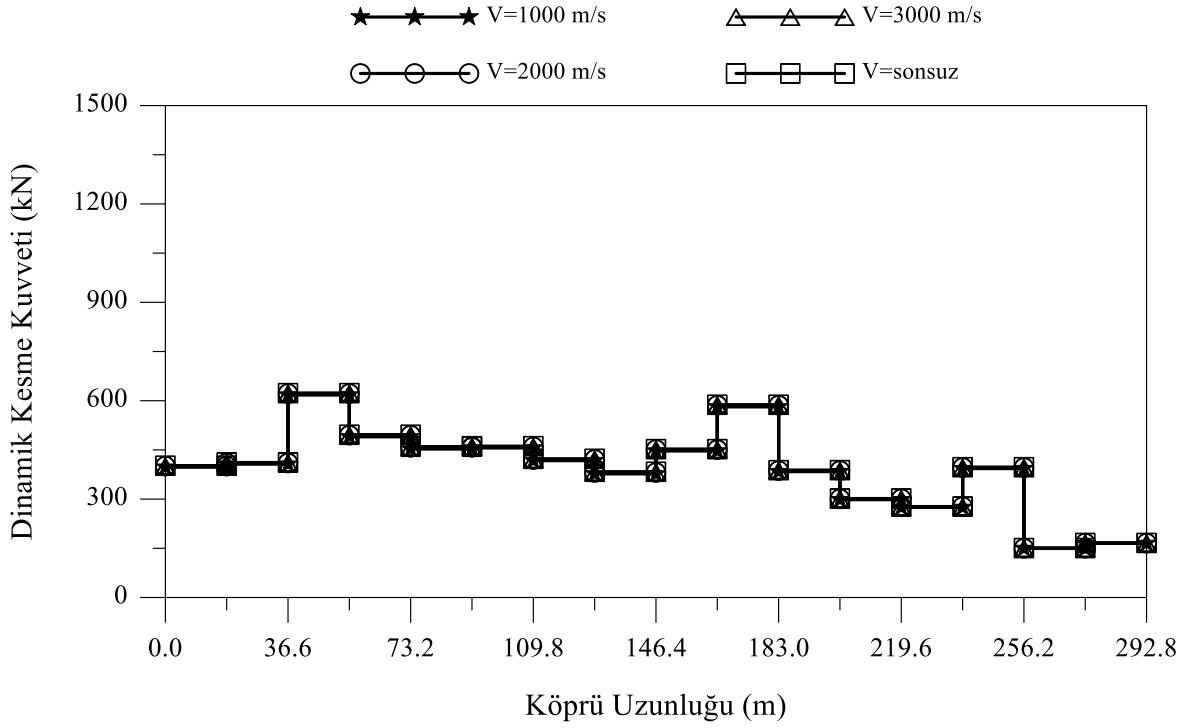
Şekil 3.8. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvveti



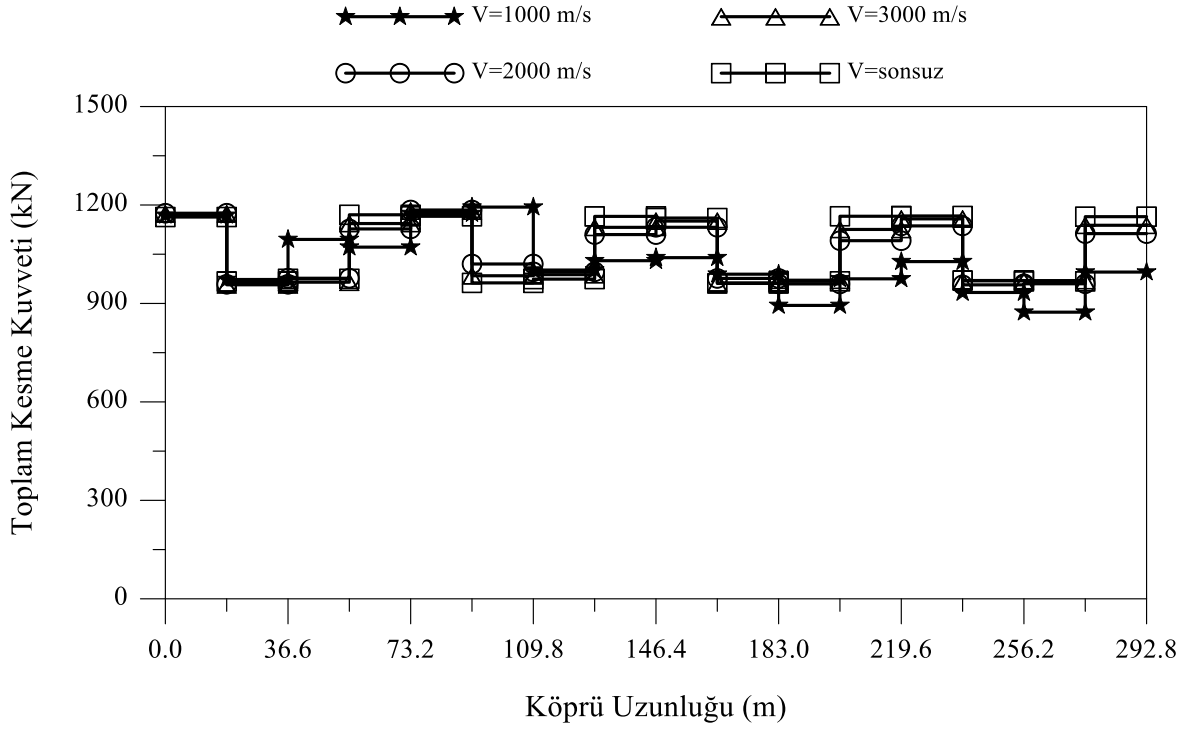
Şekil 3.9. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvveti



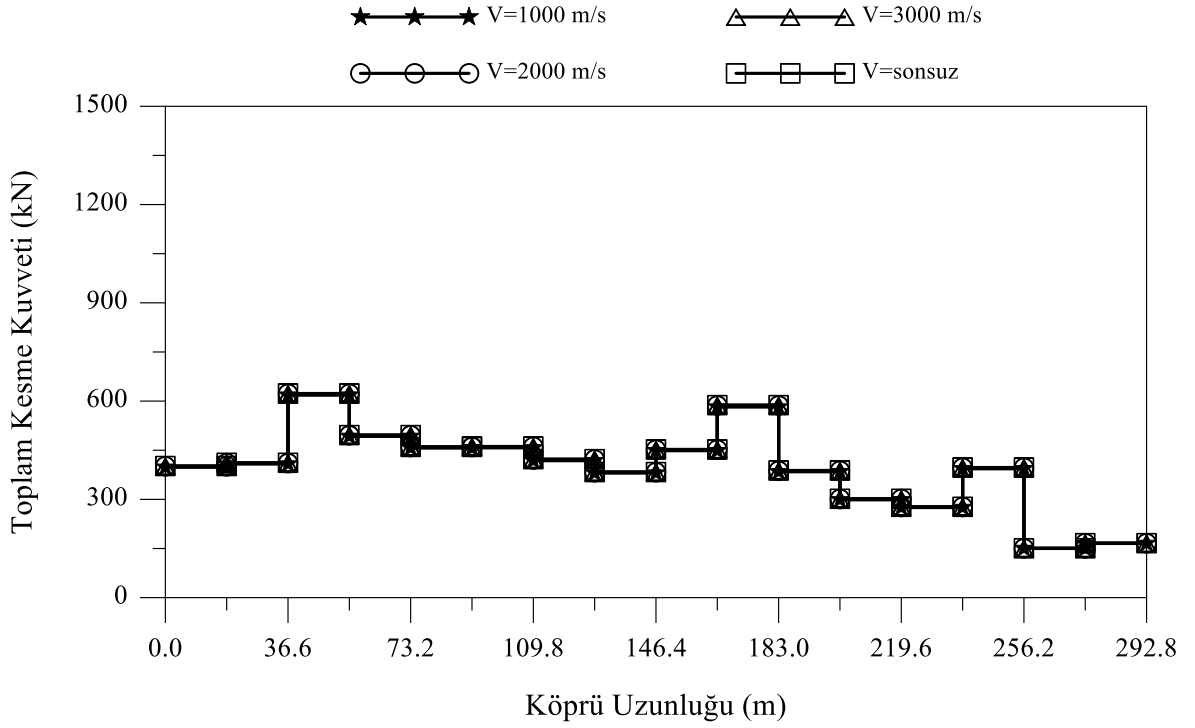
Şekil 3.10. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti



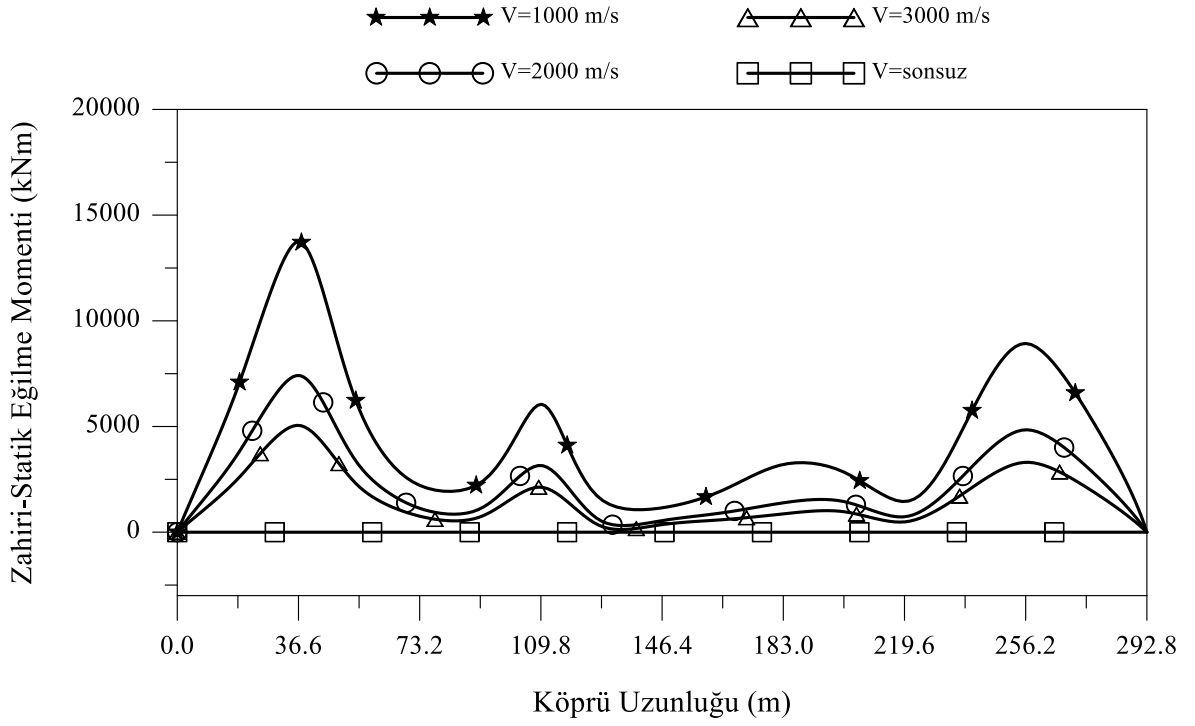
Şekil 3.11. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti



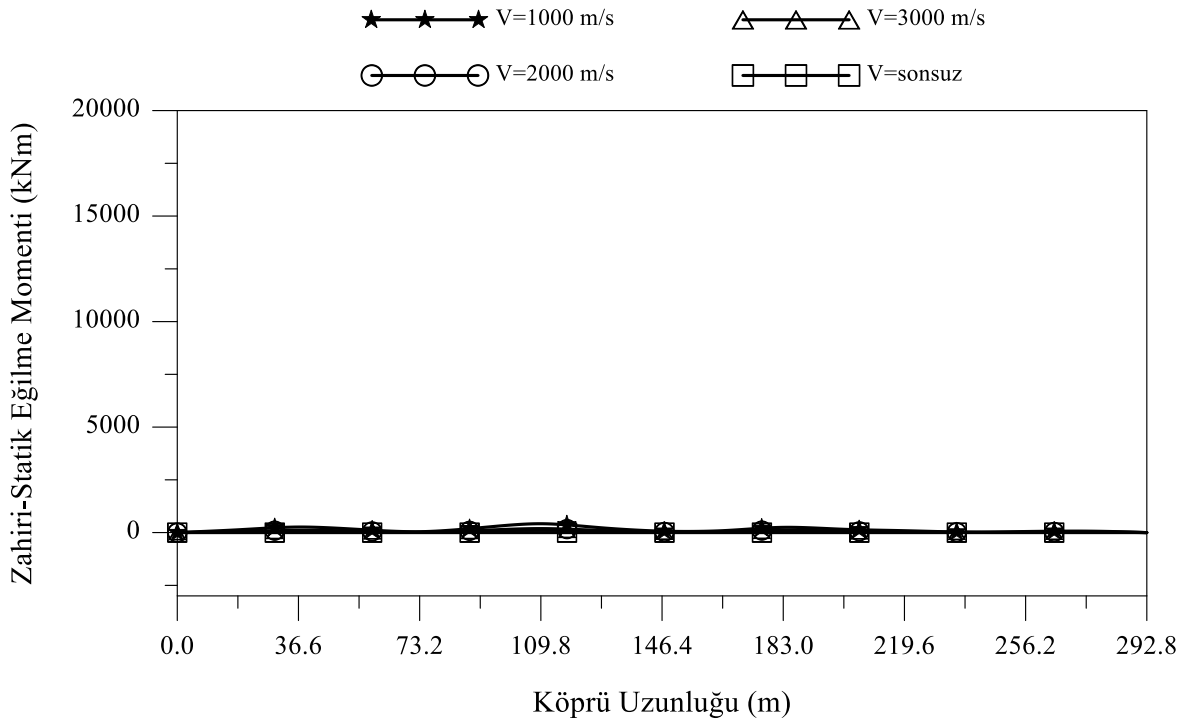
Şekil 3.12. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti



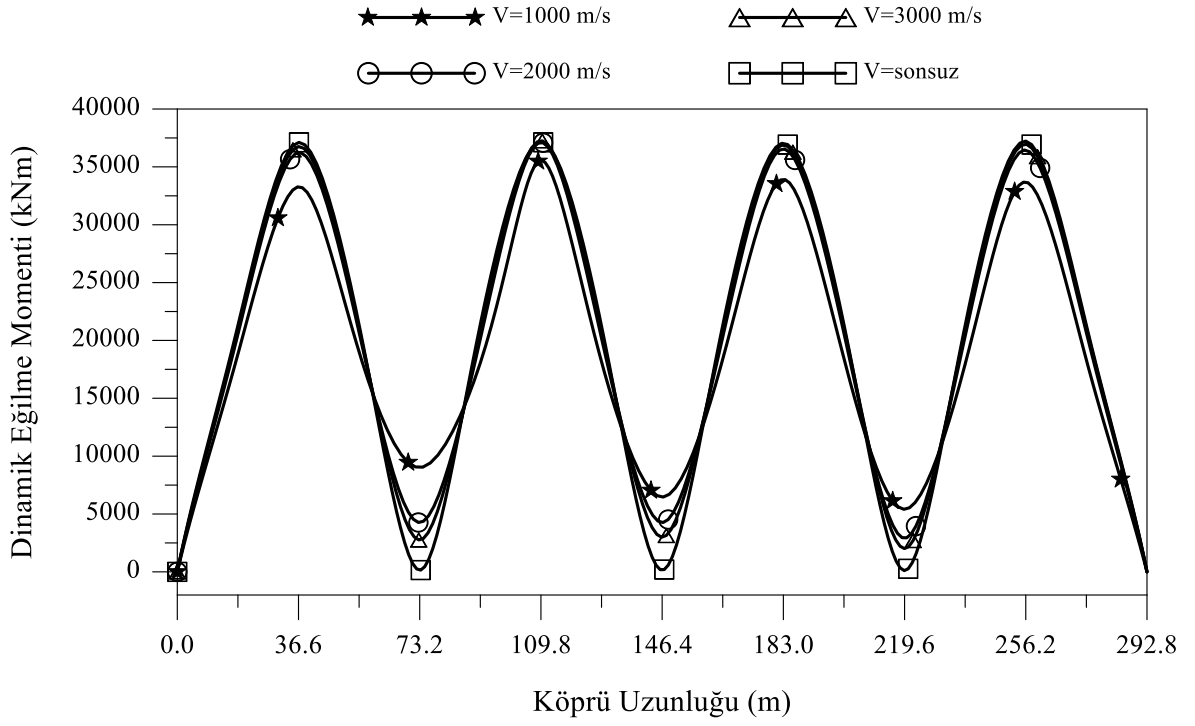
Şekil 3.13. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti



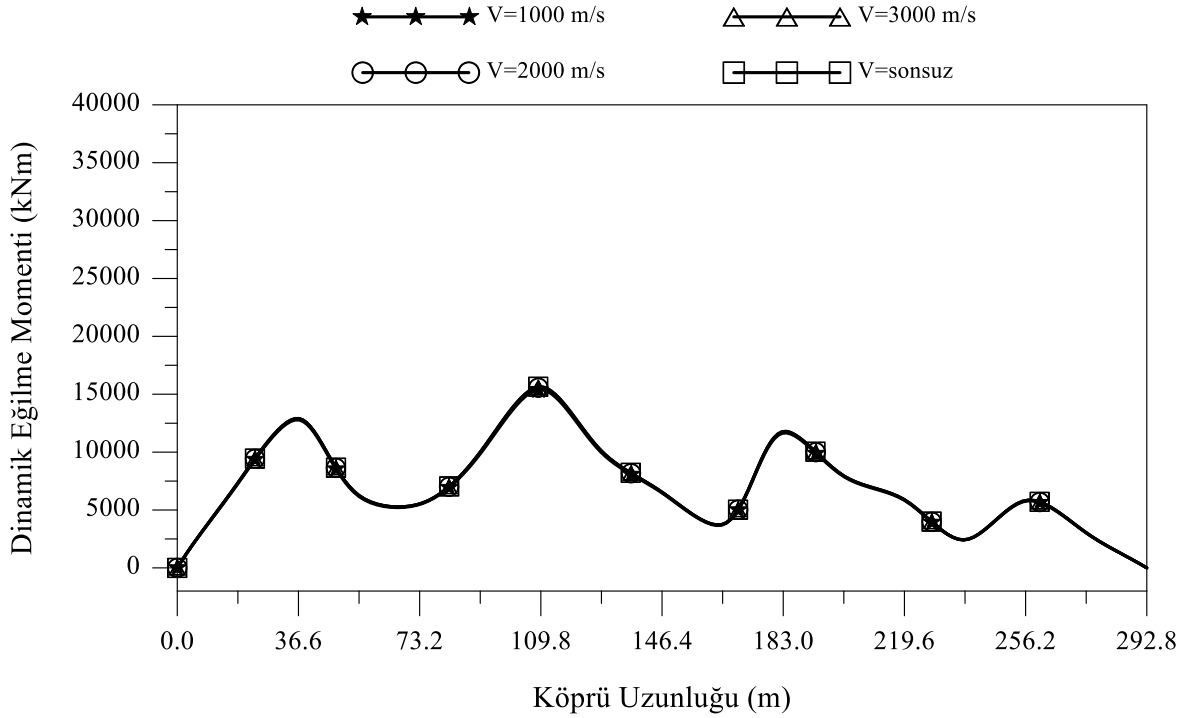
Şekil 3.14. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



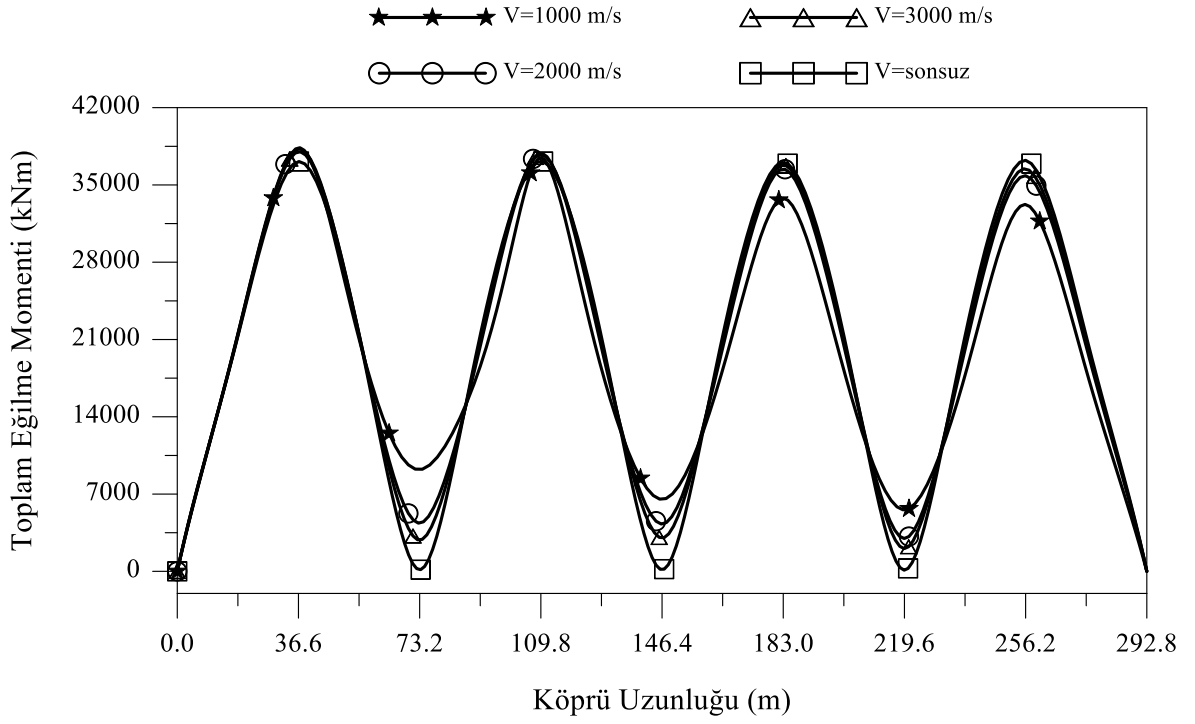
Şekil 3.15. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



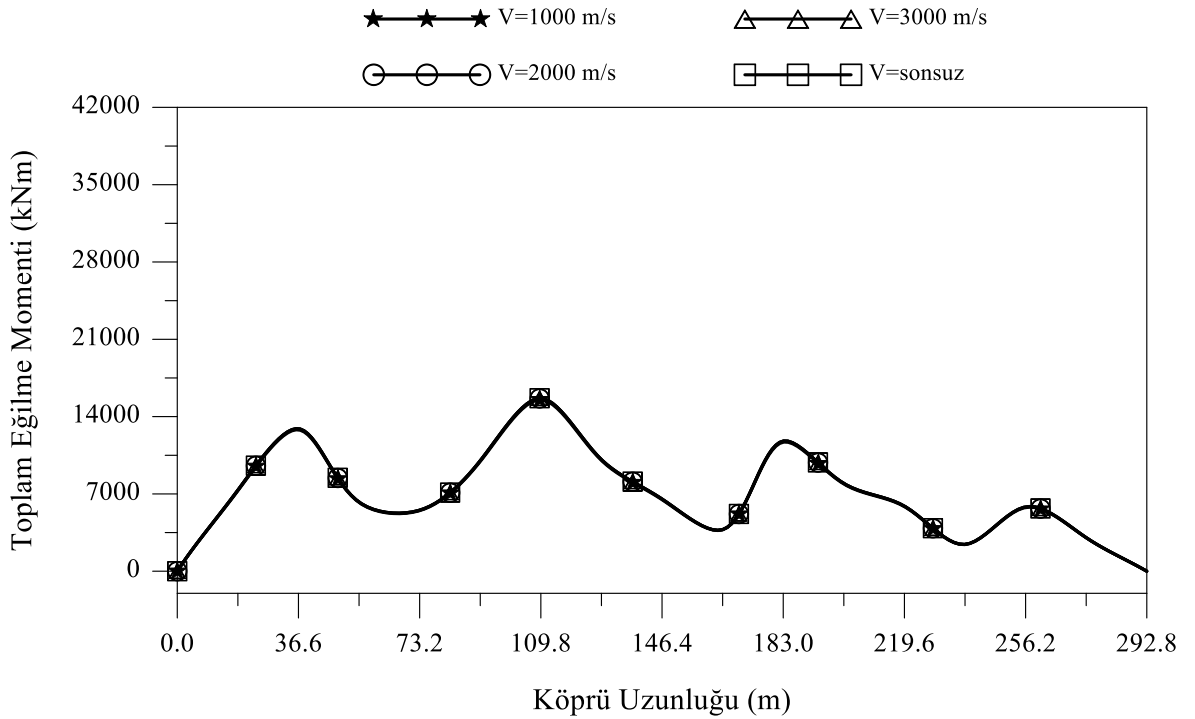
Şekil 3.16. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



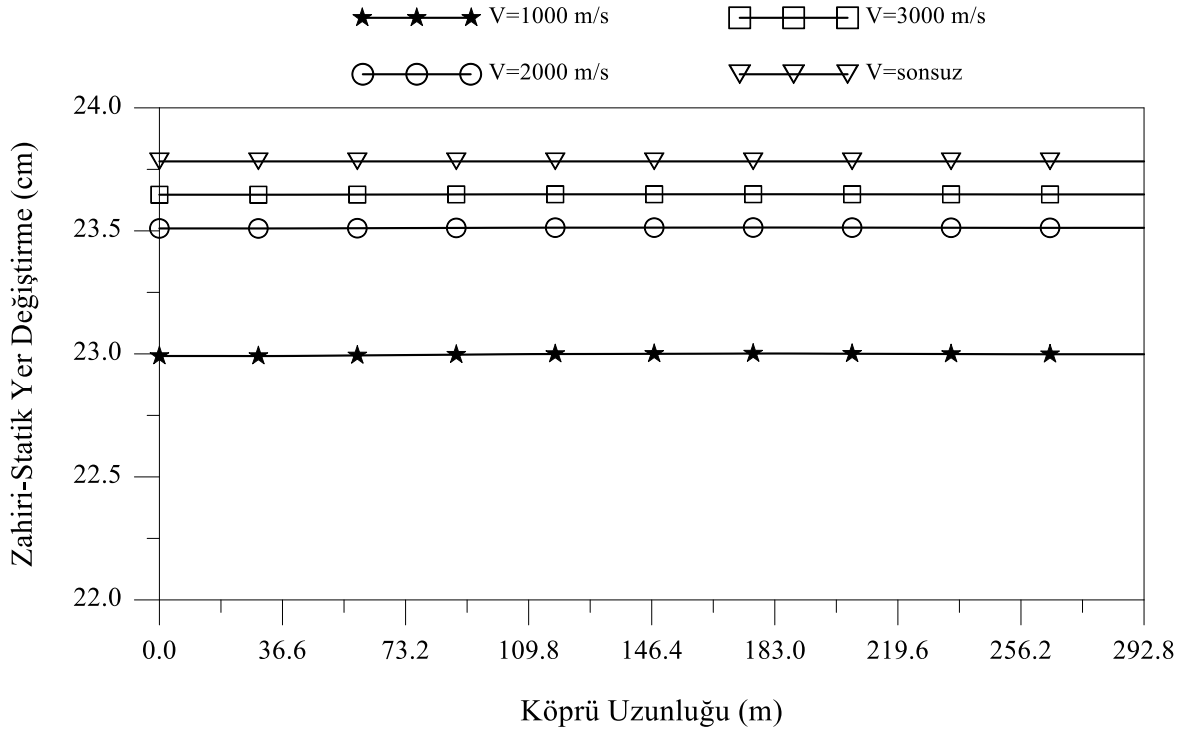
Şekil 3.17. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



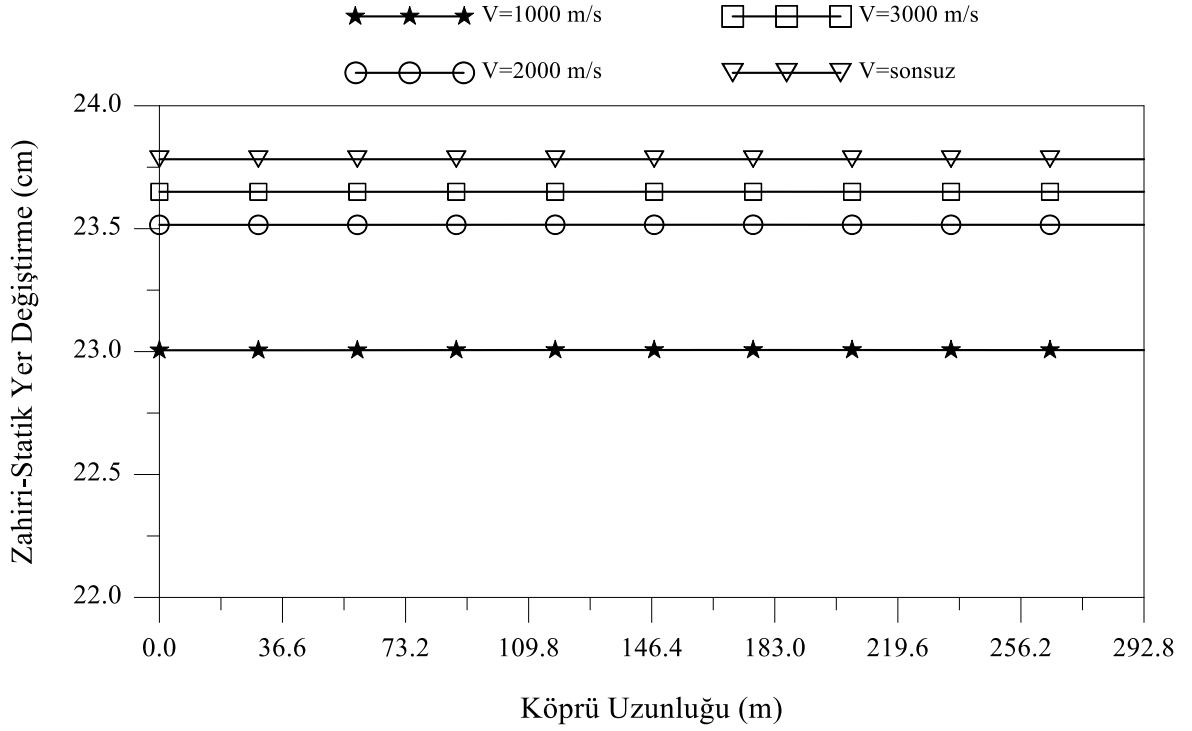
Şekil 3.18. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



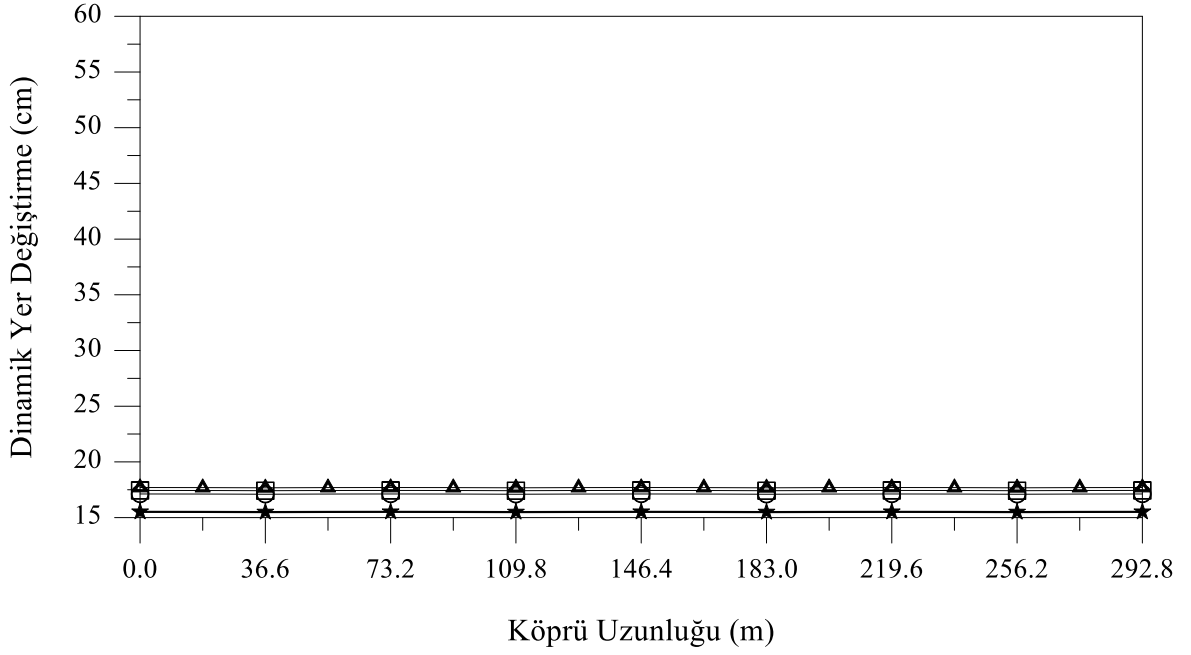
Şekil 3.19. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



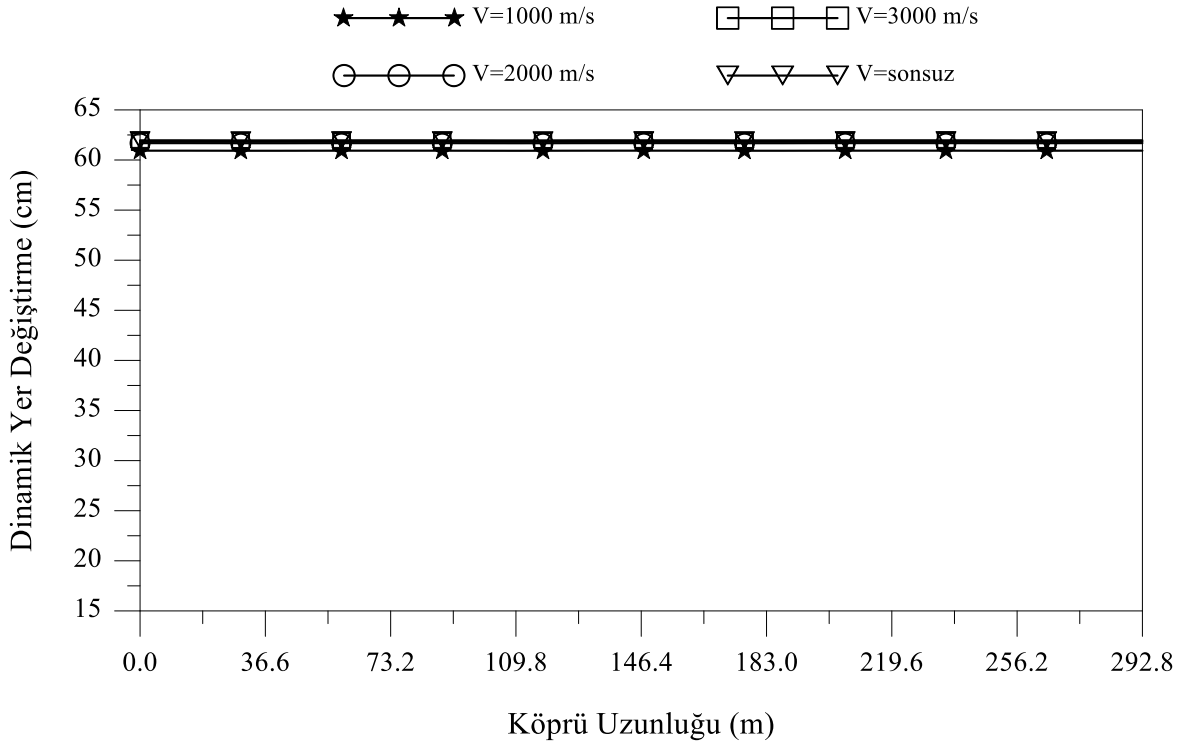
Şekil 3.20. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



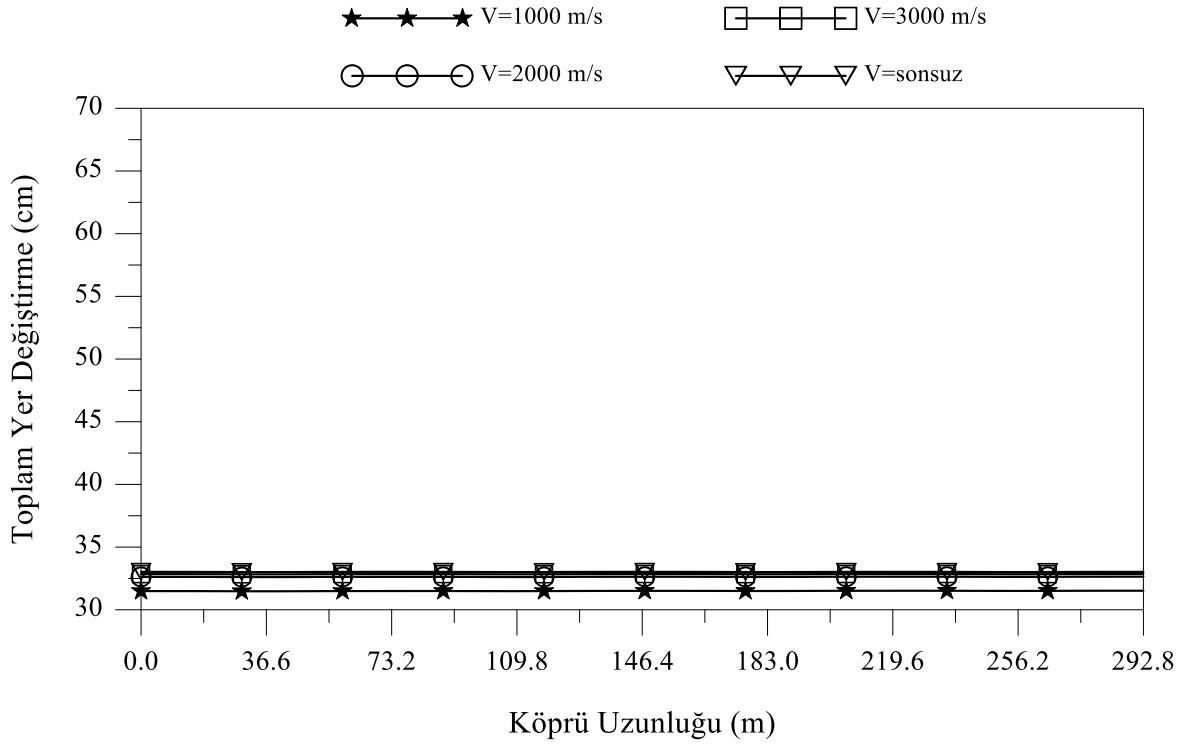
Şekil 3.21. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



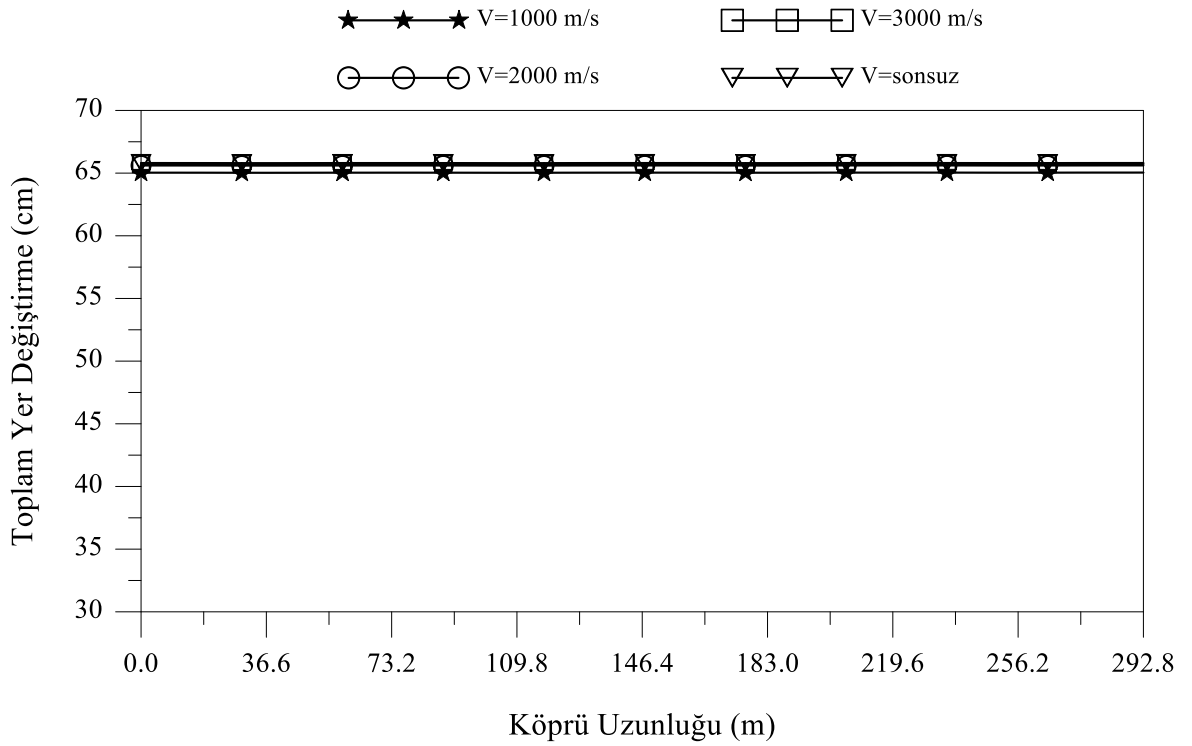
Şekil 3.22. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.23. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.24. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri



Şekil 3.25. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri

3.1.1.2. Homojen Yumuşak Zemin Durumu

Bu alt bölümde karayolu köprüsünün mesnetlendiği zeminin homojen ve yumuşak olduğu kabulü yapılmıştır. Bununla birlikte tutarsızlık etkisi ihmal edilip sadece dalga yayılma etkileri dikkate alınan sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik davranışı incelenmiştir. Bu durum, denklem (2.9)'da tutarsızlık etkisinin $\left| \gamma_{lm}(\omega) \right|^k = 1$, zemin etkisinin $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$, ve dalga yayılma etkisinin $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$ olması anlamına gelmektedir. Yumuşak zemin durumu için dalga yayılma hızları sırasıyla 100 m/s, 200 m/s, 400 m/s (DBYBHY, 2007) alınarak elde edilen analiz sonuçları hem birbirleriyle hem de dalga yayılma hızının sonsuz olduğu uniform yer hareketi durumunda bulunan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yer hareketi olarak yumuşak zeminlerde kaydedilen 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 depreminin El Centro Array #3 istasyonunun H-E03230 bileşeni kullanılmıştır. Şekil 3.26'da sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsü verilmiştir.

Sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizleri sonucunda karayolu köprüsünün tabliyesinde elde edilen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler Şekil 3.27-3.50'de gösterilmiştir. Gösterilen grafikler eleman kuvvetleri ve yer değiştirmelerin zahiri-statik, dinamik ve toplam değerlerinden oluşmaktadır.

Şekil 3.27-3.28'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam normal kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %89, %74 ve %89 oranında azaltmaktadır. Şekil Şekil 3.27-3.28'den görüldüğü gibi zahiri statik normal kuvvetler köprü uzunluğunun ortasında artarken kenar ayaklarına doğru azalmıştır. Şekil 3.27-3.30'da dalga yayılma hızının artması ile hem sismik izolasyonlu hem de izolasyonsuz köprülerin tabliyelerindeki zahiri-statik ve toplam normal kuvvetleri azalırken dinamik normal kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının sonsuz olması durumundaki toplam normal kuvvetlerinin maksimum değerinde, hızın 100 m/s olması durumundakine göre %61 azalma olmuştur. Benzer durumda sismik izolasyonsuz köprüde %84 azalma olmuştur.

Şekil 3.33-3.38'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam kesme kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %96, %72 ve %86 oranında azaltmaktadır. Şekil 3.33-3.34 dalga yayılma hızının artması ile hem sismik izolasyonlu hem de izolasyonsuz köprülerin tabliyelerindeki zahiri-statik kesme kuvvetleri azalırken Şekil 3.35-3.36'da dinamik kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Şekil 3.37-3.38'de dalga yayılma hızının artması ile izolasyonsuz durumda toplam kesme kuvvetleri azalırken izolasyonlu durumda arttığı görülmüştür. Şekil 3.33'te görüldüğü gibi zahiri-statik kesme kuvvetleri köprü tabliyesinin ortasında oldukça küçükken kenar ayaklarda en büyük değerlere ulaşmaktadır. Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının sonsuz olması durumundaki toplam kesme kuvvetlerinin maksimum değerinde, hızın 100 m/s olması durumundakine göre %120 artış olmuştur. Benzer durumda sismik izolasyonsuz köprüde %48 azalma olmuştur.

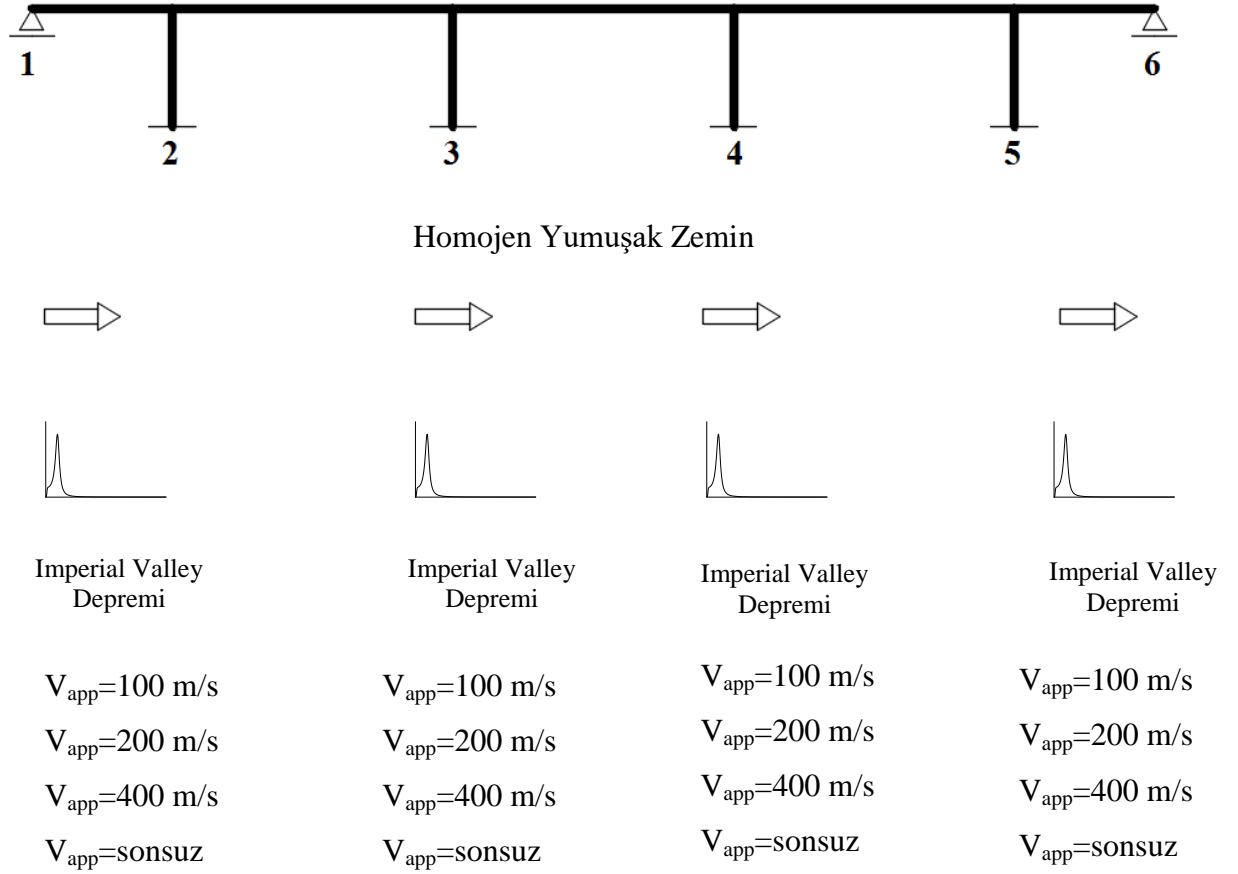
Şekil 3.39-3.44'te görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %95, %77 ve %96 oranında azaltmıştır. Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz sistemde dalga yayılma hızının artması ile zahiri-statik ve toplam eğilme momentleri azalırken dinamik momentleri artmıştır. Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının sonsuz olması durumundaki toplam momentlerinin maksimum değerinde, hızın 100 m/s olması durumundakine göre %155 artış olmuştur. Benzer durumda sismik izolasyonsuz köprüde %53 azalma olmuştur.

Şekil 3.45-3.50'de görüldüğü üzere dalga yayılma hızının artması ile sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprüdeki zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmelerin arttığı görülmektedir. Aynı şekillerde hızın sonsuz olması durumunda yer değiştirmelerin en büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama maksimum değerleri izolasyonsuz duruma göre daha büyük olmasına karşılık zahiri-statik yer değiştirmeler birbirine çok yakındır.

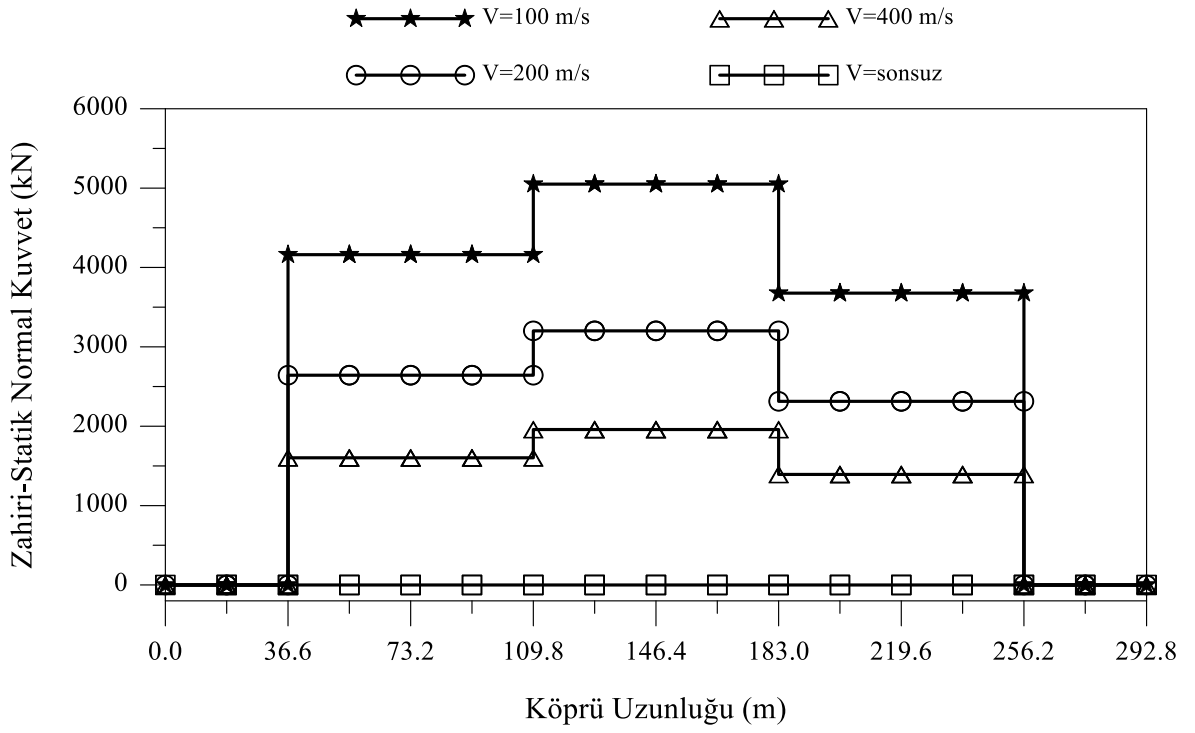
Üniform yer hareketine karşılık gelen hızın sonsuz olması durumunda köprü rijit cisim hareketi yapmaktadır. Bu nedenle Şekil 3.27, Şekil 3.33 ve Şekil 3.39'da görüldüğü gibi köprü tabliyesinde meydana gelen zahiri-statik normal kuvvetlerin, zahiri-statik kesme kuvvetlerin ve zahiri-statik eğilme momentlerin sıfır olduğu görülmektedir. Bu durum yapılan analiz sonuçlarının doğruluğu hakkında bilgi vermektedir.

Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu köprünün stokastik analizinde dalga yayılma hızının değişimi köprü tabliyesi

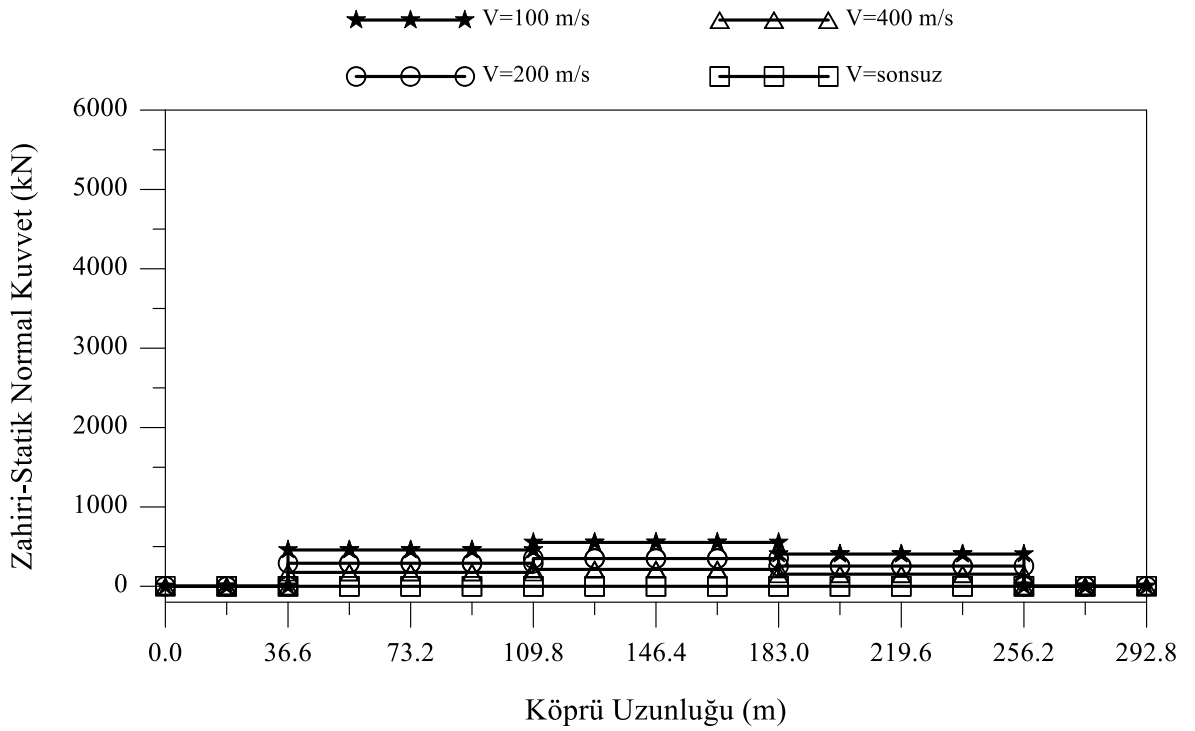
eleman kuvvetlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu durum ile sismik izolasyon sisteminin yumuşak zeminlerde kullanımının uygun olmayacağı sonucuna varılabilmektedir.



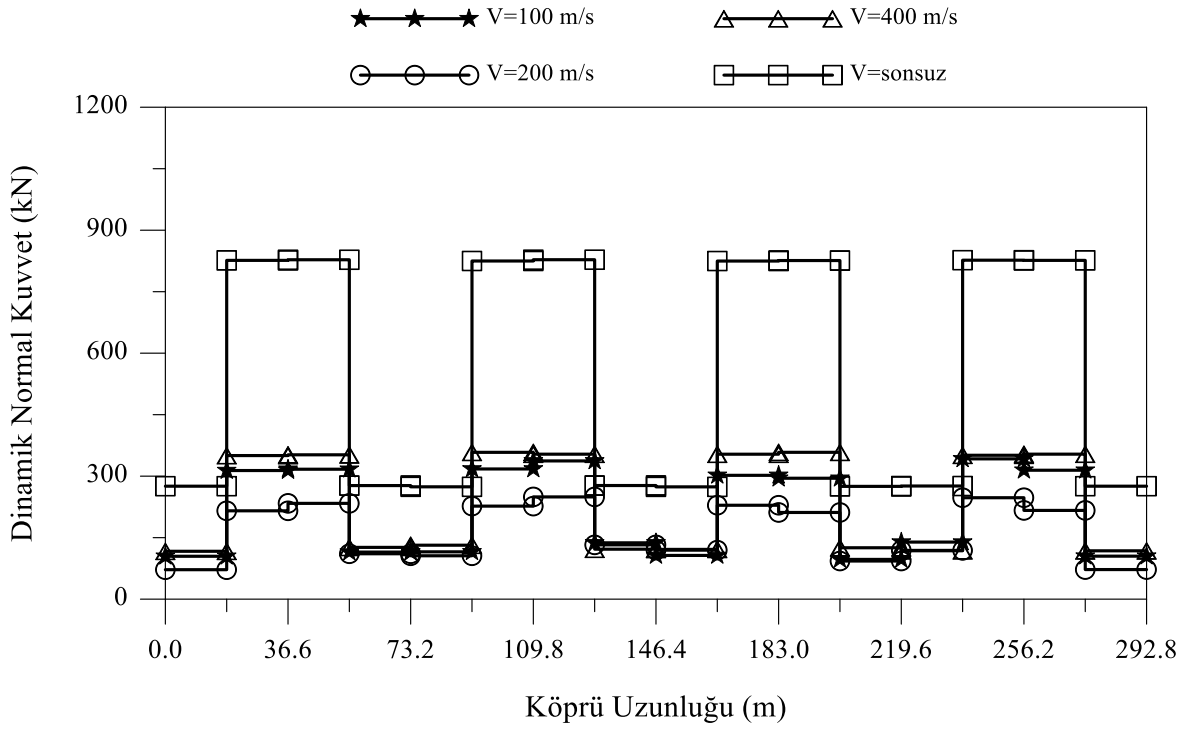
Şekil 3.26. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli



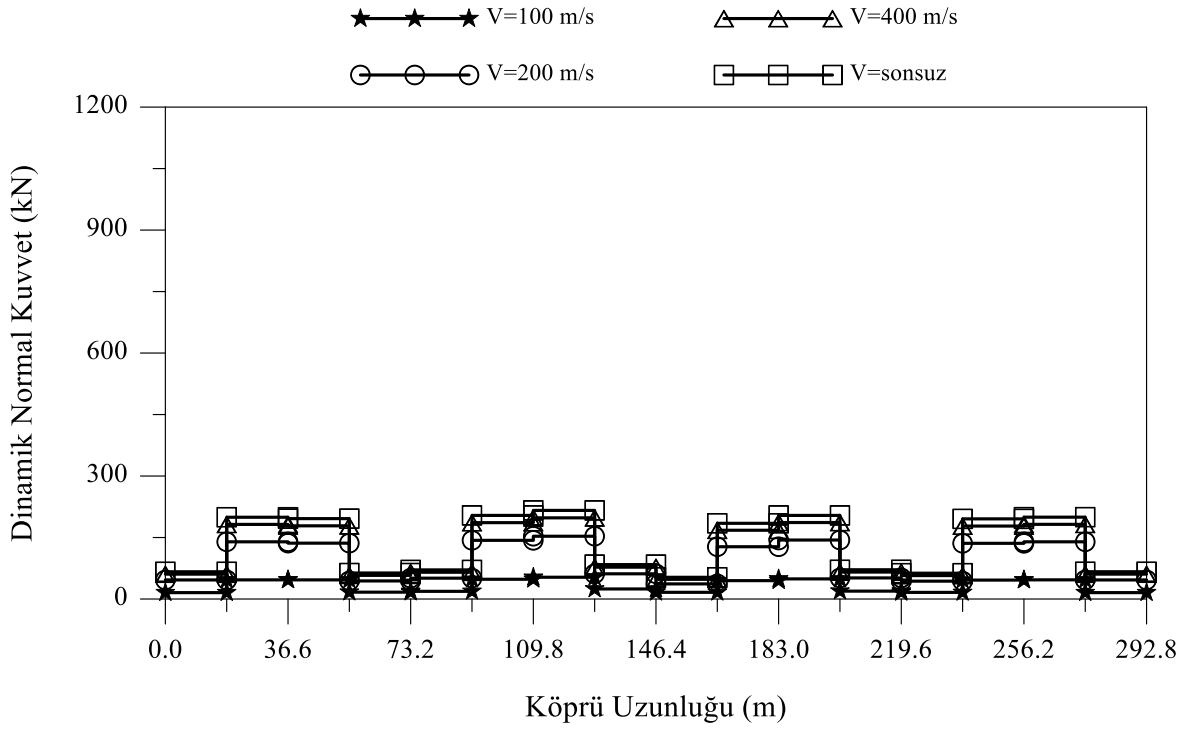
Şekil 3.27. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



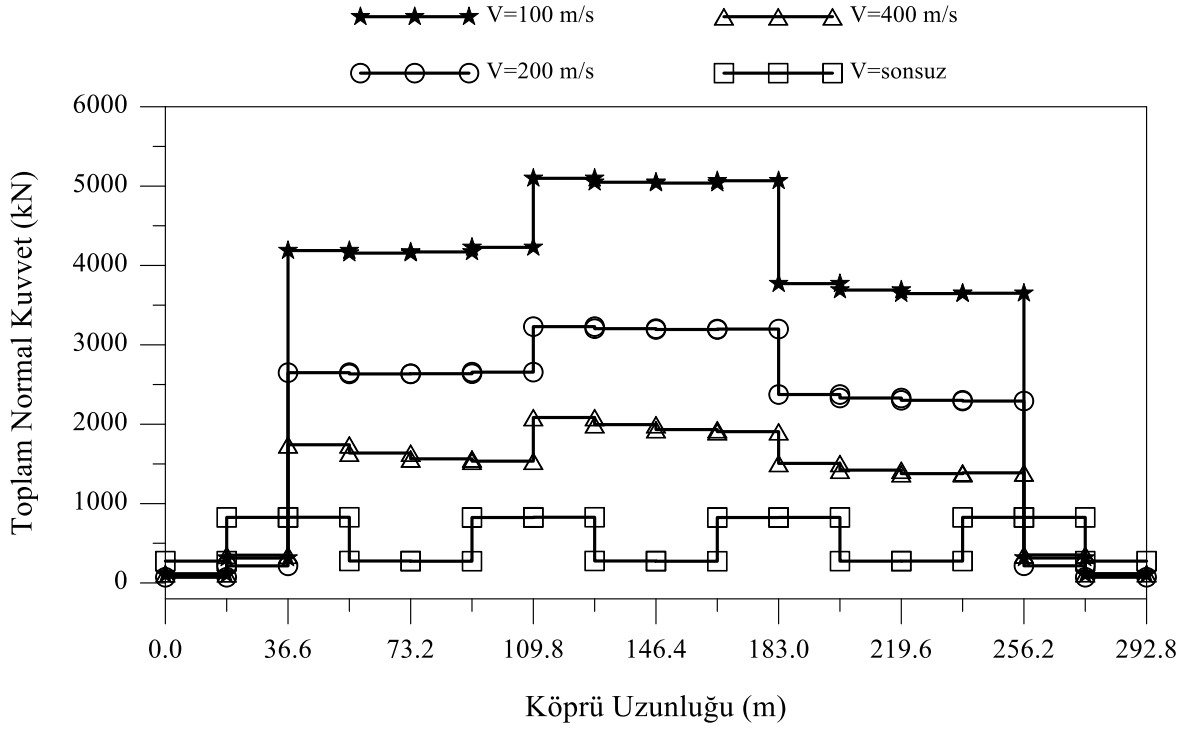
Şekil 3.28. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



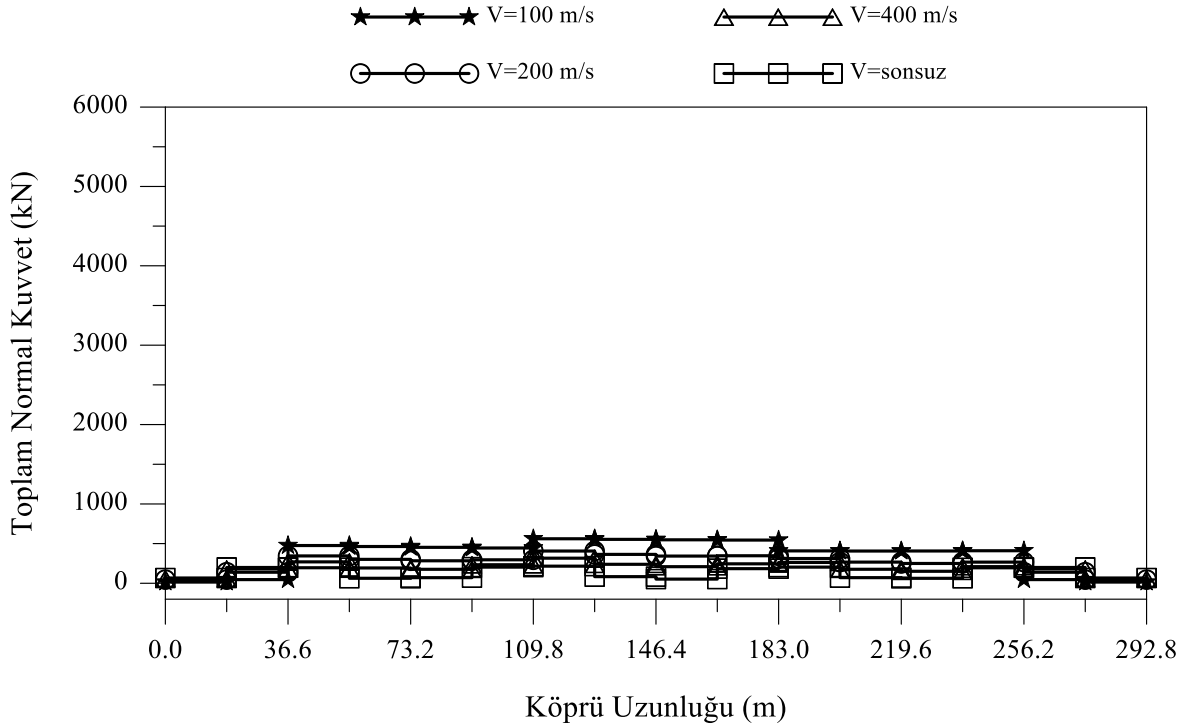
Şekil 3.29. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



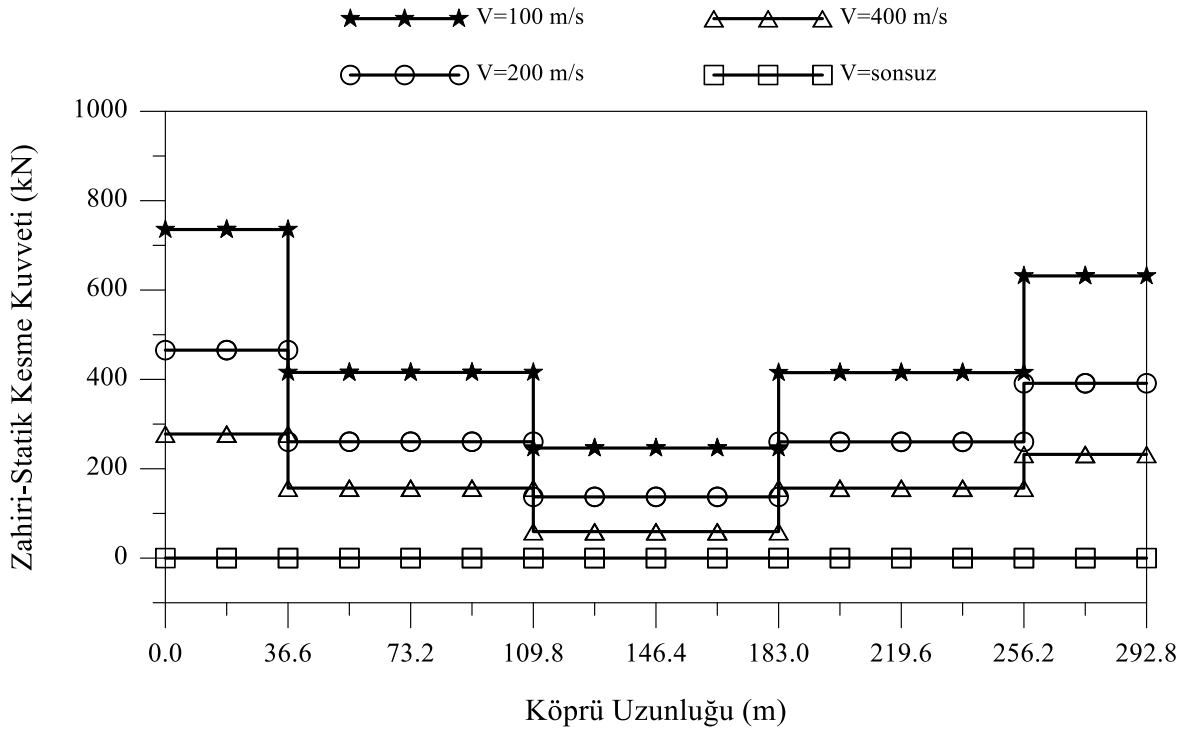
Şekil 3.30. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



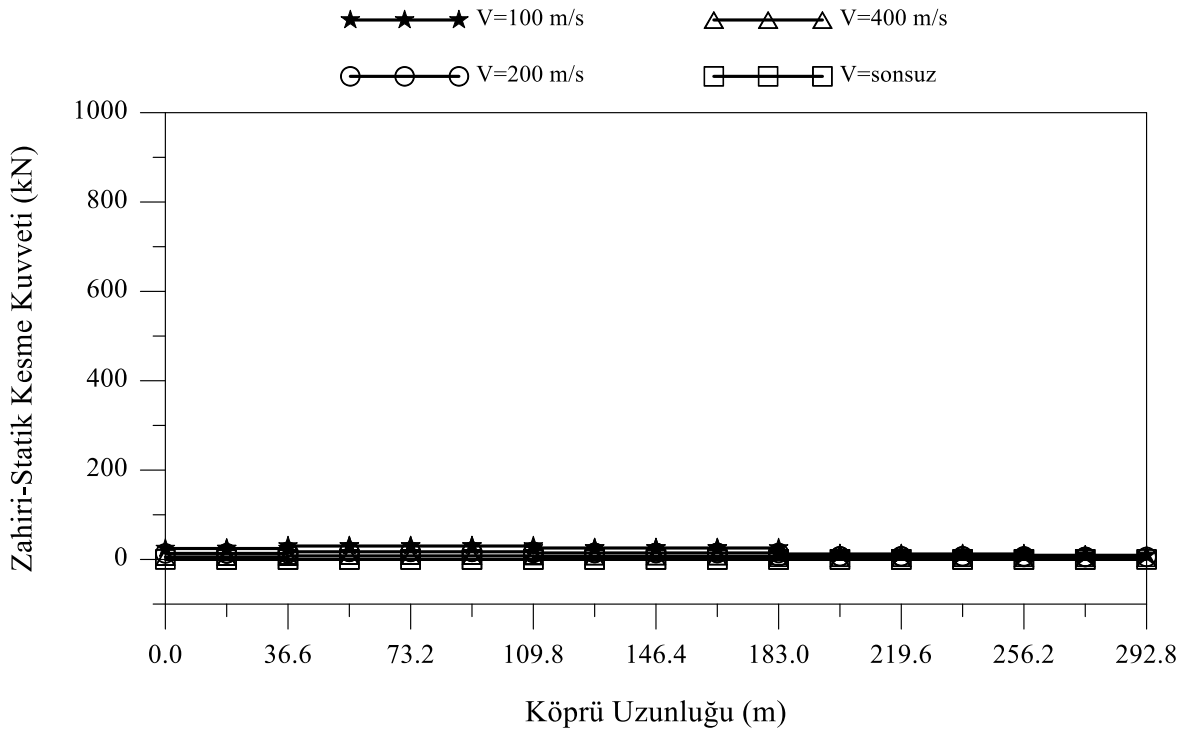
Şekil 3.31. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



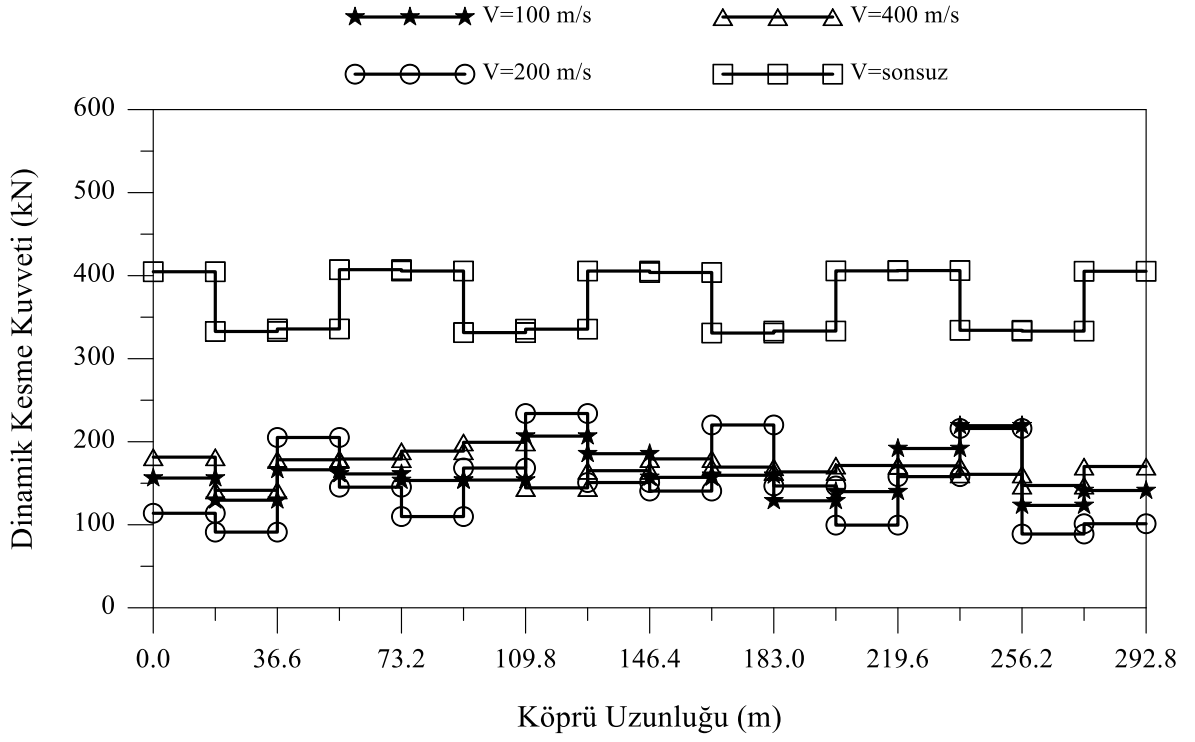
Şekil 3.32. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



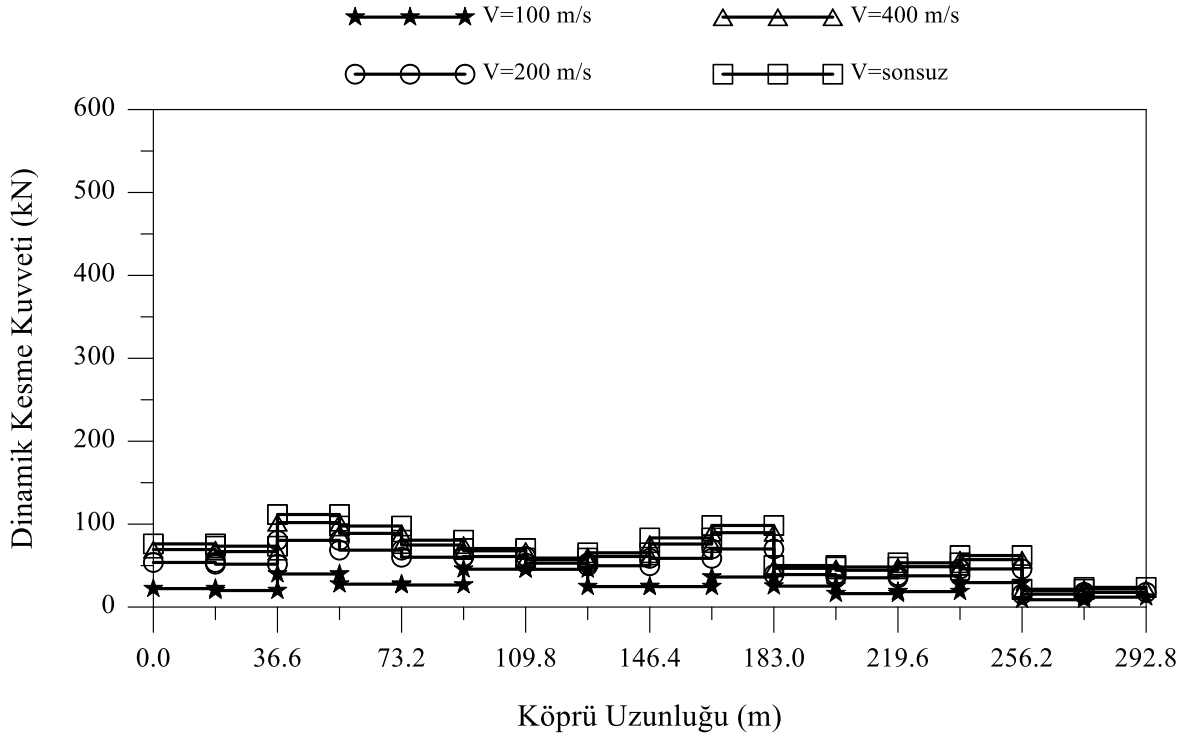
Şekil 3.33. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvveti



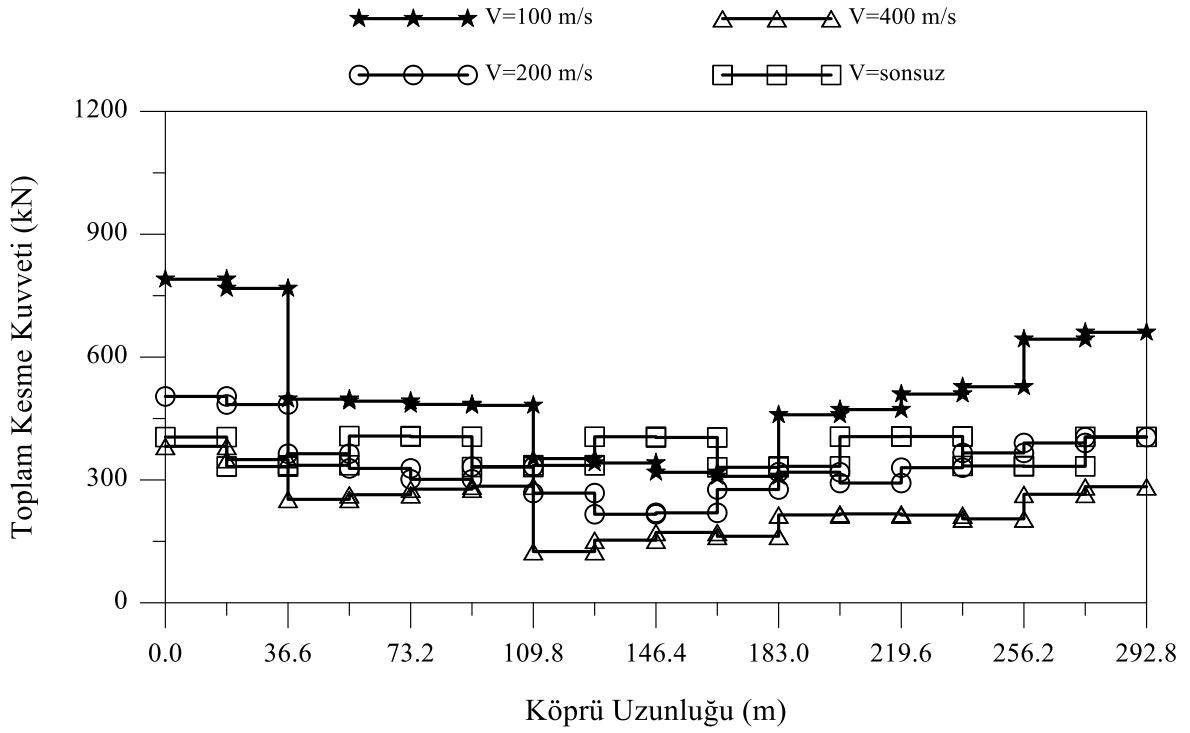
Şekil 3.34. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvveti



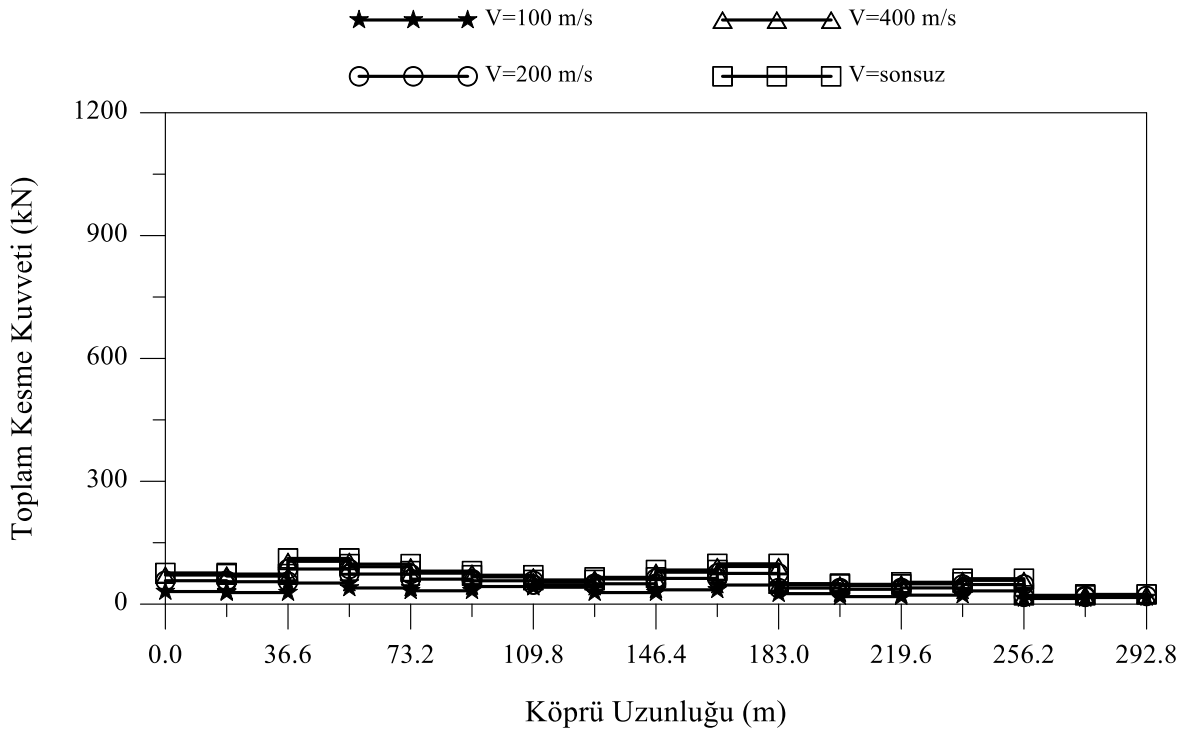
Şekil 3.35. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti



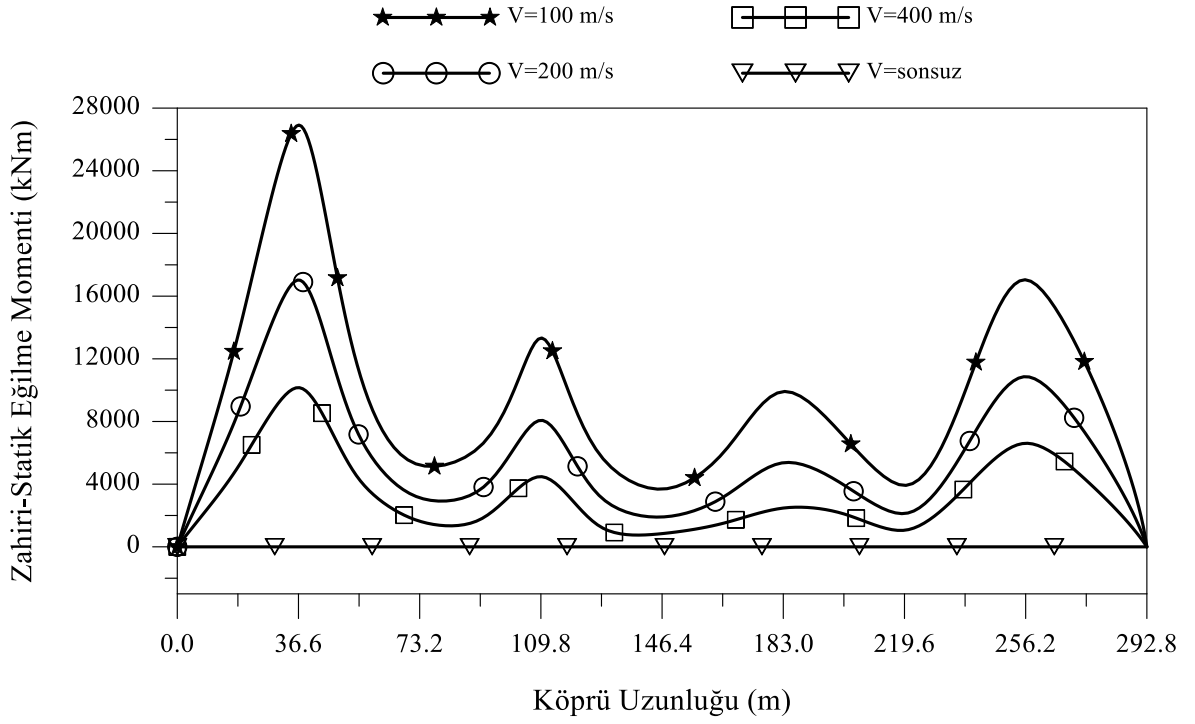
Şekil 3.36. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvveti



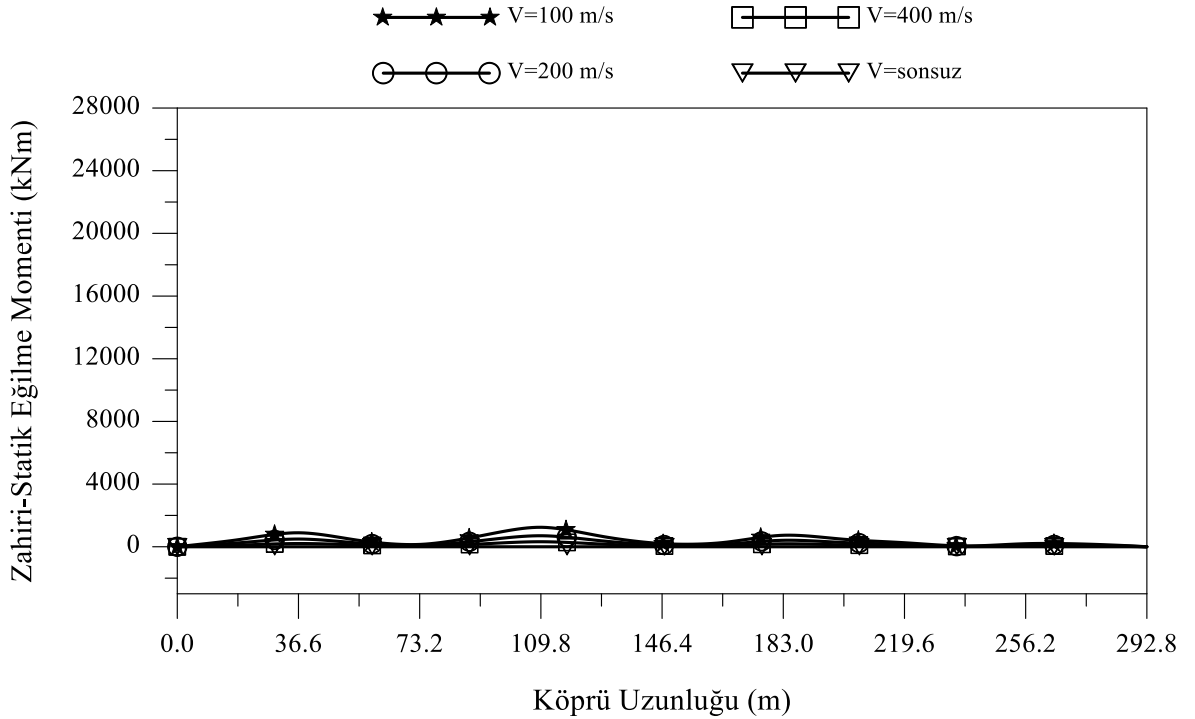
Şekil 3.37. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti



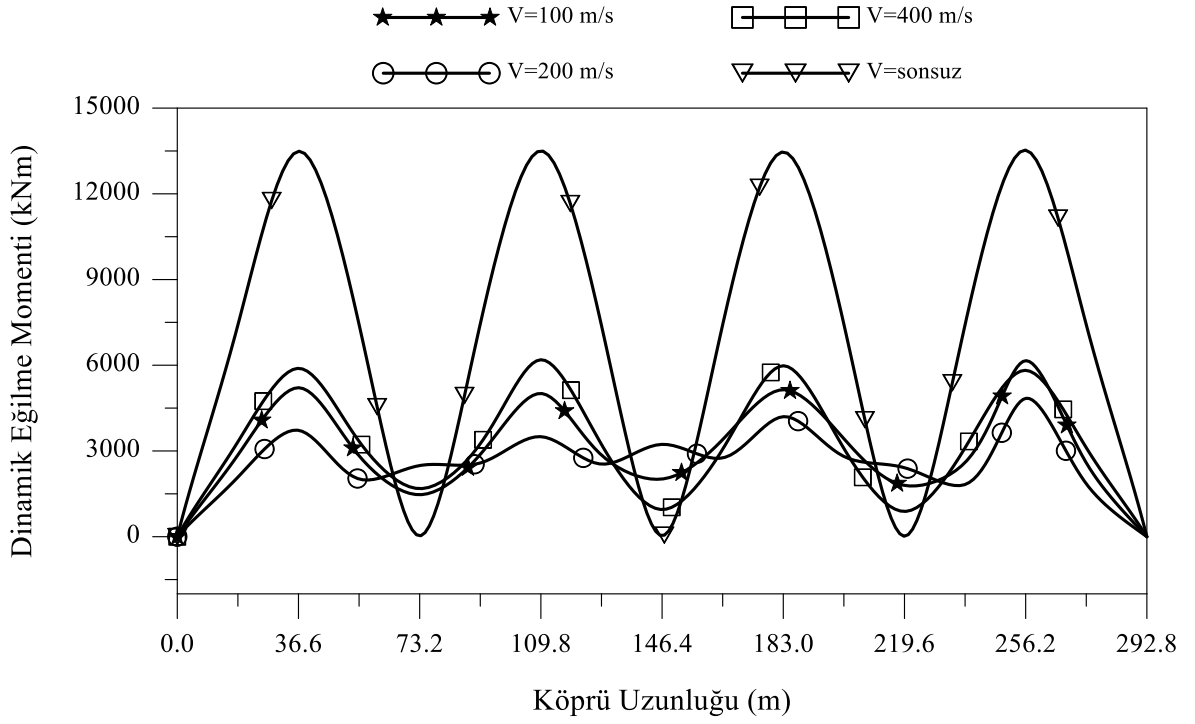
Şekil 3.38. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvveti



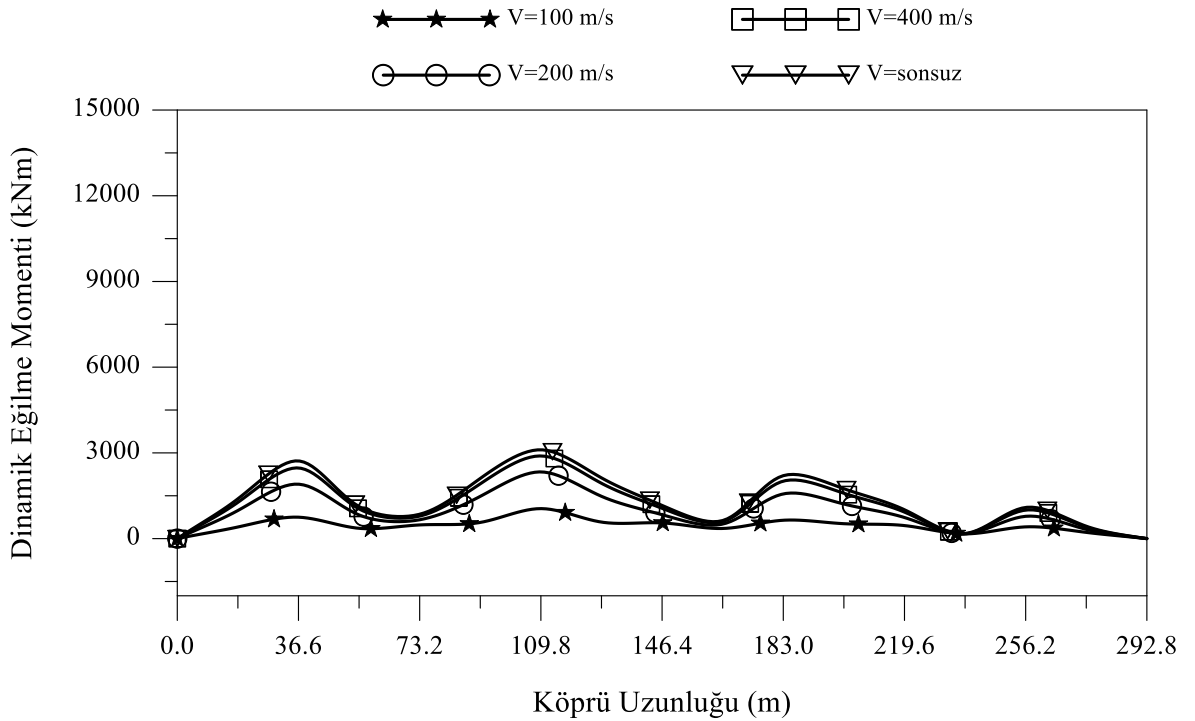
Şekil 3.39. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



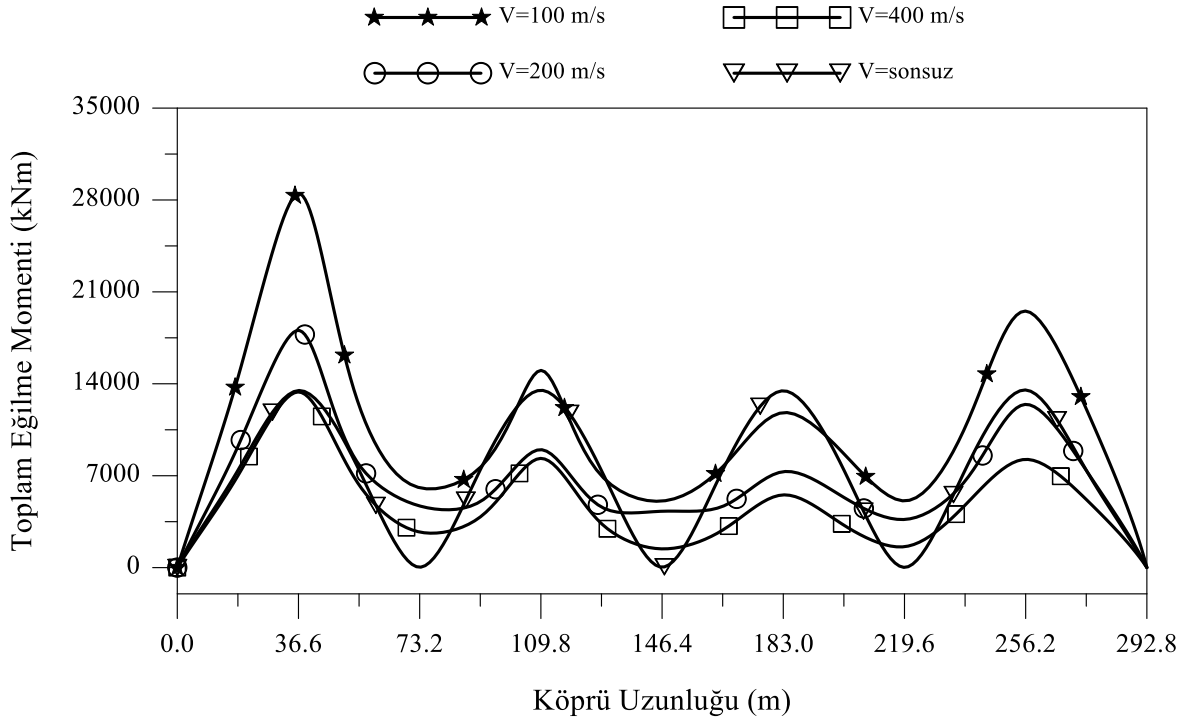
Şekil 3.40. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



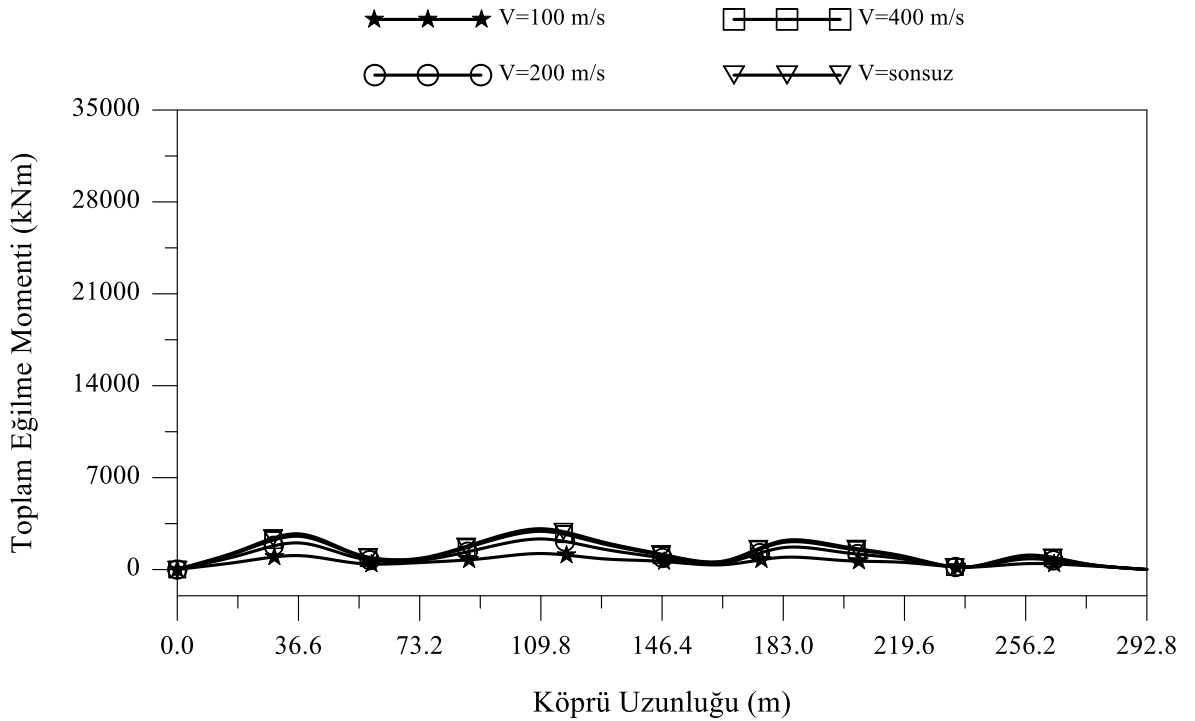
Şekil 3.41. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



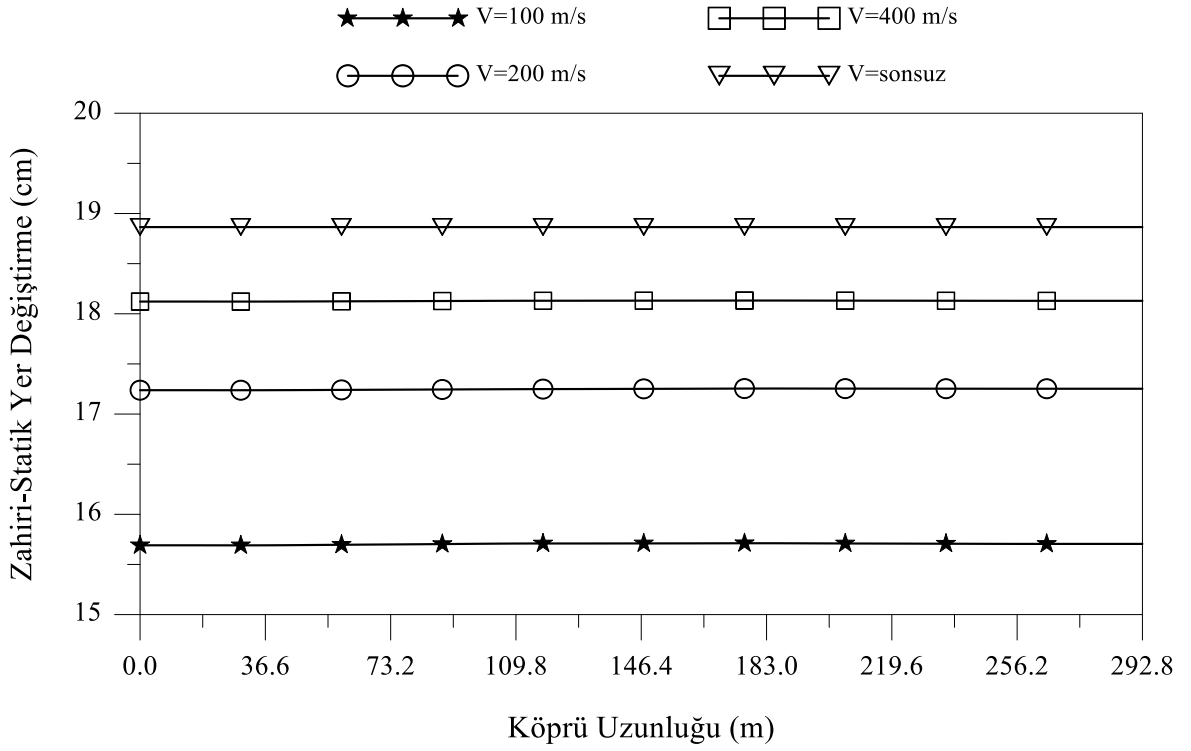
Şekil 3.42. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



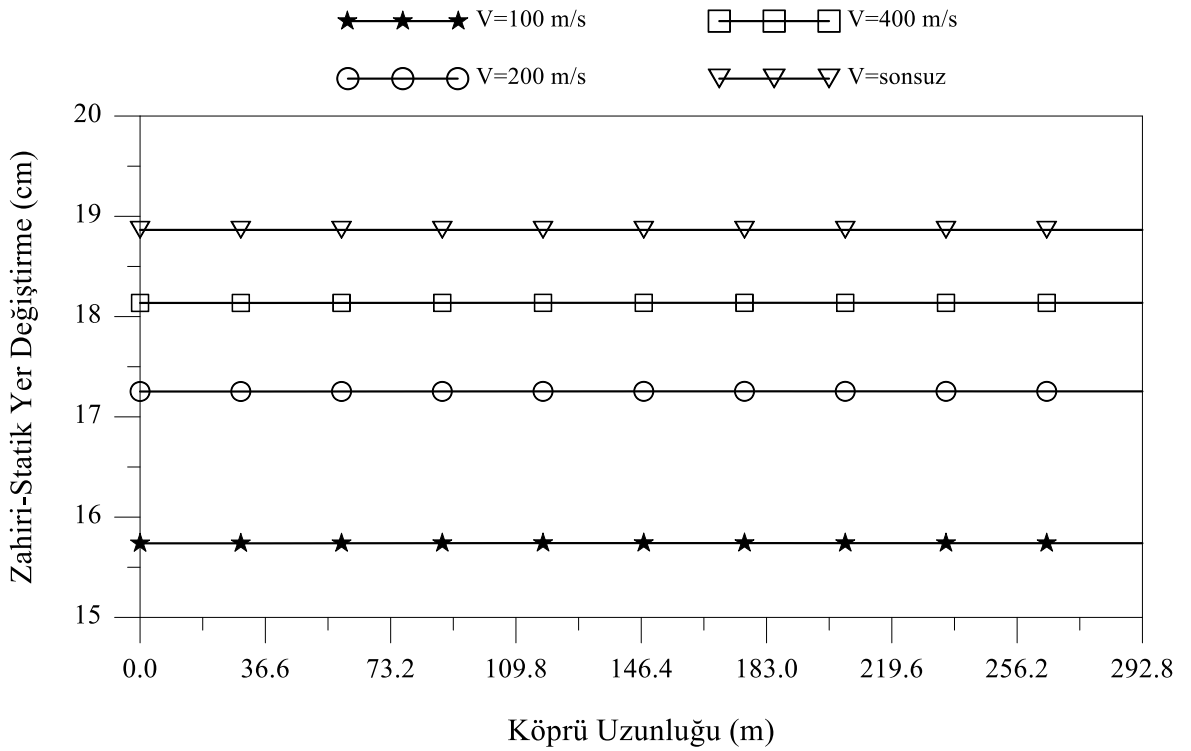
Şekil 3.43. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



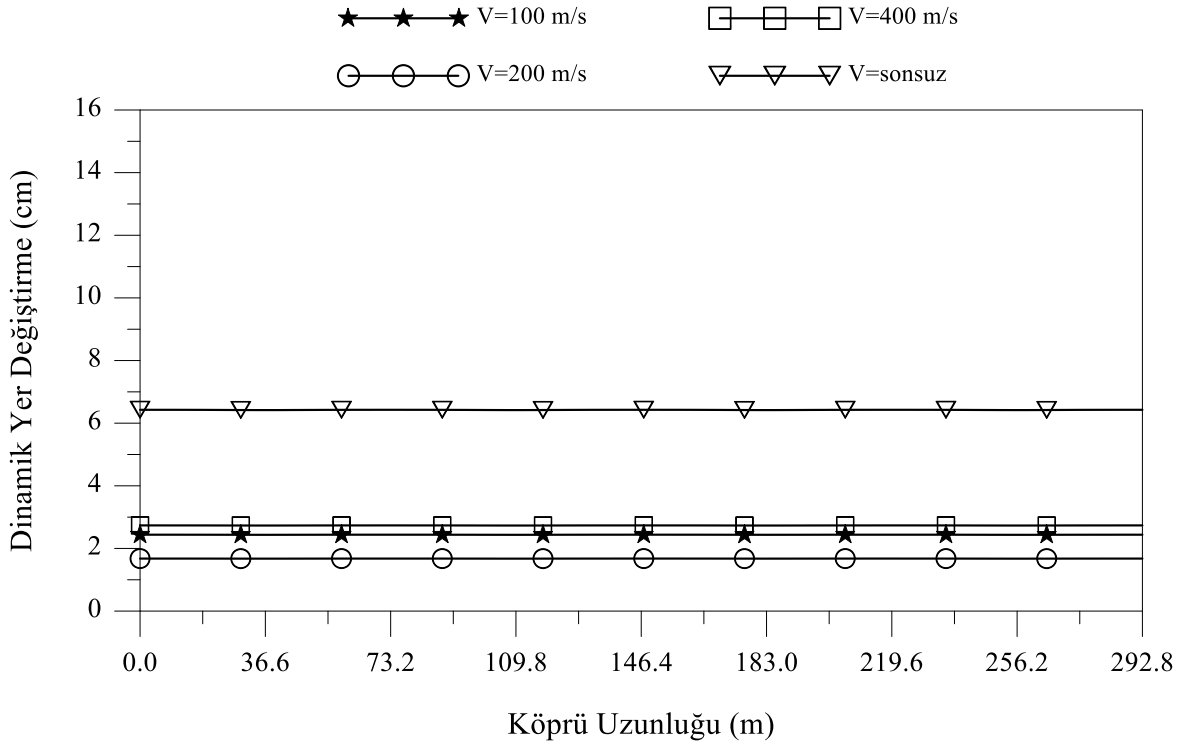
Şekil 3.44. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



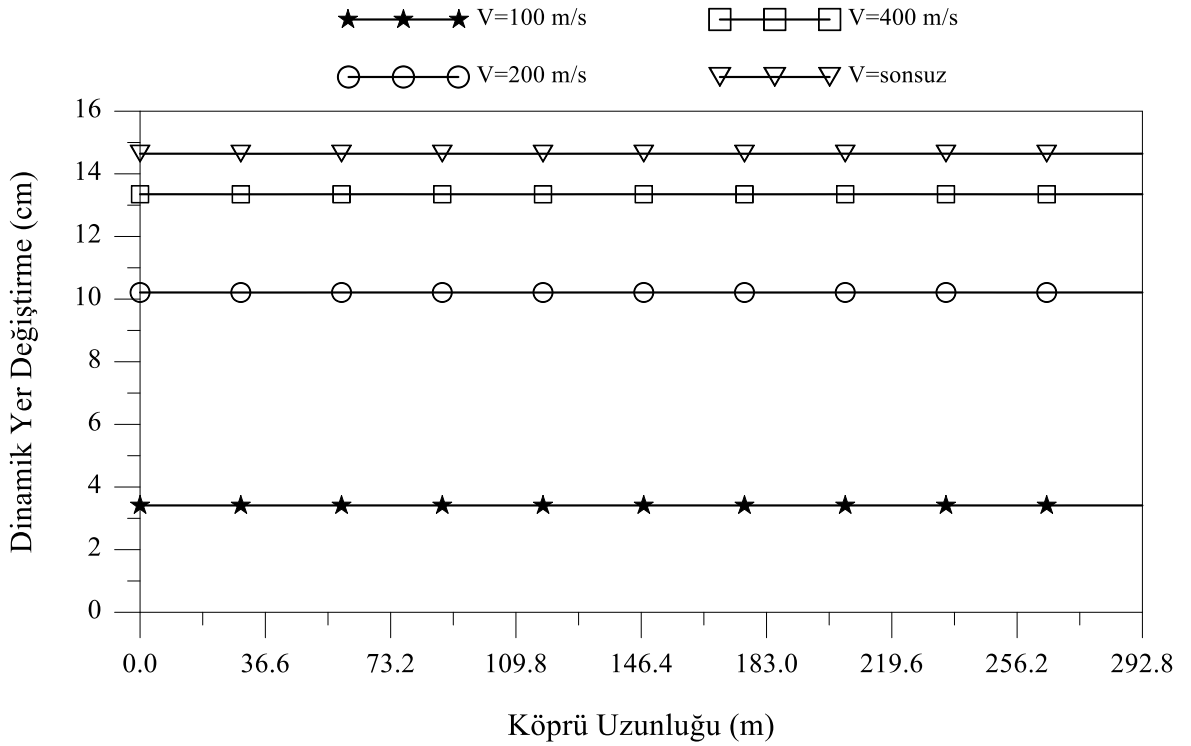
Şekil 3.45. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



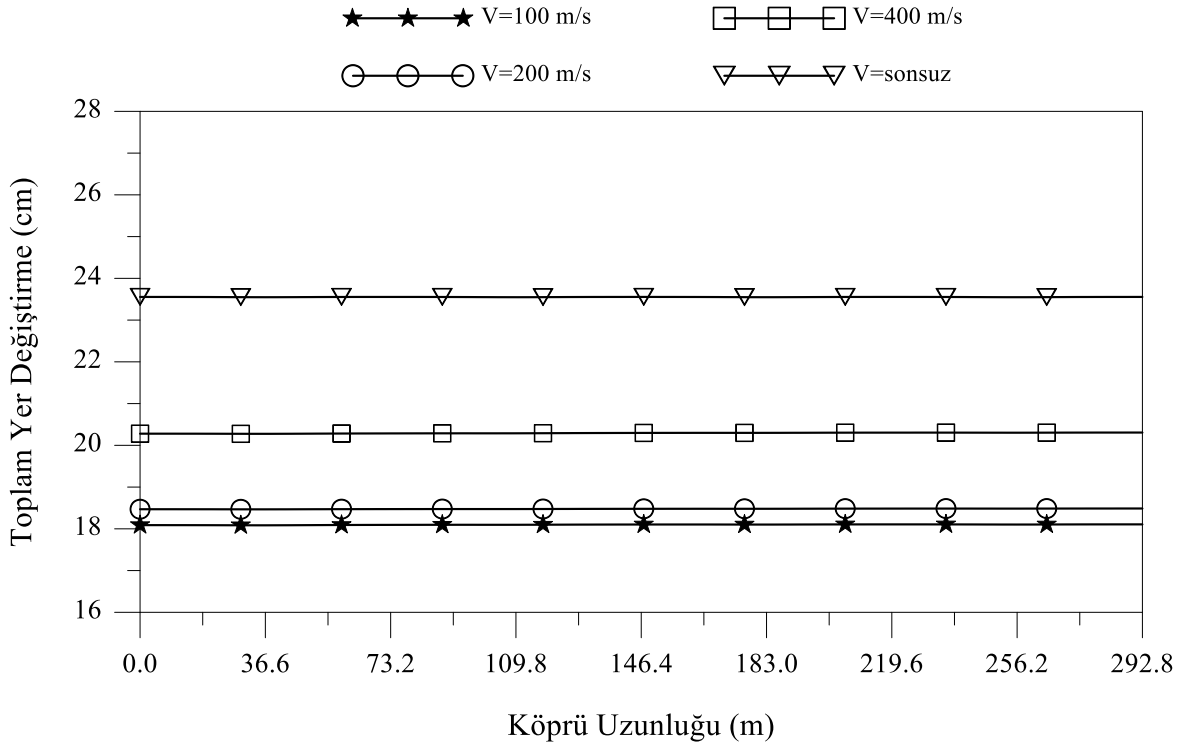
Şekil 3.46. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



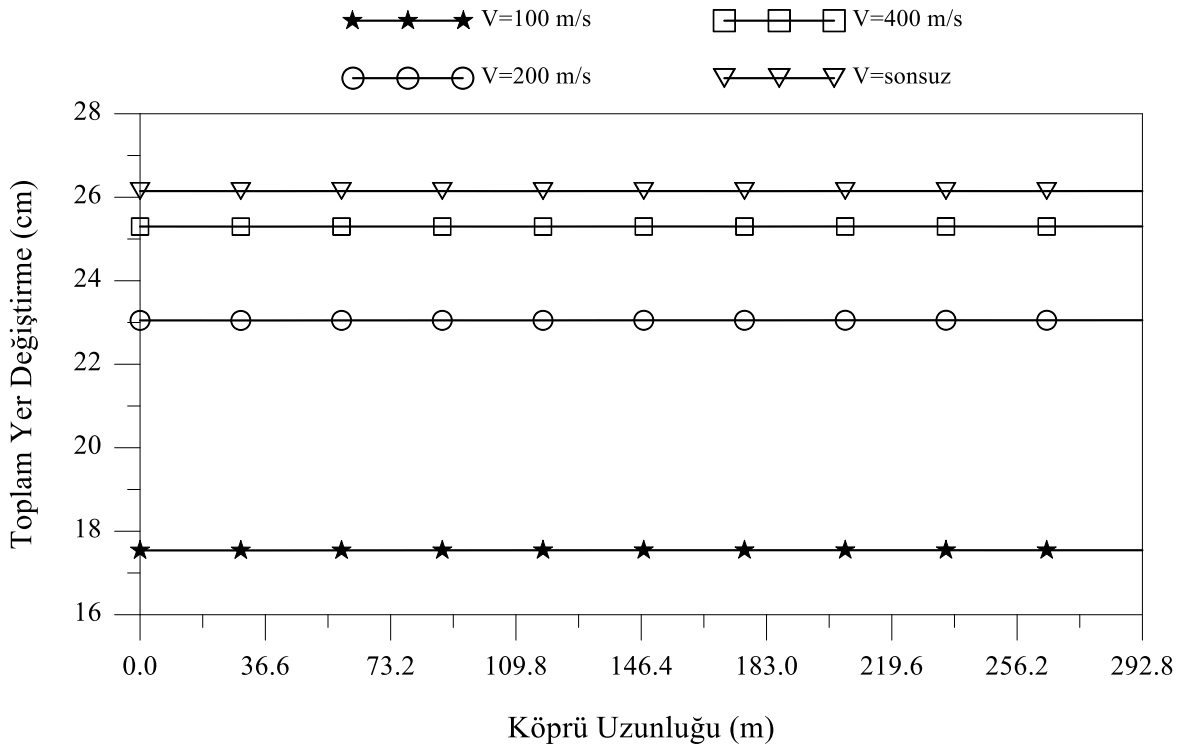
Şekil 3.47. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.48. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.49. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri



Şekil 3.50. Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri

3.1.2. Sadece Tutarsızlık Etkisine Maruz Köprünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

3.1.2.1. Homojen Sert Zemin Durumu

Bu alt bölümde karayolu köprüsünün mesnetlendiği zeminin homojen ve sert olduğu kabulü yapılarak dalga yayılma etkisi ihmal edilip sadece tutarsızlık etkileri dikkate alınan sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnedi ile sismik izolasyonu yapılan köprünün stokastik analizleri yapılmıştır. Bu durum, denklem (2.9)'da tutarsızlık etkisinin $|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$, zemin etkisinin $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ ve dalga yayılma etkisinin $\gamma_{lm}(\omega)^d = 1$ olması anlamına gelmektedir. Tutarsızlık etkisini ifade etmek için iki farklı tutarsızlık modeli kullanılmıştır. Bu modeller denklem (2.10) ile ifade edilen Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli ve denklem (2.12) ile ifade edilen Uscinski (1977) tutarsızlık modelleridir. Yer hareketi olarak sert zeminlerde kaydedilen 9 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı'ndaki istasyonun PUL164 bileşenini kullanılmıştır. Şekil 3.51'de tutarsızlık etkilerine maruz homojen sert zemine mesnetlenen karayolu köprüsü gösterilmiştir.

Sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizleri sonucunda karayolu köprüsünün tabliyesinde elde edilen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler Şekil 3.52-3.75'te gösterilmiştir. Gösterilen grafikler eleman kuvvetleri ve yer değiştirmelerin zahiri-statik, dinamik ve toplam değerlerinden oluşmaktadır. Şekillerde ayrıca korelasyon etkisi dikkate alınmadan üniform yer hareketi durumunda hesaplanan değerler de karşılaştırma amacıyla verilmiştir.

Şekil 3.52-3.57'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam normal kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %89, %57 ve %78 oranında azaltmıştır. Şekil 3.52-3.53'te görüldüğü gibi zahiri statik normal kuvvetler köprü uzunluğunun ortasında artarken kenar ayaklarına doğru azalmıştır. Şekil 3.52-3.57'de görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz köprülerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen zahiri-statik ve toplam normal kuvvet değerleri Uscinski tutarsızlık modeli kullanılması ve üniform yer hareketi olması durumundan elde edilen değerlerden daha büyük olmaktadır.

Buna karşılık dinamik kesme kuvvetlerinde üniform yer hareketi olması durumunda elde edilen değerler en büyüktür.

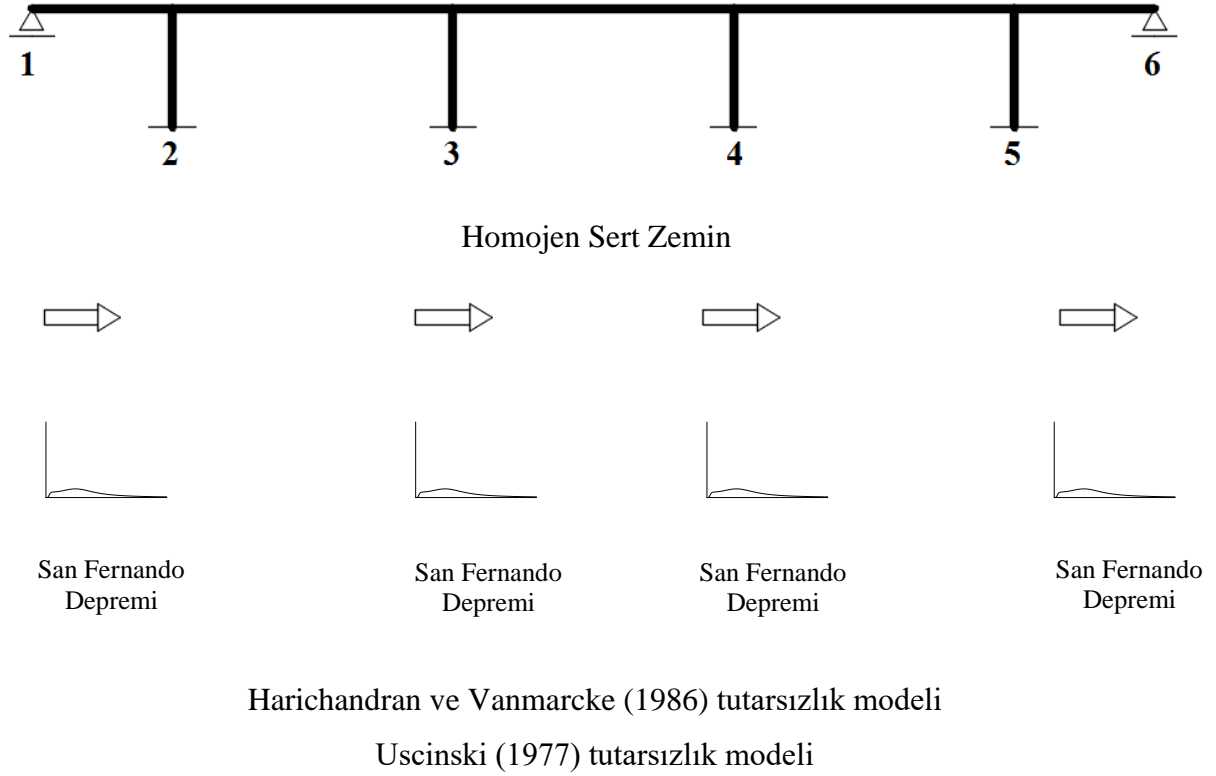
Şekil 3.58-3.63'te görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam kesme kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %94, %47 ve %52 oranında azaltmıştır. Şekil 3.58-3.59'da görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izlasyonsuz köprülerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen zahiri-statik kesme kuvveti değerleri Uscinski tutarsızlık modeli kullanılması ve üniform yer hareketi olması durumundan elde edilen değerlerden oldukça büyük olmaktadır. Bununla birlikte Şekil 3.60-3.61'de görüldüğü gibi dinamik kesme kuvvetlerinde üniform yer hareketi olması durumunda elde edilen değerler daha büyüktür. Şekil 3.62-3.63'te görüldüğü gibi izolasyonsuz durumda toplam kesme kuvvetinde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli kullanılması ile elde edilen değerler diğer durumlardan elde edilen değerlerden daha büyük olmaktadır. Buna karşılık sismik izolasyonlu köprüde üniform yer hareketi olması durumunda toplam kesme kuvveti değerleri daha büyük olmaktadır.

Şekil 3.64-3.69'da görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %94, %58 ve %63 oranında azaltmıştır. Şekil 3.64-3.65'te görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz köprülerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen zahiri-statik eğilme momenti değerleri Uscinski tutarsızlık modeli kullanılması ve üniform yer hareketi olması durumundan elde edilen değerlerden oldukça büyük olmaktadır. Bununla birlikte Şekil 3.66-3.67'de görüldüğü gibi dinamik eğilme momentlerinde üniform yer hareketi olması durumunda elde edilen değerler daha büyüktür. Şekil 3.68-3.69'da görüldüğü gibi izolasyonsuz durumda toplam eğilme momentinde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli kullanılması ile elde edilen değerler Uscinski tutarsızlık modeli kullanılması ve üniform yer hareketi olması durumlarından daha büyük olmasına rağmen sismik izolasyonlu köprüde üniform yer hareketi olması durumunda toplam eğilme momenti değerleri daha büyük olmaktadır.

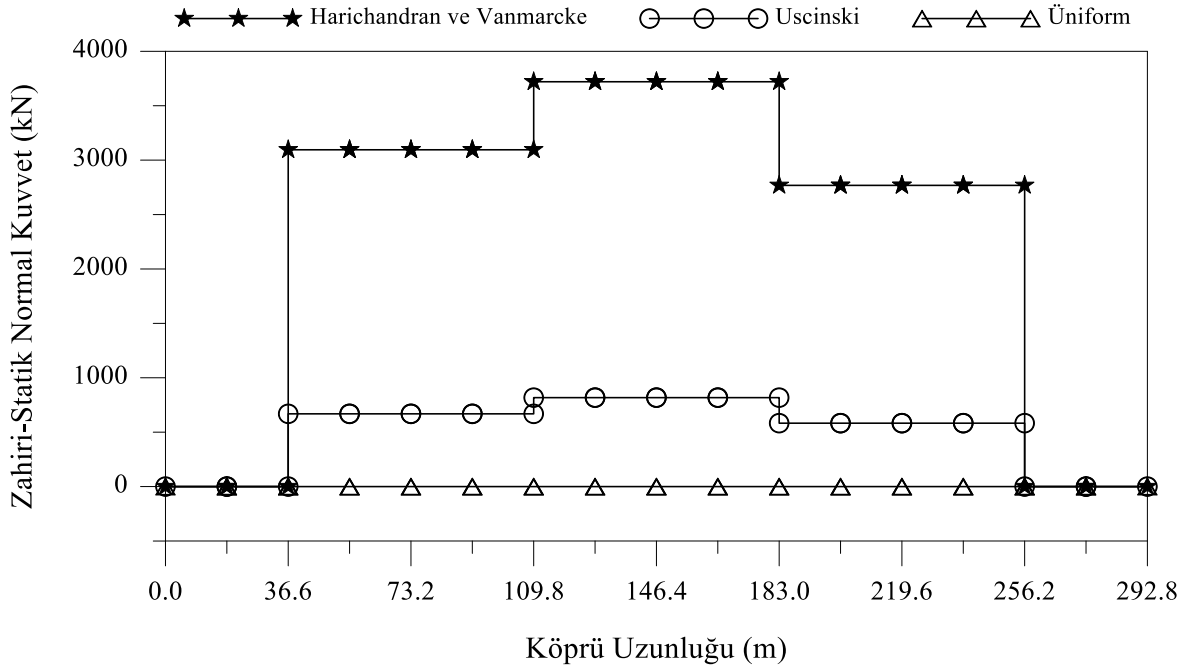
Şekil 3.70 ve Şekil 3.71'de görüldüğü üzere sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprüdeki zahiri-statik yer değiştirmeler birbirine çok yakındır. Şekil 3.72-3.75'te görüldüğü gibi sismik izolasyonlu köprü tabliyesinde oluşan dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama değerleri, sismik izolasyonsuz durumdakinden sırasıyla %239 ve

%97 daha büyük olmaktadır. Bu durum ÜESS mesnet sistemine izin verilen yer değiştirme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli kullanılması ile elde edilen yer değiştirme değerleri en az olmaktadır. Üniform ve Uscinski tutarsızlık modeli kullanımı ile elde edilen yer değiştirme değerleri birbirine yakın olmaktadır.

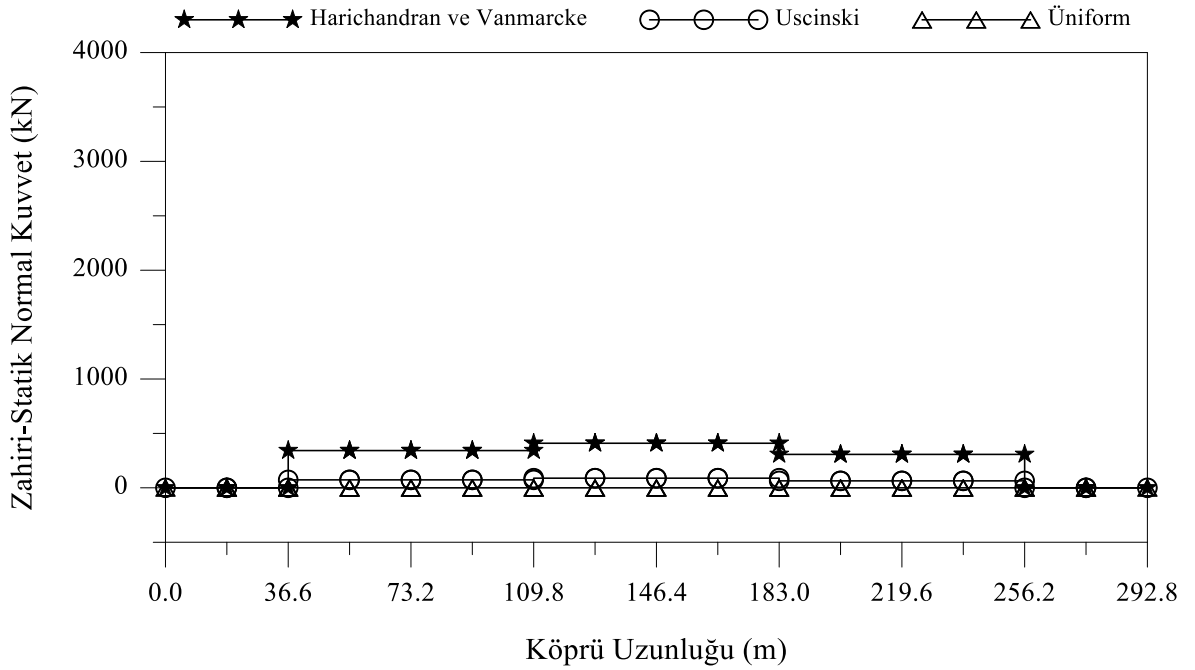
Deprem yer hareketleri köprüye yatay doğrultuda etki ettirilmiştir. Hızın sonsuz olduğu üniform yer hareketi durumunda köprü rijit cisim hareketi yapmaktadır. Bunun sonucu olarak Şekil 3.52-3.53, Şekil 3.58-3.59 ve Şekil 3.64-3.65'te köprü tabliyesinde meydana gelen zahiri-statik normal kuvvetlerin, zahiri-statik kesme kuvvetlerin ve zahiri-statik eğilme momentlerin değerleri sıfır olmaktadır.



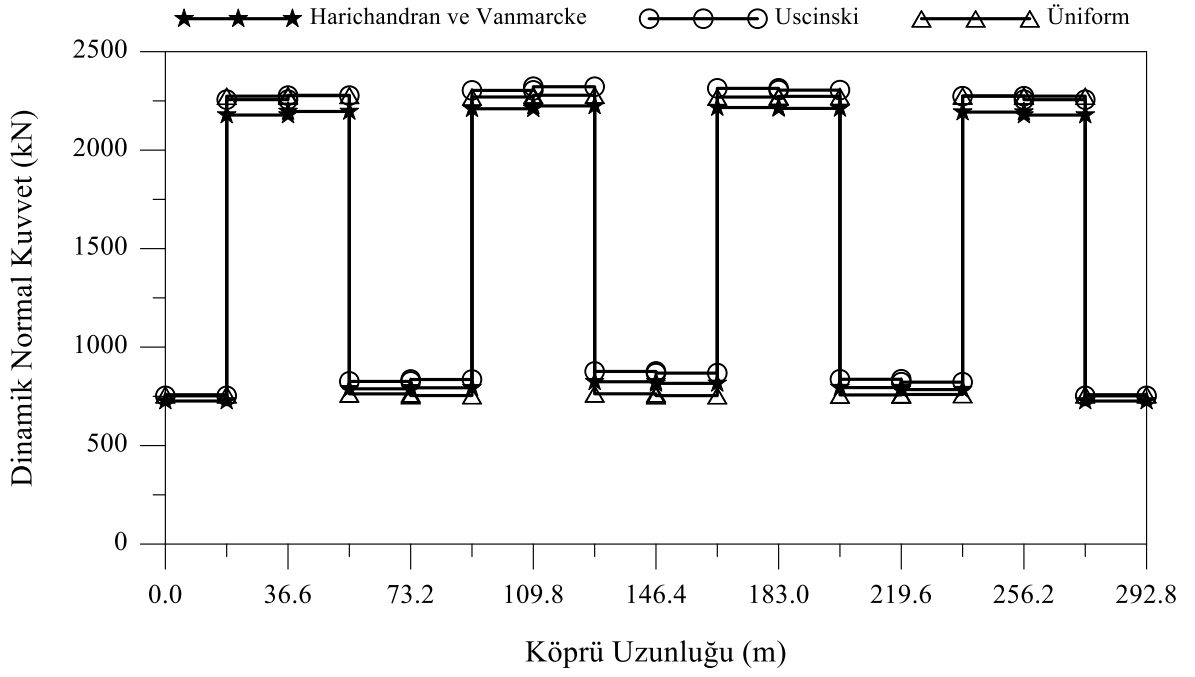
Şekil 3.51. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli



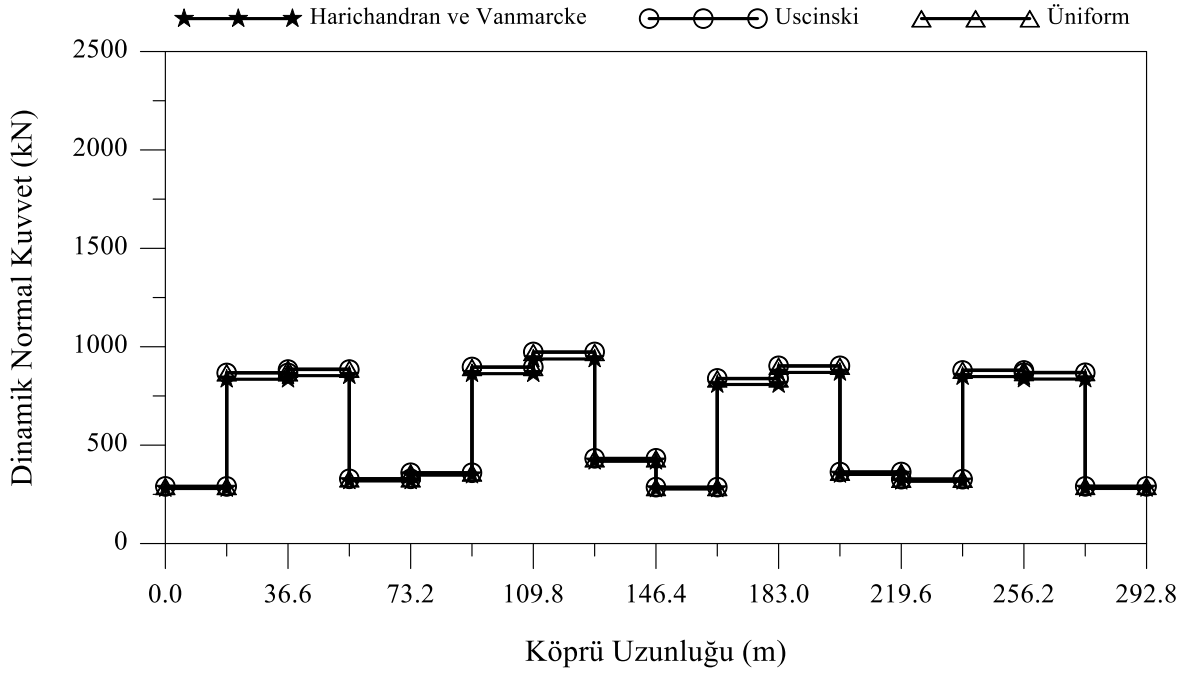
Şekil 3.52. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



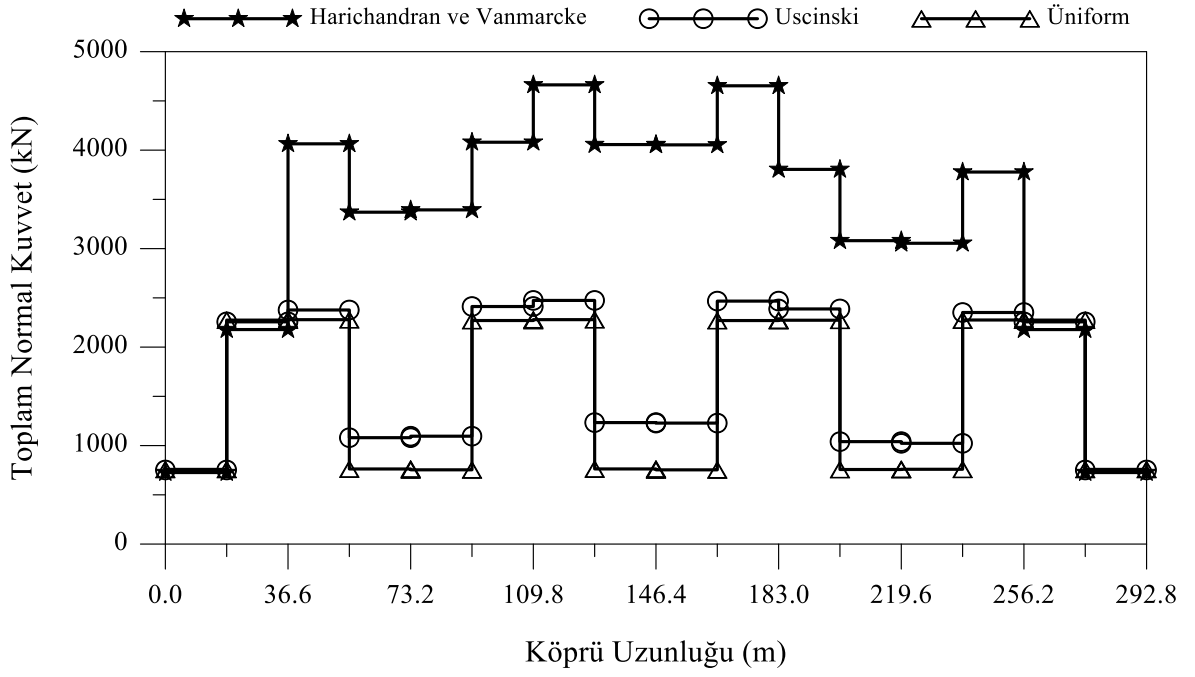
Şekil 3.53. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



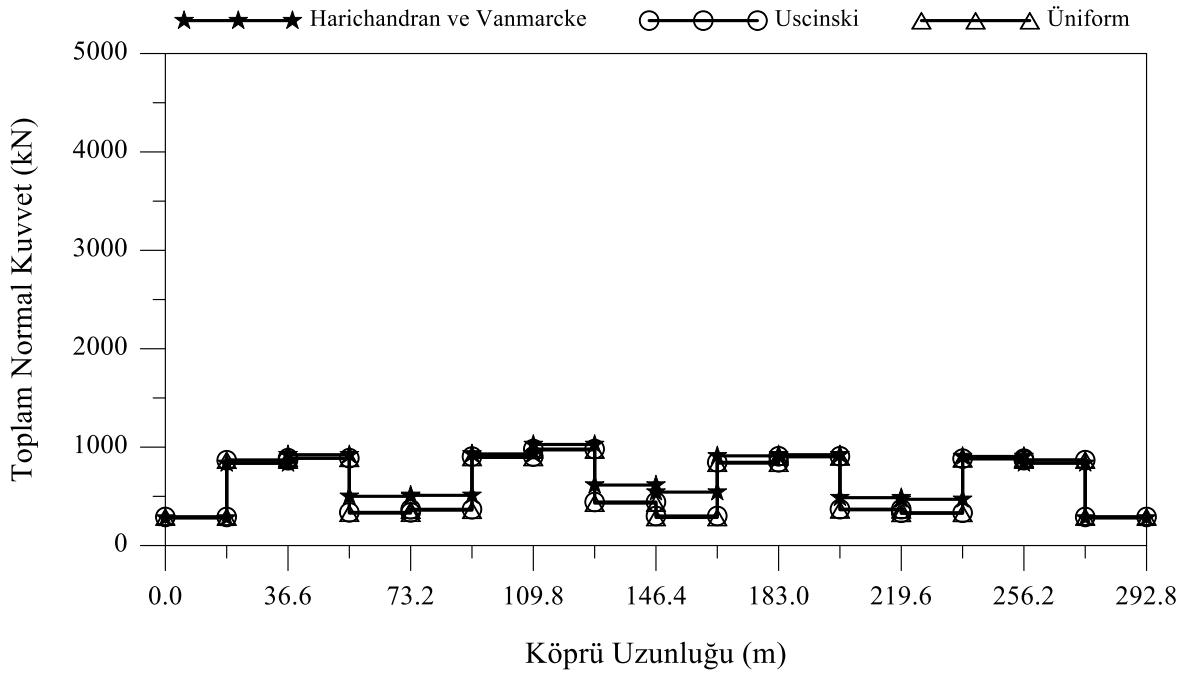
Şekil 3.54. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



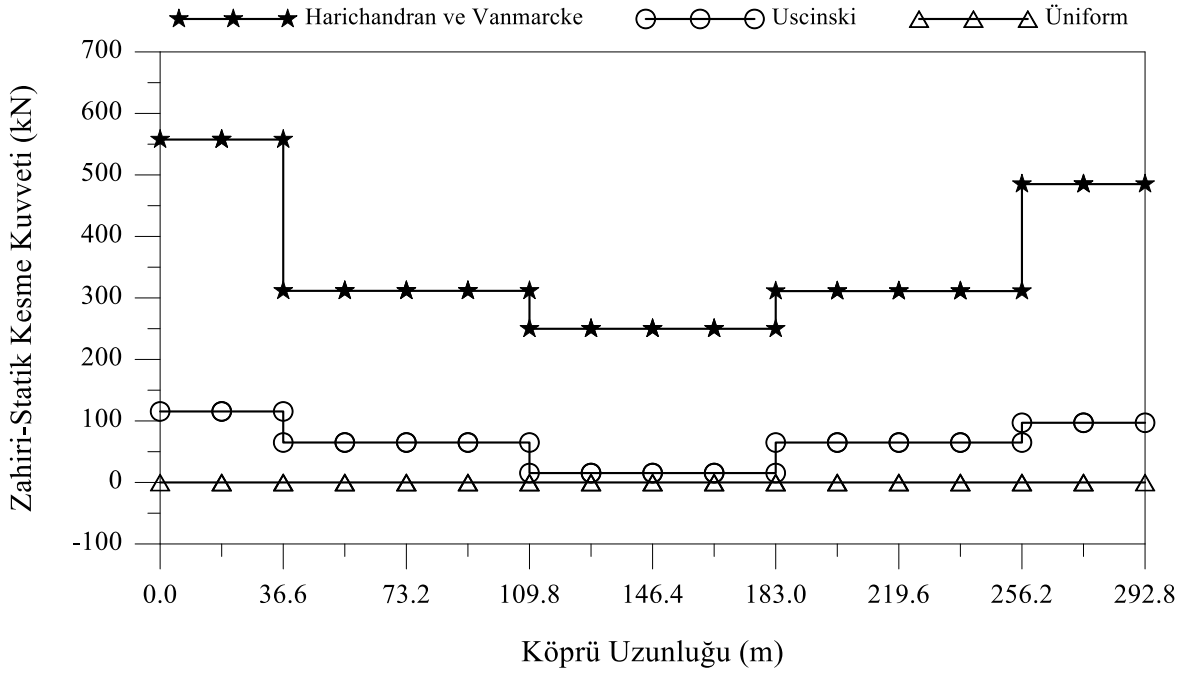
Şekil 3.55. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



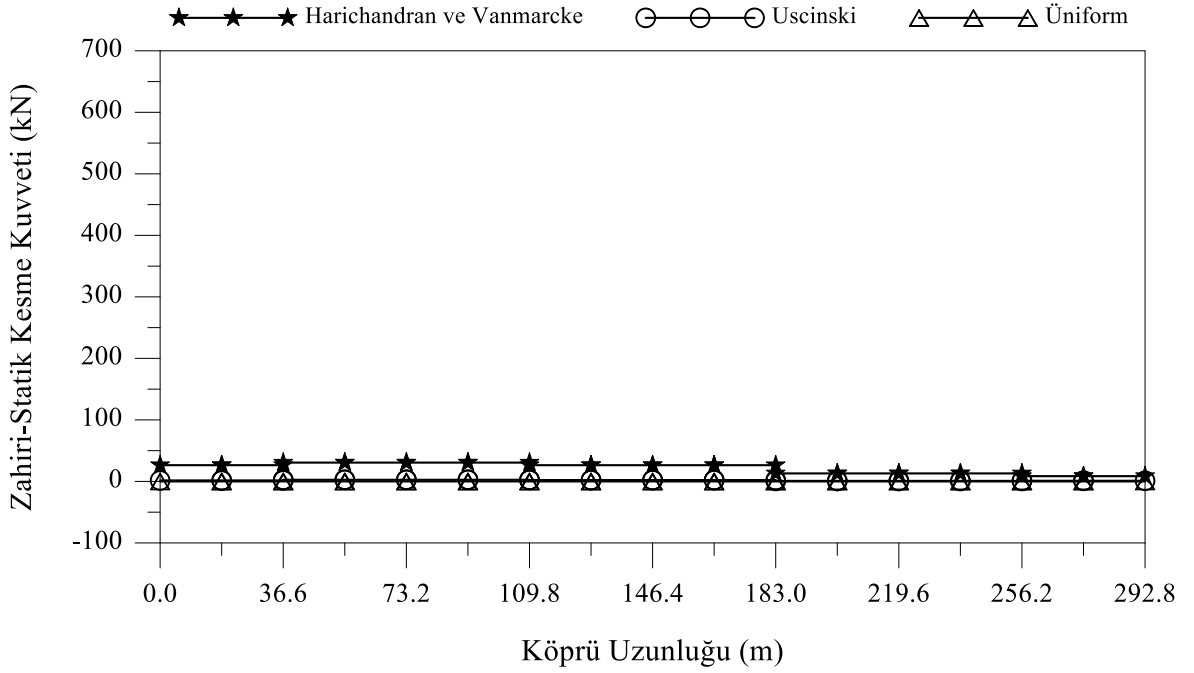
Şekil 3.56. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



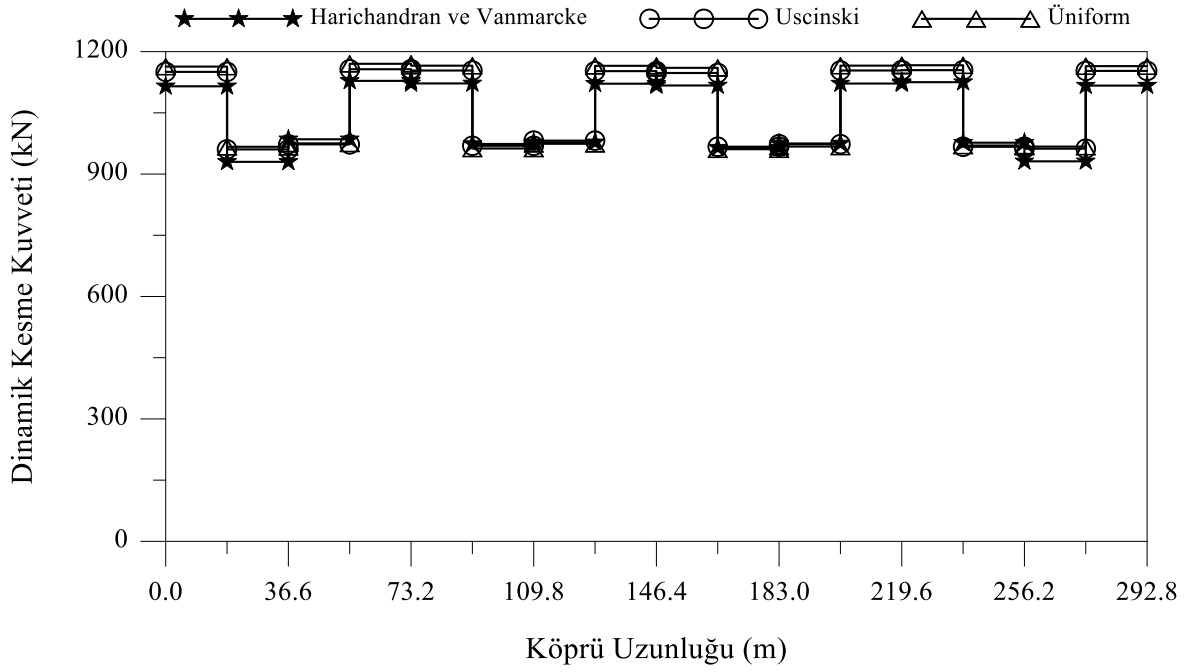
Şekil 3.57. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



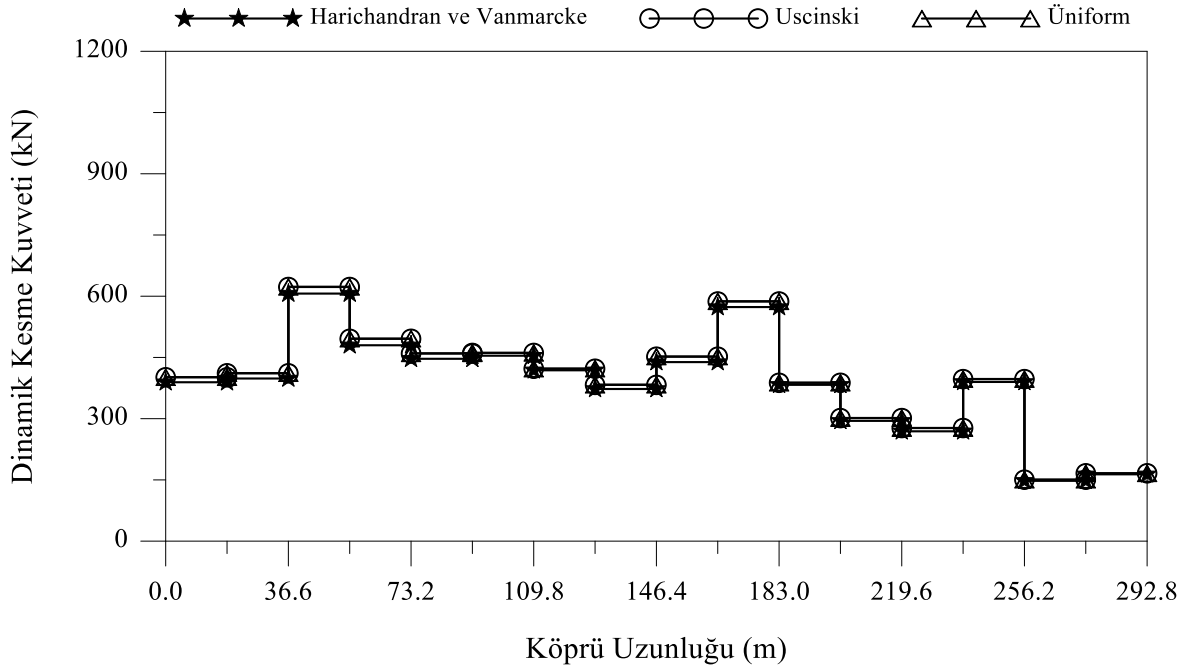
Şekil 3.58. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri



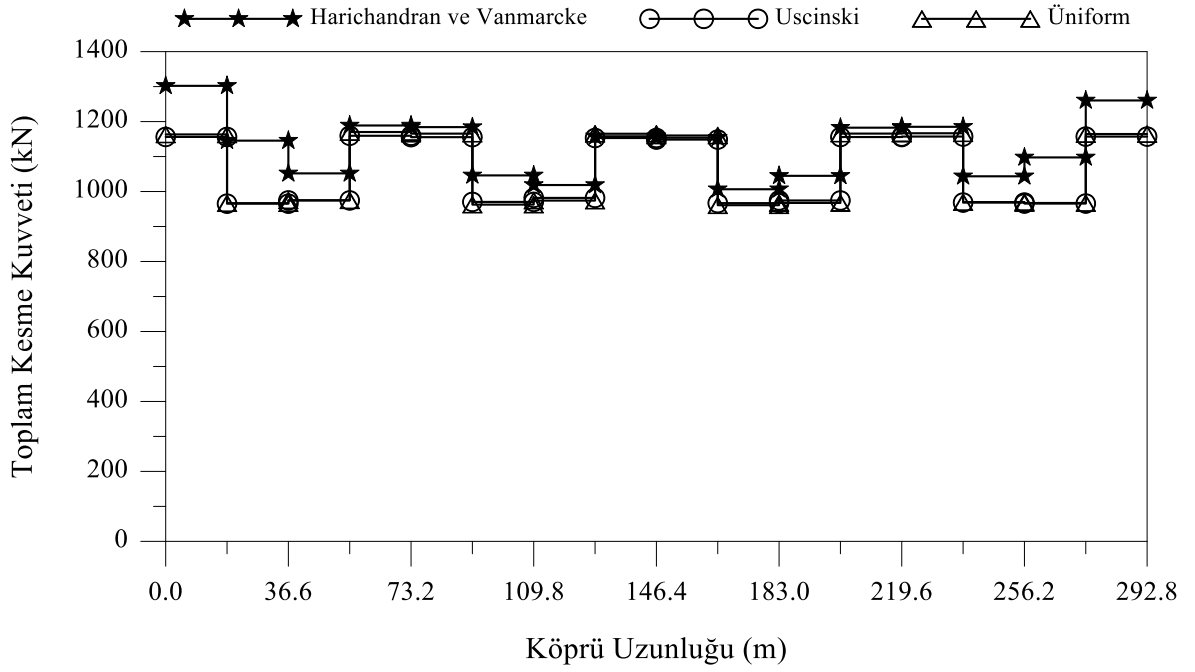
Şekil 3.59. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri



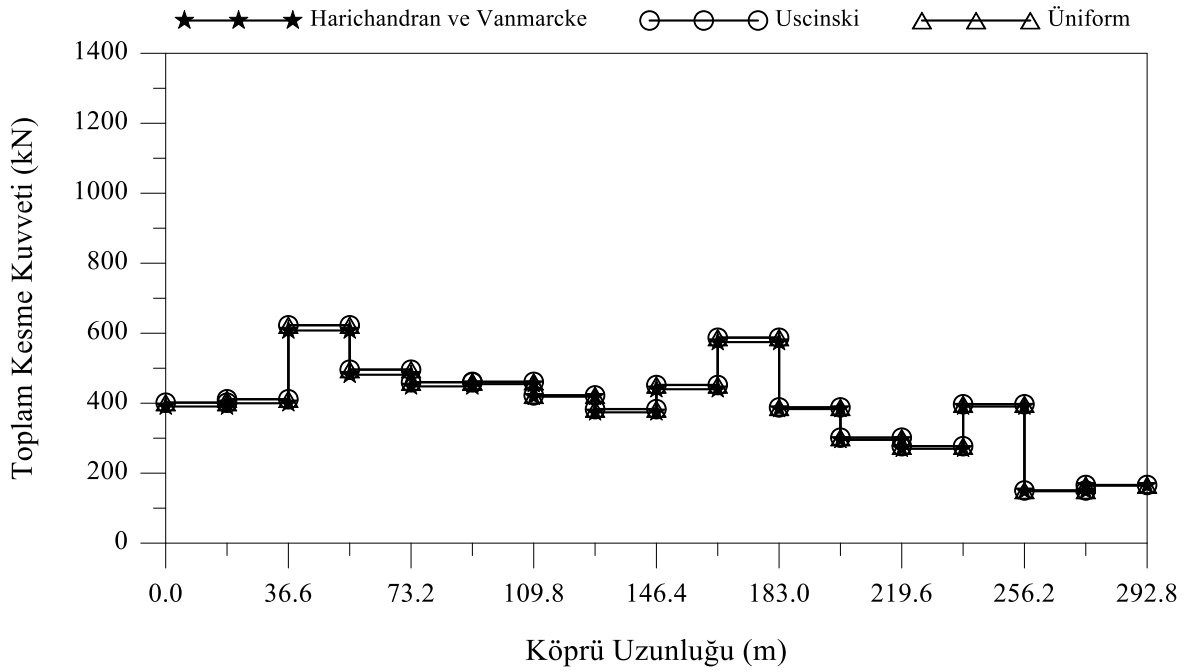
Şekil 3.60. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri



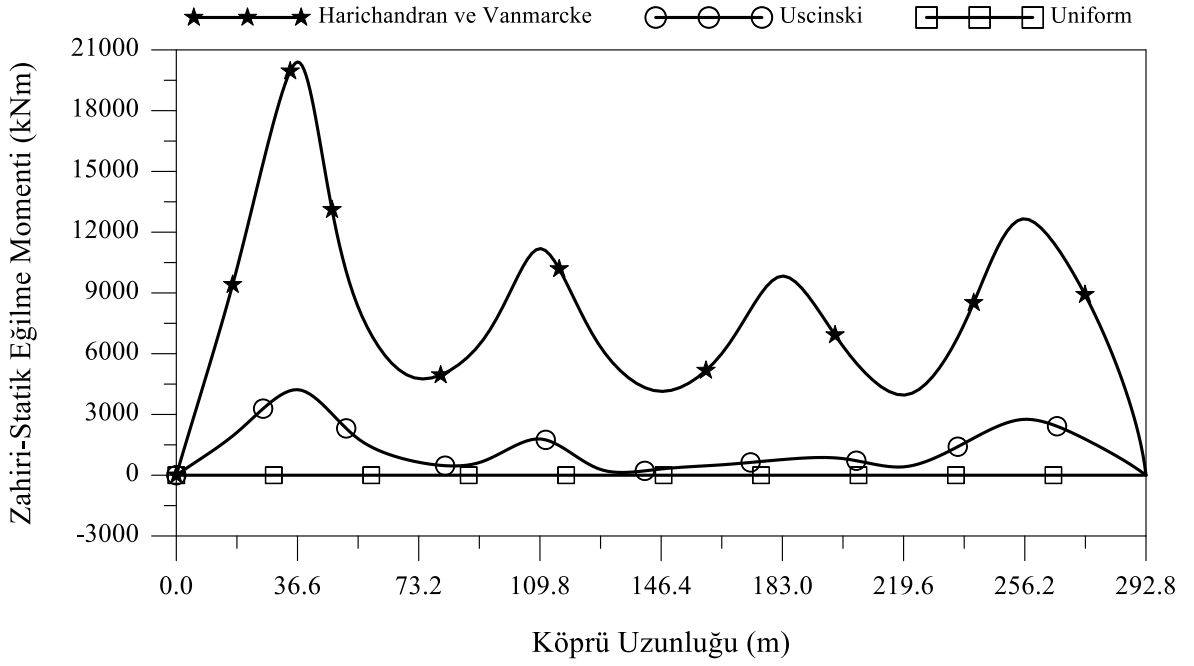
Şekil 3.61. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri



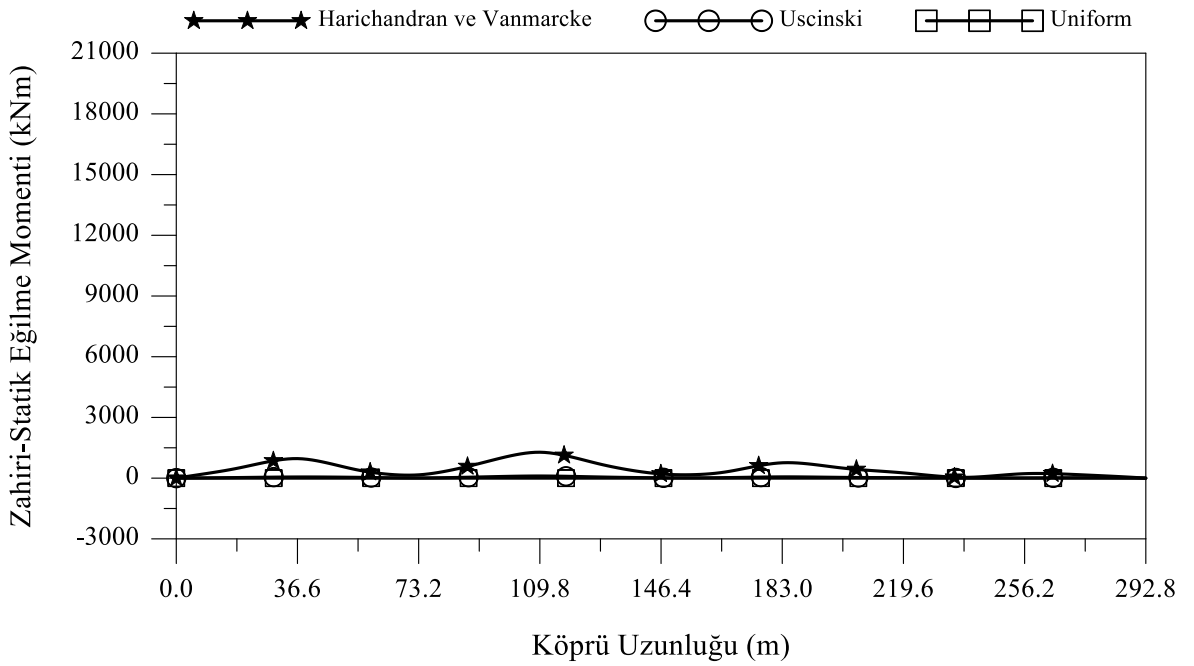
Şekil 3.62. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri



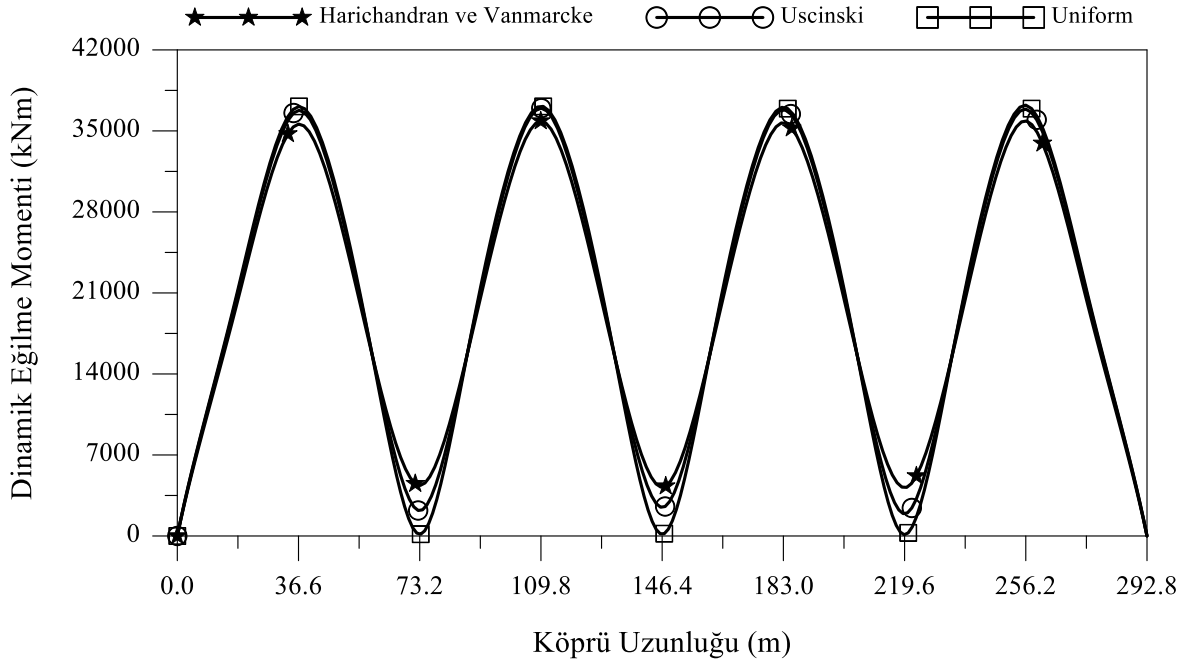
Şekil 3.63. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri



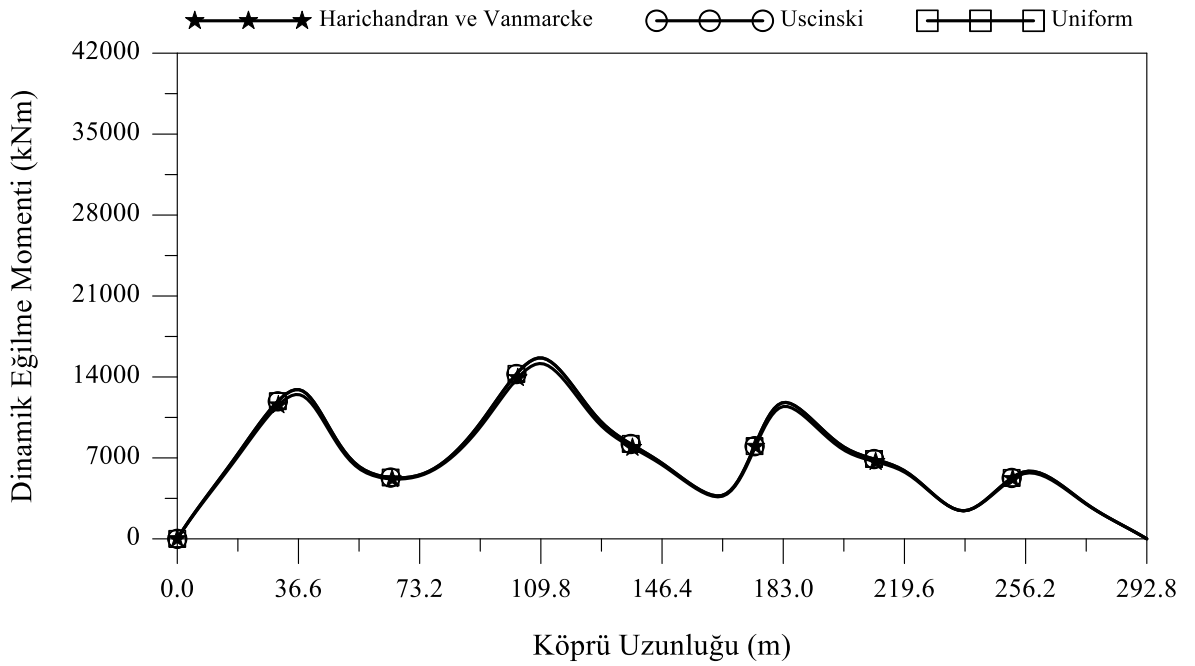
Şekil 3.64. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



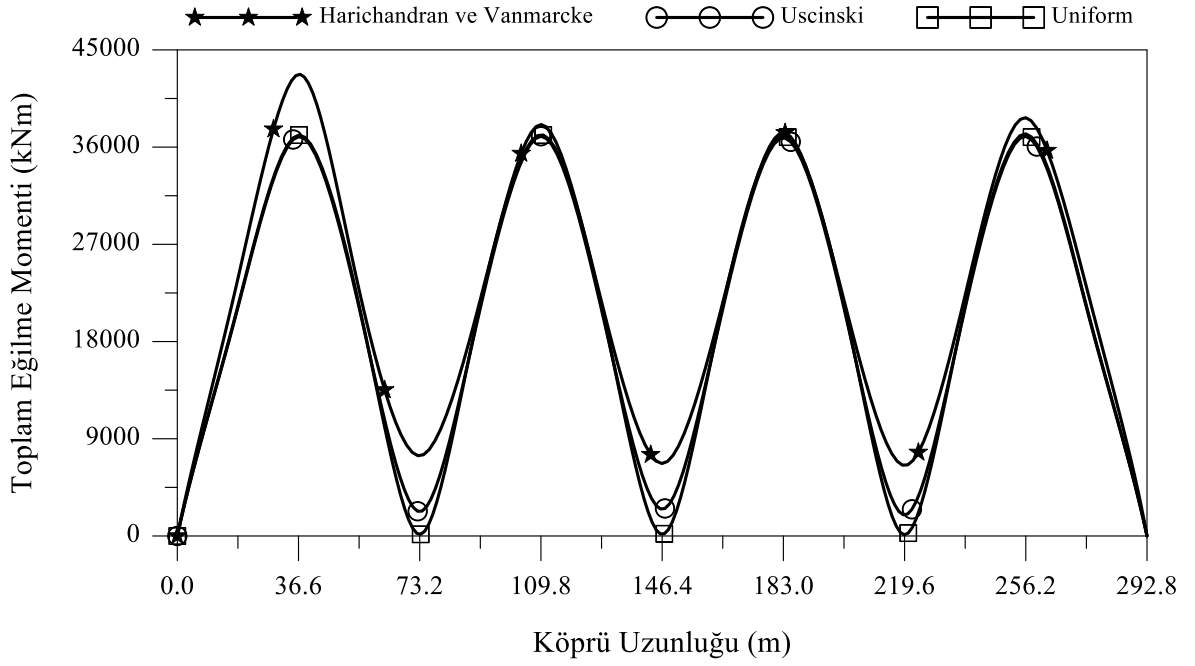
Şekil 3.65. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



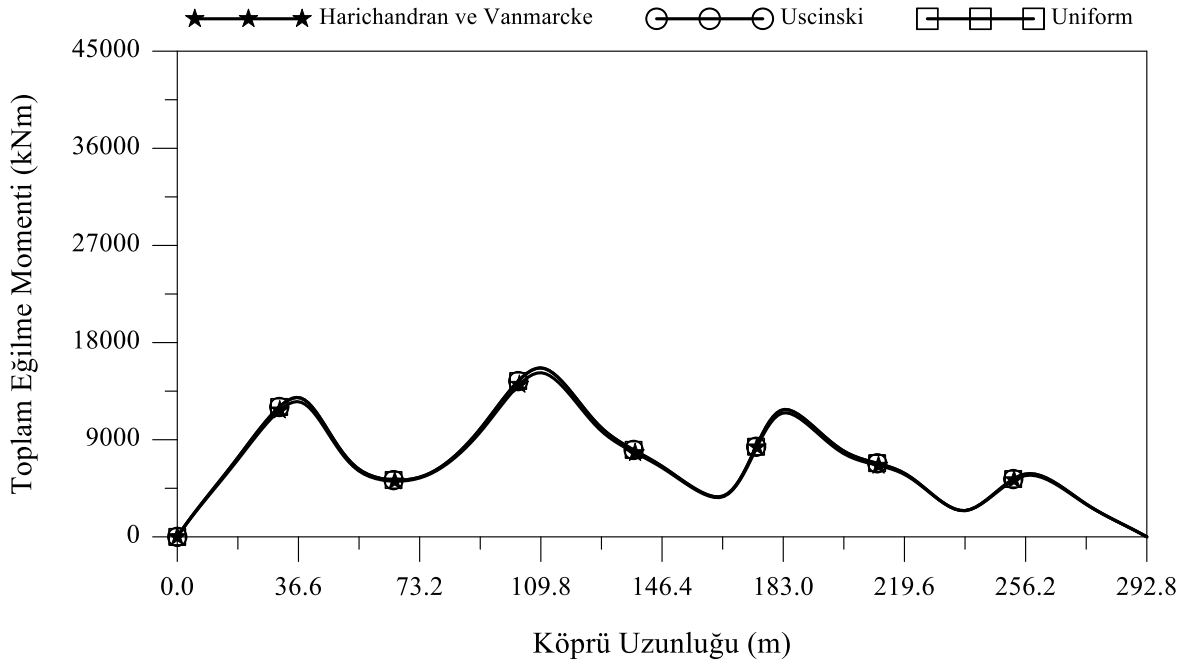
Şekil 3.66. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



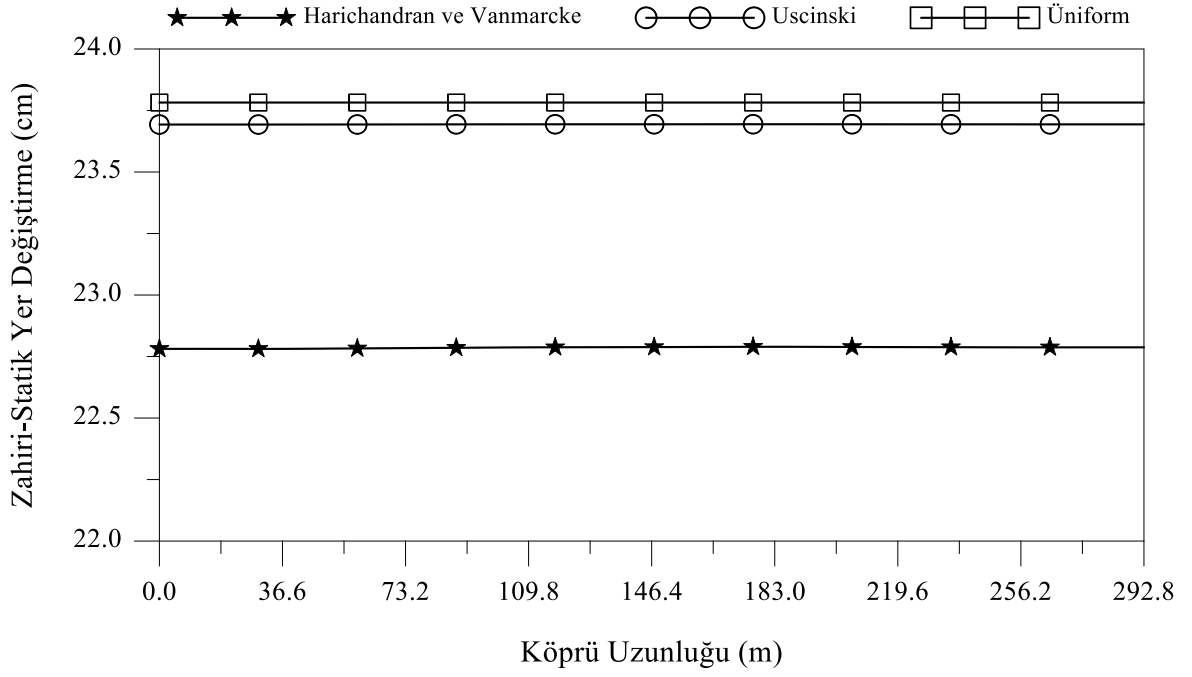
Şekil 3.67. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



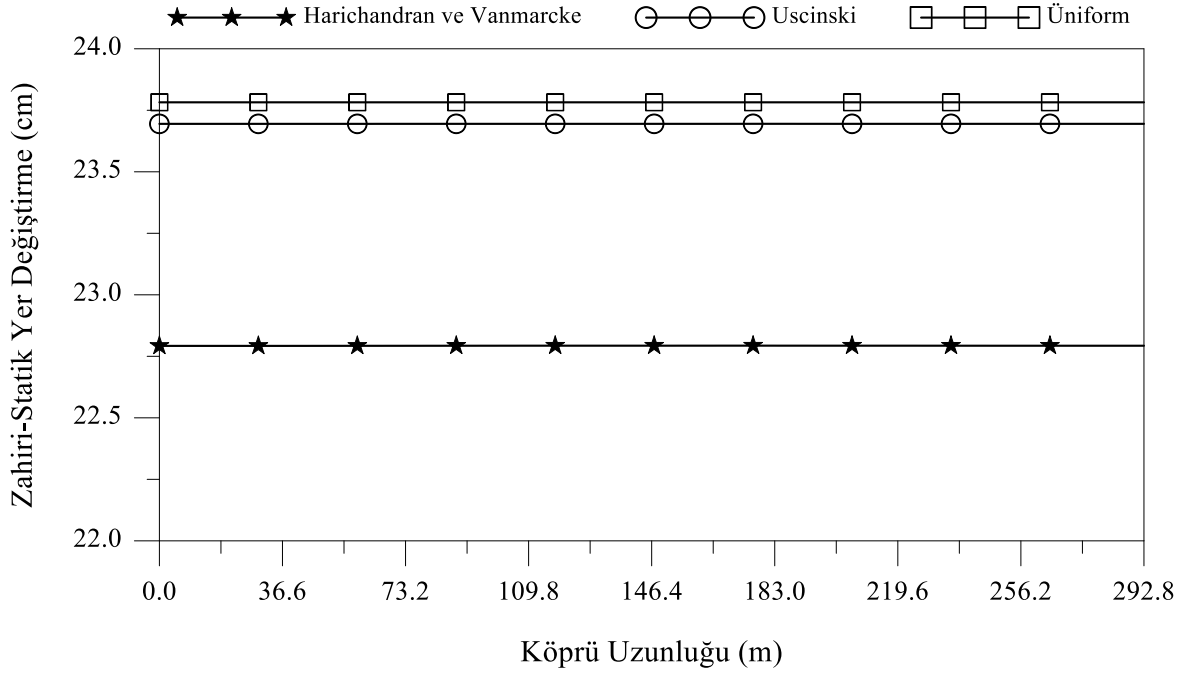
Şekil 3.68. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



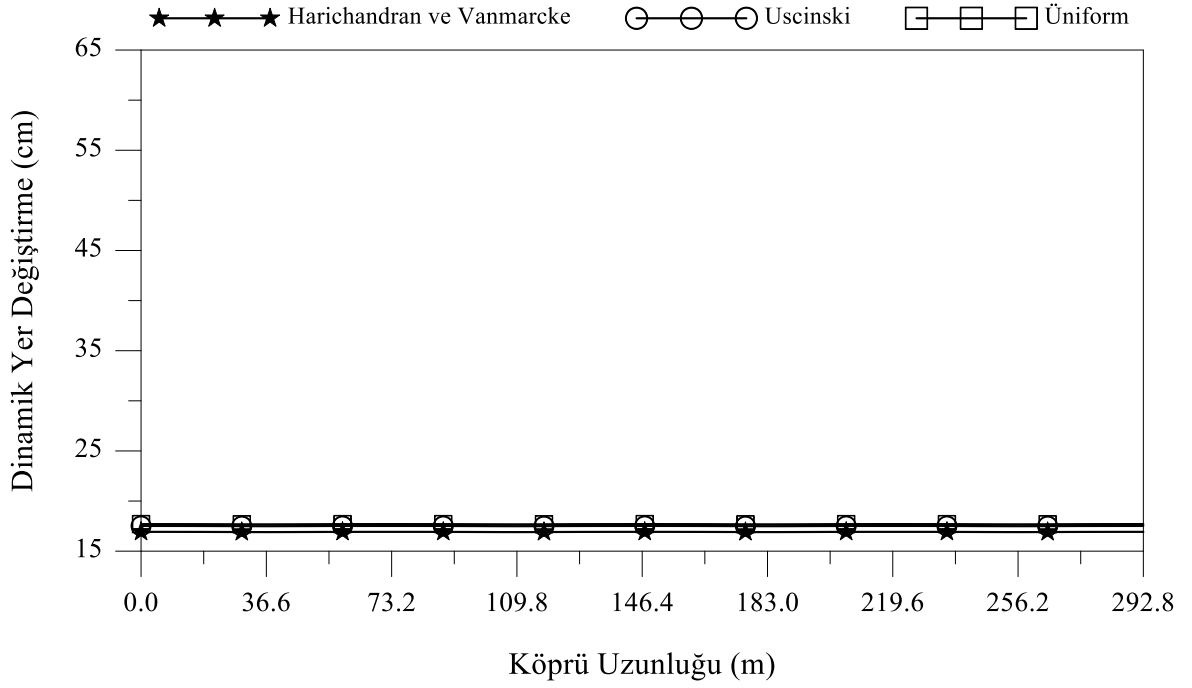
Şekil 3.69. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



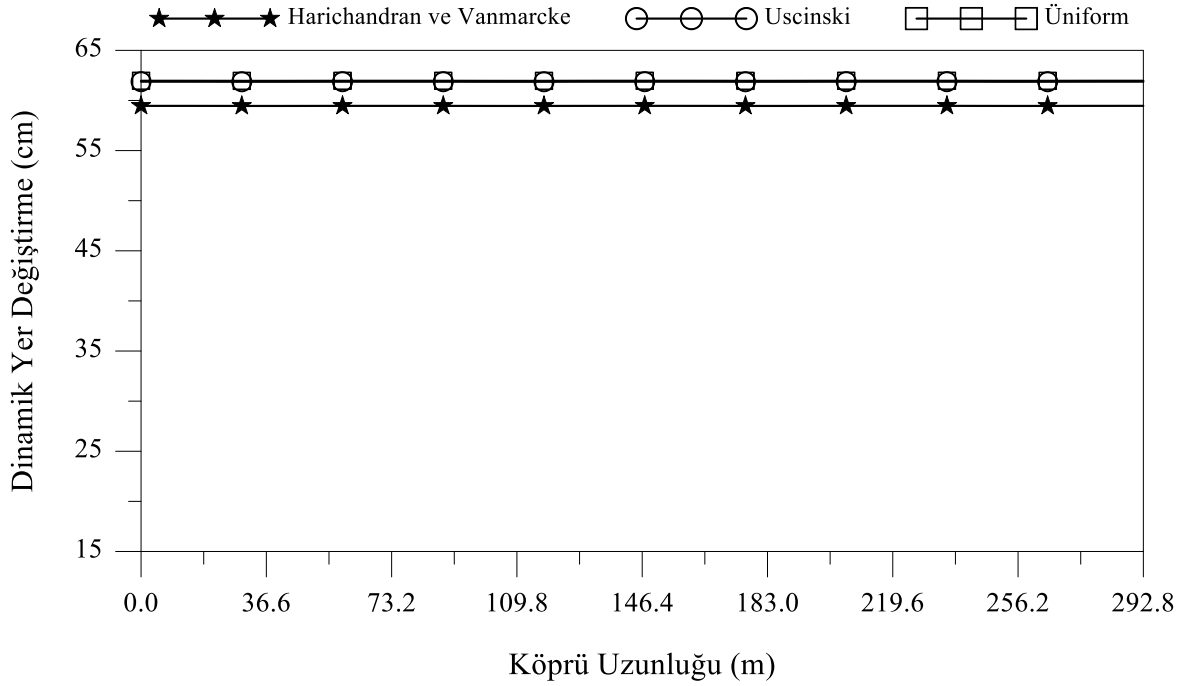
Şekil 3.70. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



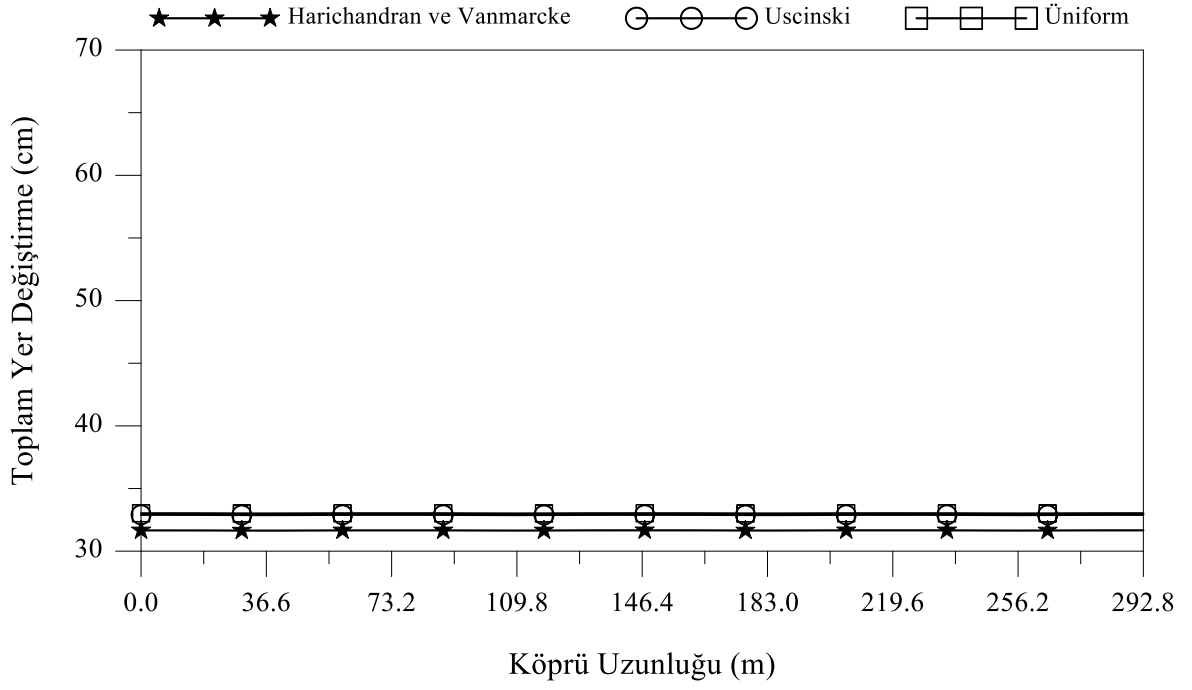
Şekil 3.71. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



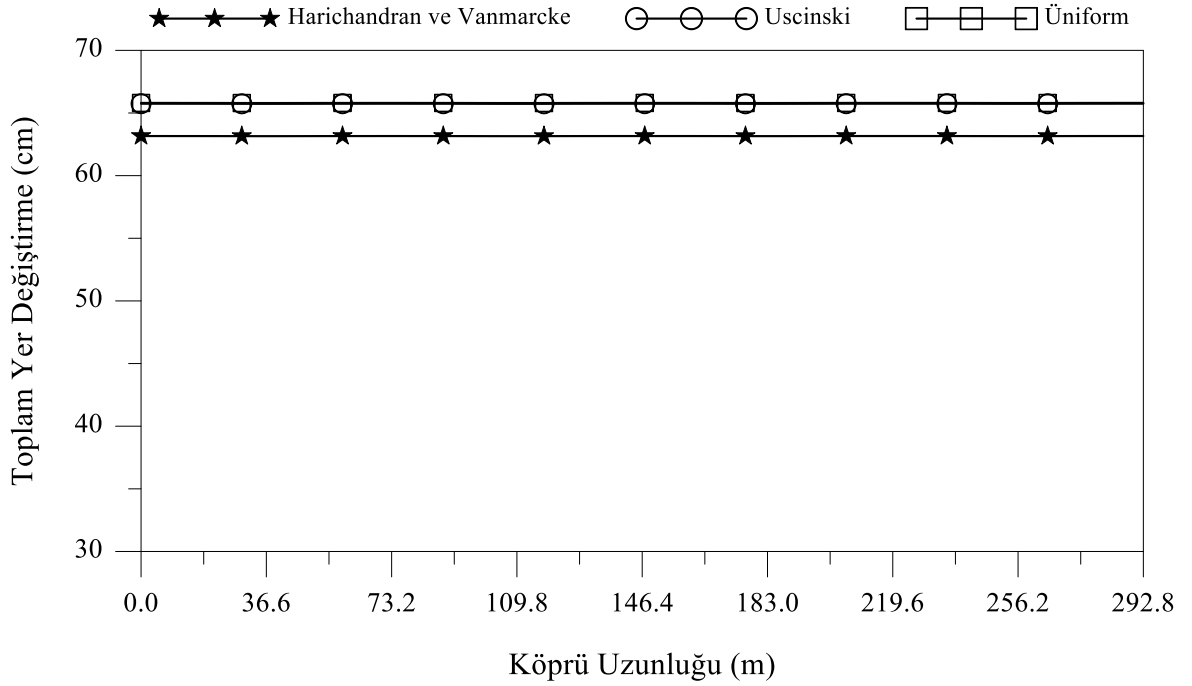
Şekil 3.72. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.73. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.74. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri



Şekil 3.75. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri

3.1.2.2. Homojen Yumuşak Zemin Durumu

Bu alt bölümde karayolu köprüsünün mesnetlendiği zeminin homojen ve yumuşak olduğu kabulü yapılarak dalga yayılma etkisi ihmal edilip sadece tutarsızlık etkileri dikkate alınan ÜESS mesnedi ile sismik izolasyonu yapılan ve izolasyonsuz köprünün stokastik analizleri yapılmıştır. Bu durum, denklem (2.9)'da tutarsızlık etkisinin $|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$, zemin etkisinin $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ ve dalga yayılma etkisinin $\gamma_{lm}(\omega)^d = 1$ olması anlamına gelmektedir. Tutarsızlık etkisini ifade etmek için iki farklı tutarsızlık modeli kullanılmıştır. Bu modeller denklem (2.10) ile ifade edilen Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli ve denklem (2.12) ile ifade edilen Uscinski (1977) tutarsızlık modelleridir. Yer hareketi olarak yumuşak zeminlerde kaydedilen 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 depreminin El Centro Array #3 istasyonunun H-E03230 bileşeni kullanılmıştır. Şekil 3.76'da tutarsızlık etkilerine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsü gösterilmiştir.

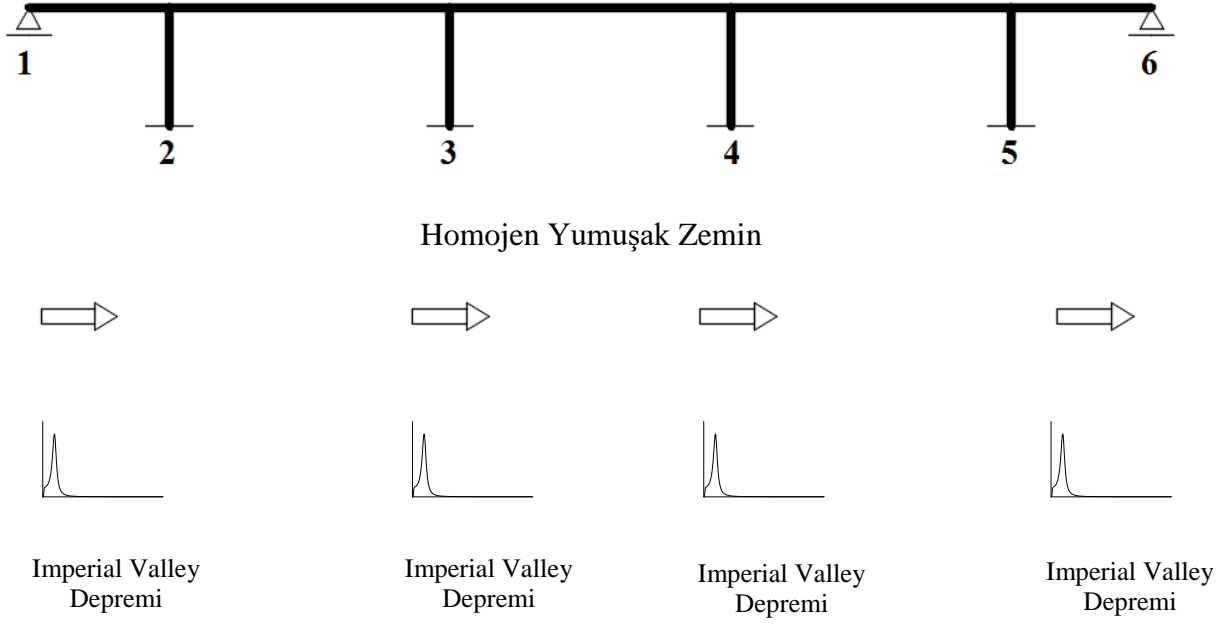
Sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizleri sonucunda karayolu köprüsünün tabliyesinde elde edilen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler Şekil 3.77-3.100'de gösterilmiştir. Gösterilen grafikler eleman kuvvetleri ve yer değiştirmelerin zahiri-statik, dinamik ve toplam değerlerinden oluşmaktadır. Şekillerde ayrıca korelasyon etkisi dikkate alınmadan üniform yer hareketi durumundaki analiz sonuçları da karşılaştırma amacıyla verilmiştir.

Şekil 3.77-3.82'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam normal kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %82, %65 ve %85 oranında azaltmıştır. Şekil 3.77-3.78 ve Şekil 3.81-3.82'de görüldüğü gibi zahiri statik normal ve toplam normal kuvvetler köprü uzunluğunun ortasında artarken bu kuvvetlerin kenar ayaklara doğru azaldığı görülmektedir. Şekil 3.77-3.78 ve Şekil 3.81-3.82'de görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izlasyonsuz köprülerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen zahiri-statik ve toplam normal kuvvet değerleri Uscinski tutarsızlık modeli kullanılması ve üniform yer hareketi olması durumundan elde edilen değerlerden daha büyük olmaktadır. Buna karşılık Şekil 3.79-3.80'de görüldüğü gibi dinamik kesme kuvvetlerinde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen değerler daha küçüktür.

Şekil 3.83-3.88'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam kesme kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %93, %68 ve %81 oranında azaltmıştır. Şekil 3.83 ve Şekil 3.87'de görüldüğü gibi sismik izolasyonsuz köprülerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen zahiri-statik kesme ve toplam kesme kuvveti değerleri Uscinski tutarsızlık modeli kullanılması ve üniform yer hareketi olması durumundan elde edilen değerlerden büyük olmaktadır. Şekil 3.85, Şekil 3.86 ve Şekil 3.88'e bakıldığında tutarsızlık modelleri ile hızın sonsuz olması durumuna karşılık gelen üniform yer hareketi olması durumlarından elde edilen değerlerin genelde birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 3.89-3.94'te görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %92, %74 ve %86 oranında azaltmıştır. Şekil 3.89-3.90 ve Şekil 3.93-3.94'te görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izlasyonsuz köprülerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen zahiri-statik eğilme momenti ve toplam eğilme momenti değerleri Uscinski tutarsızlık modeli kullanılması ve üniform yer hareketi olması durumundan elde edilen değerlerden büyük olmaktadır. Buna karşın Şekil 3.91-3.92'de görüldüğü gibi dinamik eğilme momentlerinde üniform yer hareketi olması durumunda elde edilen değerler daha büyüktür.

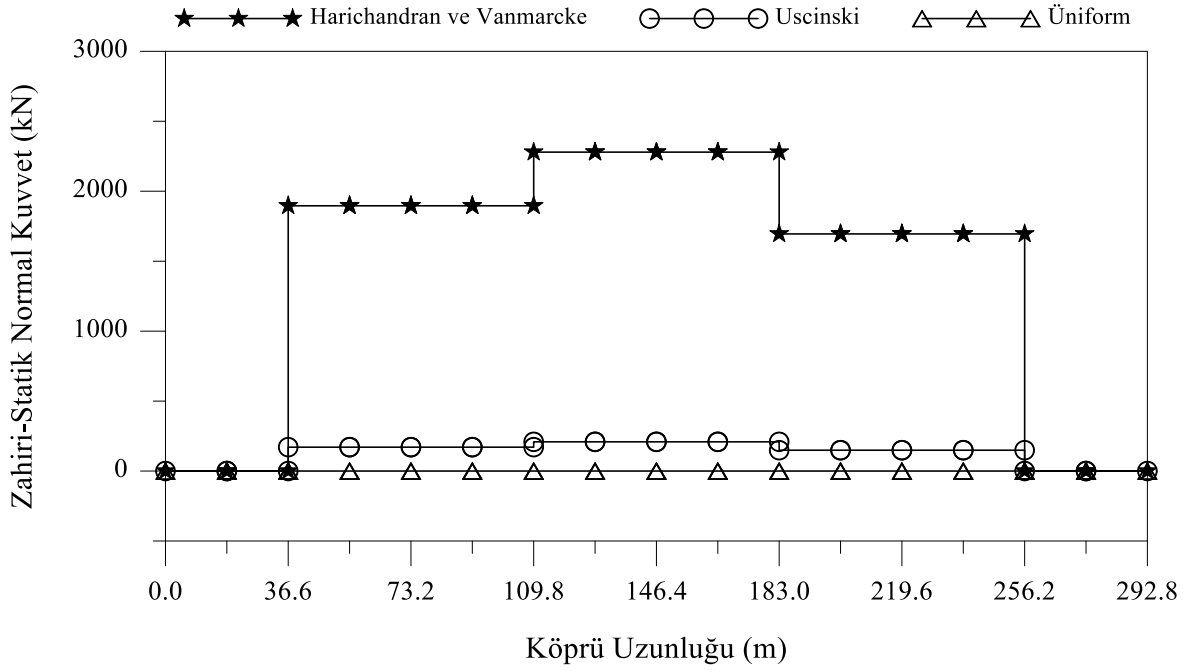
Şekil 3.95-3.100'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmelerin maksimum değerlerini sırasıyla %27, %150 ve %37 oranında arttırmıştır. Şekil 3.95-3.100'de görüldüğü gibi sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesi zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmeler incelendiğinde yer hareketinin üniform olması durumundaki değerler en büyük olmaktadır. Yer hareketinin üniform olması durumu ile elde edilen yer değiştirmeler Uscinski tutarsızlık modeli ile elde edilenler ile benzer sonuçlar verirken Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen yer değiştirmeler daha küçük olmaktadır.



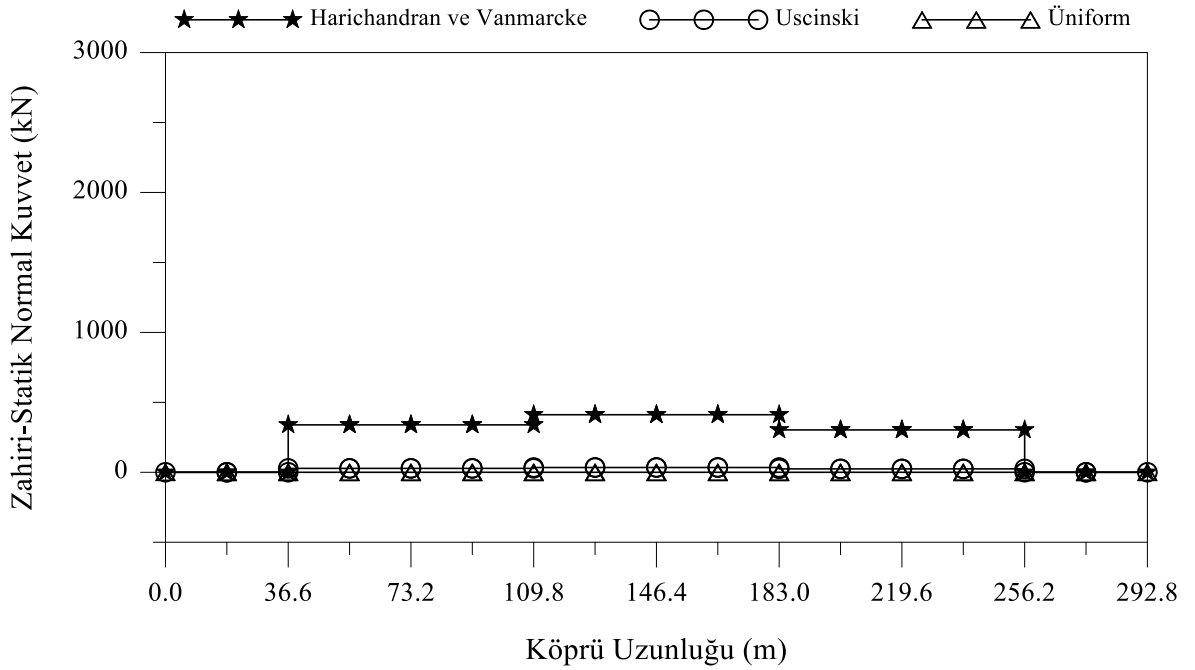
Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli

Uscinski (1977) tutarsızlık modeli

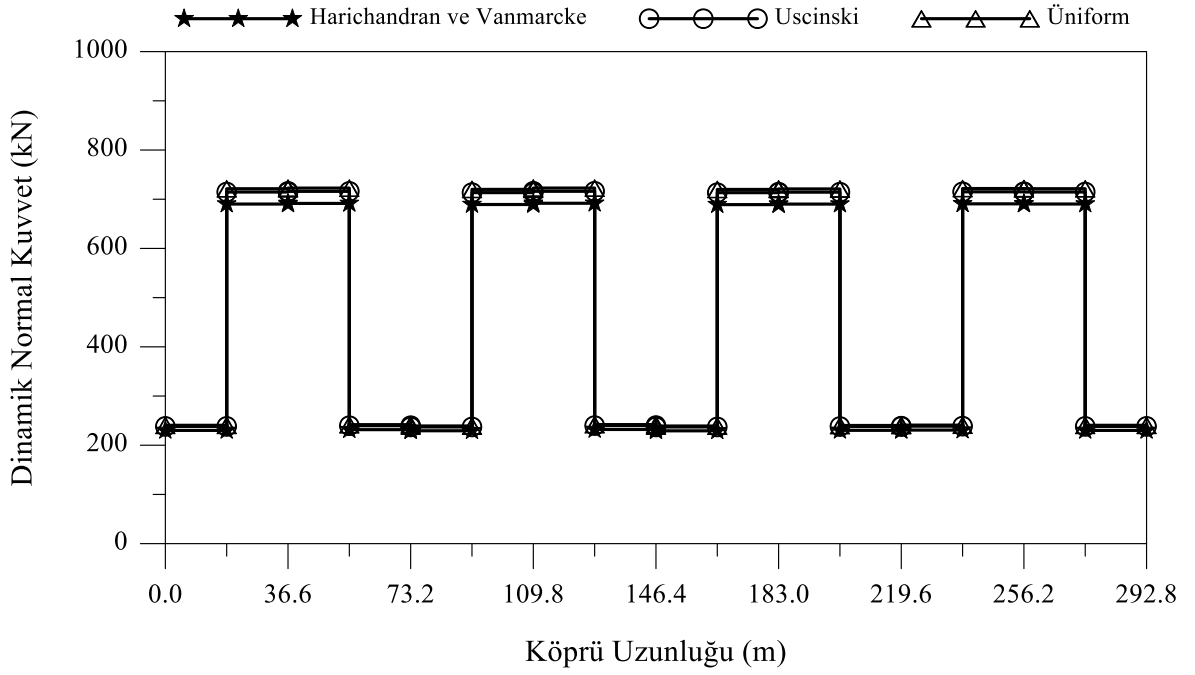
Şekil 3.76. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli



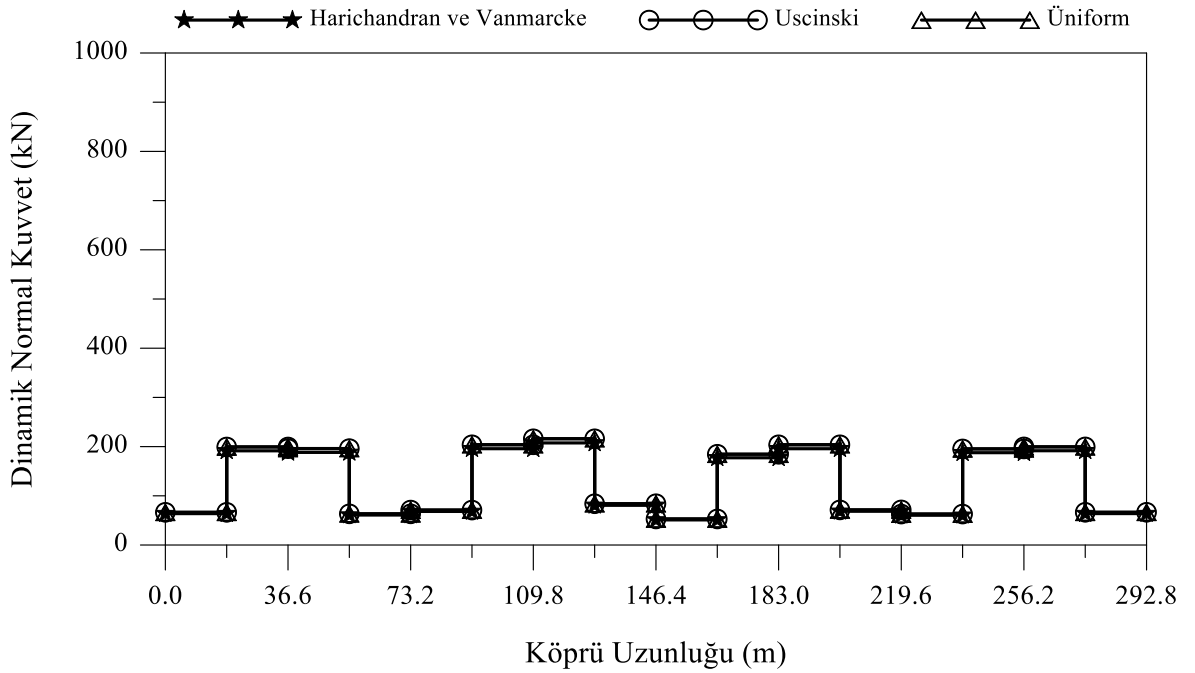
Şekil 3.77. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



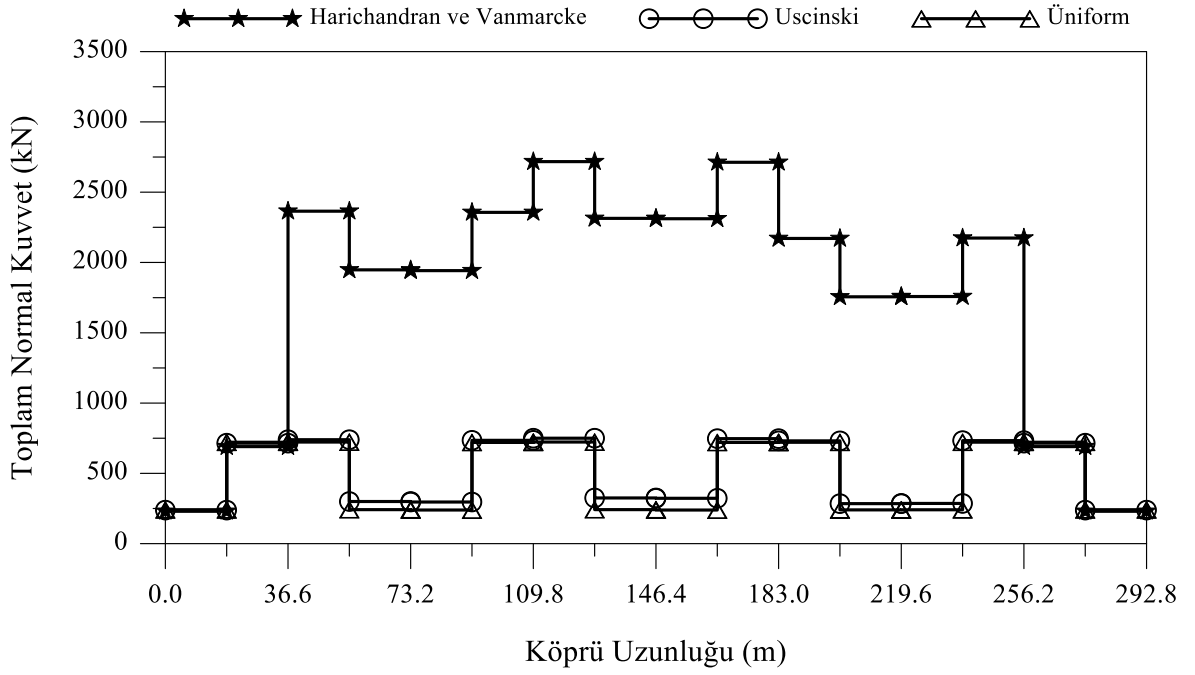
Şekil 3.78. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik normal kuvvetleri



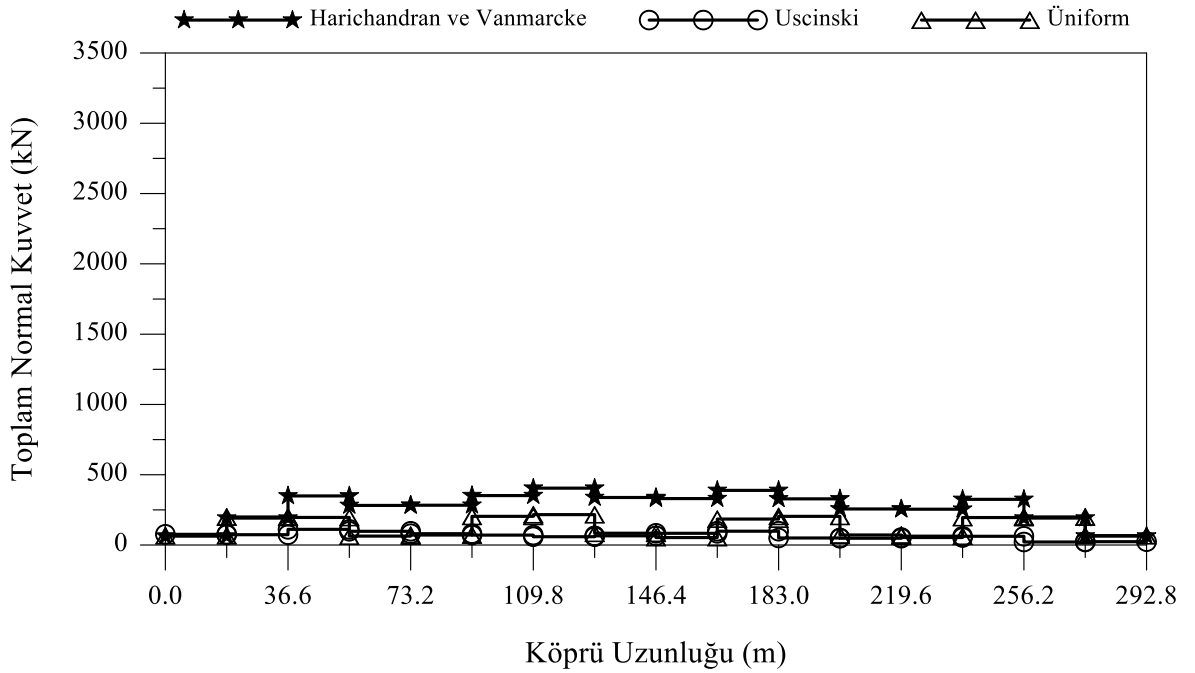
Şekil 3.79. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



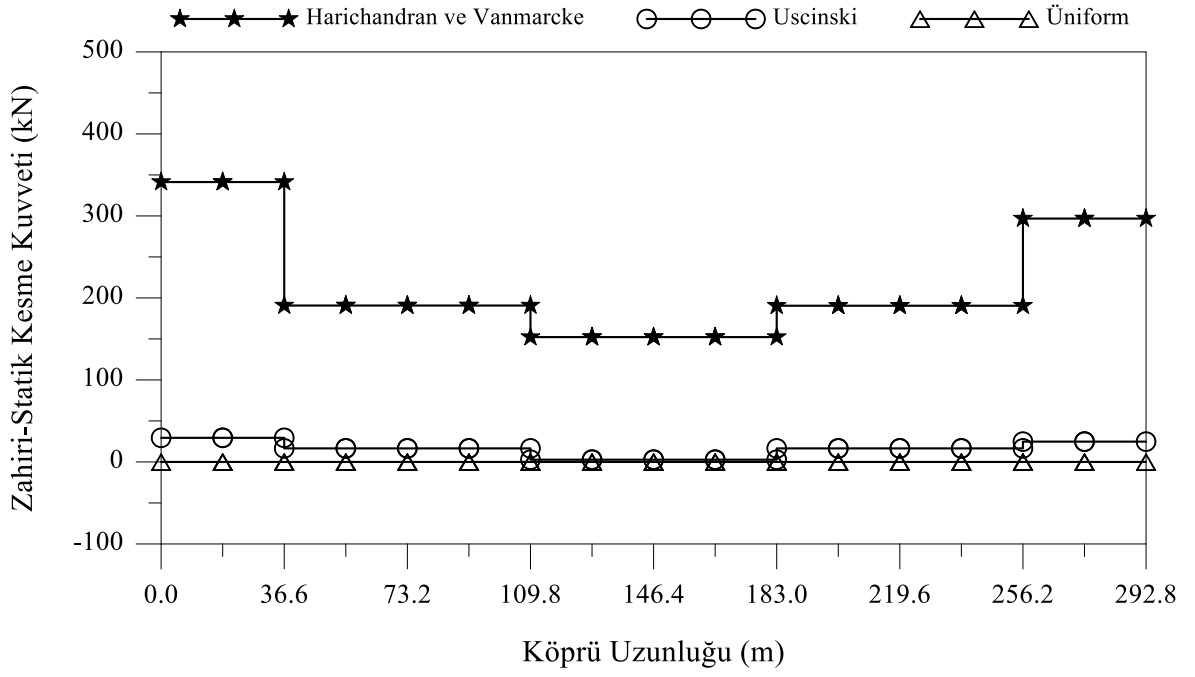
Şekil 3.80. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik normal kuvvetleri



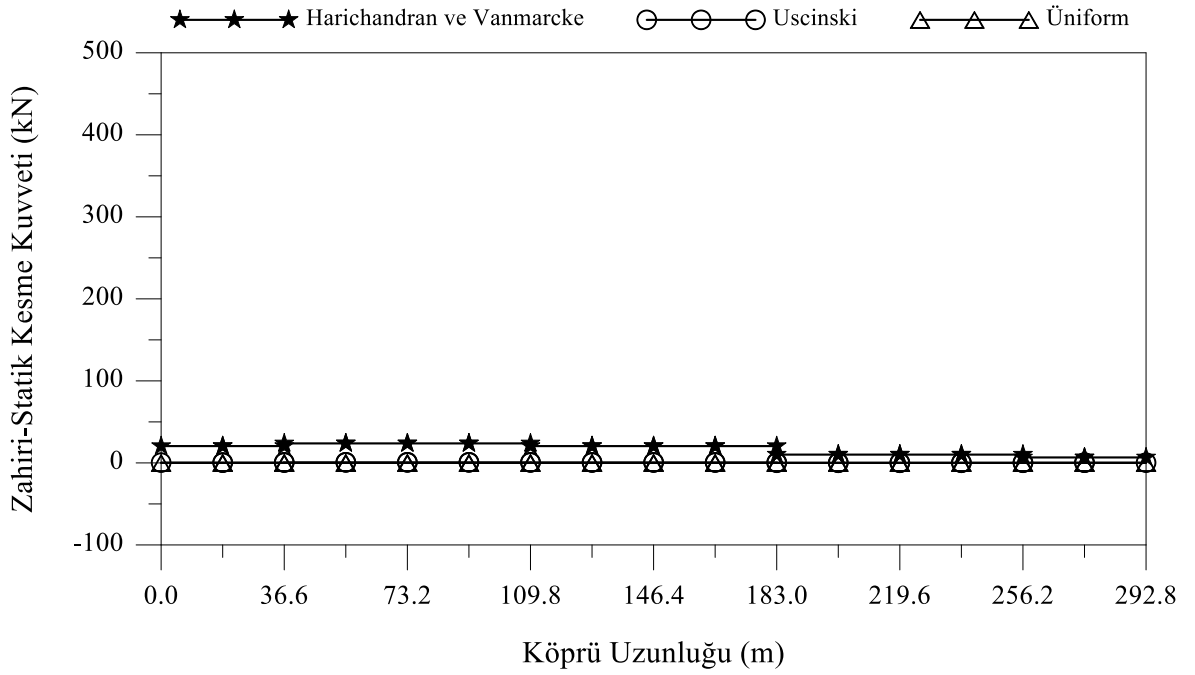
Şekil 3.81. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



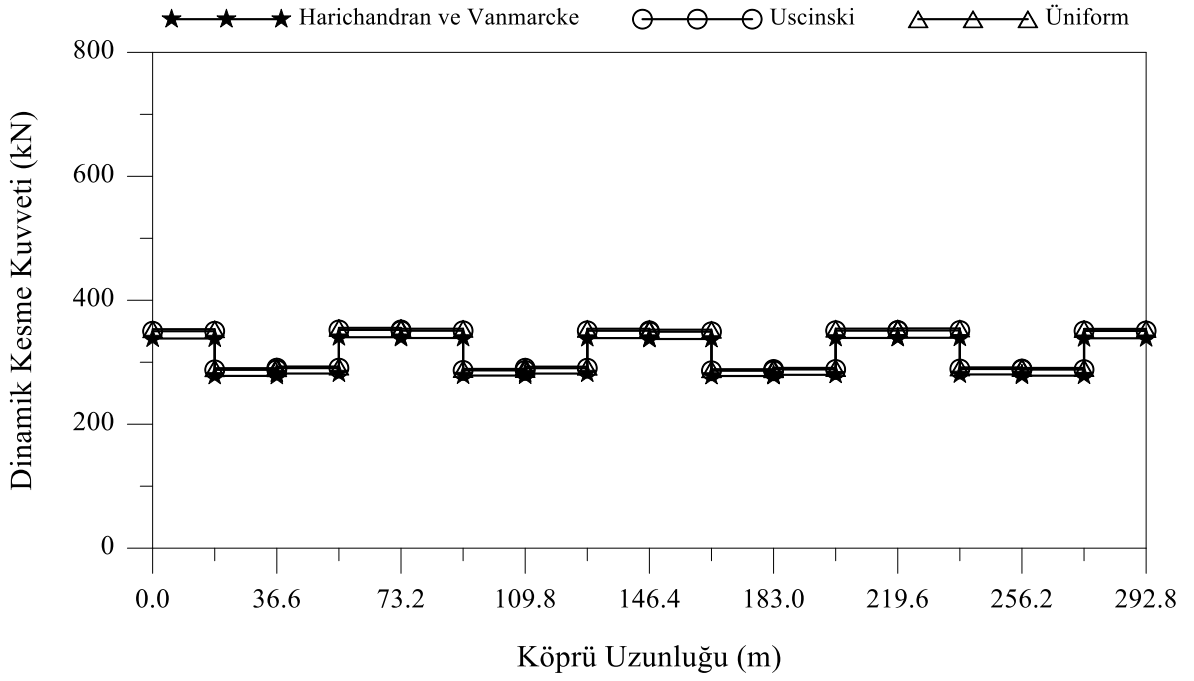
Şekil 3.82. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



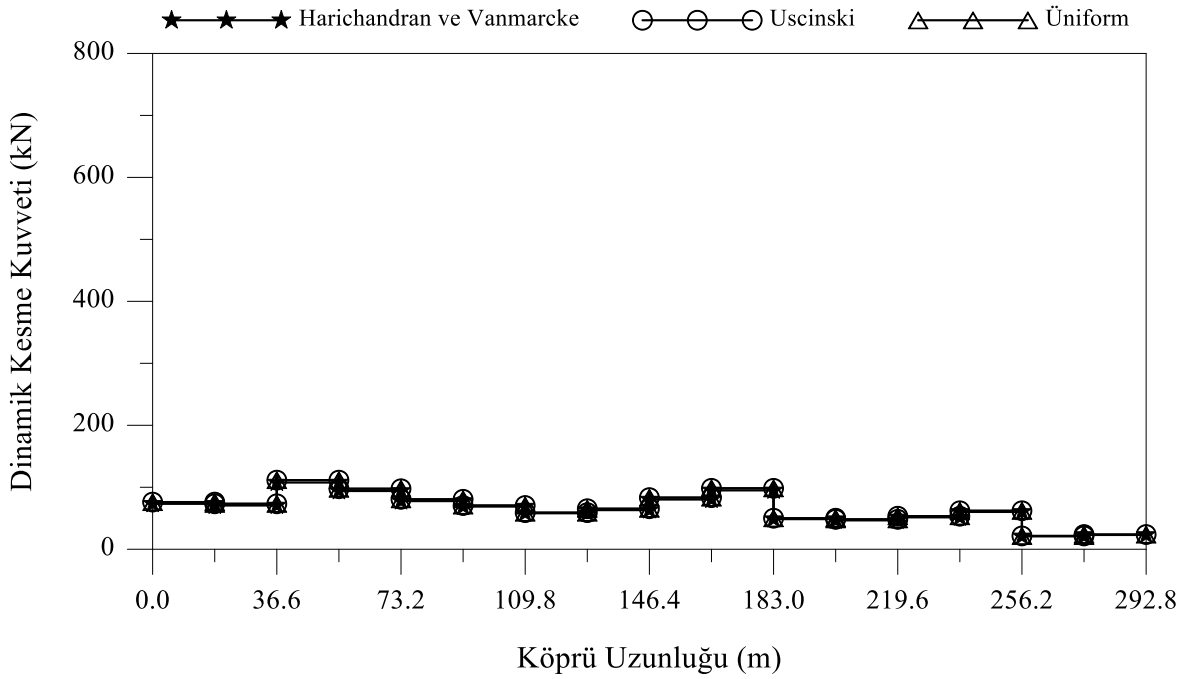
Şekil 3.83. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri



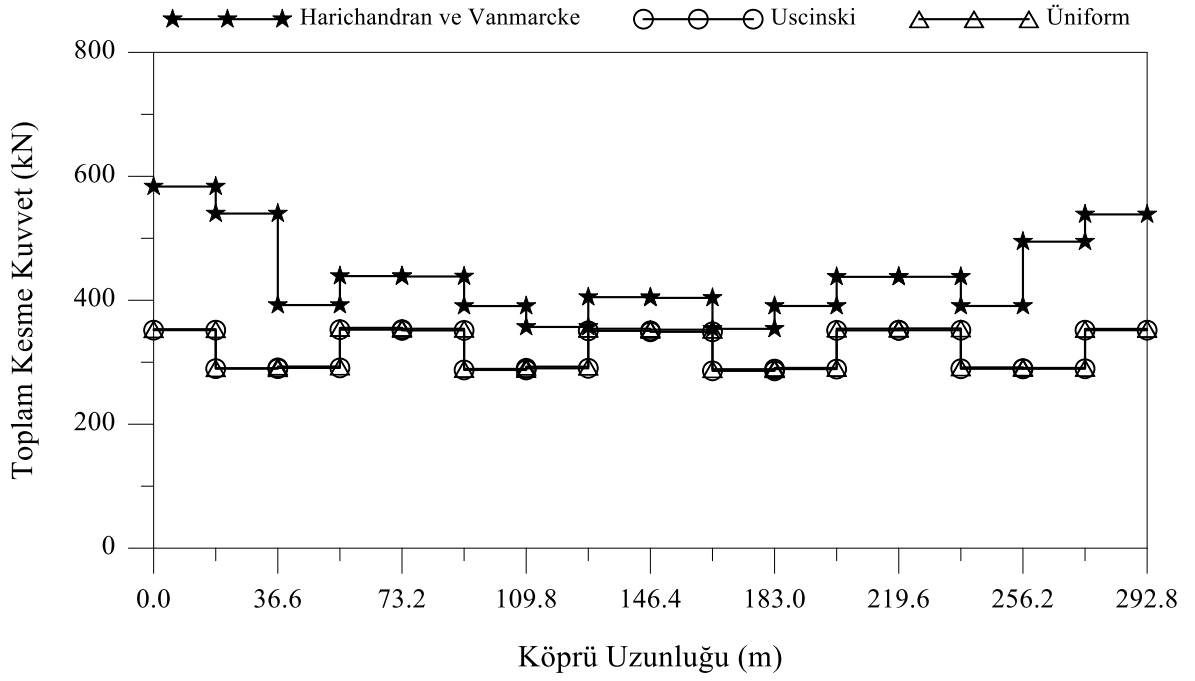
Şekil 3.84. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri



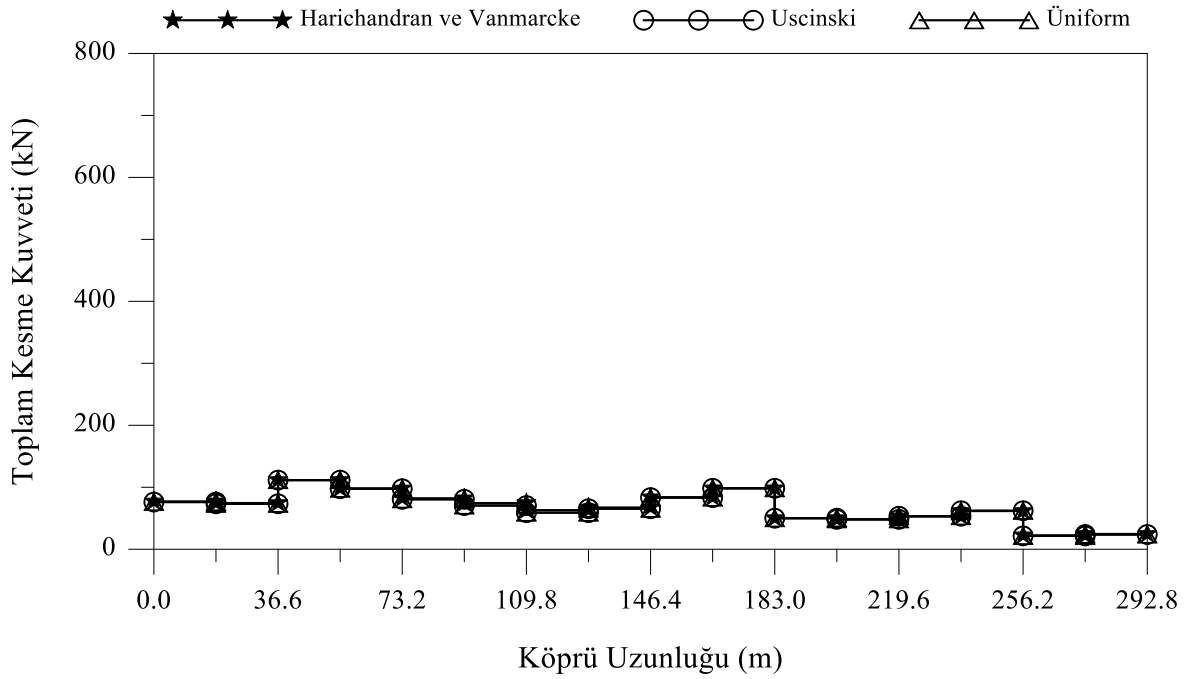
Şekil 3.85. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri



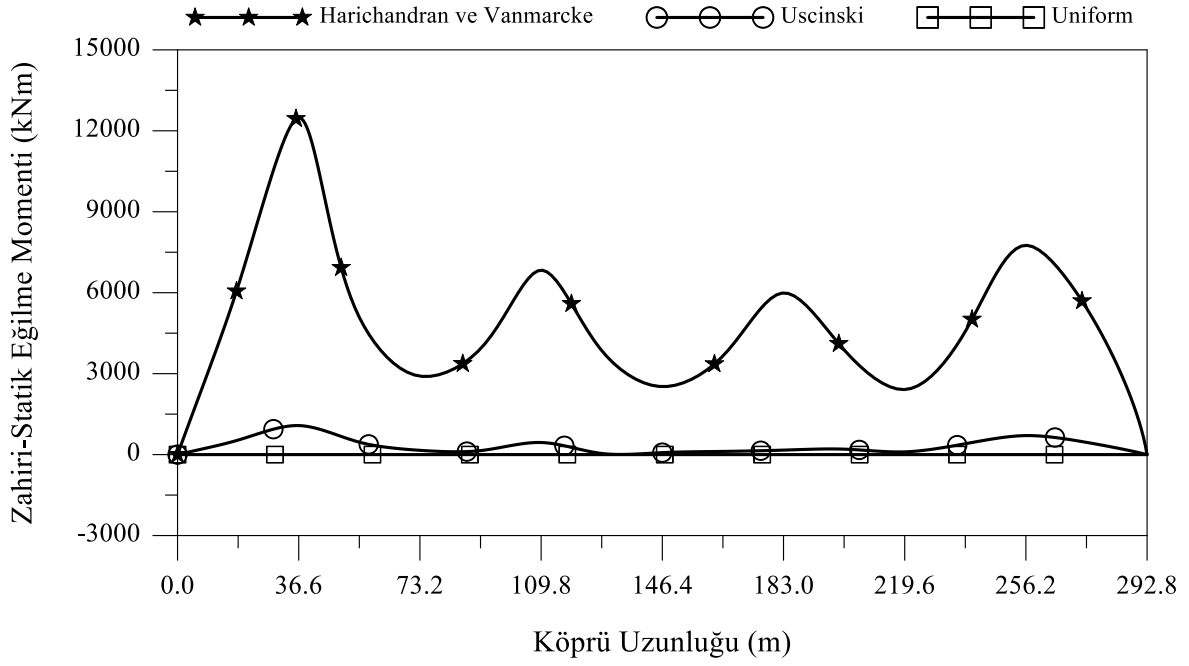
Şekil 3.86. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri



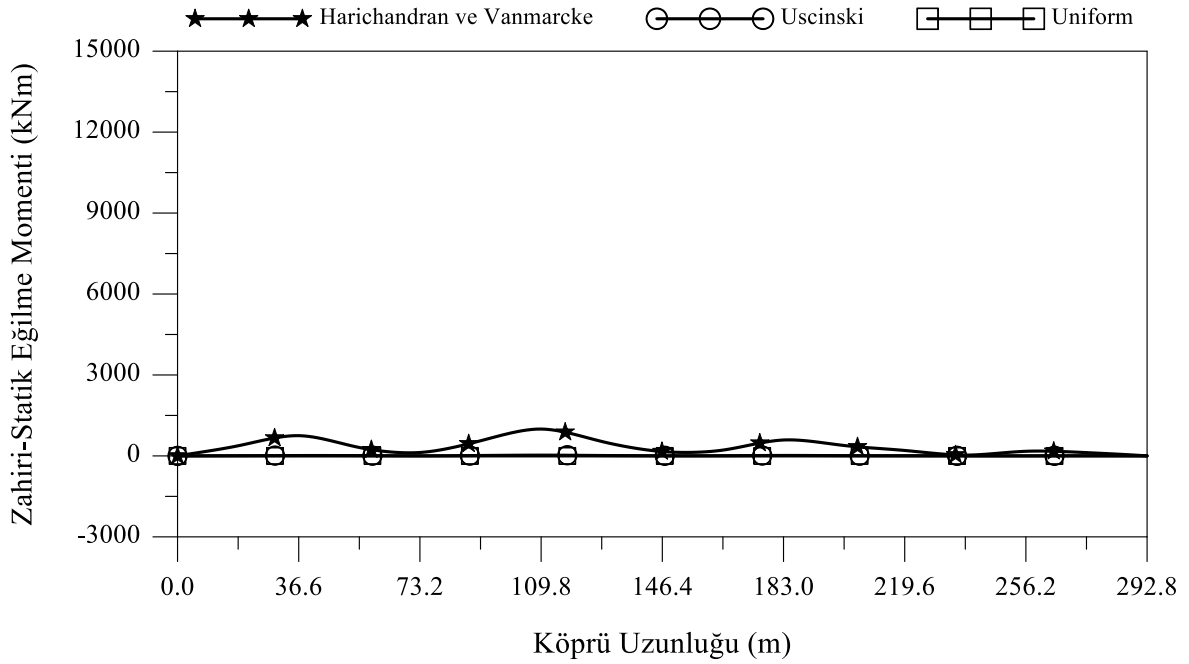
Şekil 3.87. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri



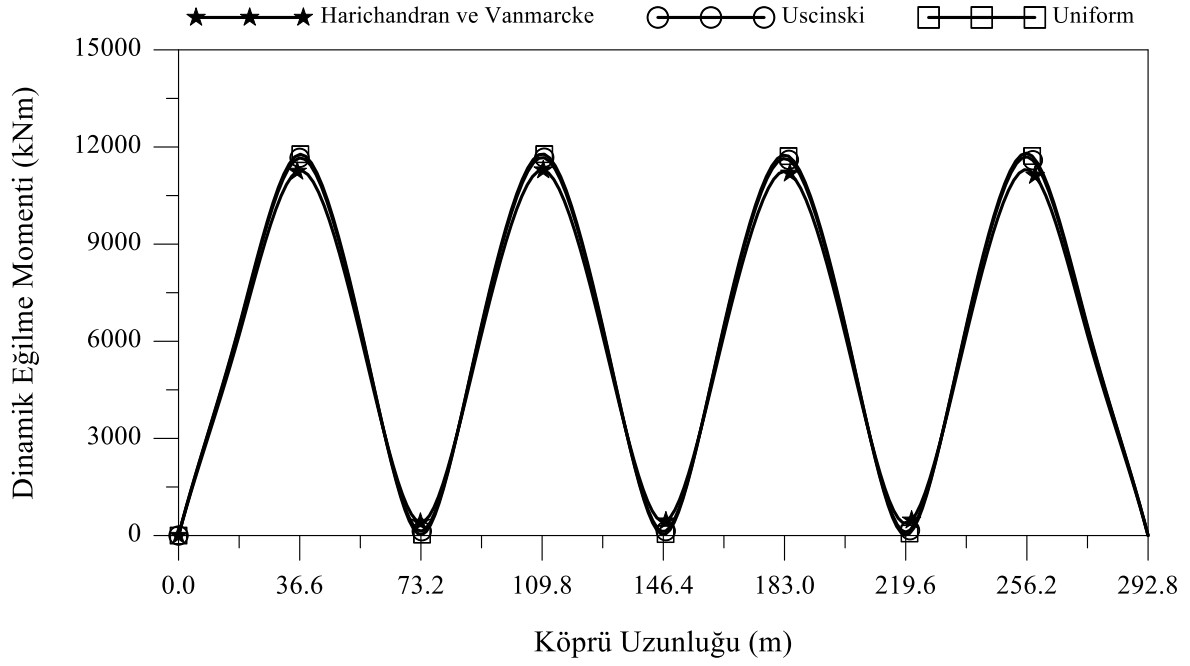
Şekil 3.88. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri



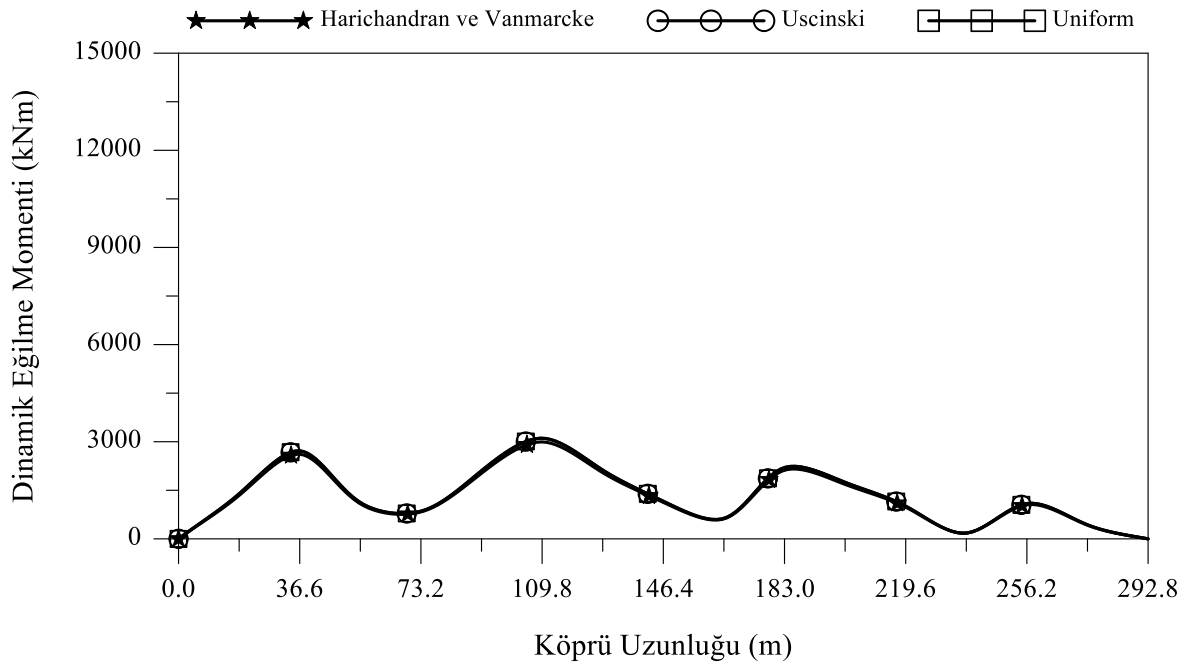
Şekil 3.89. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



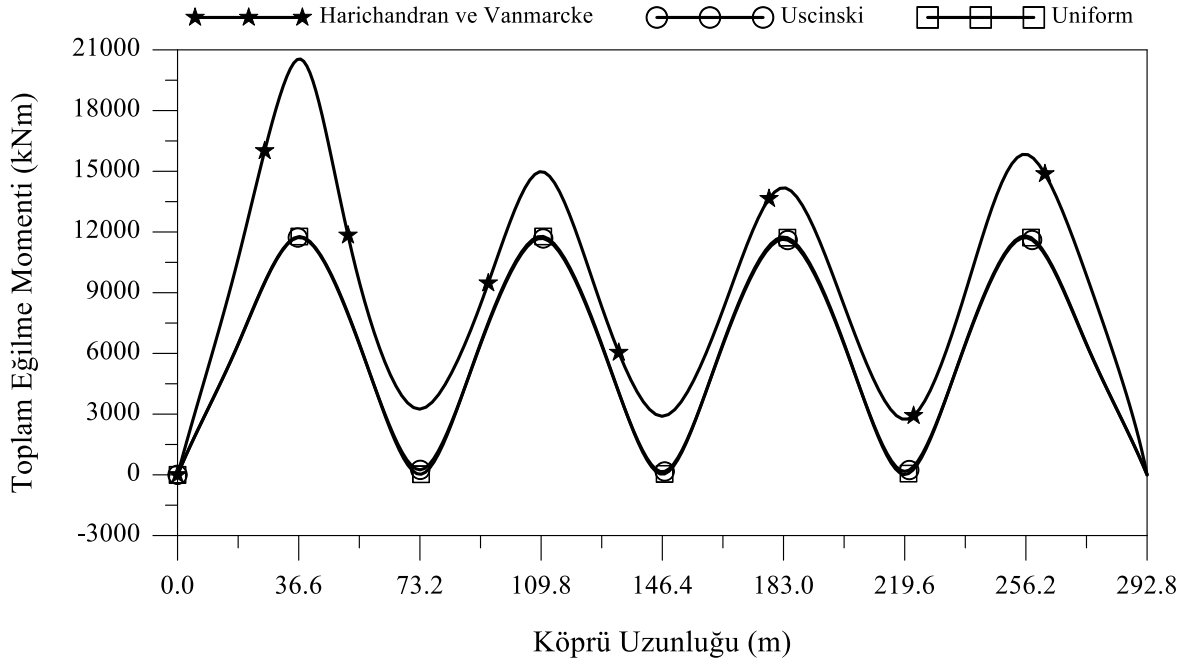
Şekil 3.90. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



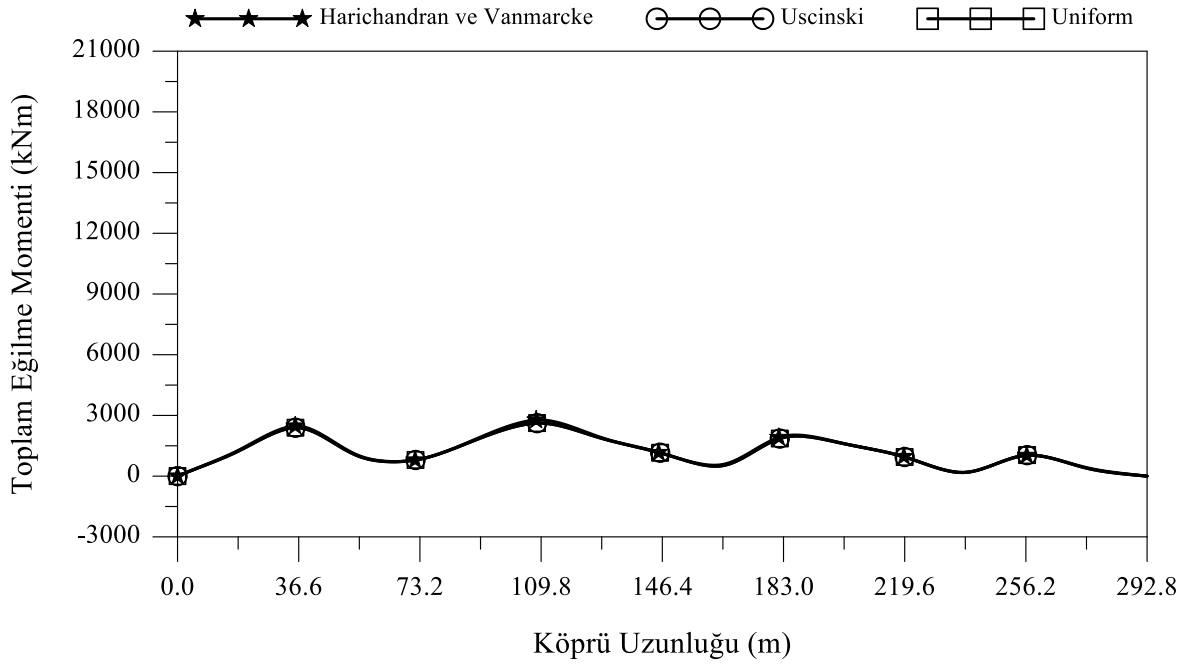
Şekil 3.91. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



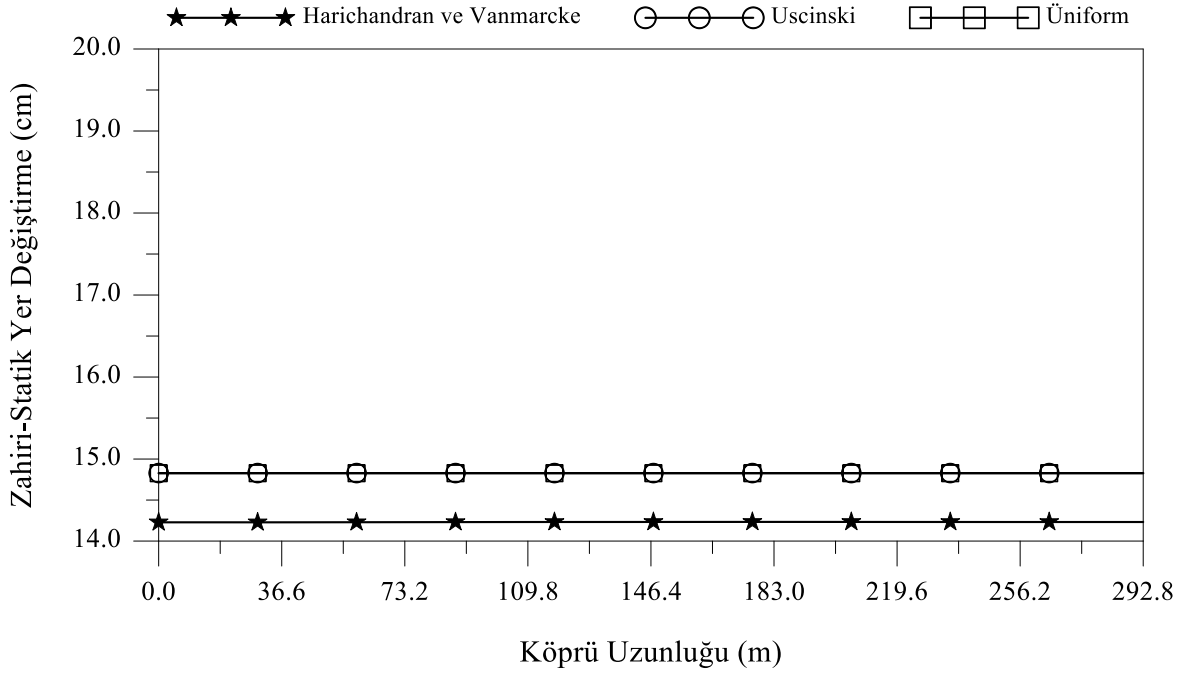
Şekil 3.92. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik eğilme momentleri



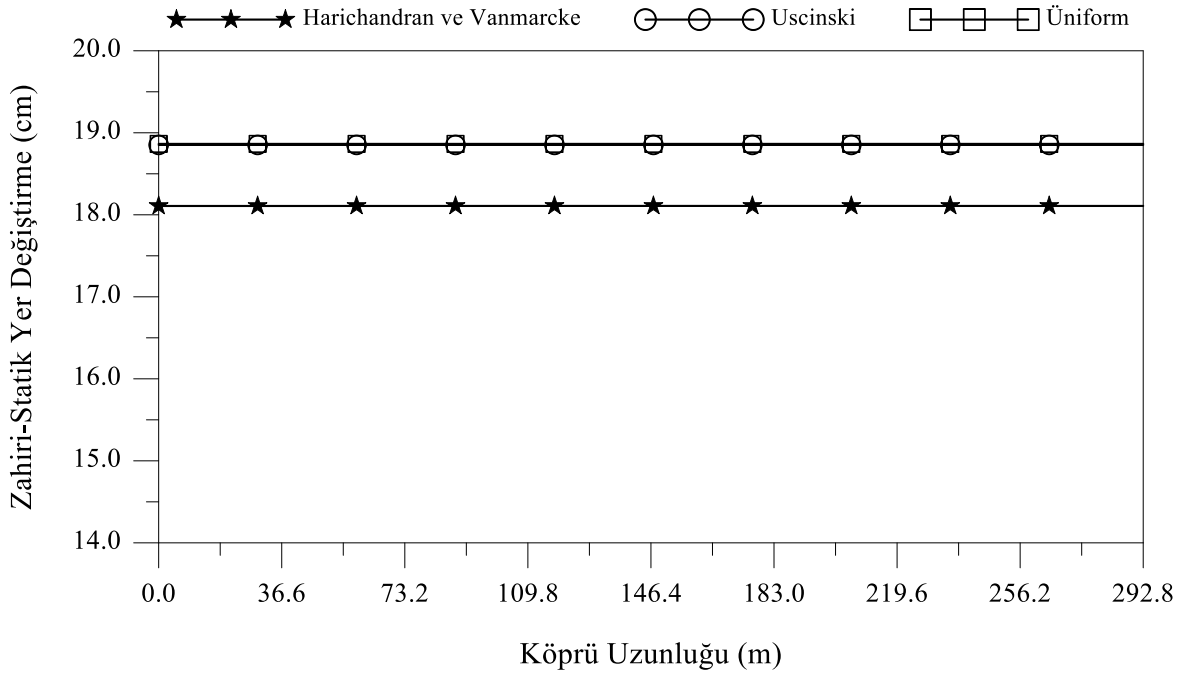
Şekil 3.93. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



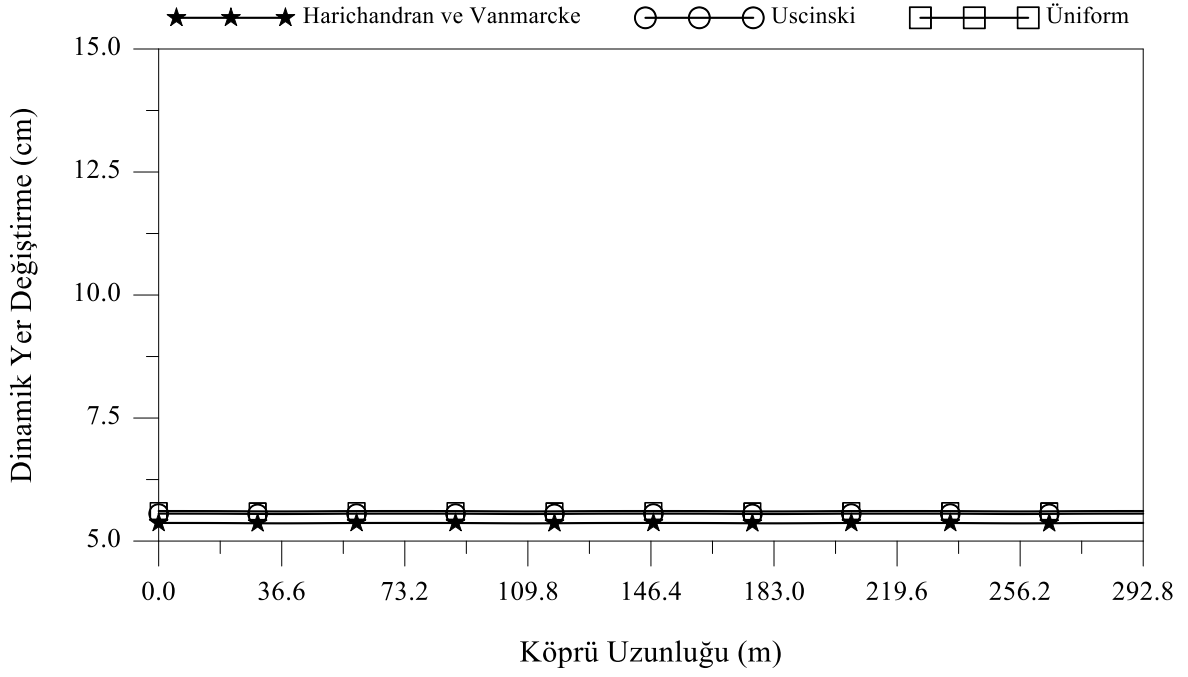
Şekil 3.94. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam eğilme momentleri



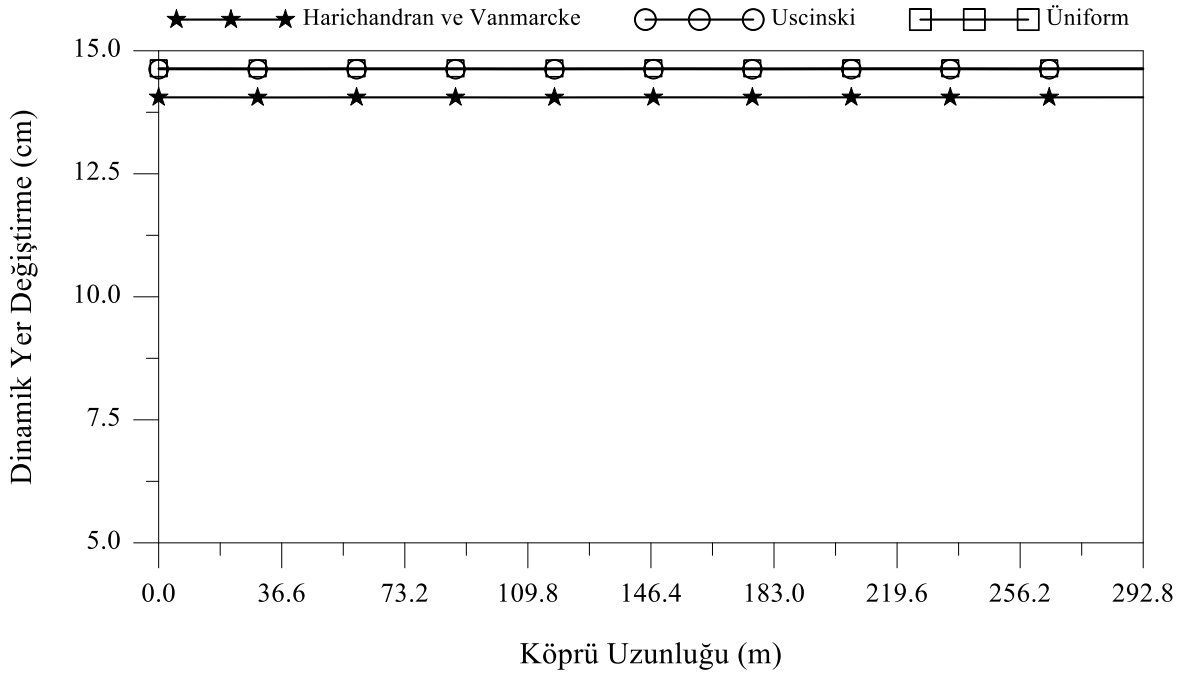
Şekil 3.95. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



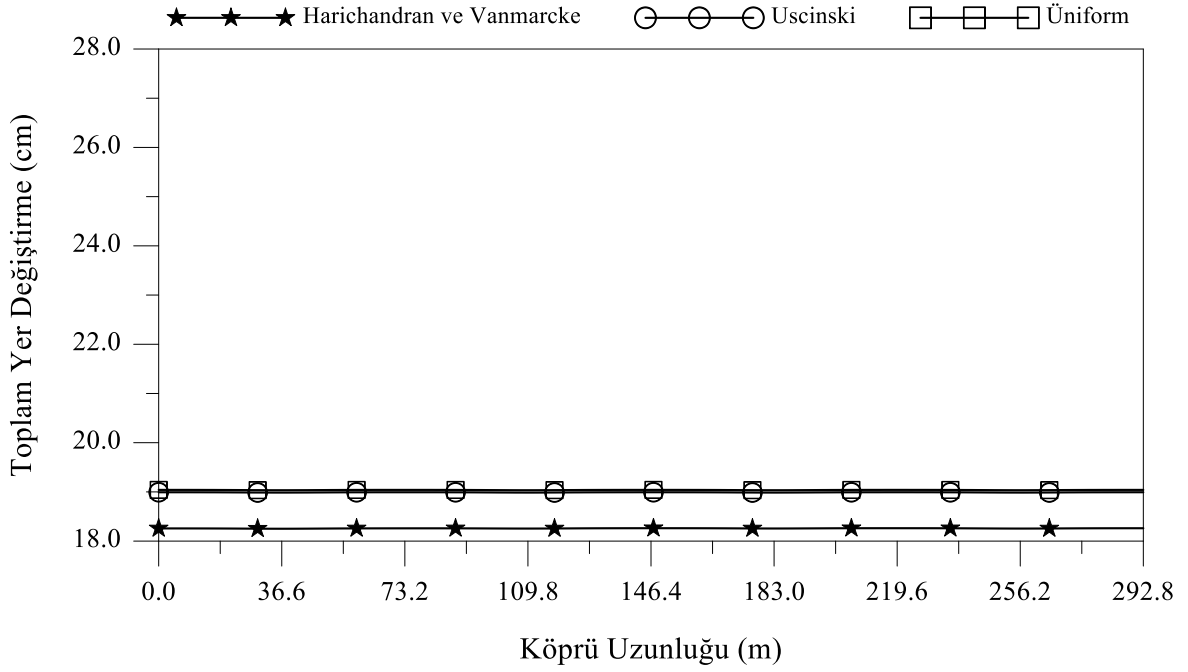
Şekil 3.96. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik yer değiştirmeleri



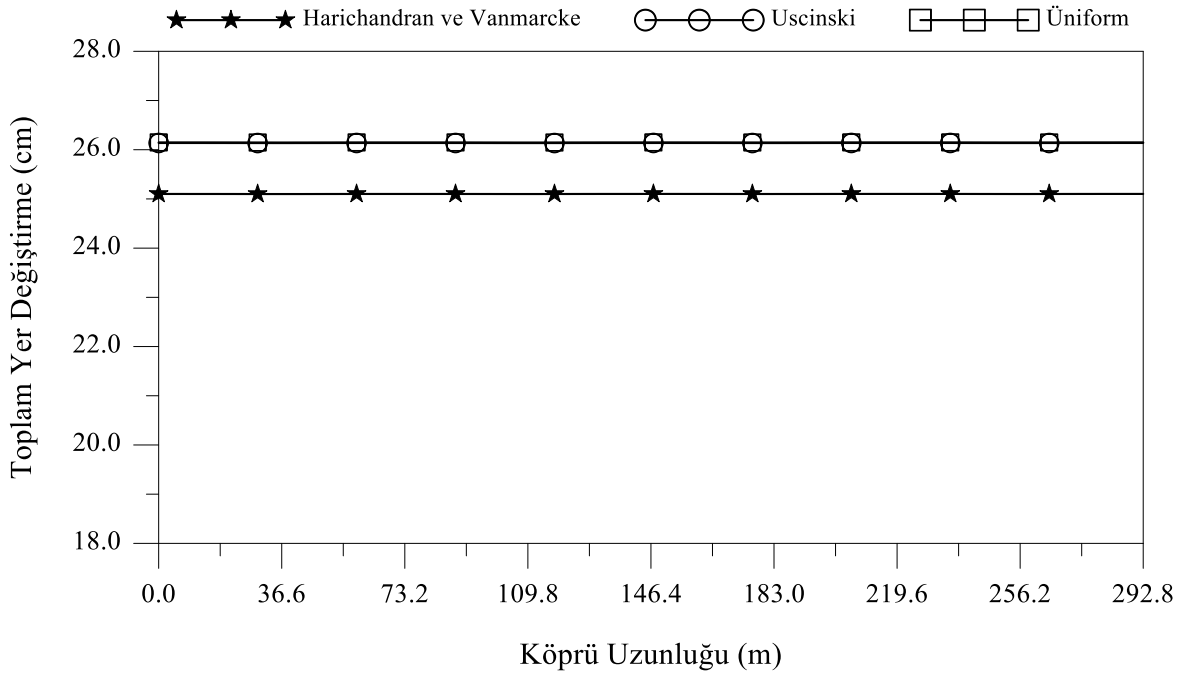
Şekil 3.97. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.98. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.99. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri



Şekil 3.100. Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam yer değiştirmeleri

3.1.3. Dalga Yayılma ve Tutarsızlık Etkilerinin Birlikte Dikkate Alınması Durumunda Köprünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Bu alt bölümde karayolu köprüsünün mesnetlendiği zeminin homojen yumuşak olması durumunda dalga yayılma ve tutarsızlık etkileri birlikte dikkate alınarak sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprünün stokastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar, dalga yayılma ve korelasyon etkileri dikkate alınmadan gerçekleştirilen hızın sonsuz olması durumuna karşılık gelen üniform yer hareketi, sadece dalga yayılma etkisi ve sadece tutarsızlık etkisi durumlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda göz önüne alınan dört durum aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

1. Durum: Yer hareketinin dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin dikkate alınmadığı, yer hareketinin sonsuz hızda yayıldığı ve köprünün her bir mesnedine aynı yer hareketinin etkideği kabul edilen durumdur. Bu durum üniform yer hareketine karşılık gelmekte ve

(2.9) denklemindeki tutarsızlık etkisi $|\gamma_{lm}(\omega)|^k = 1$, zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ ve dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d = 1$ olmaktadır.

2. Durum: Bölüm 3.1.1’de gerçekleştirilen ve sadece yer hareketinin dalga yayılma etkisinin dikkate alındığı durumdur. Bu durumda (2.9) denklemindeki dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$, tutarsızlık etkisi $|\gamma_{lm}(\omega)|^k = 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ olmaktadır. Bu durumda yumuşak zemin için dalga yayılma hızı 200 m/s olarak alınmıştır. Yer hareketi olarak 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 depreminin El Centro Array #3 istasyonunun H-E03230 bileşeni kullanılmıştır.

3. Durum: Bölüm 3.1.2’de gerçekleştirilen ve sadece tutarsızlık etkisinin dikkate alındığı durumdur. Bu durumda (2.9) denklemindeki tutarsızlık etkisi $|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$, zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ ve dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d = 1$ olmaktadır. Tutarsızlık etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli kullanılmıştır.

4. Durum: Bu durumda tutarsızlık ve dalga yayılma etkileri birlikte dikkate alınmış olup köprünün mesnetlendiği zemin ise homojen yumuşak olarak seçilmiştir. Dolayısıyla zemin etkileri dikkate alınmamıştır. Bu durumda (2.9) denklemindeki tutarsızlık etkisi

$|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$, zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z=1$ ve dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$ olmaktadır. Tutarsızlık etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli kullanılmıştır.

Şekil 101’de dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsü gösterilmiştir.

3.1.3.1. Ortalama Maksimum Eleman Kuvvetlerinin ve Yer Değiştirmelerinin İncelenmesi

Sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizleri sonucunda karayolu köprüsünün tabliyesinde elde edilen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler Şekil 3.102-3.125’te gösterilmektedir. Gösterilen grafikler eleman kuvvetleri ve yer değiştirmelerin zahiri- statik, dinamik ve toplam değerlerinden oluşmaktadır.

Şekil 3.102-3.107’de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz köprü tabliyesinde oluşan zahiri- statik, dinamik ve toplam normal kuvvetlerin maksimum değerlerini sırasıyla %89, %74 ve %88 oranında azaltmıştır. Şekil 3.102-3.103’te dalga yayılma etkisinin tutarsızlık etkisine göre daha etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.102-3.103 ve Şekil 3.106-3.107’de hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz köprülerde dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durumun diğer durumlara göre daha etkili olduğu görülmüştür. Şekil 3.104-3.107’de görüldüğü gibi dinamik ve toplam normal kuvvetlerde tutarsızlık etkisinin dalga yayılma etkisine göre daha etkili olduğu görülmektedir.

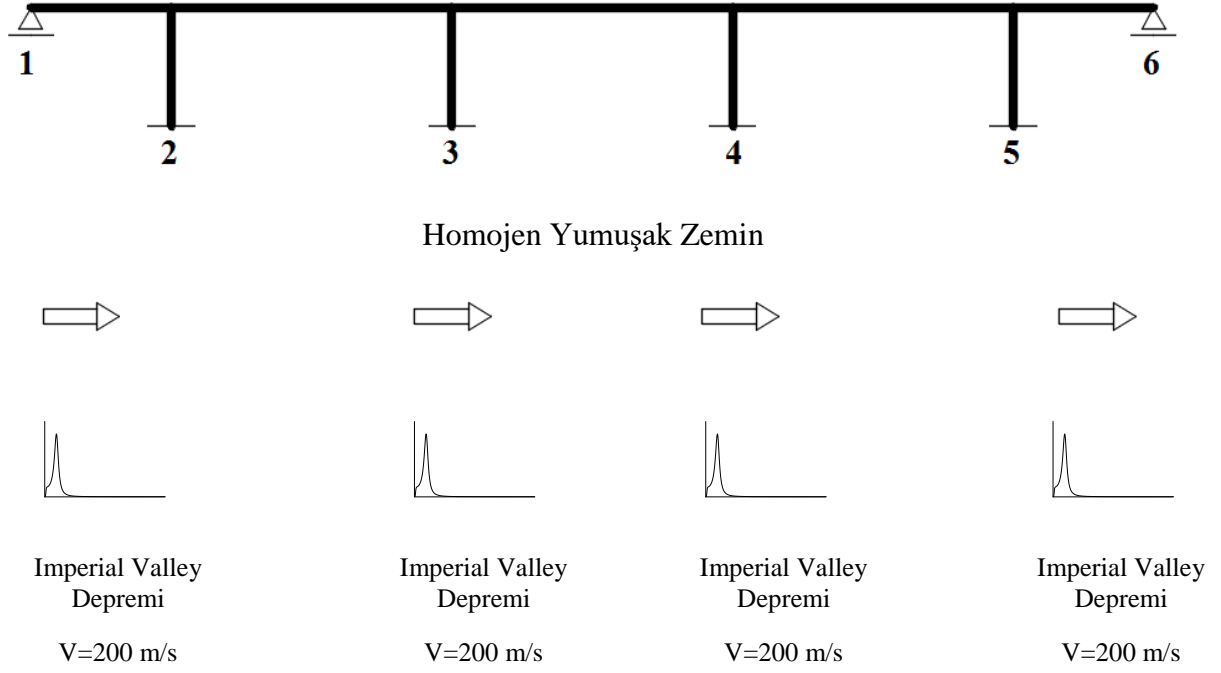
Şekil 3.108-3.113’te görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz köprü tabliyesinde oluşan zahiri- statik, dinamik ve toplam kesme kuvvetlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %99, %72 ve %84 oranında azaltmaktadır. Şekil 3.108-3.109’da dalga yayılma etkisinin tutarsızlık etkisine göre daha etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.110-113’te görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz köprülerde dinamik ve toplam kesme kuvvetlerinde tutarsızlık etkisinin dalga yayılma etkisine göre daha fazla etkili olduğu görülmektedir.

Şekil 3.114-3.119’da görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz köprü tabliyesinde oluşan zahiri- statik, dinamik ve

toplam eğilme momentlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %94, %77 ve %87 oranında azaltmıştır. Yine aynı şekillerde görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz köprülerde zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinde tutarsızlık etkisinin dalga yayılma etkisine göre daha fazla etkili olduğu görülmektedir.

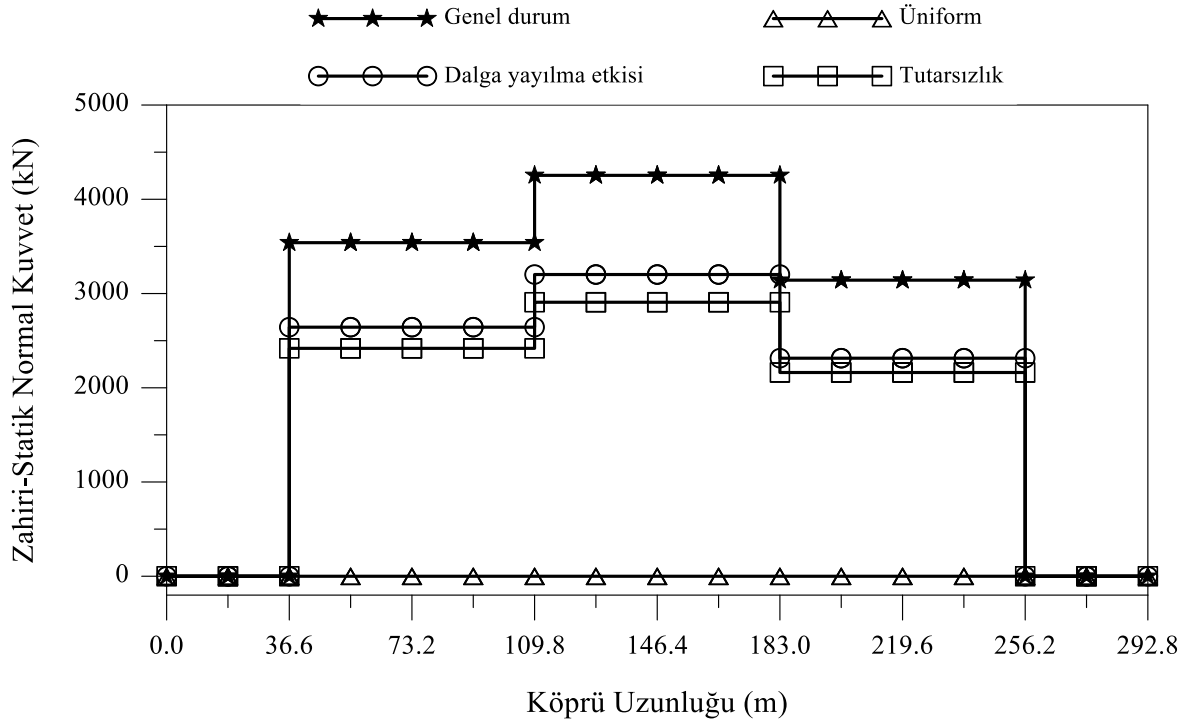
Şekil 3.120-3.121’de görüldüğü üzere sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprüdeki zahiri-statik yer değiştirmeler birbirine çok yakındır. Şekil 3.122-3.125’te görüldüğü gibi sismik izolasyonlu köprü tabliyesinde oluşan dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama değerleri, sismik izolasyonsuz durumdakinden sırasıyla %128 ve %11 daha büyük olmaktadır. Bu durum ÜESS mesnet sistemine izin verilen yer değiştirme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.122-3.123’te görüldüğü gibi dalga yayılma etkisi ve genel durum kullanılması ile elde edilen yer değiştirmeler birbirine çok yakın olmaktadır. Şekil 3.120-3.125’te görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama maksimum değerleri dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durumda en küçük olmaktadır. Yine aynı şekillerde görüldüğü gibi hızın sonsuz olduğu üniform yer hareketinde yer değiştirmeler en büyük olmaktadır.

Deprem yer hareketleri köprüye yatay doğrultuda etki ettirilmiştir. Hızın sonsuz olduğu üniform yer hareketi durumunda köprü rijit cisim hareketi yapmaktadır. Bunun sonucu olarak Şekil 3.102-3.103, Şekil 3.108-3.109 ve Şekil 3.114-3.115’te köprü tabliyesinde meydana gelen zahiri-statik normal, kesme kuvvetlerin ve eğilme momentlerinin değerleri sıfır olmaktadır. Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesi toplam kesme kuvveti ve eğilme momentleri sadece tutarsızlık etkisi durumunda en büyük değerleri alırken toplam normal kuvvetler genel durumda en büyük değerleri almaktadır.

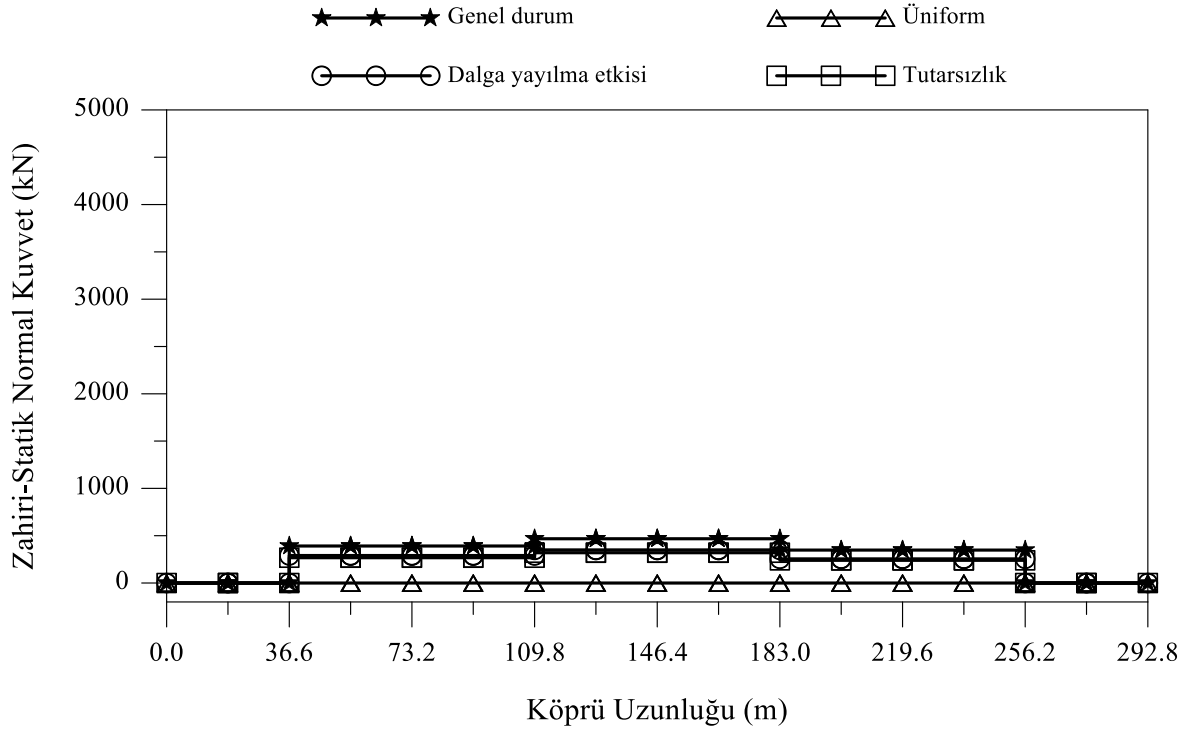


Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli

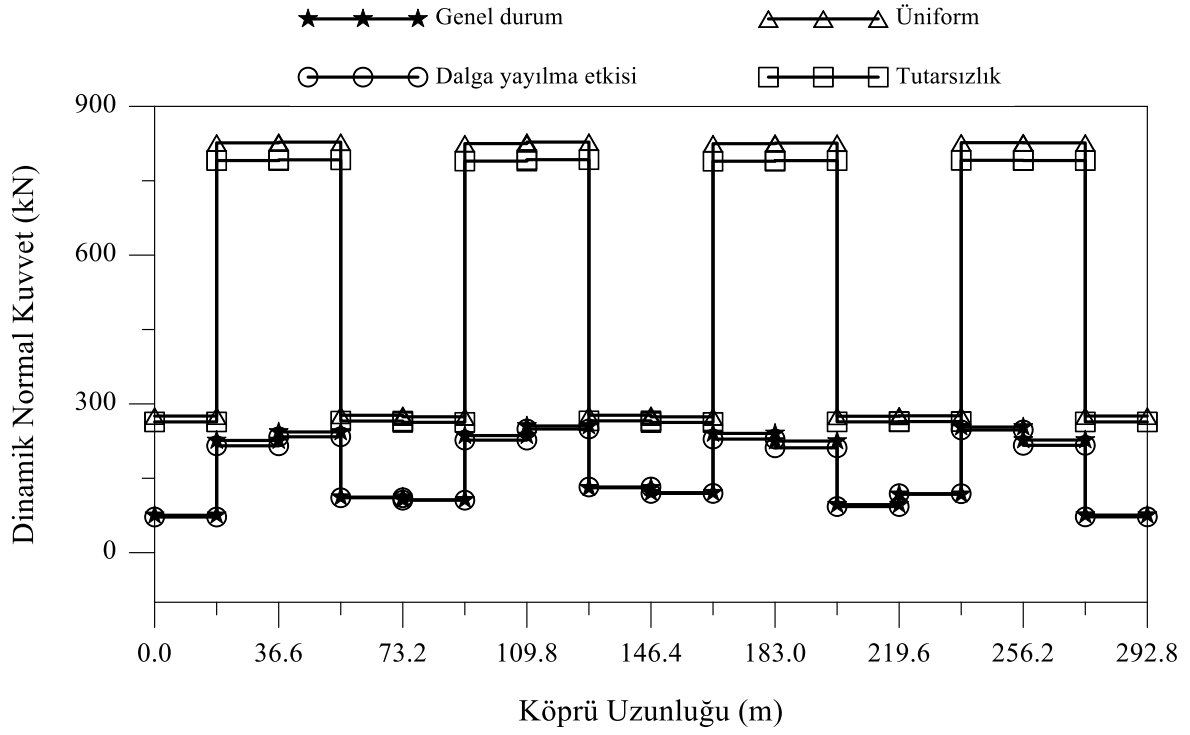
Şekil 3.101. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli



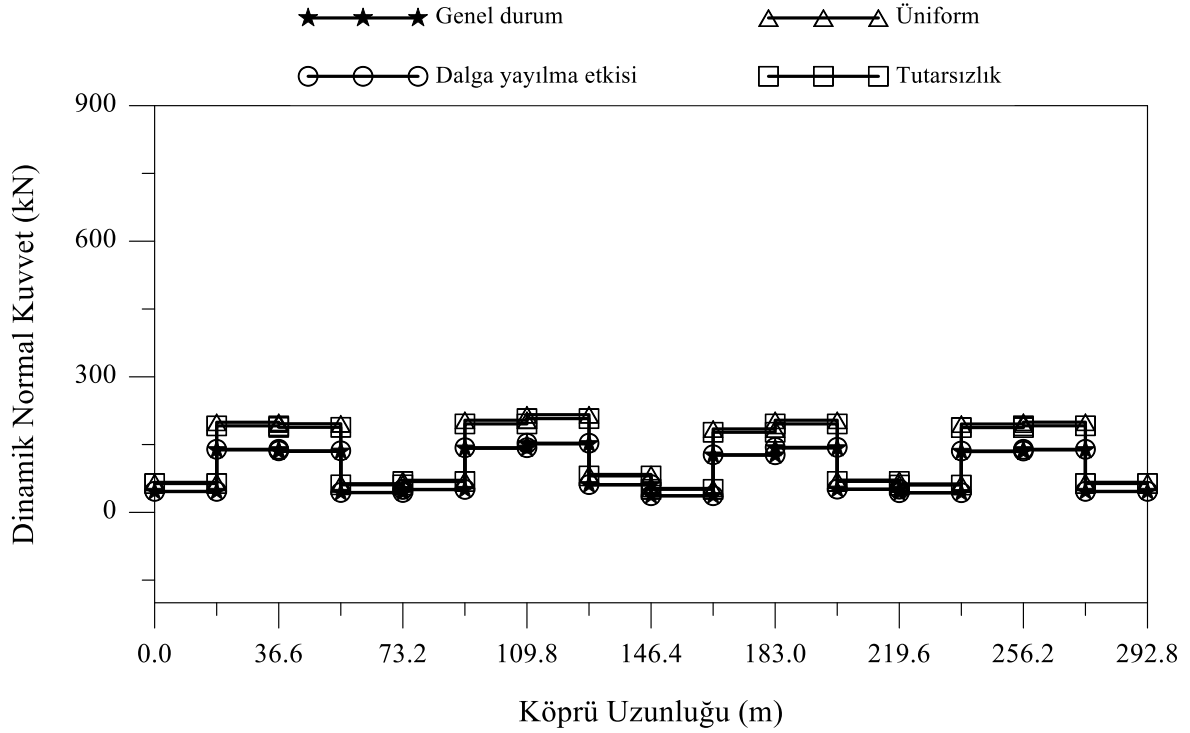
Şekil 3.102. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tablıe zahırı-statık normal kuvvetleri



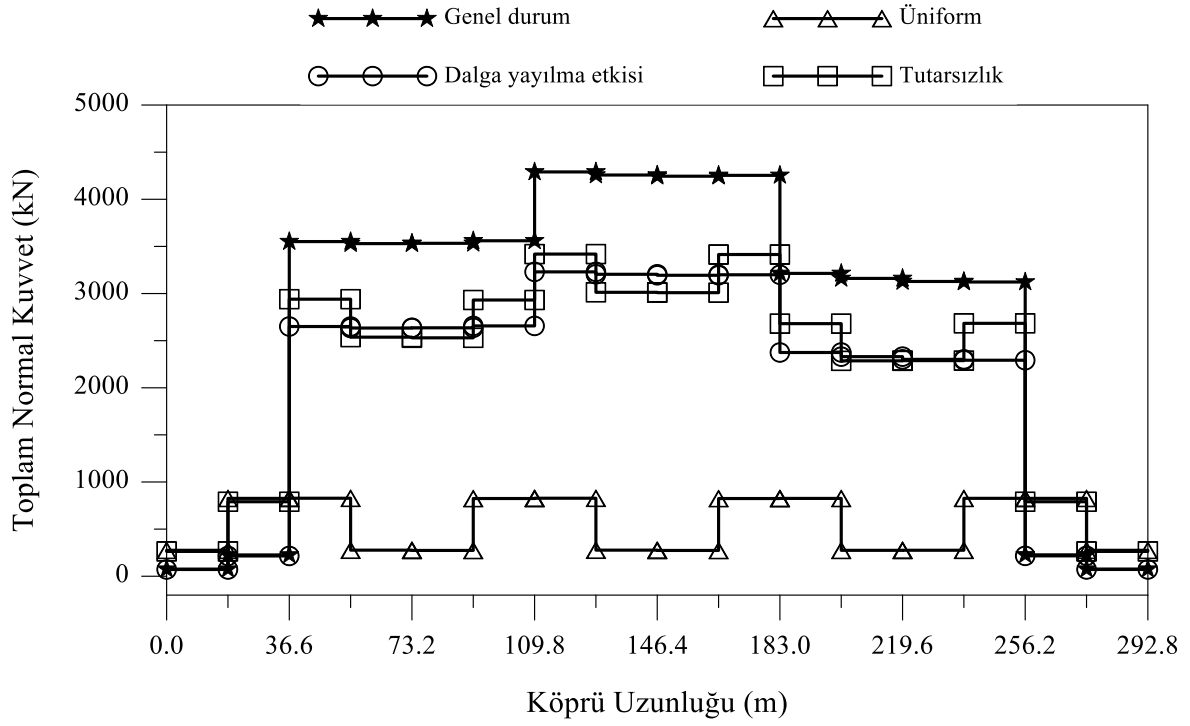
Şekil 3.103. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tablıe zahırı-statık normal kuvvetleri



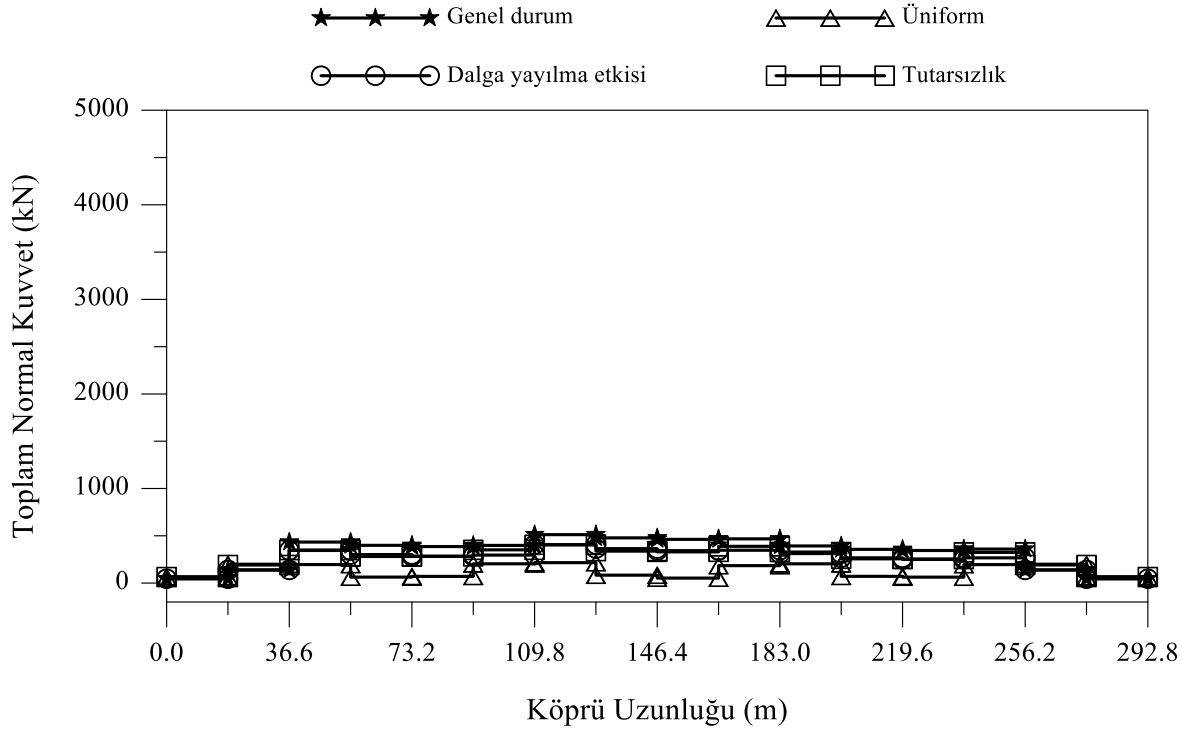
Şekil 3.104. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tablıye dınamik normal kuvvetleri



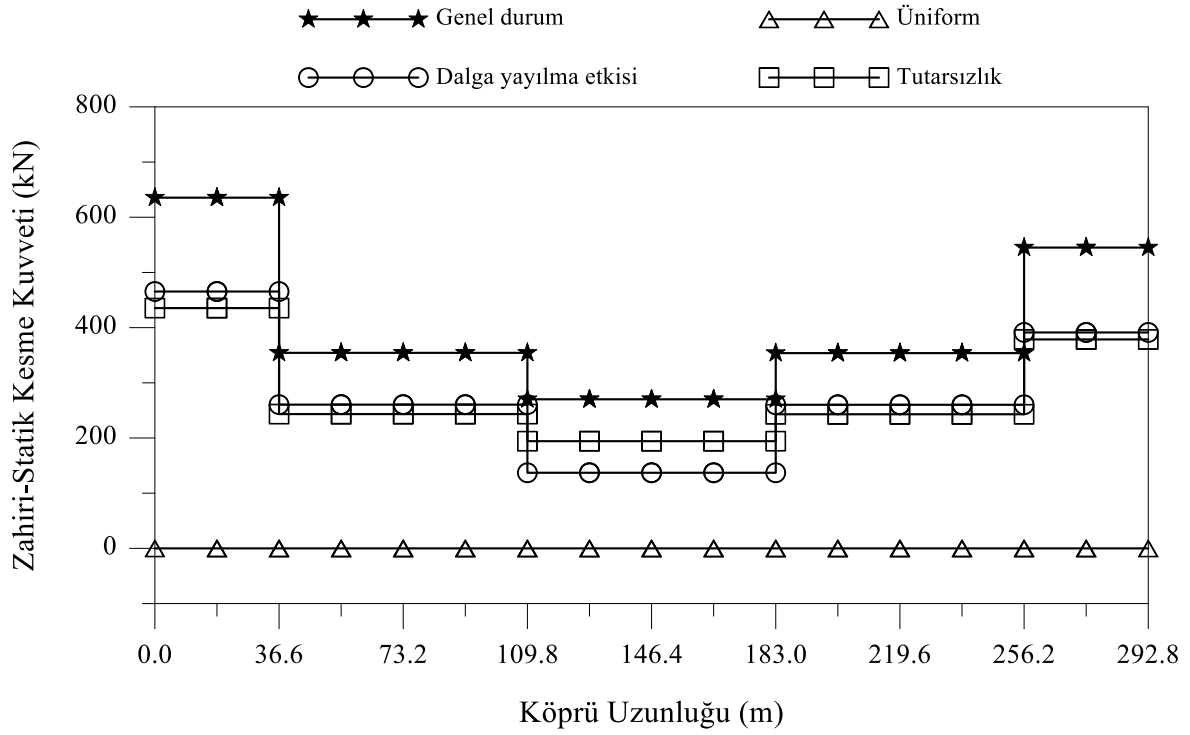
Şekil 3.105. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tablıye dınamik normal kuvvetleri



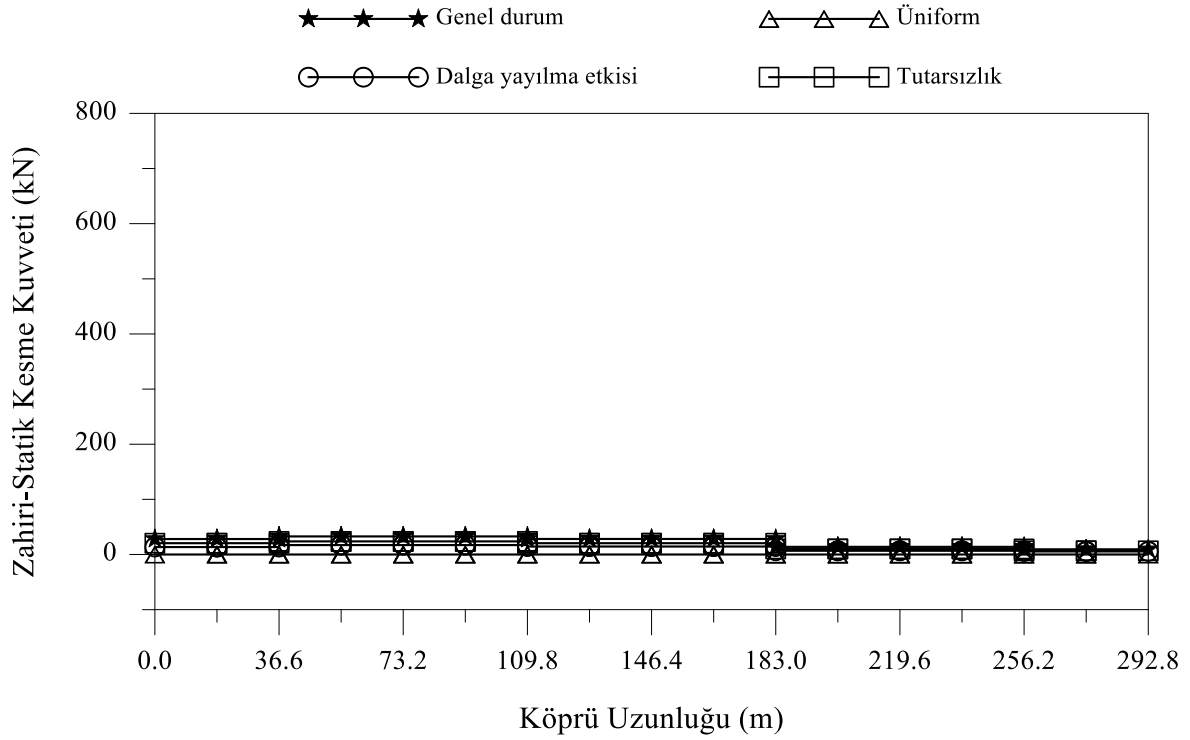
Şekil 3.106. Dalgay yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



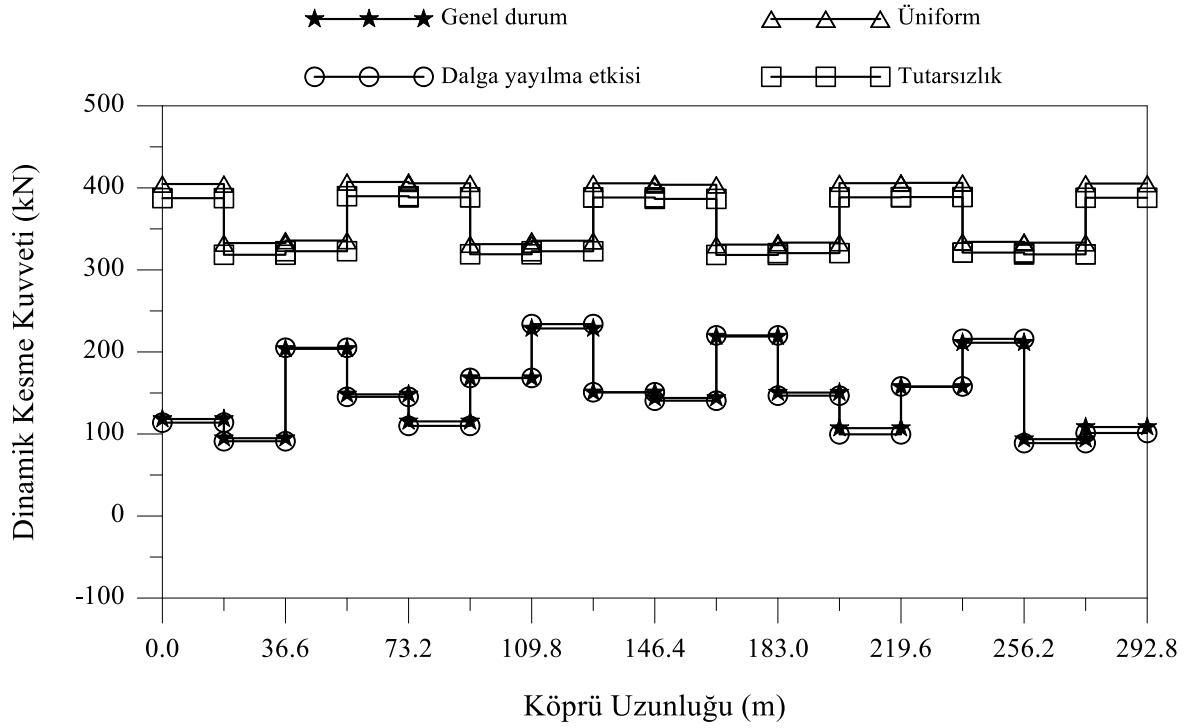
Şekil 3.107. Dalgay yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam normal kuvvetleri



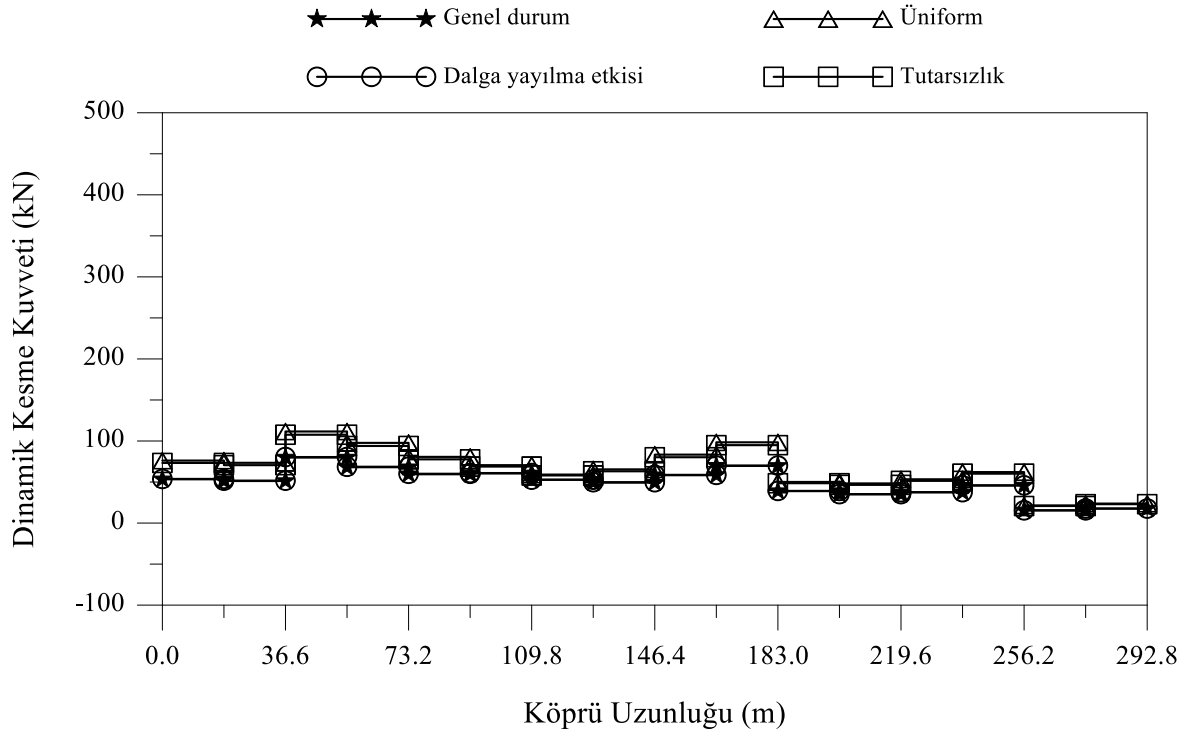
Şekil 3.108. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri



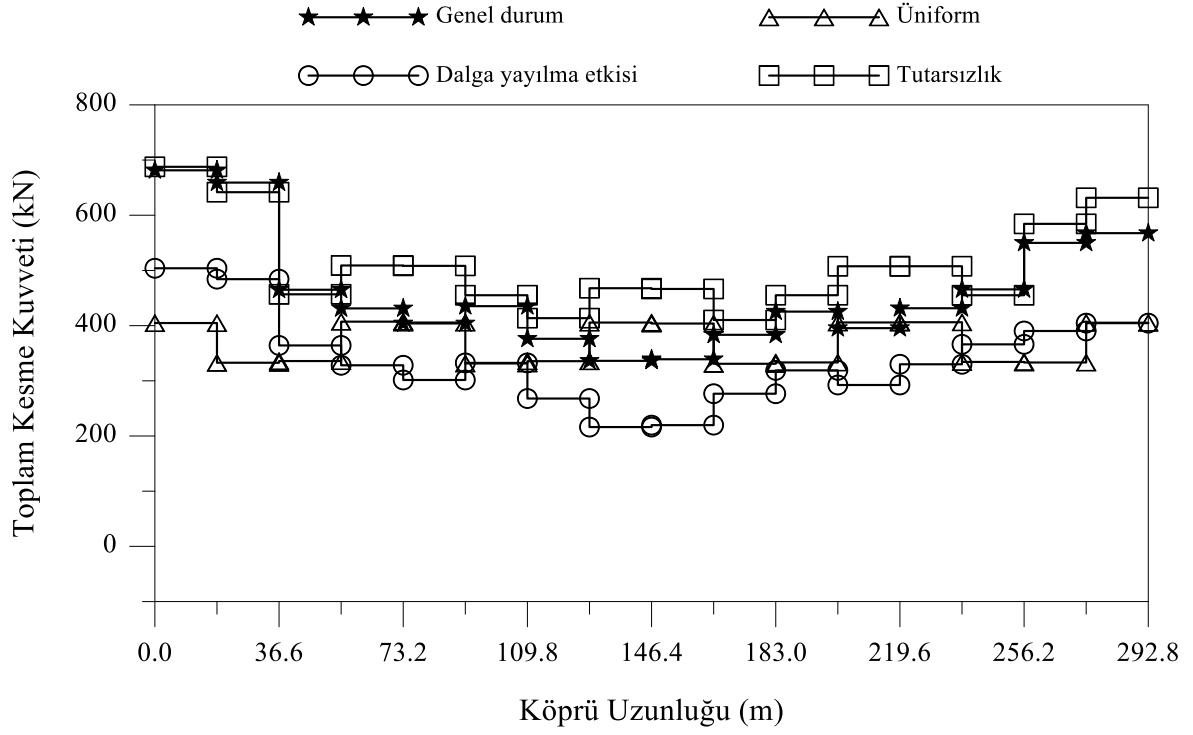
Şekil 3.109. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye zahiri-statik kesme kuvvetleri



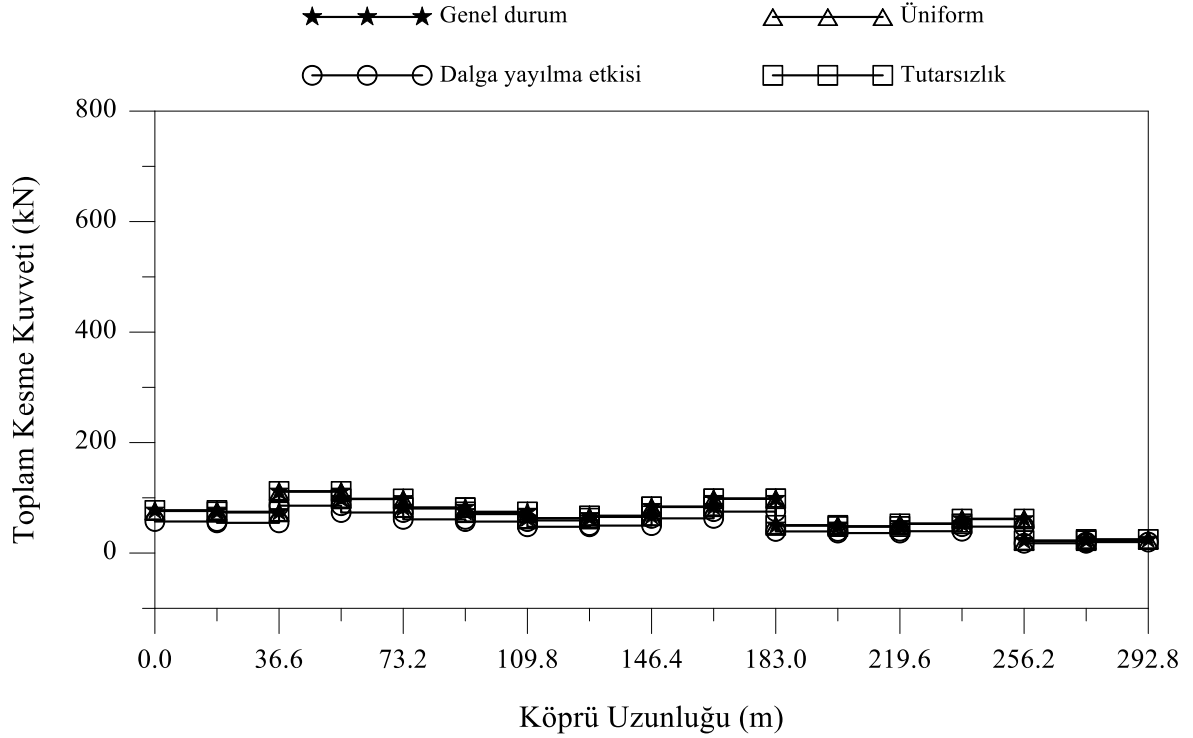
Şekil 3.110. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri



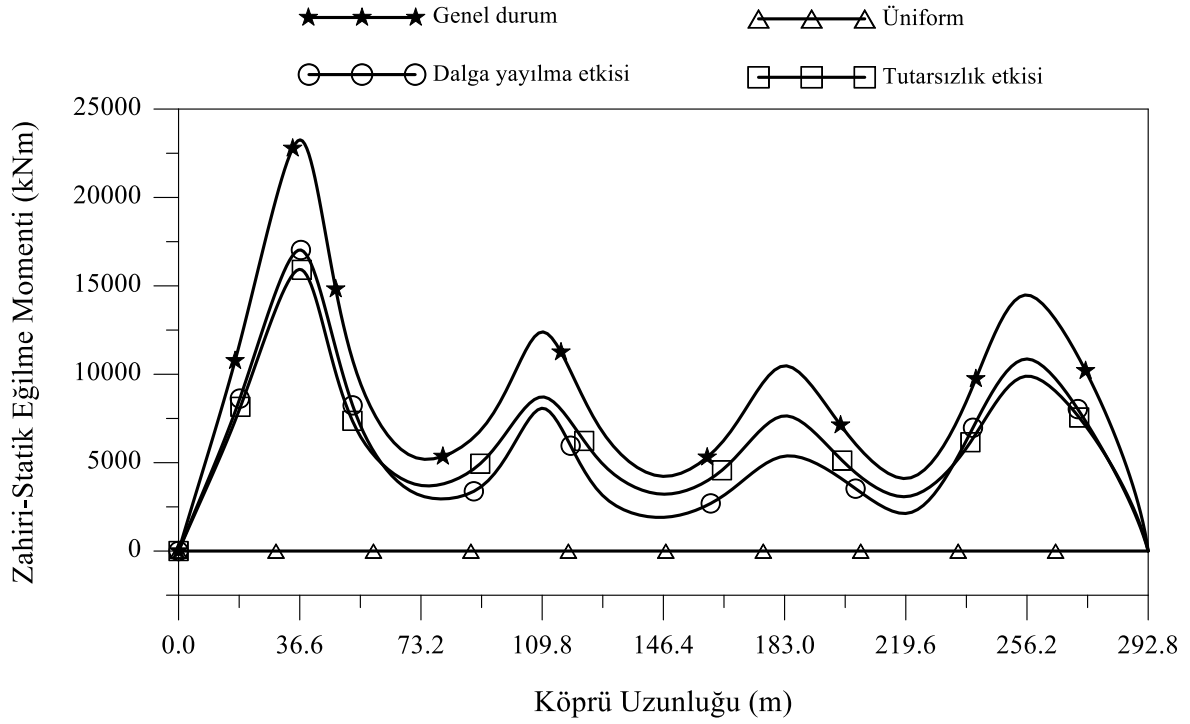
Şekil 3.111. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye dinamik kesme kuvvetleri



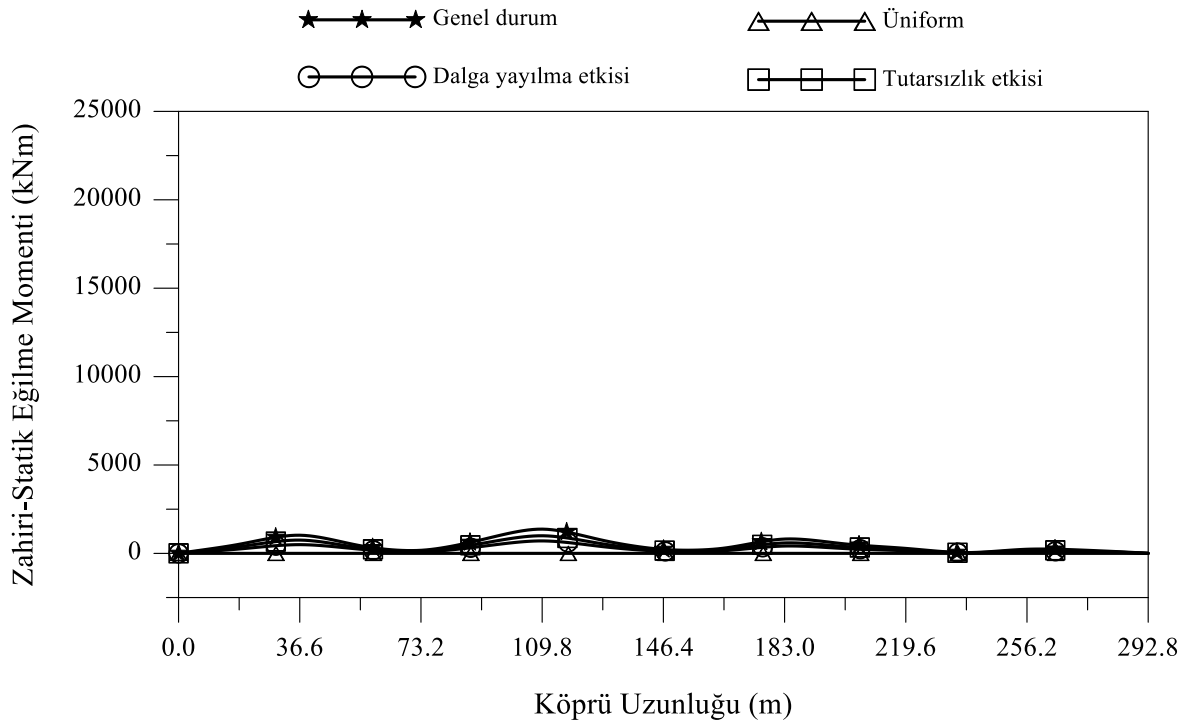
Şekil 3.112. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri



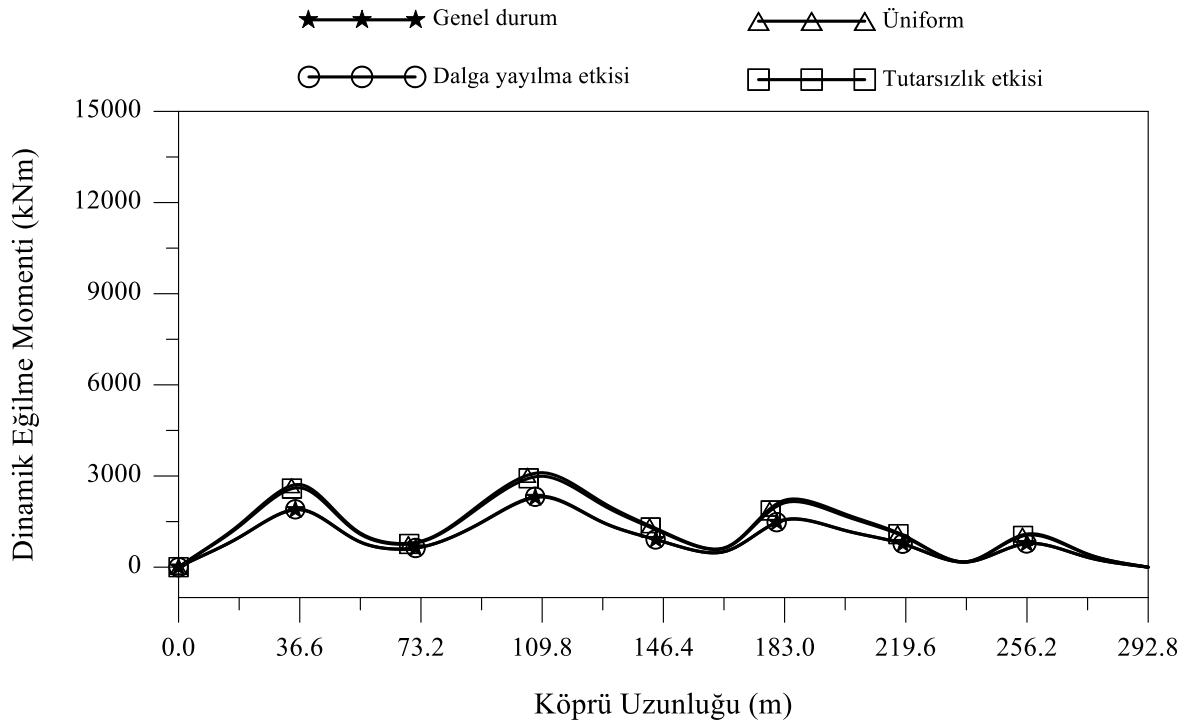
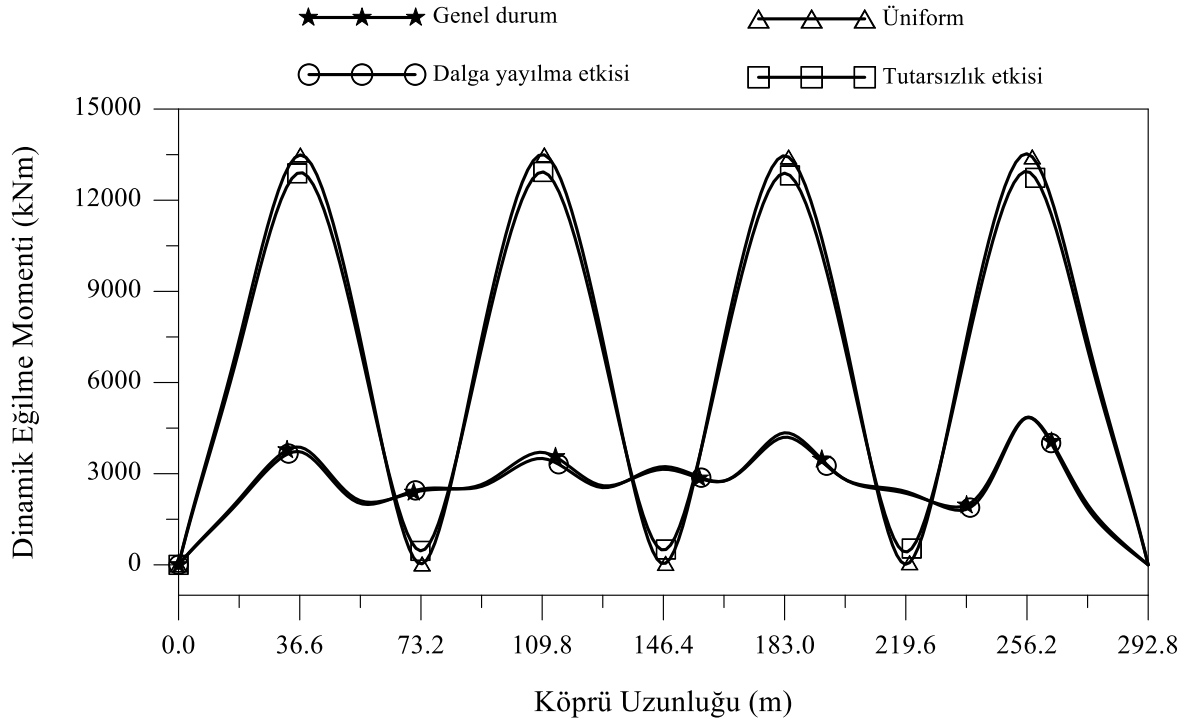
Şekil 3.113. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün tabliye toplam kesme kuvvetleri

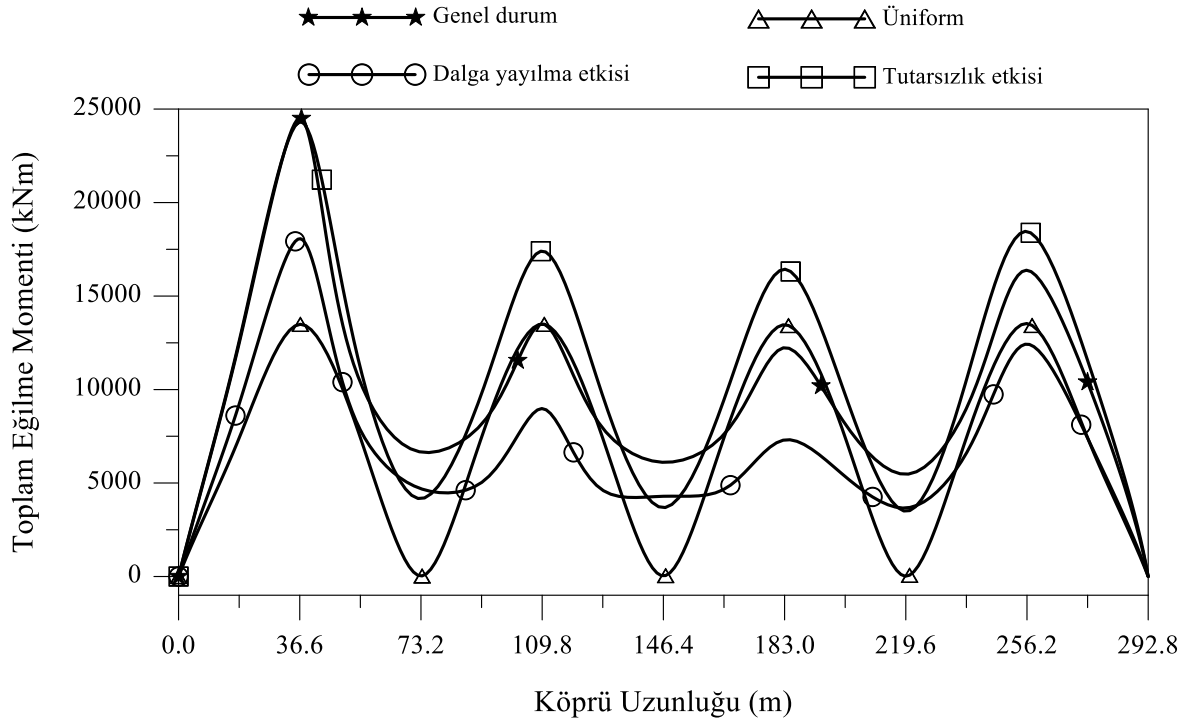


Şekil 3.114. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri

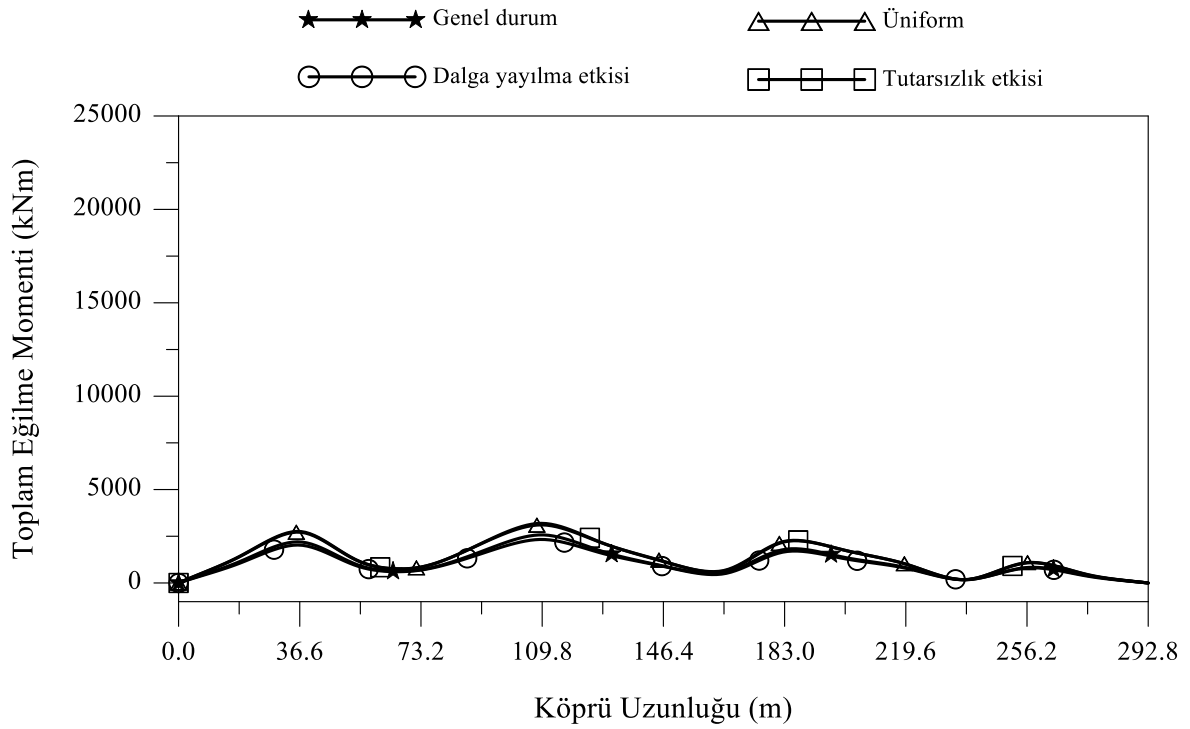


Şekil 3.115. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri

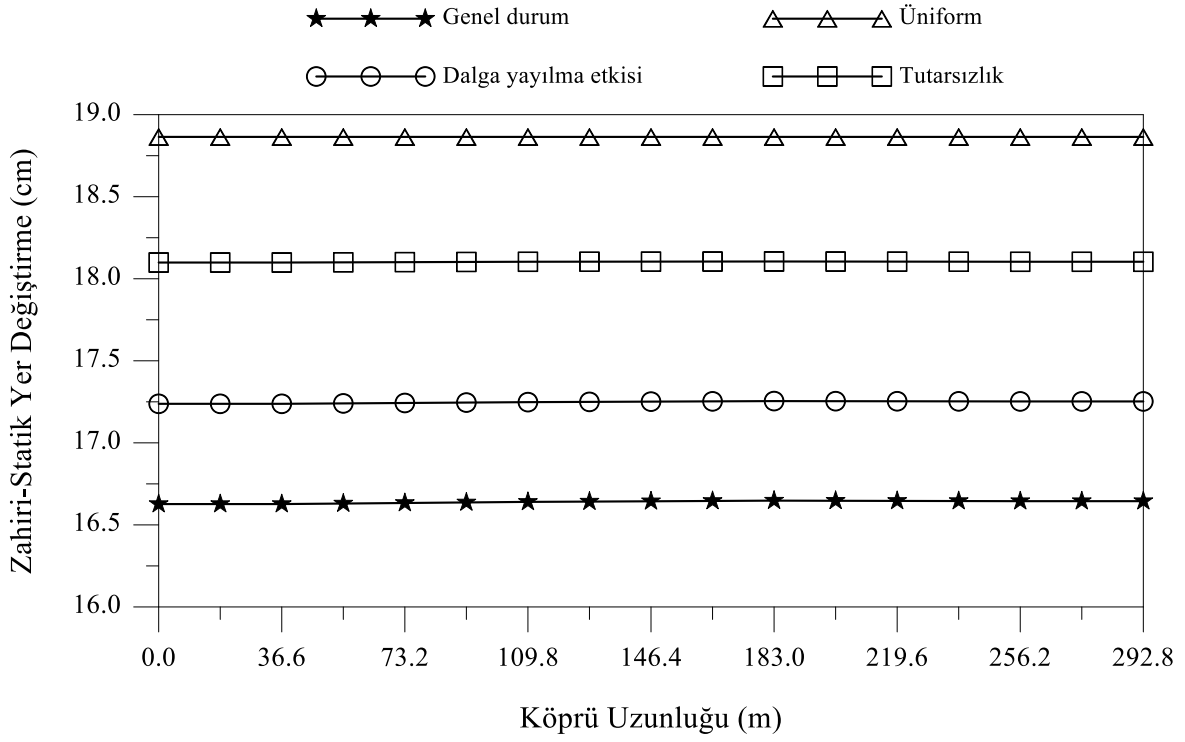




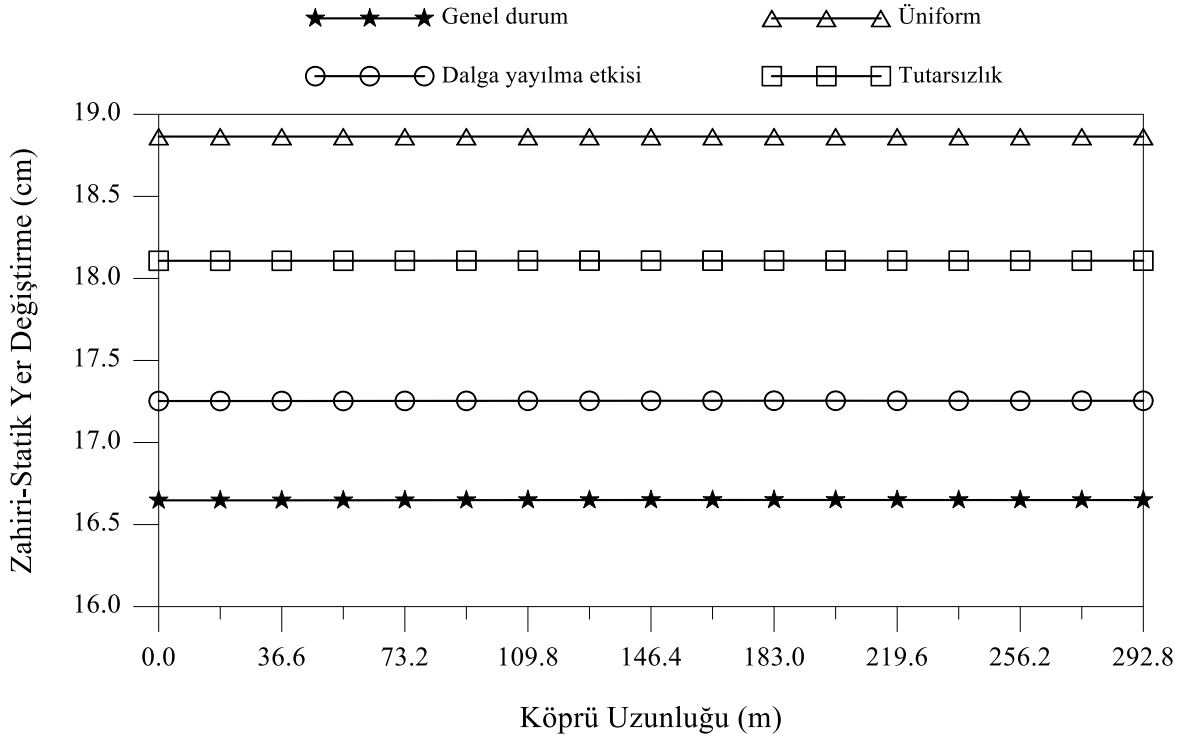
Şekil 3.118. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri



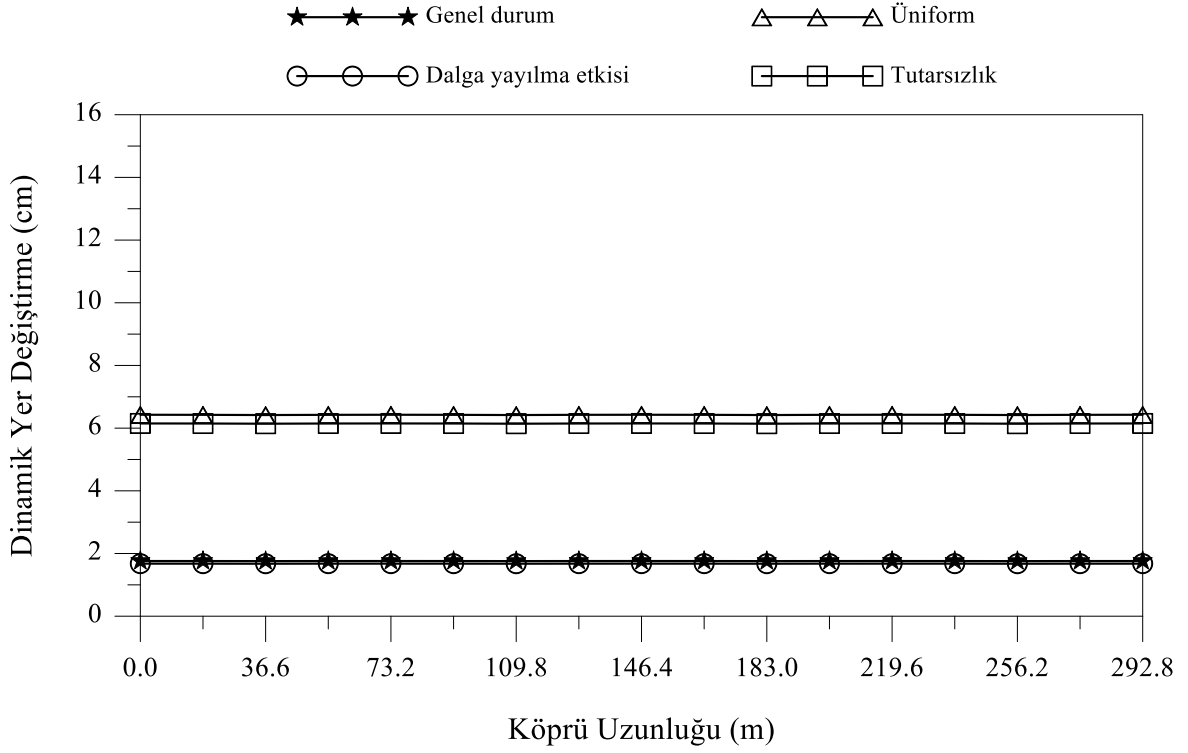
Şekil 3.119. Dalgı yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri



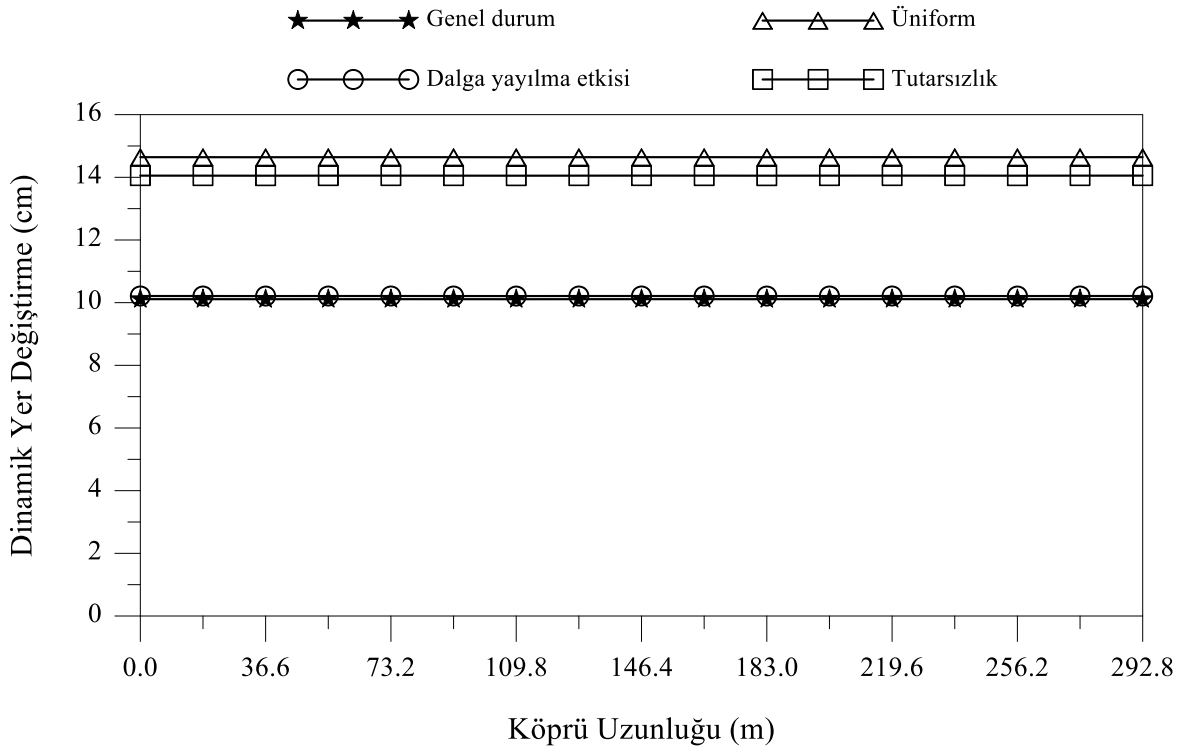
Şekil 3.120. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri



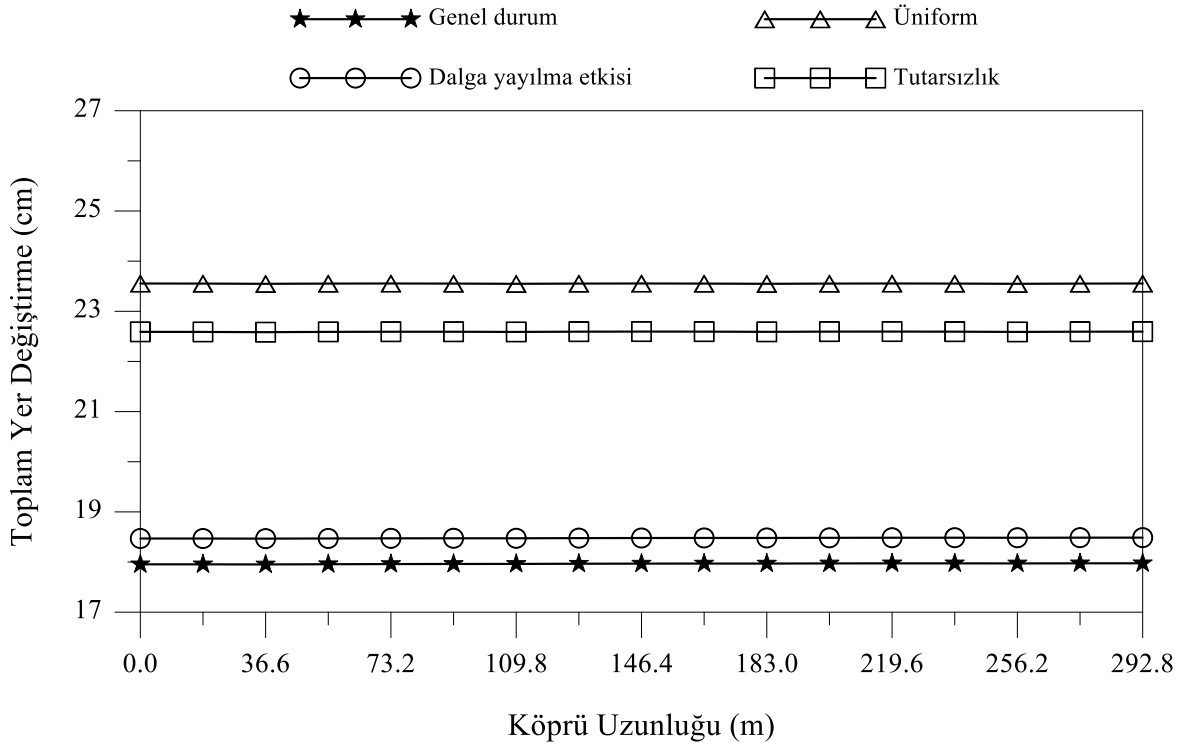
Şekil 3.121. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri



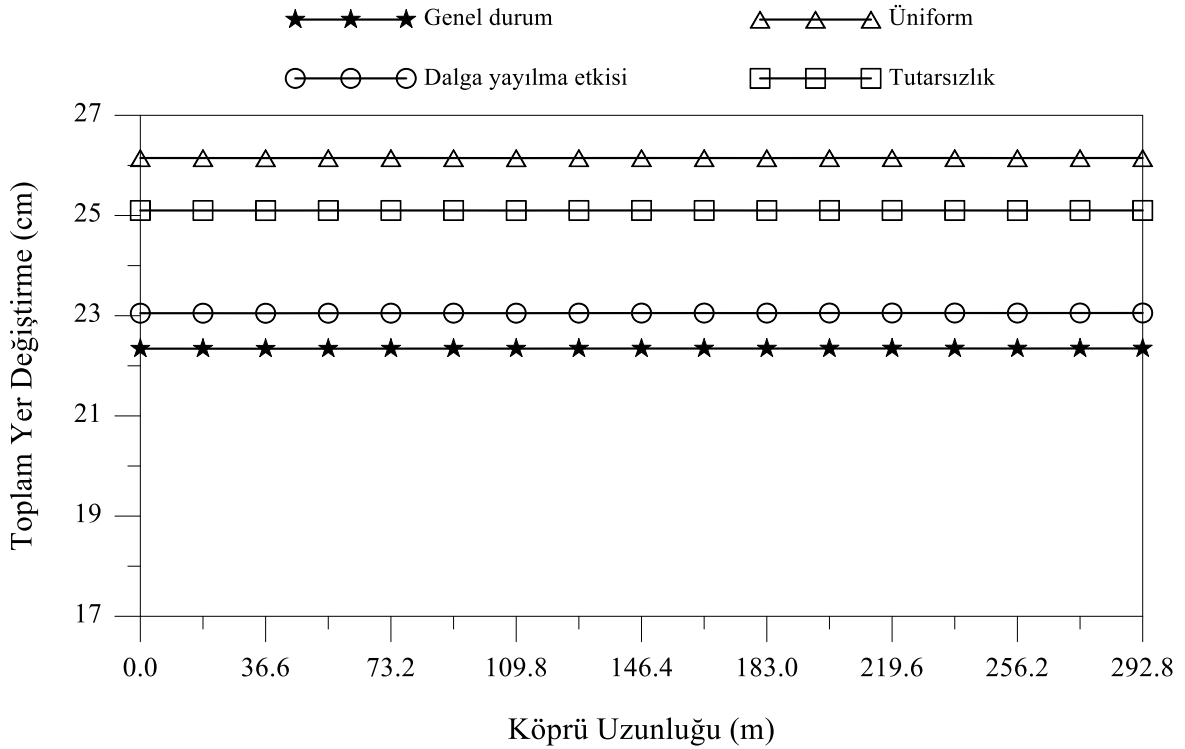
Şekil 3.122. Dalgaya yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.123. Dalgaya yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.124. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam yer değiştirmeleri



Şekil 3.125. Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerine maruz izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam yer değiştirmeleri

3.1.4. Dalga Yayılma, Tutarsızlık ve Zemin Etkilerinin Birlikte Dikkate Alınması Durumunda Köprünün Stokastik Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Bu alt bölümde karayolu köprüsünün mesnetlendiği zeminin homojen olmaması durumunda dalga yayılma, tutarsızlık ve zemin etkileri birlikte dikkate alınarak sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprünün stokastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen stokastik analizlerde kullanılan karayolu köprü modelinin mesnetlendiği zemin üç bölge olarak hesaplara katılıp farklı durumları için karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalarda dikkate alınacak olan A, B, C, D durumları Şekil 3.126'da gösterilmekte ve aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

A Durumu: Yer hareketi dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin birlikte dikkate alındığı, köprünün oturduğu tüm mesnetlerin homojen orta zemin sınıfı olduğu durumdur. Bu durumda (2.9) denklemindeki dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$, tutarsızlık etkisi

$|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ olmaktadır. Bu durumdaki orta zemin sınıfında dalga yayılma hızı 700 m/s olarak hesaplara katılmıştır. Tutarsızlık etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli kullanılmıştır. Yer hareketi olarak 15 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni kullanılmıştır.

B Durumu: Yer hareketi dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin birlikte dikkate alındığı, köprünün oturduğu tüm mesnetlerin homojen sert zemin sınıfı olduğu durumdur. Bu durumda (2.9) denklemindeki dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$, tutarsızlık etkisi

$|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ olmaktadır. Bu durumdaki sert zemin sınıfında dalga yayılma hızı 1000 m/s olarak hesaplara katılmıştır. Tutarsızlık etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli kullanılmıştır. Yer hareketi olarak 15 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni kullanılmıştır.

C Durumu: Bu durumda köprünün 1, 2, 5 ve 6 nolu kenar ayakları sert zemine, 3 ve 4 nolu orta ayakları ise yumuşak zemine oturduğu kabul edilmiştir. Bu durumda (2.9)

denklemindeki dalga yayılma etkisi $\gamma_{/m}(\omega)^d \neq 1$, tutarsızlık etkisi $|\gamma_{/m}(\omega)|^k \neq 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{/m}(\omega)^z \neq 1$ olmaktadır. Bu durumdaki sert ve yumuşak zemin sınıflarında dalga yayılma hızları sırasıyla 1000 m/s ve 400 m/s olarak hesaplara katılmıştır. Tutarsızlık etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli kullanılmıştır. Yer hareketi olarak 15 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni kullanılmıştır.

D Durumu: Bu durumda köprünün 1, 2, 5 ve 6 nolu kenar ayakları sert zemine, 3 ve 4 nolu orta ayakları ise orta zemine oturduğu kabul edilmiştir. Bu durumda (2.9) denklemindeki dalga yayılma etkisi $\gamma_{/m}(\omega)^d \neq 1$, tutarsızlık etkisi $|\gamma_{/m}(\omega)|^k \neq 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{/m}(\omega)^z \neq 1$ olmaktadır. Bu durumdaki sert ve yumuşak zemin sınıflarında dalga yayılma hızları sırasıyla 1000 m/s ve 700 m/s olarak hesaplara katılmıştır. Tutarsızlık etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli kullanılmıştır. Yer hareketi olarak 15 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı istasyonu PUL164 bileşeni kullanılmıştır.

3.1.4.1. Ortalama Maksimum Eleman Kuvvetlerinin ve Yer Değiştirmelerinin İncelenmesi

Sismik izolasyonsuz ve ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizleri sonucunda karayolu köprüsünün tabliyesinde elde edilen ortalama maksimum eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler Şekil 3.127-3.150'de gösterilmiştir. Gösterilen grafikler eleman kuvvetleri ve yer değiştirmelerin zahiri-statik, dinamik ve toplam değerlerinden oluşmaktadır.

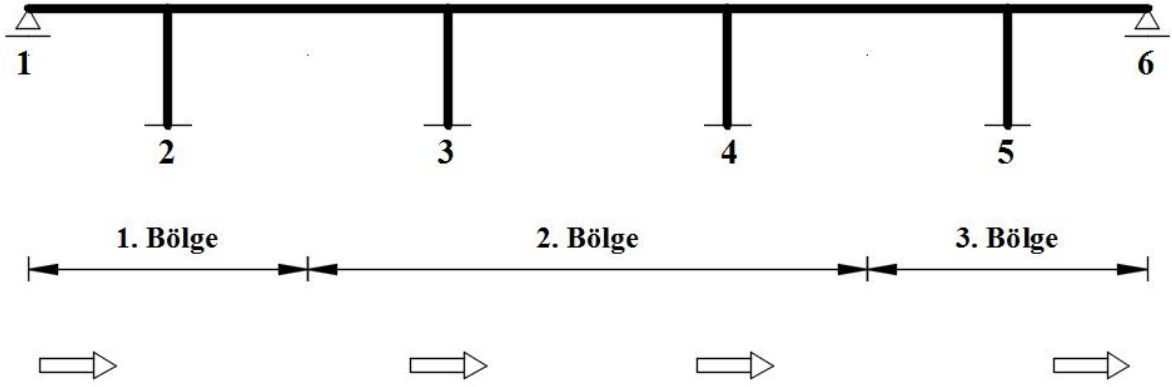
Şekil 3.127-3.132'de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam normal kuvvetlerin maksimum değerlerini sırasıyla %88, %63 ve %88 oranında azaltmıştır. Şekil 3.127-3.132'de görüldüğü gibi sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz köprüde C durumundaki normal kuvvetler diğer durumlardakilere göre genelde daha etkili olmaktadır. Aynı şekillerden görüldüğü gibi normal kuvvetlerde etkisi en az olan durum B durumu olmaktadır. Bununla birlikte A durumunun D durumundan daha etkili olduğu görülmektedir.

Şekil 3.133-3.138’de görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam kesme kuvvetlerin maksimum değerlerini sırasıyla %93, %61 ve %88 oranında azaltmaktadır. Şekil 3.133, Şekil 3.135 ve Şekil 3.137’de sismik izolasyosuz köprünün C durumundaki zahiri-statik, dinamik ve toplam kesme kuvvetlerinin diğer durumlardakilere göre daha etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.134, Şekil 3.136 ve Şekil 3.138’den görüldüğü sismik izolasyonlu köprünün A durumundaki dinamik ve toplam kesme kuvvetleri diğer durumlardakilere göre daha etkili olurken C durumundaki zahiri-statik kesme kuvveti diğer durumlardakilere göre daha etkili olmaktadır.

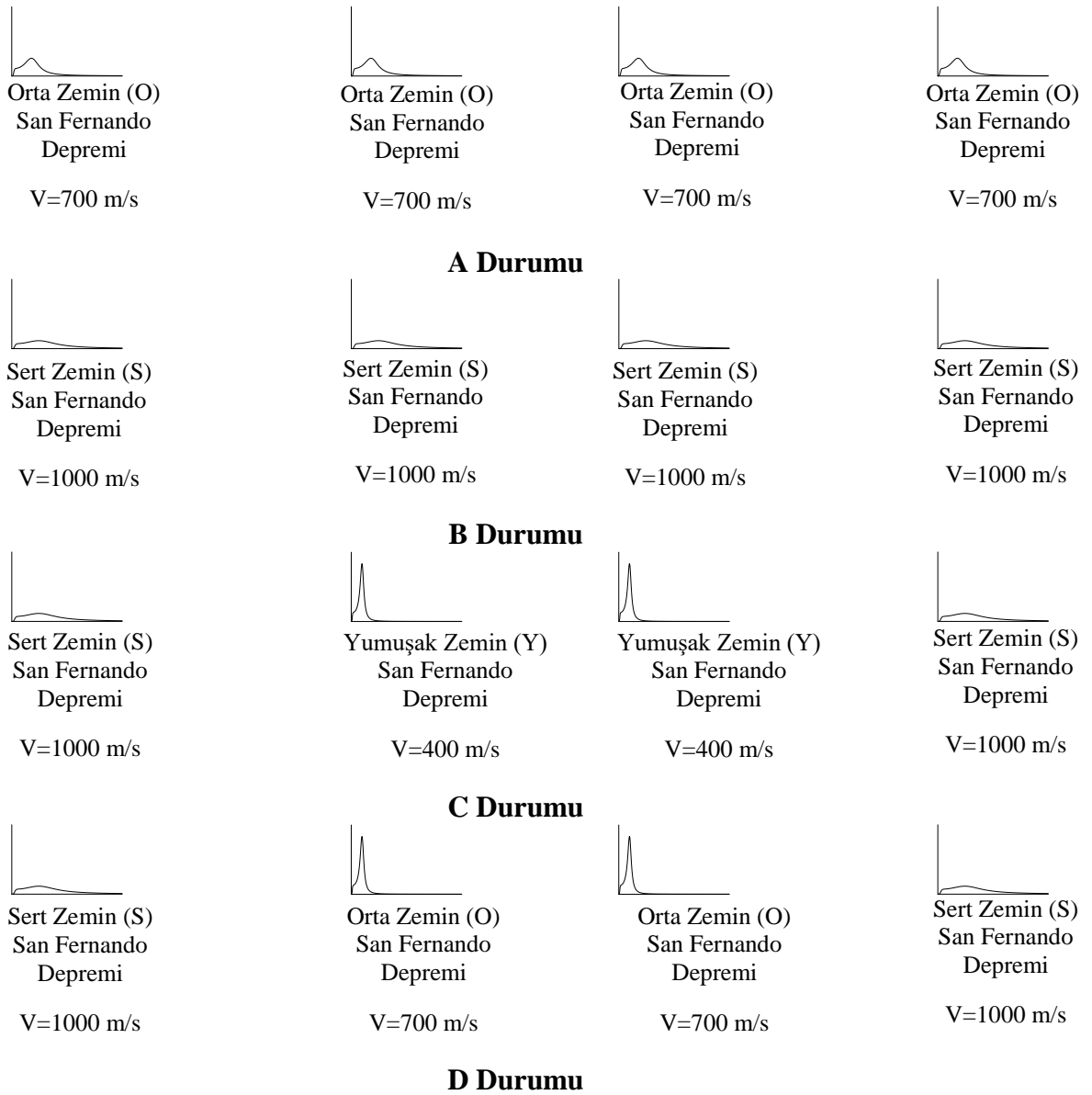
Şekil 3.139-3.144’te görüldüğü gibi ÜESS mesnet sisteminin kullanımı homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinin maksimum değerlerini sırasıyla %91, %63 ve %88 oranında azaltmıştır. Şekil 3.139, Şekil 3.141 ve Şekil 3.143’den sismik izolasyosuz köprünün C durumundaki zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinin diğer durumlardakilere göre daha etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.140, Şekil 3.142 ve Şekil 3.144’de görüldüğü gibi sismik izolasyonlu köprünün C durumundaki zahiri-statik ve toplam eğilme momentleri diğer durumlardakilere göre daha etkili olurken A durumundaki dinamik eğilme momenti diğer durumlardakilere göre daha etkili olmaktadır.

Şekil 3.145-3.150’de görüldüğü gibi sismik izolasyonlu köprü tabliyesinde dört farklı durumda oluşan dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama değerleri sismik izolasyosuz durumdakinden sırasıyla %284 ve %61 daha büyük olurken zahiri-statik yer değiştirmeler birbirine çok yakın olmaktadır. Şekil 3.145-3.150’de görüldüğü gibi hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyosuz köprünün C durumundaki zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirme değerleri diğer durumlardakilere göre daha büyük olurken B durumundaki yer değiştirme değerleri en küçük olmaktadır. Yine aynı şekillerden A durumundaki yer değiştirme değerlerinin B durumundakilerden daha büyük olduğu görülmektedir.

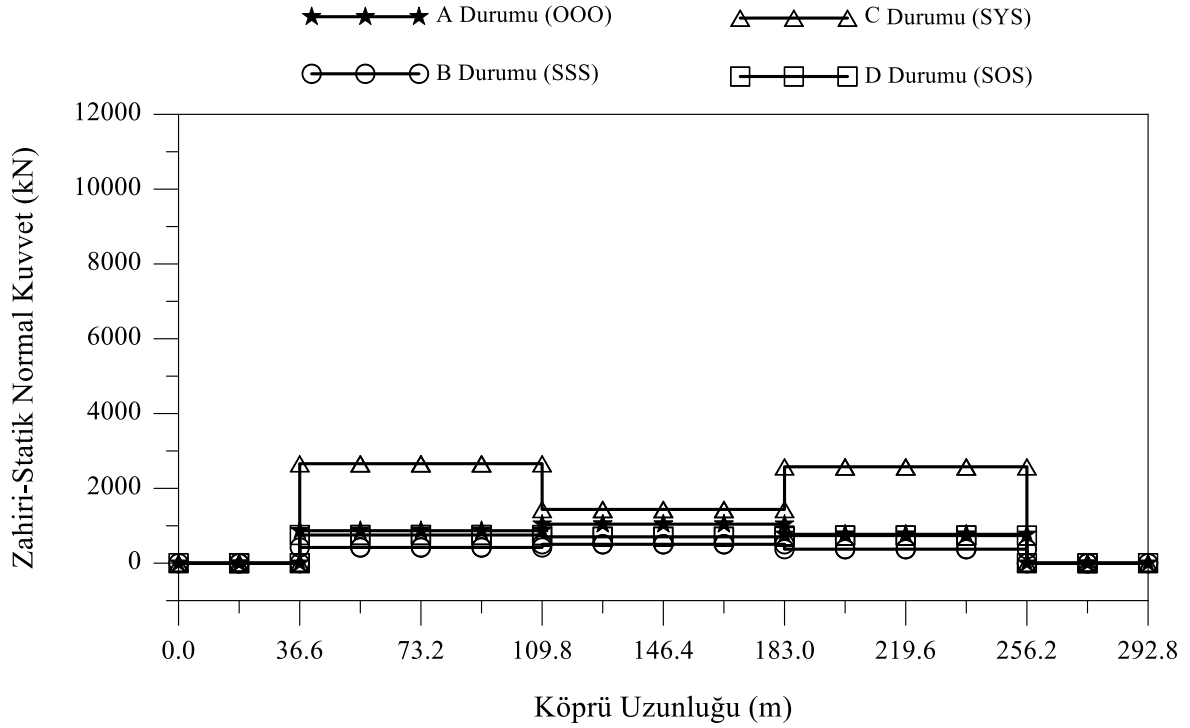
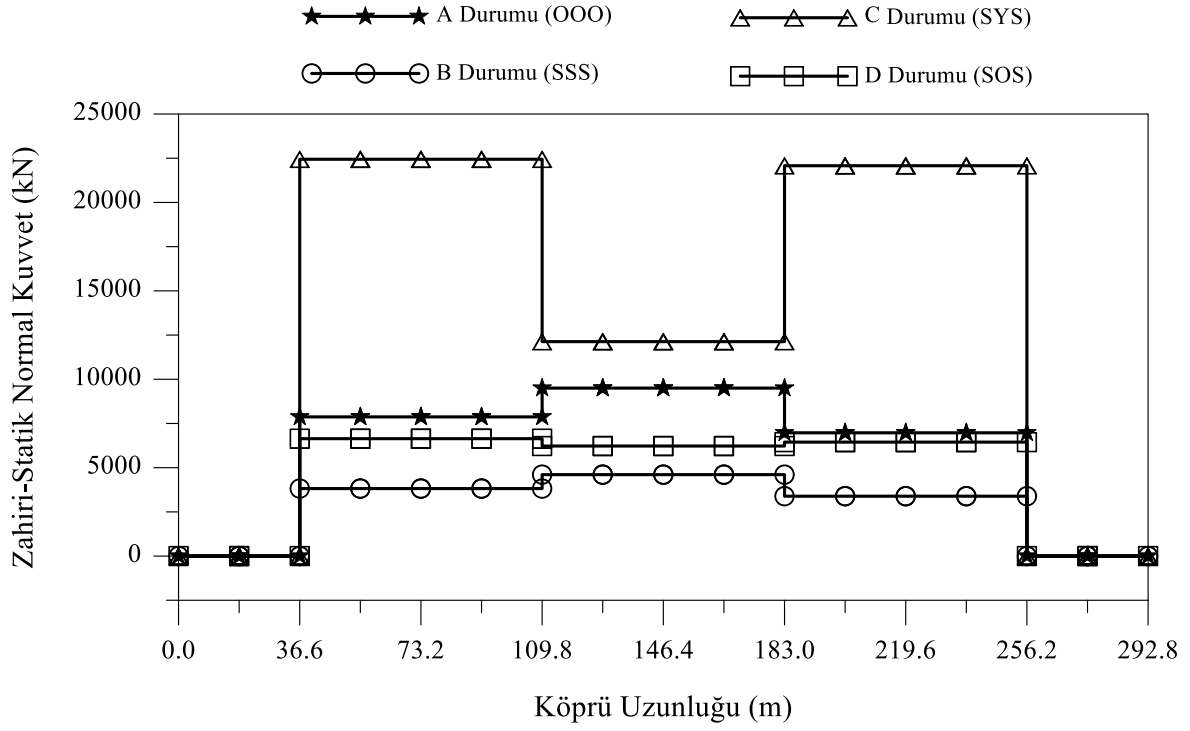
Köprünün farklı mesnetlere oturması durumunda zemin cinsleri arasındaki farklılığın artmasıyla birlikte yani sert ve yumuşak zeminlerin bir arada olması durumlarında eleman kesit tesirleri ve yer değiştirmeler genelde artmaktadır. Zemin cinsleri birbirine yaklaştıkça eleman kesit tesirleri ve yer değiştirmeler azalmaktadır.

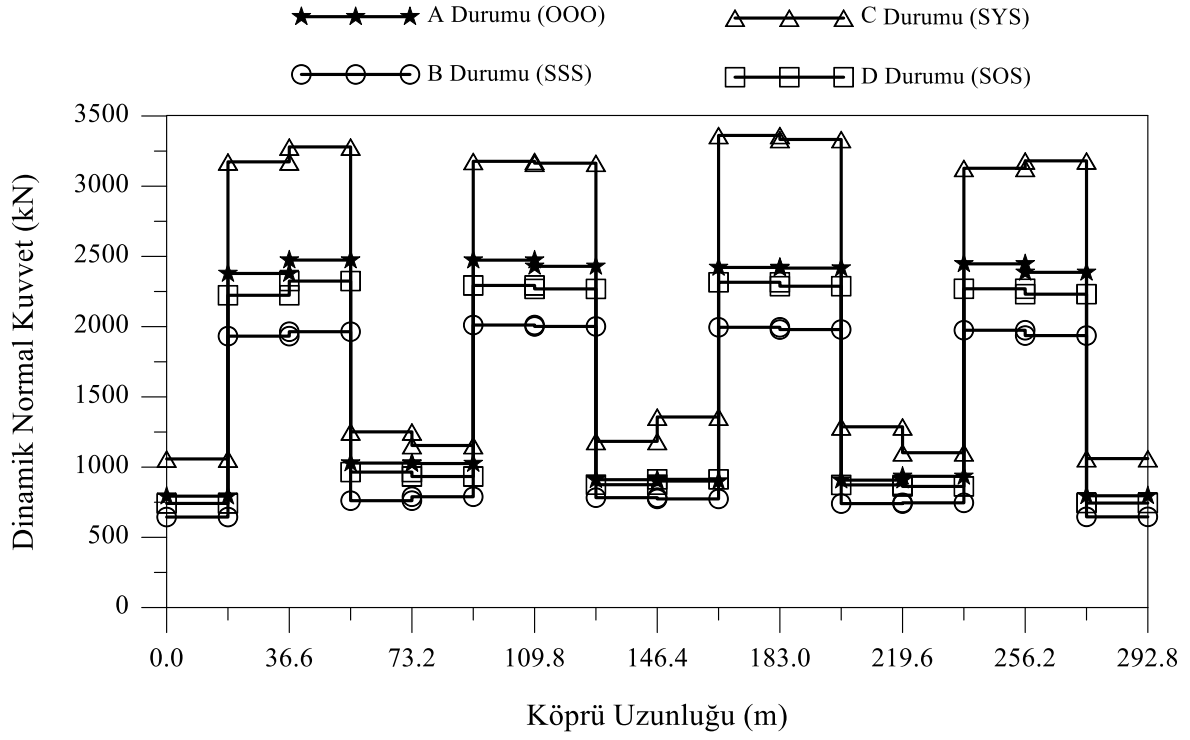


Harichandran ve Vanmarcke (1986) tutarsızlık modeli

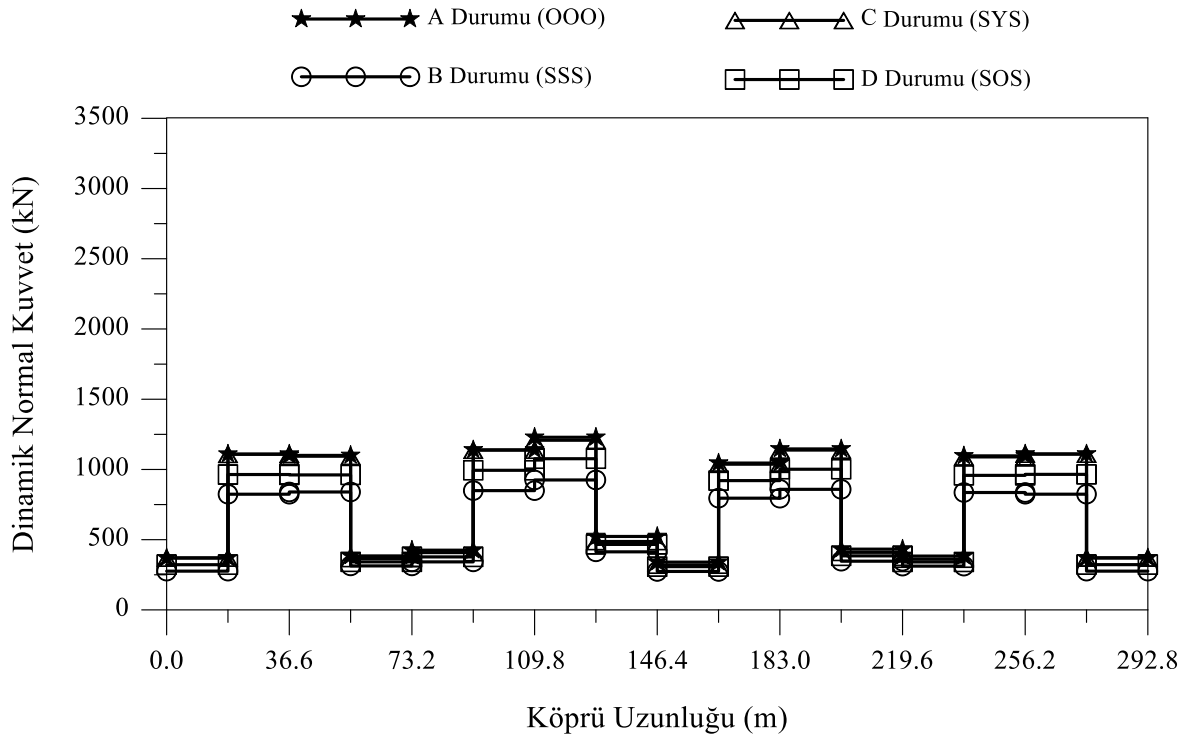


Şekil 3.126. Homojen ve homojen olmayan zemine mesnetlenen karayolu köprüsünün analitik modeli

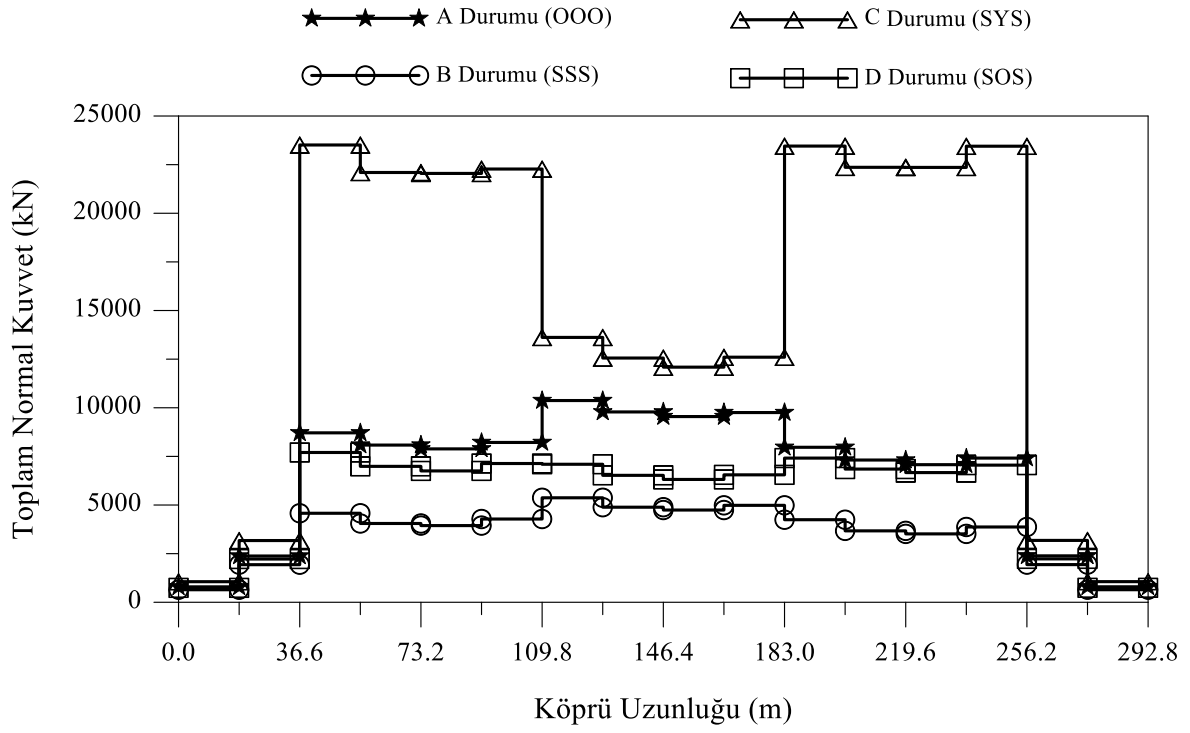




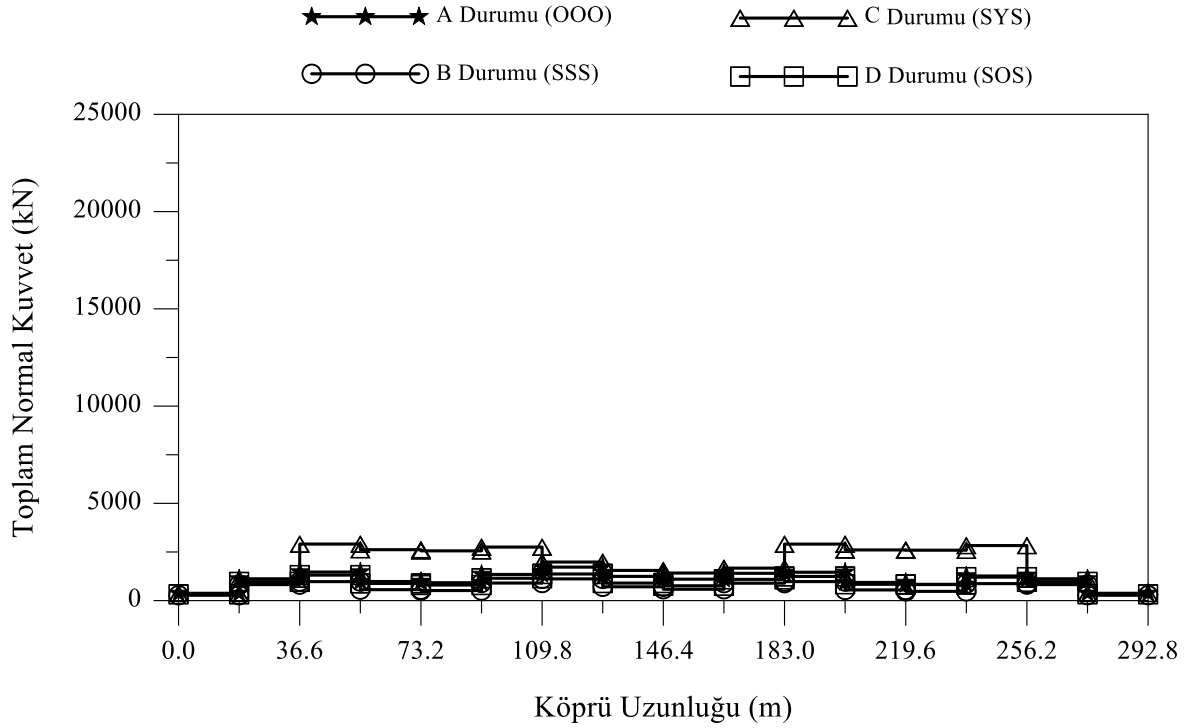
Şekil 3.129. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik normal kuvvetleri



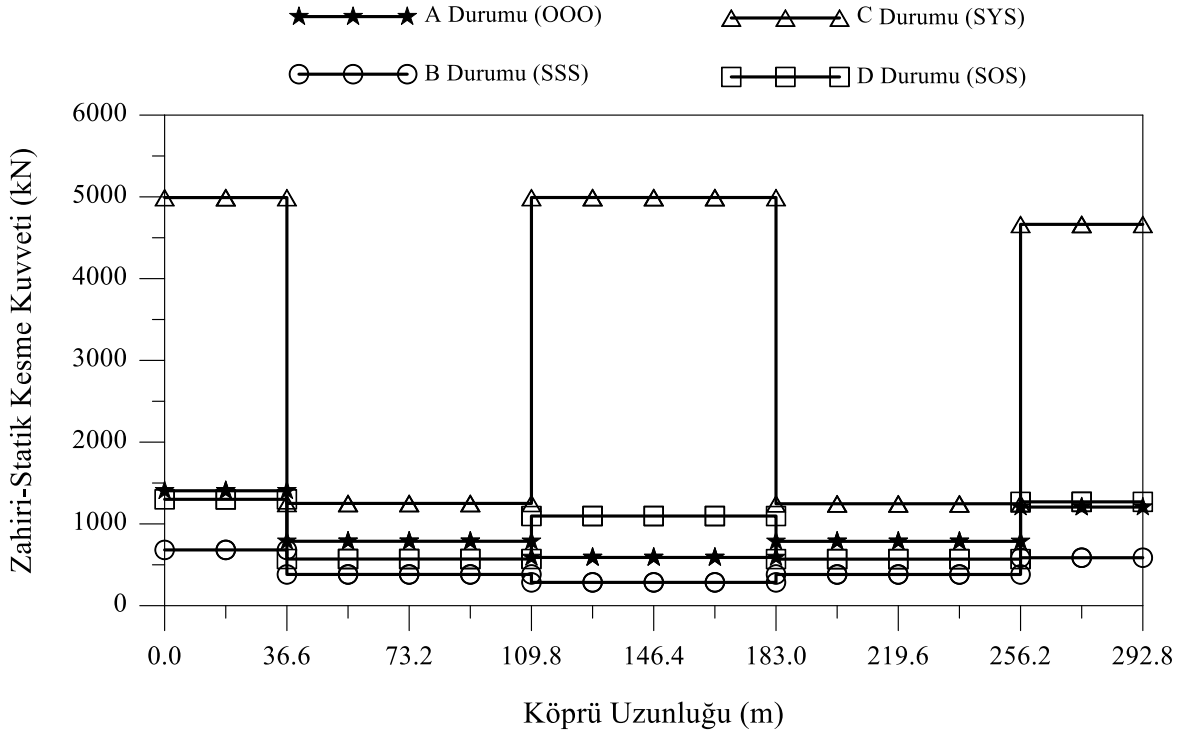
Şekil 3.130. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik normal kuvvetleri



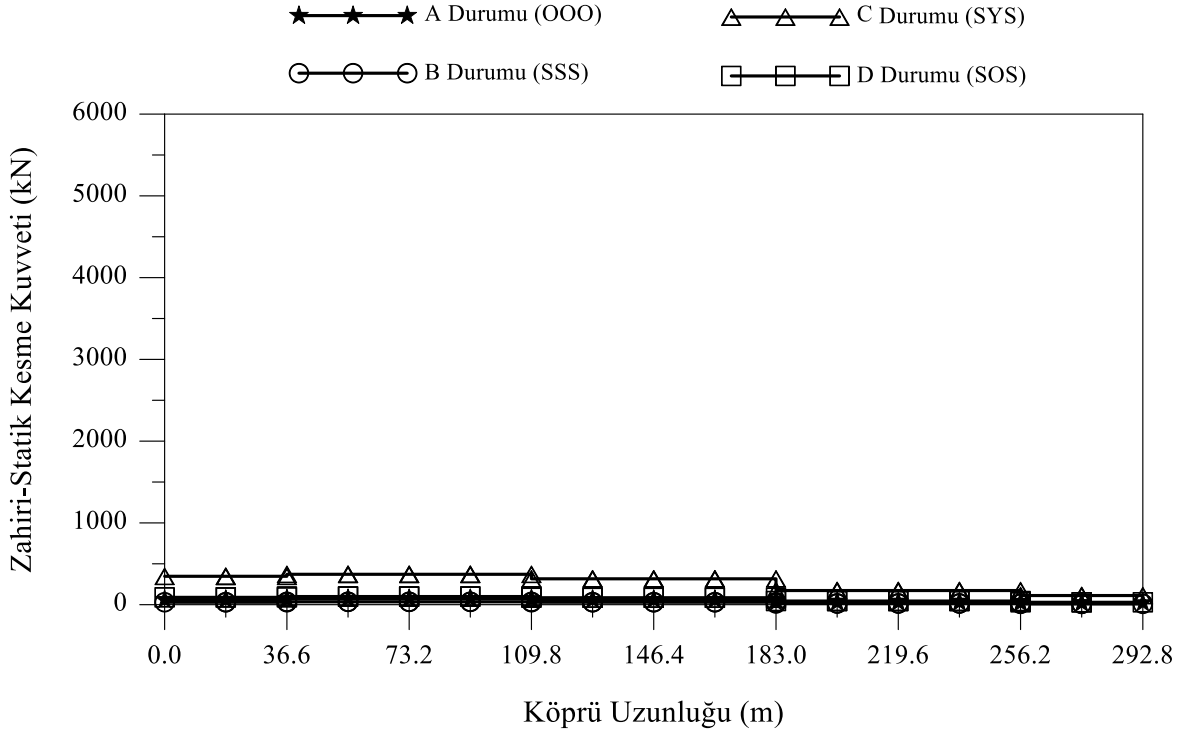
Şekil 3.131. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam normal kuvvetleri



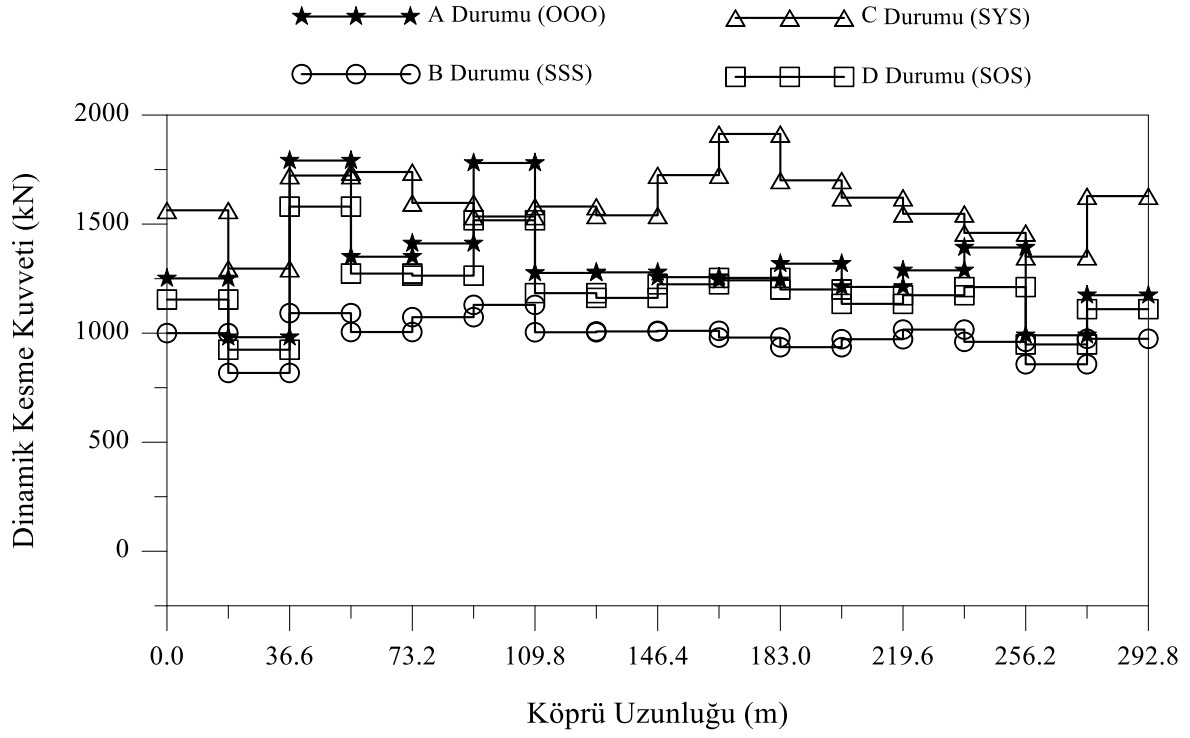
Şekil 3.132. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam normal kuvvetleri



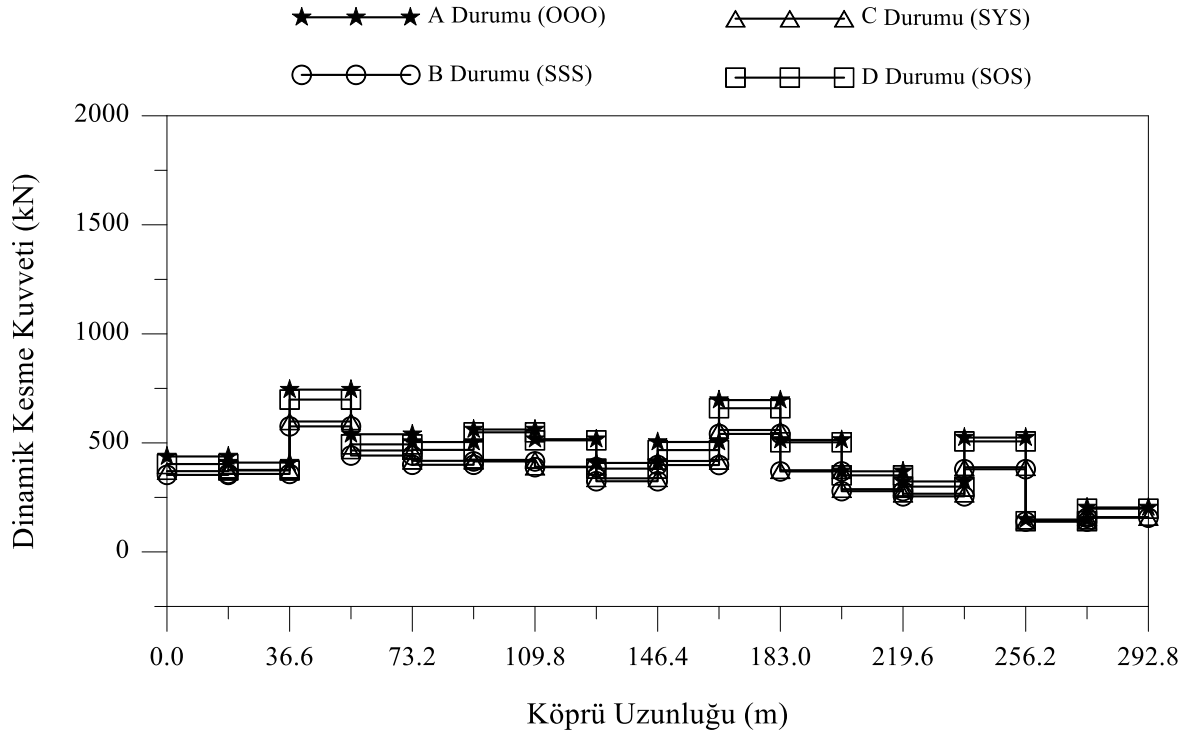
Şekil 3.133. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik kesme kuvvetleri



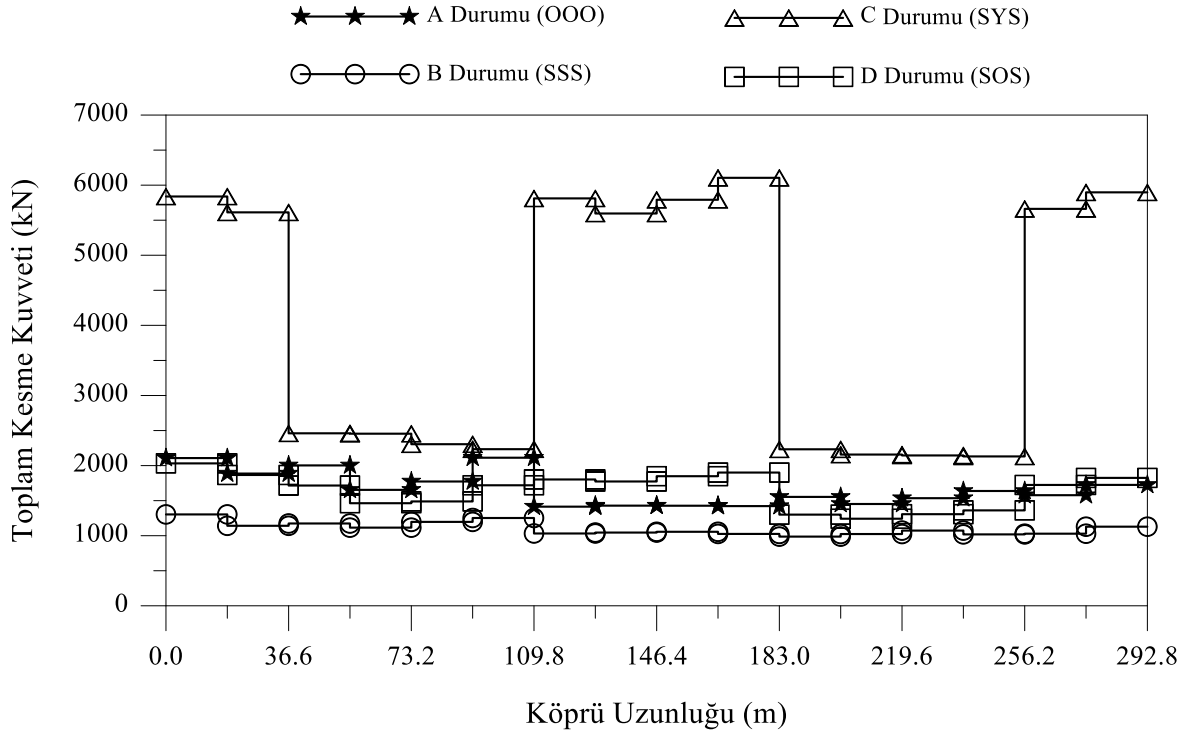
Şekil 3.134. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik kesme kuvvetleri



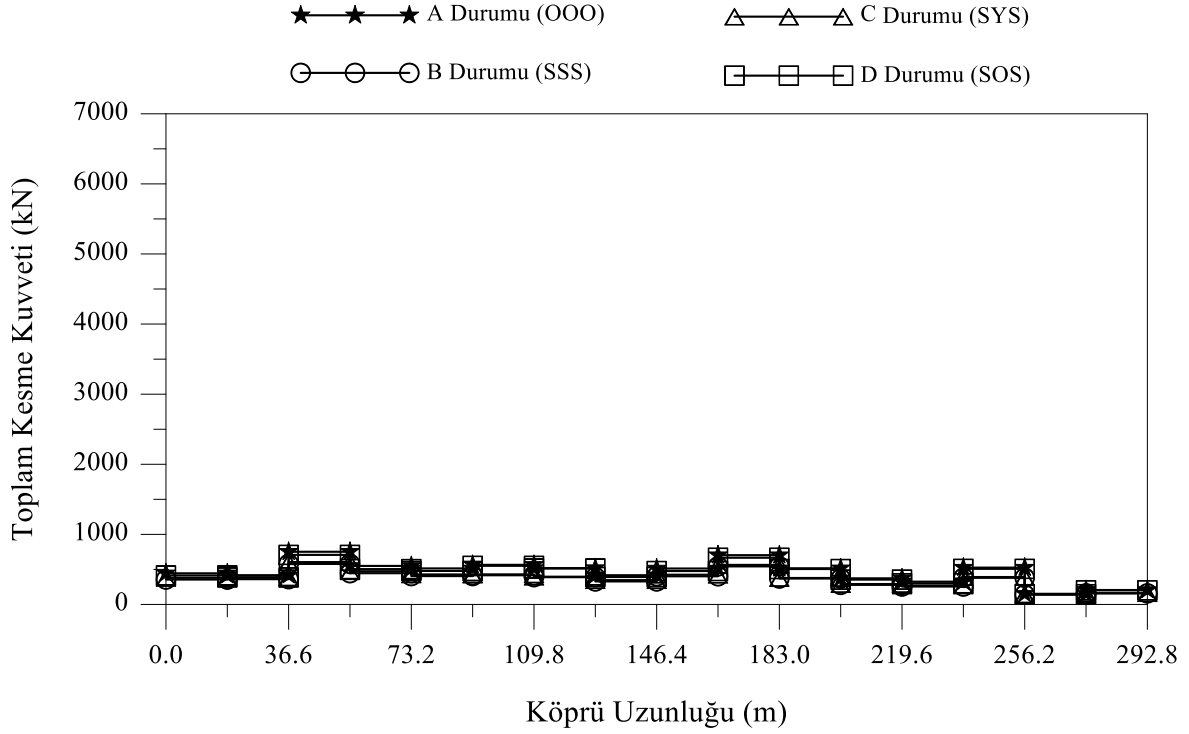
Şekil 3.135. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik kesme kuvvetleri



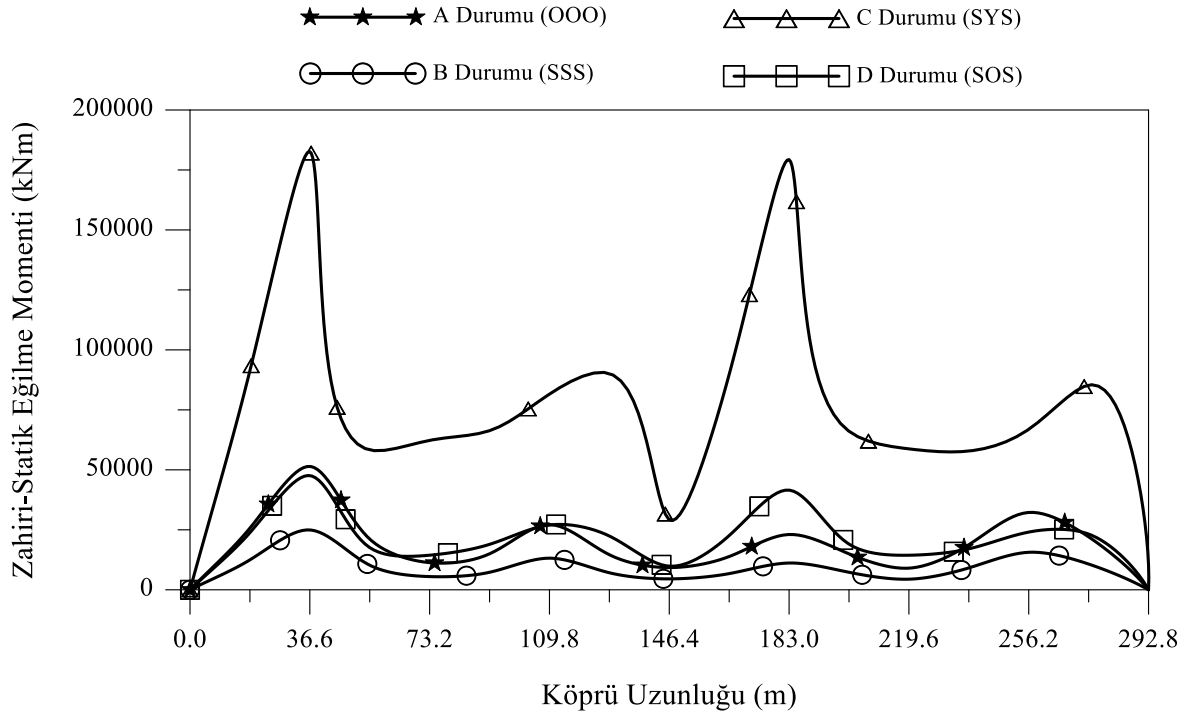
Şekil 3.136. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik kesme kuvvetleri



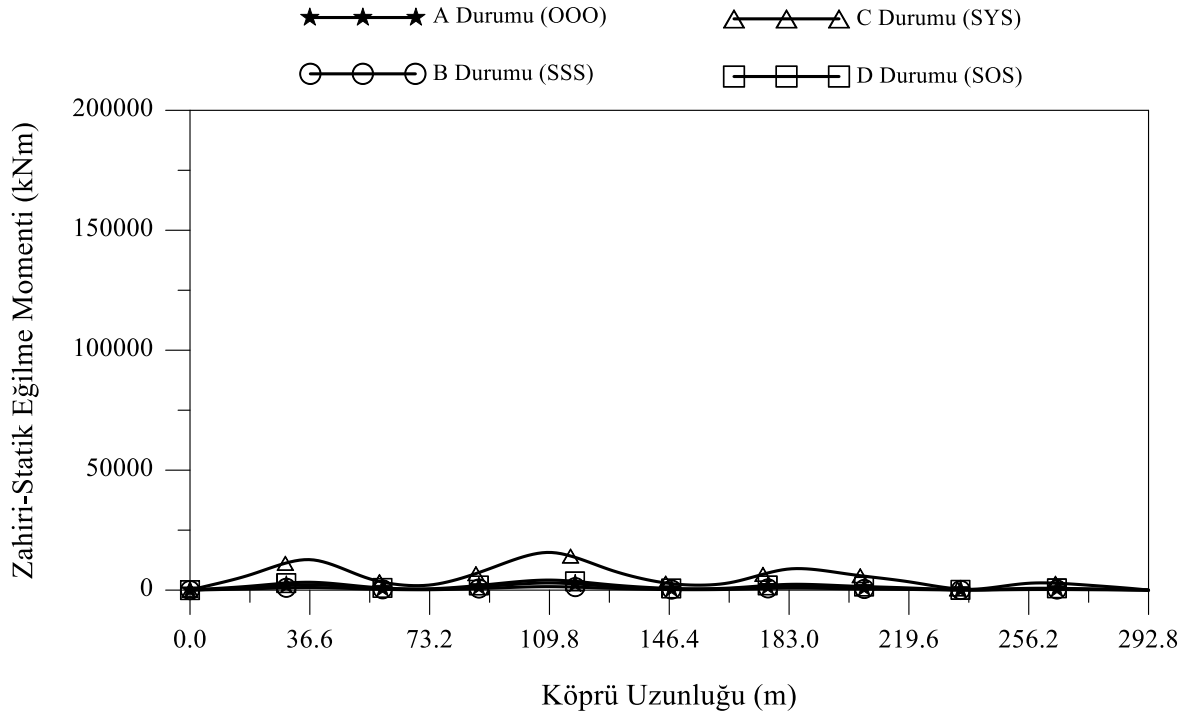
Şekil 3.137. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam kesme kuvvetleri



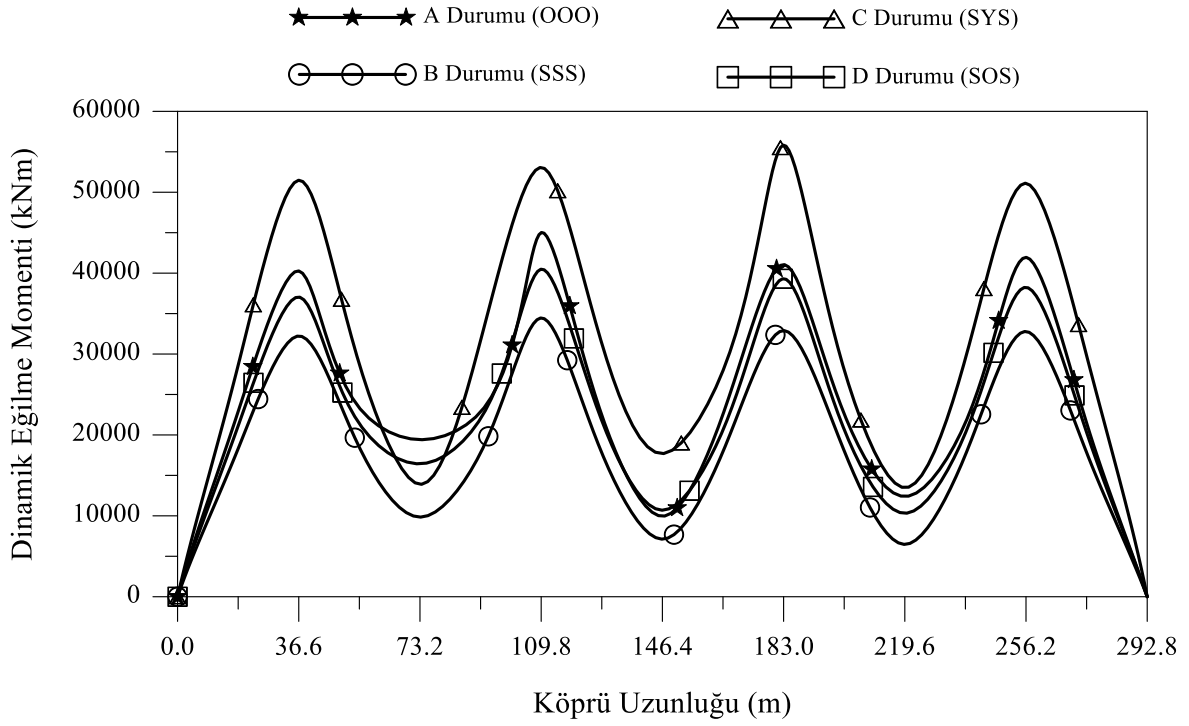
Şekil 3.138. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam kesme kuvvetleri



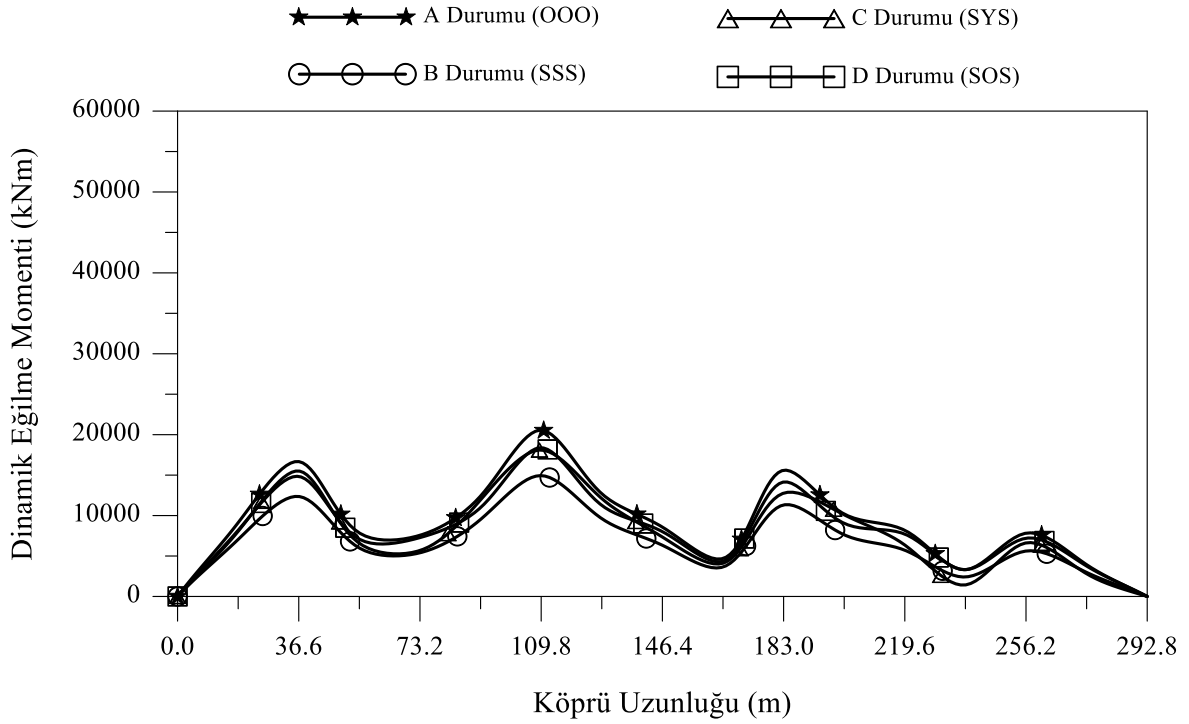
Şekil 3.139. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri



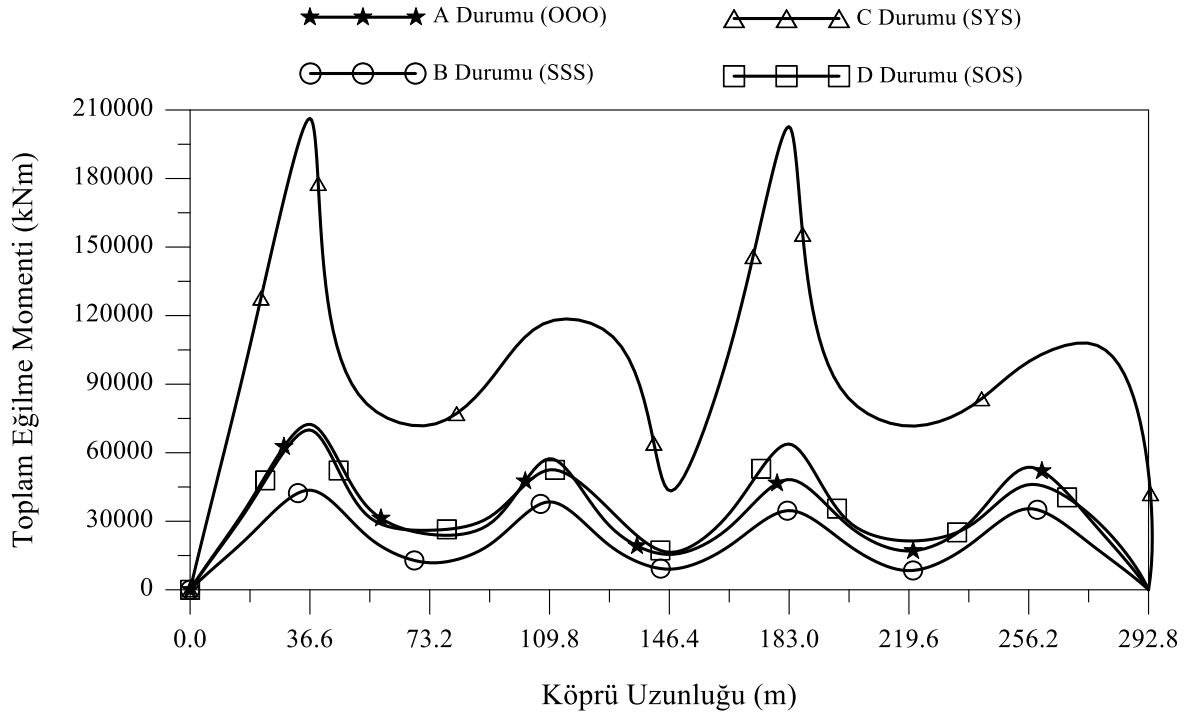
Şekil 3.140. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik eğilme momentleri



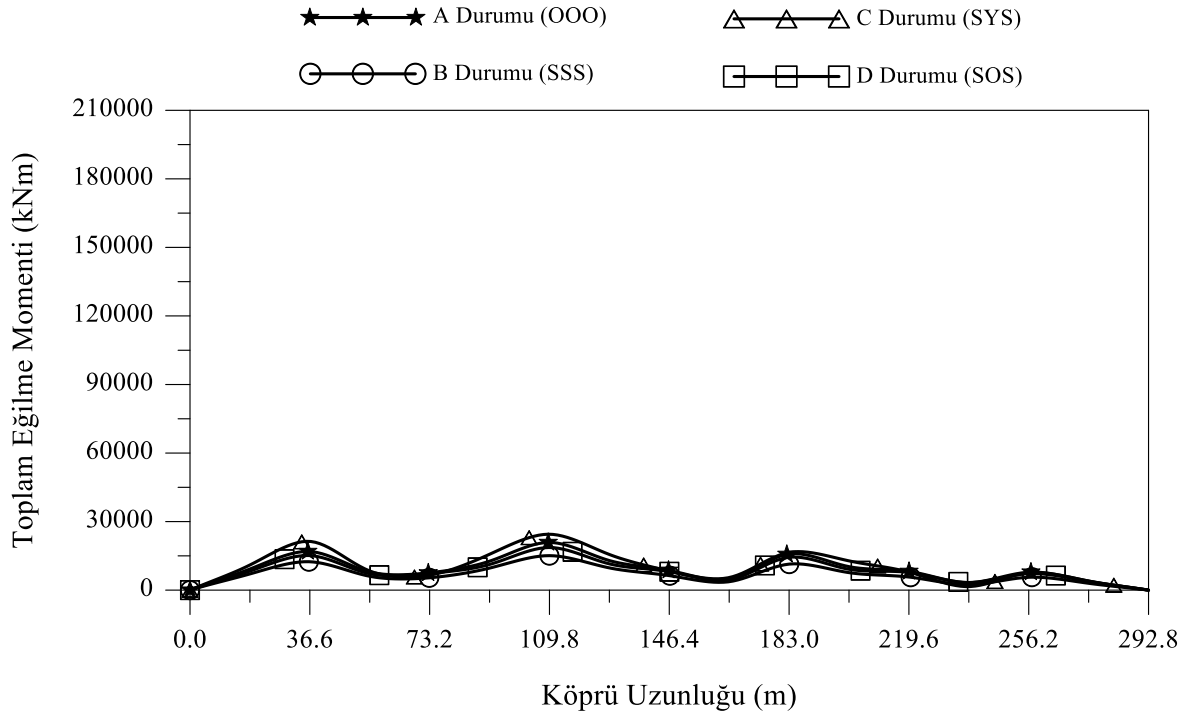
Şekil 3.141. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik eğilme momentleri



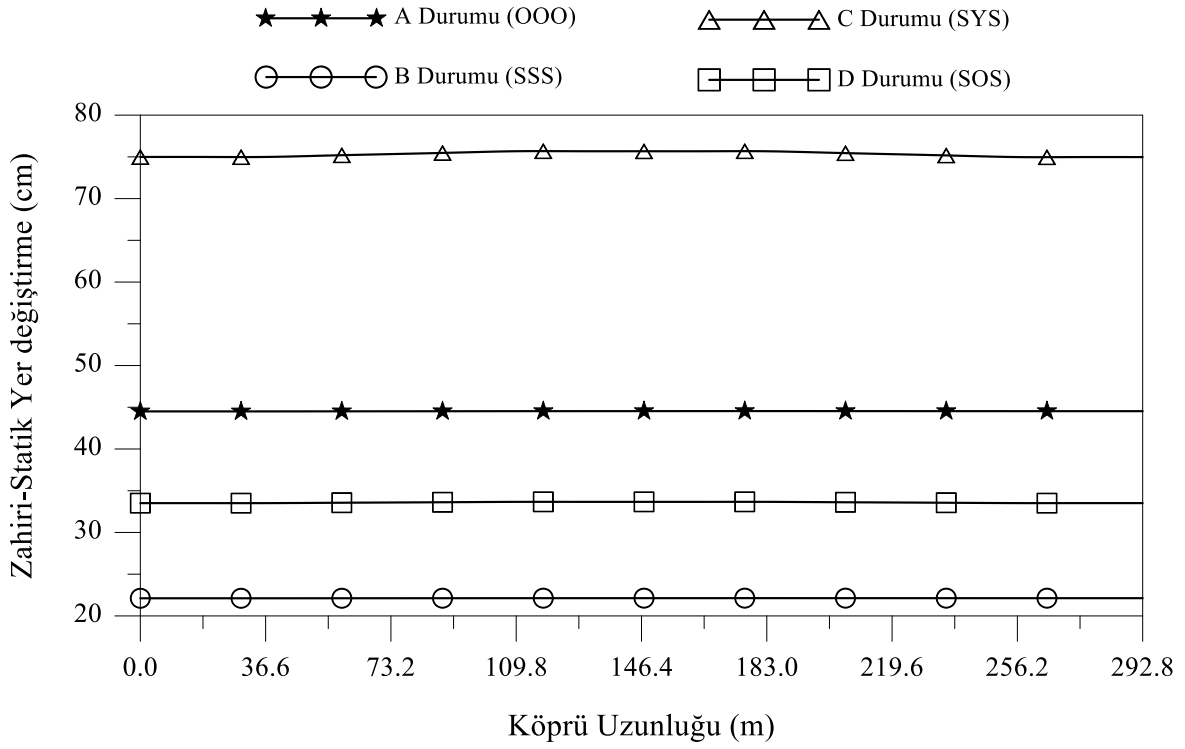
Şekil 3.142. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik eğilme momentleri



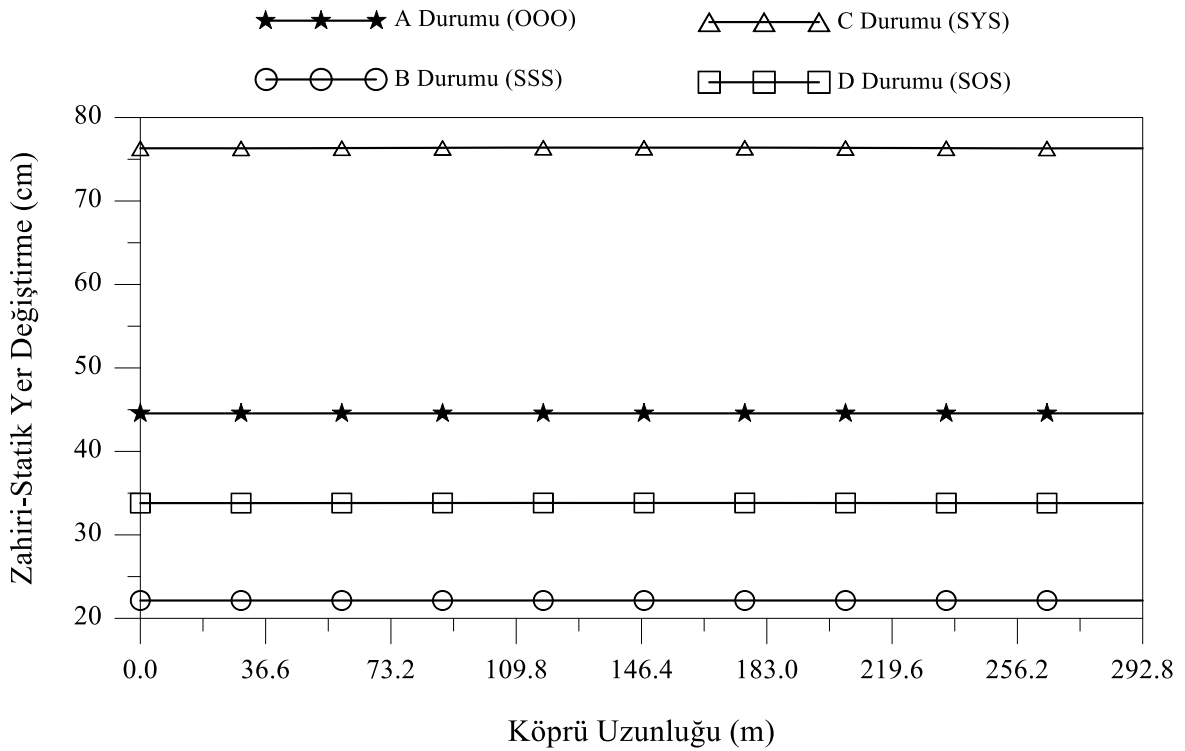
Şekil 3.143. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri



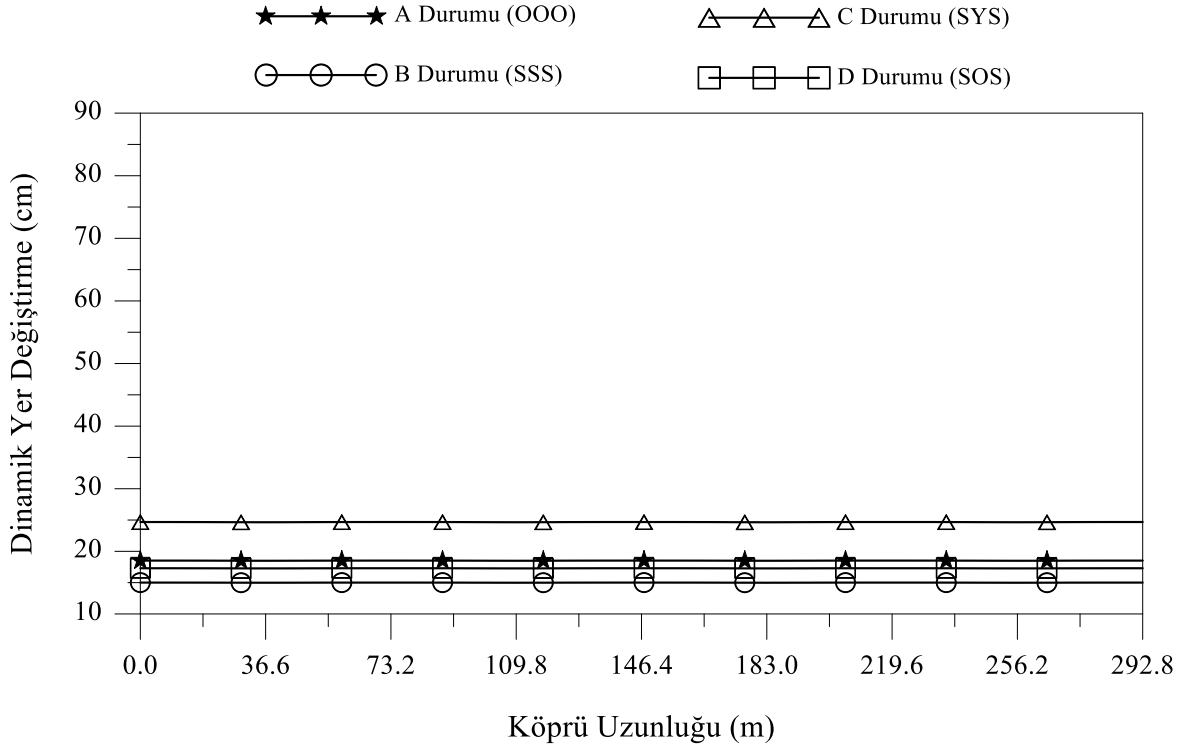
Şekil 3.144. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam eğilme momentleri



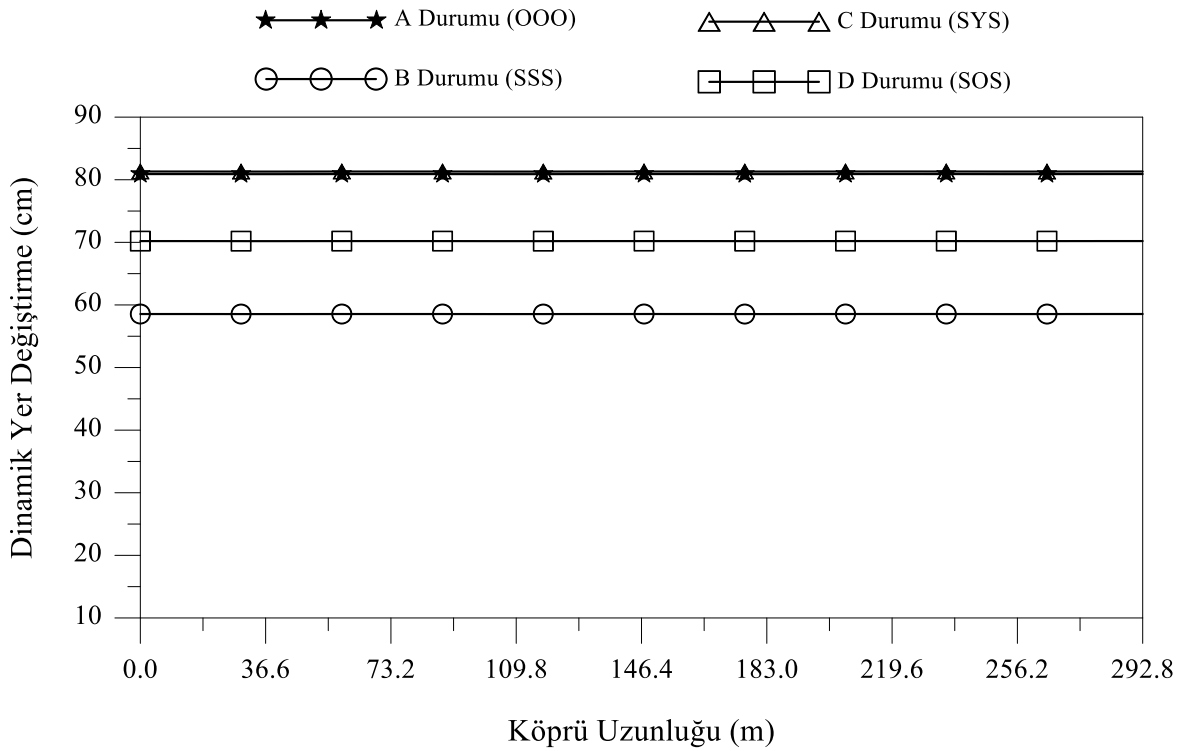
Şekil 3.145. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri



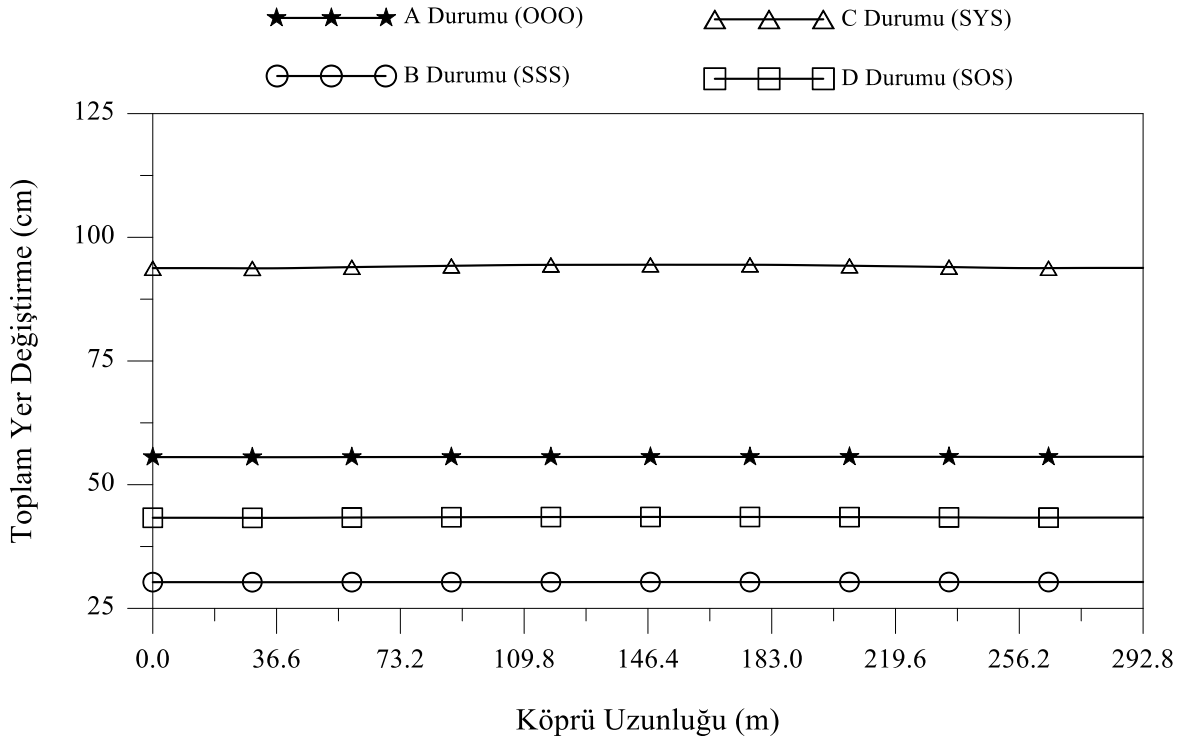
Şekil 3.146. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün zahiri-statik yer değiştirmeleri



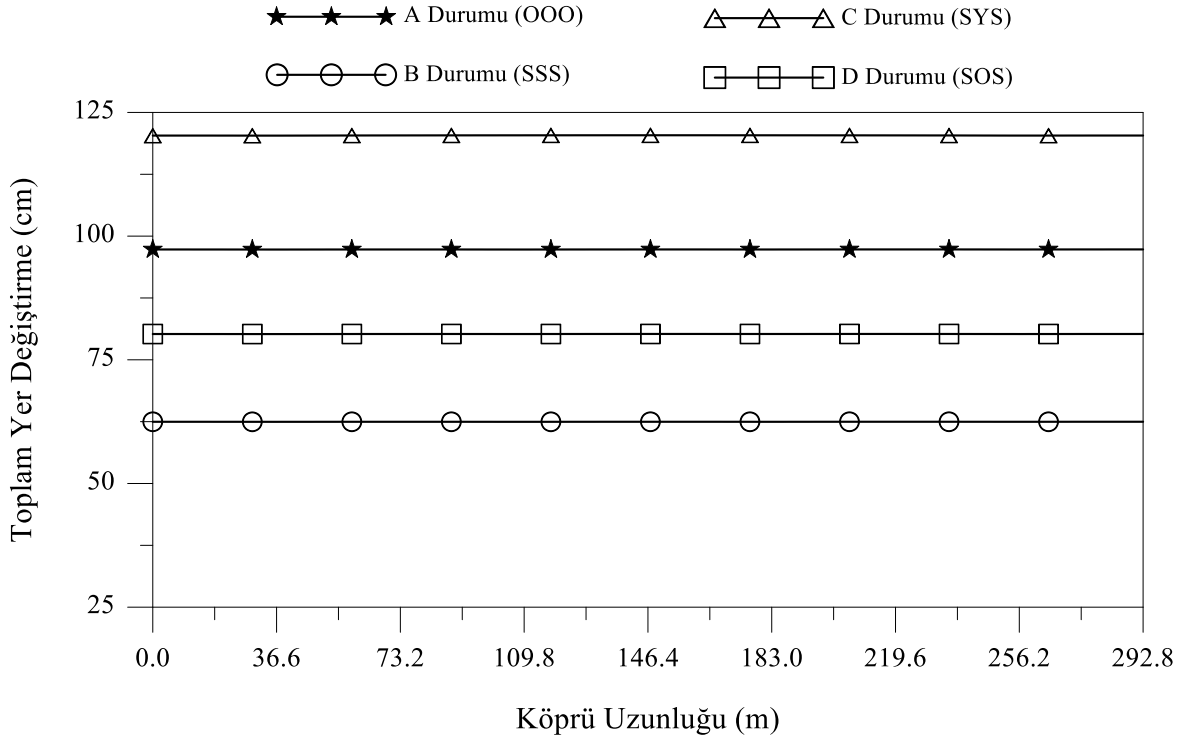
Şekil 3.147. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.148. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün dinamik yer değiştirmeleri



Şekil 3.149. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonsuz karayolu köprüsünün toplam yer değiştirmeleri



Şekil 3.150. Homojen olan ve homojen olmayan zemine mesnetlenen izolasyonlu karayolu köprüsünün toplam yer değiştirmeleri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç (ÜESS) mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan ve sismik izolasyonsuz karayolu köprülerinin değişerek yayılan yer hareketi altında stokastik analizleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen stokastik analizlerde deprem yer hareketi rastgele işlem olarak güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilirken yer hareketinin değişimi dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin şartlarındaki değişim ile dikkate alınmıştır. Deprem hareketi gibi farklı zamanlarda farklı istatistiklere sahip rastgele işlemler hareket süresince durağan değillerdir. Ancak en büyük tepkilerin oluştuğu saniyeler boyunca durağanlık kabulü yapmak uygun olmaktadır. Çalışmada en büyük tepkilerin oluştuğu saniyeler boyunca istatistiksel özelliklerin zamandan bağımsız olduğu durağanlık kabulü yapılmıştır.

ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan ve sismik izolasyonsuz köprülerin stokastik davranışları, sadece dalga yayılma, sadece tutarsızlık, dalga yayılma ve tutarsızlık etkileri birlikte olan ve dalga yayılma-tutarsızlık-zemin etkileri birlikte dikkate alınarak ayrı ayrı incelenmiştir.

Stokastik analizlerde Clough ve Penzien (1993) tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü (FBG) yer hareketi modeli kullanılmıştır. Yer hareketi olarak sert zeminler için 9 Şubat 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajındaki istasyonun PUL164 bileşeni, yumuşak zeminler için 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 depreminin El Centro Array #3 istasyonunun H-E03230 bileşeni kullanılmıştır. Söz konusu bileşenler köprünün boyuna doğrultusunda uygulanmıştır. Köprü ayaklarının oturduğu zeminin sert zemin olması durumunda dalga yayılma etkisi incelenirken dalga yayılma hızlarının değerleri 1000 m/s, 2000 m/s, 3000 m/s ve sonsuz olarak hesaplara katılmıştır. Köprü ayaklarının oturduğu zeminin orta zemin olması durumunda dalga yayılma etkisi incelenirken dalga yayılma hızının değeri 700 m/s olarak dikkate alınmıştır. Köprü ayaklarının oturduğu zeminin yumuşak zemin olması durumunda dalga yayılma etkisi incelenirken dalga yayılma hızlarının değerleri 100 m/s, 200 m/s, 400 m/s ve sonsuz olarak dikkate alınmıştır. Hız değerinin sonsuz olması üniform yer hareketi durumuna karşılık gelmektedir. Bu durumda yer hareketinin bir mesnetten diğer mesnede ulaşıncaya kadar geçen süre sıfırdır. Yani yer hareketi tüm mesnetlere aynı anda etki etmektedir. Çalışmada iki farklı tutarsızlık modeli kullanılmıştır. Bunlar; Harichandran ve Vanmarcke (1986) ve Uscinski (1977) tutarsızlık modelleridir. Zemin etkisi incelenirken sismik izolasyonlu ve

sismik izolasyonsuz köprünün oturduğu zeminin orta zemin cinsi (OOOO), sert zemin cinsi (SSSS), sert-yumuşak (SYYS) ve sert-orta (SOOS) olması durumları dikkate alınmıştır (Der Kiureghian ve Neuenhofer, 1991; Ateş, 2004).

Bu çalışmada Ateş (2004) tarafından kullanılan köprü modeli uygulama amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan köprü beş açıklıktan oluşmakta olup toplam uzunluğu 292.8 m.'dir. Kenar açıklıkları 36.6 m., orta açıklıklar ise 73.2 m.'dir. Köprü ayakları 24.4 m. yüksekliğinde dairesel kesitli olup çapı 2.5 m.'dir. Köprü tabliyesi kutu kesitlidir.

Bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmaktadır:

- 1) Köprülerin periyotları genellikle 0.2-1.2 sn arasında değişmektedir. ÜESS mesnet sistemi kullanımı ile diğer SSM mesnet sistemlerine göre periyotlar daha fazla uzatılabilmekte ve dolayısıyla köprünün depreme karşı dayanıklılığı daha fazla artırılabilir.
- 2) ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprü tabliyesindeki kuvvet değerlerinin sismik izolasyonsuz köprü tabliyesindekilere göre %52-% 97 oranında azaldığı görülmüştür.
- 3) Dalga yayılma hızının artması ile köprü tabliyesinin zahiri-statik normal, toplam normal, zahiri-statik kesme ve toplam kesme kuvvetlerinde azalış olurken dinamik normal kuvvet ve dinamik kesme kuvveti değerlerinde artış olmaktadır.
- 4) Sismik izolasyonlu köprüde dalga yayılma hızının değişimi tepkileri normal kuvvetler hariç nerdeyse değiştirmemektedir. Normal kuvvet için hız değişimindeki %10'luk artış köprü tabliyesi eksenel doğrultuda oldukça rijit olduğu için göz ardı edilebileceği düşünülmektedir.
- 5) Dalga yayılma hızının artması ile hem sismik izolasyonlu hem de izolasyonsuz köprülerin tabliyelerindeki zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmeler artmıştır.
- 6) Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen sert ve yumuşak zemin durumlarında zahiri-statik normal kuvvetler köprü uzunluğunun ortasında artarken kenar ayaklara doğru azalmıştır.
- 7) Homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz karayolu köprüsünde dalga yayılma hızının artmasıyla zahiri-statik ve toplam normal kuvvetler azalırken dinamik normal kuvvetlerin arttığı görülmüştür.

- 8) Homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz karayolu koprusunde dalga yayılma hızının artmasıyla zahiri-statik kuvvetler azalırken dinamik kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür.
- 9) Homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz karayolu koprusunde dalga yayılma hızının artmasıyla zahiri-statik ve dinamik eğilme momentleri azalırken dinamik eğilme momentlerinin arttığı görülmüştür.
- 10) Homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz karayolu koprusunde dalga yayılma hızının artmasıyla zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmelerin arttığı görülmüştür.
- 11) Sadece dalga yayılma etkisine maruz homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu karayolu koprusunun stokastik analizinde dalga yayılma hızının değişimi kopru tabliyesi eleman kuvvetlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu durumdan dolayı sismik izolasyon sisteminin yumuşak zeminlerde kullanımının uygun olmayacağı düşünölebilmektedir.
- 12) Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert ve yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz kopruerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli ile elde edilen kopru tabliyesindeki eleman kuvvetleri genellikle daha büyük olmaktadır.
- 13) Sadece tutarsızlık etkisine maruz homojen sert ve yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz kopruerde Harichandran ve Vanmarcke tutarsızlık modeli kullanılması ile elde edilen yer değiştirme değerleri en az olmaktadır. Üniform ve Uscinski tutarsızlık modeli kullanımı ile elde edilen yer değiştirme değerlerinin de birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- 14) Sadece tutarsızlık ve sadece dalga yayılma etkilerine maruz homojen sert ve yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz kopru tabliyelerinde üniform yer hareketi durumunda meydana gelen zahiri-statik normal kuvvetlerin, zahiri-statik kesme kuvvetlerin ve zahiri-statik eğilme momentlerin değerleri sıfır olmaktadır.
- 15) Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin birlikte dikkate alındığı sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz kopru tabliyesindeki zahiri-statik normal ve kesme kuvvetlerinde dalga yayılma etkisinin tutarsızlık etkisine göre daha etkili olduğu görülmüştür. Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz zahiri statik normal ve toplam kuvvetlerde genel durumun diğer durumlara göre daha etkili olduğu görülmüştür.

- 16) Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin birlikte dikkate alındığı sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesindeki zahiri-statik ve toplam kesme kuvvetlerinde tutarsızlık etkisinin dalga yayılma etkisine göre daha etkili olduğu görülmektedir.
- 17) Dalga yayılma ve tutarsızlık etkilerinin birlikte dikkate alındığı sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesindeki zahiri-statik, dinamik ve toplam eğilme momentlerinde tutarsızlık etkisinin dalga yayılma etkisine göre daha etkili olduğu görülmüştür.
- 18) Tutarsızlık ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesinin zahiri-statik yer değiştirmeleri birbirine yakın çıkmaktadır. Sismik izolasyonlu köprü tabliyesinde oluşan dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama değerleri, sismik izolasyonsuz durumdakinden sırasıyla %128 ve %11 daha büyük olmaktadır.
- 19) Tutarsızlık ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesinin zahiri-statik yer değiştirmeleri birbirine yakın çıkmaktadır.
- 20) Tutarsızlık ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı homojen yumuşak zemine mesnetlenen sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik, dinamik ve toplam yer değiştirmelerin ortalama maksimum değerleri genel durumda en küçük olmaktadır. Bununla birlikte hızın sonsuz olduğu üniform yer hareketinde yer değiştirmeler en büyük olmaktadır.
- 21) Tutarsızlık ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesinde meydana gelen zahiri-statik normal kuvvetlerin, kesme kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin değerleri sıfır olmaktadır. Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesi toplam kesme kuvveti ve eğilme momentleri sadece tutarsızlık etkisi durumunda en büyük değerleri alırken toplam normal kuvvetler genel durumda en büyük değerleri almaktadır.
- 22) Dalga yayılma, tutarsızlık ve farklı zemin etkilerinin birlikte dikkate alındığı hem sismik izolasyonlu hem de sismik izolasyonsuz durumda köprü tabliyesindeki eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler oldukça etkilenmektedir.
- 23) Tutarsızlık ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü'nün mesnetlendiği zeminin homojen olması ve homojen olmaması durumlarında sert zemin ortamından yumuşak zemin ortamına gidilmesi

- ile yani birbirinden çok farklı zemin cinslerinin bir arada olması durumunda elde edilen eleman tepkileri en büyük olmuştur. Buna karşın bütün köprü ayaklarının homojen sert zemine mesnetlendiği durumda en küçük eleman tepkileri elde edilmiştir.
- 24) Tutarsızlık ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü tabliyesinin zahiri-statik yer değiştirmeleri birbirine yakın çıkmaktadır.
- 25) Homojen ve homojen olmayan zemine mesnetlenen köprünün tüm durumlarında sismik izolasyonsuz köprüler için en büyük katkıyı zahiri-statik bileşen yaparken sismik izolasyonlu köprüde en büyük katkıyı bazen zahiri-statik bazen de dinamik bileşenlerin yaptığı görülmüştür.
- 26) SVEM ve SAP2000 programlarında ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün modal analiz sonuçlarından elde edilen hakim periyotların beklendiği gibi birbirine yakın çıktığı görülmüştür.
- 27) Bu çalışmada karşılaştırma yapmak için Ateş (2004) tarafından kullanılan TESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsü seçilmiştir. TESS mesnetli köprünün hakim periyodu 2.85 sn iken ÜESS mesnetli köprününki 3.66 sn'ye çıkmıştır. Dolayısıyla köprünün kesit tesirleri TESS mesnetli köprüye göre azalmıştır. Ayrıca ÜESS mesnedinin boyutu TESS mesnedine göre daha küçük olduğundan daha az hacim kaplar ve yapının mimarisini daha az etkiler.
- 28) ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan köprü tabliyesinden elde edilen eleman tepkileri sismik izolasyonsuz duruma göre oldukça küçük olmasına rağmen dalga yayılma etkisi, tutarsızlık etkisi ve zemin şatlarındaki değişim sismik izolasyonlu köprülerde dikkate alınması gerekmektedir.
- 29) Değişerek yayılan yer hareketi etkisine maruz ÜESS mesnet sistemi ile sismik izolasyonu yapılan karayolu köprüsünün stokastik analizinde zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınması daha farklı sonuçları gösterebilir.
- 30) Stokastik analizler durağanlık kabulü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Durağanlık kabulü ile yapılan bu analizler durağan olmama durumu dikkate alınarak da yapılabilir.
- 31) Çalışmada doğrusal analiz yapılmıştır. Doğrusal olmayan analiz de yapılarak köprünün davranışları incelenmelidir.

- 32) Çalışmada kullanılan izolatörün sürtünme katsayılarının değişimi köprünün davranışını etkilemektedir. Farklı sürtünme katsayıları kullanılarak yapının davranışının nasıl değiştiği incelenmelidir.
- 33) Bu çalışmada tek tip karayolu köprü örneği seçilerek değişen yer hareketi durumundaki davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Buradan elde edilen sonuçların geliştirilmesi için farklı köprü modellerinin de incelenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak denilebilir ki; tek bir doğrultuda geçilmesi mümkün olmayan tepeleri, dağları ve hatta adaları birbirine bağlayan karayolu köprüleri önemli mühendislik yapılarından biridir. Bu yapıların deprem analizlerinde sismik izolasyon sistemleri ile birlikte yer hareketinin değişerek yayılma etkilerinin tümünün dikkate alınması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO, 1991. Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transport Officials, Washington, D.C.
- Abdel-Ghaffar, A.M. ve Rubin, L. I., 1982, Suspension Bridge Response to Multiple-Support Excitations, Journal of Engineering Mechanics, 108, 419-435.
- Abdel-Ghaffar, A.M. ve Rubin, L.I., 1983. Lateral Earthquake Response of Suspension Bridges, Journal of Structural Engineering, 109, 3, 664-675.
- Abrahamson, N.A., Schneider, J.F. ve Step, J.C., 1991. Empirical Spatial Coherency Functions for Application to Soil-Structure Interaction Analyses, Earthquake Spectra, 7, 1, 1-27.
- Abrahamson, N.A., Spatially Variation of Multiply Support Inputs, Proc. of the First U.S. Seminar, Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges, 1993, October, San Francisco, 1-34.
- Adanur, S., Altunışık, A. C., Soyluk, K., Bayraktar, A. ve Dumanoğlu, A.A., 2016. Multiple-Support Seismic Response of Bosphorus Suspension Bridge for Various Random Vibration Methods, Case Studies in Structural Engineering, 5, 54-67.
- Ahmadi, G., 1983. Stochastic Earthquake Response of Structures on Sliding Foundation, International Journal of Engineering Science, 21, 2, 93-102.
- Allam, S.M. ve Datta, T.K., 1999. Seismic Behaviour of Cable-Stayed Bridges Under Multi-Component Random Ground Motion, Engineering Structures, 21, 62-74.
- Allam, S.M. ve Datta, T.K., 2000. Analysis of Cable-Stayed Bridges Under Multi-Component Random Ground Motion by Response Spectrum Method, Engineering Structures, 22, 1367-1377.
- Almazan, J.L.Llera, J.C.D. ve Inaudi, J.A., 1998. Modelling Aspects of Structures Isolated With the Frictional Pendulum System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 845-867.
- American Society of Civil Engineers-ASCE, 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Standard ASCE/SEI 7-10.
- Apaydın, N. M., Bas, S. ve Harmandar, E., 2016. Response of The Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge Under Spatially Varying Multi-Point Earthquake Excitations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 84, 44-54.
- Ateş, Ş, Sürtümlü Sarkaç Sistemi İle İzolasyonlu Karayolu Köprülerinin Değişerek Yayılan Yer Hareketi İçin Stokastik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.

- Ateş, Ş. ve Dumanoglu, A.A., Kauçuk Mesnetli Binaların Dinamik Analizi, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Mayıs 2003, İstanbul, Bildiri No: AT-048.
- Ateş, Ş., 2012a. Investigation of Effectiveness of Double Concave Friction Pendulum Bearings, Computers and Concrete, 9, 3, 195-213.
- Ateş, Ş., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., Sürtünmeli Sarkaç Mesnet ile Taban İzolasyonu Yapılan Köprülerin Deprem Davranışının Belirlenmesi, Türkiye İnşaat Mühendisliği On Yedinci Teknik Kongre ve Sergisi, 2004, Bildiriler Metni (CD), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ateş, Ş., Dumanoglu, A.A. ve Bayraktar, A., 2005. Stochastic Response of Seismically Isolated Highway Bridges With Friction Pendulum Systems to Spatially Varying Earthquake Ground Motions, Engineering Structures, 27, 13, 1843-1858.
- Ateş, Ş., 2012b. Seismic Behaviour of Isolated Multi-Span Continuous Bridge to Nonstationary Random Seismic Excitation, Nonlinear Dynamics, 67, 1, 263-282.
- Ateş, Ş., Soyluk, K., Dumanoglu, A. A., Bayraktar, A., 2009. Earthquake Response of Isolated Cable-Stayed Bridges Under Spatially Varying Ground Motions, Structural Engineering and Mechanics, 32, 1, 639-662.
- Augisti, G., Baratta, A. ve Casciati, F., Probabilistic Methods in Structural Engineering, First Edition, Chapman and Hall Ltd., New York.
- Avanoğlu, S.E. ve Soyluk, K., 2012. Investigation of The Effect of Spatially Varying Ground Motion Components on The Dynamic Behaviour of Cable Stayed Bridges Depending on Soil Conditions, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27, 4, 881-889.
- Bai, F. L., Hao, H., Li, H. N., 2010. Seismic Response of a Steel Trussed Arch Structure to Spatially Varying Earthquake Ground Motions Including Site Effect, Advances In Structural Engineering, 13, 6, 1089-1103.
- Bayraktar, A., Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel sistemlerinin Dinamik Davranışı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 1995.
- Bo, Z., Yuanging, W., Zhihua, C., Yongjiu, S., Yang, J. Ve Yihong, W., 2015. Research on the Random Seismic Response Analysis for Multi-and Large-Span Structures to Multi-Support Excitations, 14, 3, 527-538.
- Bozorgnia, Y. ve Bertero, V.V., Earthquake Engineering From Engineering Seismology to Performance Based-Engineering, CRC Press, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-13 978-0-203-48624-5, 2004, (eBook-Pdf).

- Bi, K. ve Hao, H., 2012. Numerical Simulation of Pounding Damage to Bridge Structures Under Spatially Varying Ground Motions, Engineering Structures, 46 2013, 62-76.
- Bi., K., Hao, H. ve Ren, W., 2010. Response of a Frame Structure on a Canyon Site to Spatially Varying Ground Motions, Structural Engineering and Mechanics, 36, 1, 111-127.
- Bradford, P., Reinhorn, A.M., Kartoum, A., Constantinou, M.C. 1991. Experimental and Theoretical Study of a Sliding Isolation System for Bridges, Technical Report MCEER-91-0027, State University of New York at Buffalo.
- Buckle, I., Nagarajaiah, S. ve Ferrell, K., 2002. Stability of Elastomeric Isolation Bearings: Experimental Study, Journal of Structural Engineering, ASCE, 128, 1, 3-11.
- Budisso, R.A. ve Singh, M.P., 1987. Multiply Supported Secondary Systems Part I: Response Spectrum Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 53-72.
- Button, M.R., Der Kiureghian, A. ve Wilson, E.L., 1981. STOCAL-User Information Manual, Report No UCB/SEMM-81/2, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA.
- Button, M.R., Numerical Techniques for Dynamic Stochastic Structural Analysis, Doktora Tezi, Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley, 1981.
- Ceccoli, C., Mazzotti C. ve Savoia, M., 1999. Non-Linear Seismic of Base Isolated RC Frame Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 28, 633-653.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, Birinci Baskı, Sema Matbaacılık, İstanbul, 1992.
- Chaudary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2001. Performance Evaluation of Base-Isolated Yama-age Bridge with High Damping Rubber Bearings Using Recorded Seismic Data, Engineering Structures, 23, 902-910.
- Chaudary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2002. Investigation of Atypical Seismic Response of a Base-Isolated Bridge, Engineering Structures, 24, 945-953.
- Chopra, A.K., Dynamics of Structures, Second Edition, Prentice Hall, 2001, New Jersey.
- Chen, Y. ve Ahmadi, G., 1992. Stochastic Earthquake Response of Secondary Systems In Base-Isolated Structures, Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 21, 12, 1039-1057.

- Chouw, N., Hao, H. ve Su, H., 2009. Multi-Sided Pounding Response of Bridge Structures with Non-Linear Bearings to Spatially Varying Ground Excitation, Advances in Structural Engineering, 9, 1, 55-66.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., 1993, Dynamics of Structures, Second Edition, McGraw Hill, Inc., Singapore.
- Computers and Structures Inc. 2007. SAP2000: Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures, Berkeley, CA, U.S.A.
- Constantinou, M.C. ve Tadjbakhsh, I.G., 1984a. The Optimum Design of a Base-Isolation System with Frictional Element, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 12, 2, 203-214.
- Constantinou, A.C., Tsopelas, P., Kim, Y.S. ve Okamoto, S., 1993. Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of Friction Pendulum System, Technical Report MCEER-93-0020, State University of New York at Buffalo.
- Constantinou, M.C. ve Tadjbakhsh, I.G., 1984b. Response of a Sliding Structure to Filtered Random Excitation, Journal of Structural Mechanics, 12, 3, 401-418.
- Constantinou, M.C. ve Tadjbakhsh, I.G., 1985. Hysteretic Dampers in Base Isolation: Random Approach, Journal of Structural Engineering, 111, 4, 705-721.
- Constantinou, M.C., Kalpakidis, I., Filiatrault A. ve Ecker Lay, R.A., 2011. Lrfd-Based Analysis And Design Procedures For Bridge, February 28, Teknik Rapor.
- Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kasalanti, A. ve Wolf, E., 1999. Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings, Technical Report MCEER-99-0012, State University of New York at Buffalo.
- Constantinou, M.C., 1987. A simplified Analysis Procedure for Base-Isolated Structures on Flexible Foundation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 963-983.
- Crandall, S.H. ve Zhu, W.Q., 1983. Random Vibrations: a Survey of Recent Developments, Journal of Applied Mechanics, 50, 4b, 953-962.
- Datta, T.K. ve Mashaly, E.A., 1986. Pipeline Response to Random Ground Motion by Discrete Model, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, 559-572.
- Der Kiureghian, A., 1980. Structural Response to Stationary Excitation, Journal of the Engineering Mechanics Division, 106, 1195-1213.

- Der Kiureghian, A. ve Neuenhofer, A., 1991. A response Spectrum method for multiple-support seismic excitations, Report no. UCB/EERC-91/08, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA.
- Der Kiureghian, A. ve Neuenhofer, A., 1992. Response Spectrum Method for Multiple-Support Seismic Excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 8, 713-740.
- Der Kiureghian, A., 1996. A Coherency Model for Spatially Varying Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, 1, 99-111.
- Der Kiureghian, A., Keshishian, P. ve Hakobian, A., 1997. Multiply Support Response Spectrum Analysis of Bridges Including the Site- Response Effect and MSRS Code, Report No. UCB/EERC-97/02, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA.
- Dumanoğlu, A.A. ve Ateş, Ş., 1999. Dynamic Response Analysis of 3D-Base Isolated Asymmetric Building Structures, European Association of Earthquake Engineering Task Group 8, Asymmetric And Irregular Structures, 1, 181-194, İTU, İstanbul.
- Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1987. Seismic Response of Modern Suspension Bridges to Asynchronous Vertical Ground Motion, Institution of Civil Engineers, Proceedings, Part 2, 83, 701-730.
- Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1990. Stochastic Response of Suspansion Bridges to Earthquake Forces, Earthquake, Engineering and Structural Dynamics, 19, 133-152.
- Dumanoğlu, A.A. ve Soyluk, K., Mesnetlerinden Farklı Dinamik Etkilere Maruz Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi, Teknik Rapor, TDV/TR 032-54, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul, 2000.
- Dumanoğlu, A.A. ve Soyluk, K., 2002. SVEM, A Stochastic Structural Analysis Program for Spatially Varying Earthquake Motinos, Turkish Earthquake Foundation, TDV/KT 023-76, İstanbul.
- Eem, S.H. ve Jung H.J., 2015. Seismic Response Distribution Estimation for Isolated Structures Using Stochastic Response Database, Earthquakes and Structures, 9, 5, 937-956.
- Fadi, F. ve Constantinou, M.C., 2009. Evaluation of Simplified Methods of Analysis for Structures With Triple Friction Pendulum Isolators, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 39, 1, 5-22.

- Fallahian, M., Khoshnoudian, F., Loghman, V., 2015. Torsionally Seismic Behavior of Triple Concave Friction Pendulum Bearing, Advances In Structural Engineering, 18, 12, 2151-2166.
- Fan, F.G. ve Ahmadi, G., 1990a. Random Response of Frictional Base Isolation System, Journal of Engineering Mechanics, 116, 9, 1881-1901.
- Fan, F.G. ve Ahmadi, G., 1990b. Floor Response Spectra for Base-Isolated Multi-Storey Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 377-388.
- Fenz, D.M., 2008. Development, Implementation Verification of Dynamic Analysis Models of Multi-Spherical Sliding Bearings, Doktora Tezi, Department of Civil Structural and Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo, New York.
- Fenz, D.M. ve Constantinou, M.C., 2006. Behaviour of Double Friction Pendulum Bearing, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 11, 1403-1424.
- Fenz, D. M. ve Constantinou, M. C., 2008a. Spherical Sliding Isolation Bearings with Adaptive Behavior: Theory, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37,2, 163-183.
- Fenz, D.M. ve Constantinou, M.C., 2008b. Modeling Triple Friction Pendulum Bearings for Response History Analysis, Earthquake Spectra, 24, 4, 1011-1028.
- Garevski, M., Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1988. Dynamic Characteristics and Seismic Behaviour of Jindo Bridge, South Korea Structural Engineering Review, 1, 141-149.
- Harichandran, R.S., 1992. Random Vibration Under Propagating Excitation: Closed-Form Solutions, Journal of Engineering Mechanics, 118, 3, 575-586.
- Harichandran, R.S., 1993. An Efficient, Adaptive Algorithm for Large-Scale Random Vibration Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22, 151-165.
- Harichandran, R.S. ve Vanmarcke, E.H., 1986. Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time, Journal of Engineering Mechanics, 112, 2, 154-174.
- Harichandran, R.S., Hawwari A. ve Sweidan B.N., 1996. Response of Long-Span Bridges to Spatially varying ground motion, Journal of Structural Engineering, 122, 5, 476-484.
- Harichandran, R.S. ve Wang, W., 1988. Response of Simple Beam to Spatially Varying Earthquake Excitation, Journal of Engineering Mechanics, 114, 9, 1526-1541.

- Harichandran, R.S. ve Wang, W., 1990. Response of Indeterminate Two-Span Beam to Spatially Varying Seismic Excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 2, 173-187.
- Hawwari, A.R., 1992. Suspension Bridge Response to Spatially Varying Ground motion, doktora tezi, Michigan State University, Michigan, ABD.
- Heredia-Zavoni, E. ve Vanmarcke, E.H., 1994. Seismic Random- Vibration Analysis of Multisupport-Structural Systems, Journal of Engineering Mechanics, 120, 5, 1107-1127.
- Hindy, A. ve Novak, M., 1980. Pipeline Response to Random Ground Motion, Journal of Engineering Mechanics Division, 106, 2, 339-360.
- Hwang, J.S. ve Sheng, L.H., 1993. Effective Stiffness and Equivalent Damping of Base Isolated Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, 119, 3094-3101.
- Hwang, J.S. ve Sheng, L.H., 1994. Practical Analysis of Bridges on Isolation Bearings with Bilinear Hysteresis Characteristics, Earthquake Spectra, 10, 705-727.
- Jangid, R.S. ve Banerji, P., 1995. Seismic Response of Bridges With Non-Linear Supports, 2nd Int. Conf. on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, 1, 561-568.
- Jangid, R.S. ve Banerji, P., 1998. Effects of Isolation Damping on Stochastic Response of Structures with Nonlinear Base Isolator, Earthquake Spectra, 14, 1, 95-114.
- Jangid, R.S. ve Datta, T.K., 1992. Seismic Behaviour of Torsionally Coupled Base Isolated Structure, European Earthquake Engineering, 6, 2-13.
- Jangid, R.S. ve Datta, T.K., 1993. Seismic response of a torsionally coupled system with a sliding support, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 99, 271-280.
- Jangid, R.S., 1997. Response of Pure-Friction Sliding Structures to Bi-Directional Harmonic Ground Motion, Engineering Structures, 19, 2, 97-104.
- Jangid, R.S. ve Data, T.K., 1995. Seismic Behaviour of Base-Isolated Buildigs: A State of Art Review, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 110, 186-203.
- Jangid, R.S., 2008. Equivalent Linear Stochastic Seismic Response of Isolated Bridges, Journal of Sound And Vibration, 309, 3-5, 805-822.
- Jia, H.Y., Zhang, D.Y., Zheng, S.X., Xie, W.C. ve Pandey, M.D., 2013. Local Site Effects On A High-Pier Railway Bridge Under Tridirectional Spatial Excitations: Nonstationary Stochastic Analysis, Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 52, 55-69.

- Jiao, C.K., Li, A.Q., Wu, X.P. ve Dong, X., 2013. Seismic Response Analysis of a Double-Deck Long-Span Cable-Stayed Bridge Under Multi-Support Excitations, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 36, 3, 314-334.
- Kadir, A., Rubber Properties Important in Design of Bearings, International Conference on Natural Rubber for Earthquake Protection of Building and Vibration Isolation, Kuala Lumpur, 1982, 211-227.
- Kim, S.K. ve Yun, C.B., 2007. Seismic Response Characteristics of Bridges Using Double Concave Friction Pendulum Bearings With Tri-Linear Behavior, Engineering Structures, 29, 11, 3082-3093.
- Koh, C.H. ve Balendra, T., 1989. Seismic Response of Base Isolated Buildings Including P- Δ Effects of Isolation Bearings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 4, 461-473.
- Koh, C.H. ve Kelly, J.M., 1990. Application of Frictional Derivatives to Seismic Analysis of Base-Isolated Models, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 229-241.
- Konakli, A., Stochastic Dynamic Analysis of Bridges Subjected to Spatially Varying Ground Motions, Doktora Tezi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği, Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley, 2011.
- Konakli, K. ve Kiureghian, A.D., 2012. Simulation of Spatially Varying Ground Motions Including Incoherence, Wave-Passage and Differential Site-Response Effects, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41, 3, 495-513.
- Kreyszig, E., 1993. Advances Engineering Mathematics, Seventh Edition, John Wiley and Sons, Inc., Singapore.
- Kulkarni, J.A. ve Jangid, R.S., 2002. Rigid body response of base-isolated structures, Journal of Structural Control, 9, 3, 171-188.
- Kumarasena, T. ve Stroh, S.L., 1995. Multiple-Support Excitation Analysis Simplified, Proceedings of the National Seismic Conference on Bridges and Highways, December, San Diego, California.
- Lee, D.M. ve Medland, I.C., 1979. Base Isolation Systems for Earthquake Protection of Multi-Storey Shear Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 7, 555, 568.
- Lee, D.M. ve Penzien, J., 1980. Stochastic Seismic Analysis of Nuclear Power Plant Structures and Piping Systems Subjected to Multiple Support Excitations, Report No. UCB/EERC-80/19, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA.

- Lee, D.M. ve Penzien, J., 1983. Stochastic Analysis of Structures and Piping Systems Subjected to Multiple Support Excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 91-110.
- Li, B., Bi, K., Chouw, N., Butterworth, J.W. ve Hao, H., 2012. Experimental investigation of spatially varying effect of ground motions on bridge pounding, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41, 14, 1959-1976.
- Li, X.M., 1989. Optimisation of Stochastic Response of a Bridge Isolation System with Hysteretic Dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 7, 951-964.
- Lin, B.C., Tadjbakhsh, I.G. ve Papageorgiou, 1989. Response of Base-Isolated Buildings to Random Excitations Described by the Clough-Penzian Spectral Model, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 49-62.
- Loghman, V., Khoshnoudian, F. ve Banazadeh, M., 2015. Effect of Vertical Component of Earthquake on Seismic Responses of Triple Concave Friction Pendulum Base-Isolated Structures, Journal of Vibration and Control, 21, 11, 2099-2113.
- Lou, L. ve Zerva, A., 2005. Effects of Spatially Variable Ground Motions on The Seismic Response of A Skewed, Multi-Span, RC Highway Bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 7-10, 729-740.
- Luco, J.E. ve Mita, A., 1987. Response of Circular Foundation to Spatially Random Ground Motion, Journal of Engineering Mechanics, 113, 1, 1-16.
- Luco, J.E. ve Wong, H.L., 1986. Response of A Rigid Foundation to a Spatially Random Ground Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, 6, 891-908.
- Lupoi, A., 2009. The Response of Isolated Bridges Accounting for Spatial Variability of Ground Motion, Journal of Earthquake Engineering, 13, 6, 814-834.
- Lupoi, A., Franchin, P., Pinto, P.E. ve Monti, G., 2005. Seismic Design of Bridges Accounting for Spatial Variability of Ground Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34, 4-5, 327-348.
- Marano, G.C., Sgobba, S., 2007. Stochastic Energy Analysis of Seismic Isolated Bridges, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 8, 759-773.
- Mokha, A.S. ve Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M., 1990a. Teflon Bearings in Base Isolation I: Testing, Journal of Structural Engineering, 116, 2, 438-454.

- Mokha, A.S., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M., 1990b. Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of a Sliding Isolation System with Spherical Surface. TEchnical REport NCER-90-0020, State University of New York at Buffalo.
- Mokha, A.S., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M., 1993. Verification of Model of Teflon Bearings under Triaxial Load, Journal of Structural Engineering, ASCE, 119, 1, 240-261.
- Monti, G., Nuti, C. ve Pinto, P.E., 1996. Nonlinear Response of Bridges Under Multi-Support Excitation, Journal of Structural Engineering, 122, 10, 1147-1159.
- Monti, G., Pinto, P.E. ve Nuti, C., Response of Conventional and Isolated Bridges under Non-synchronous Seismic Motion, Proceedings of the Fifth SECED Conference, Rotterdam, 1995, 117-124.
- Mostaghel, N. ve Khodaverdian, M., 1987. Seismic Response Structures Supported on RFBI System, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 15, 3, 379-390.
- Mutobe, R.M. ve Cooper, T.R., 1999. Nonlinear Analysis of a Large Bridge with Isolation Bearings, Computers and Structures, 72, 279-292.
- Nazmy, A.S. ve Abdel-Ghaffar, A.M., 1992. Effects of Ground Motions Spatial Variability on the Response of Cable-Stayed Bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 1-20.
- Newland, D.E., 1983. An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis, Fifth Edition, Longman Inc., New York.
- Nigam, N.C., 1983. Introduction to Random Vibrations, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- Novak, M. ve Henserson, P., 1989. Base Isolated Buildings With Soil-Structure Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 6, 751-765.
- Oliveira, C.S., Hao, H. ve Penzien, J., 1991. Ground Motion Modelling for Multiply-Input Structural Analysis, Structural Safety, 10, 79-93.
- Park, K.S., Jung, H.J. ve Lee, I.W., 2002. A Comparative Study on Seismic Performances of Base Isolation Systems for Multi-Span Continuous Bridge, Engineering Structures, 24, 1001-1013.
- Paz, M., 1991. Structural Dynamics, Third Edition, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York.
- Peebles, P.Z., 1987. Probability, Random Variables and Random Signal Principles, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., New York.

- PEER, 2016. Pacific Earthquake Engineering Research Centre, ngawest2.berkeley.edu.
- Purnachandra, S. ve Jangid, R.S., 2008. Comparative Performance of Isolation Systems for Benchmark Cable-stayed Bridge, International Journal of Applied Science and Engineering, 6, 2, 111-139.
- Reoder, C.W. ve Stanton, J.F., 1983. Elastomeric bearings:State of the Art, Journal of Structural Engineering, 109,12, 2853-2871.
- Roberts, J.B. ve Spanos, P.T.D., 1986. Stochastic Averaging: An Approximate Method of Solving Random Vibration Problems, International Journal of Nonlinear Mechanics, 21, 2, 111-134.
- Roberts, J.B., 1984. Techniques for Nonlinear Random Vibrations Problems, Shock and Vibrations Digest, 16,3-14.
- Scheller, J. ve Constantinou, M.C., 1999. Response History Analysis of Structures with Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems: Verification Examples for SAP2000, Technical Report MCEER-99-0002, Buffalo.
- Schneider, J.F., Step, J.C. ve Abrahamson, N.A., 1992. The spatially Variation of Earthquake Ground Motion and Effects of Local Site Conditions, Advanced in Civil Engineering, Proc. 10th WCEE, July, Madrid, 967-972.
- Sextos, A.G., Kappos, A.J. ve Mergos, P., 2004. Effect of Soil-Structure Interaction and Spatial Variability of Ground Motion on Irregular Bridges: The Case of the Krystallopigi Bridge, 13th World Conference on EarthquakeEngineering, Vancouver, Canada, 2298.
- Shrestha, B., Hao, H. ve Bi, K., 2014. Effectiveness of Using Rubber Bumper and Restrainer on Mitigating Pounding and Unseating Damage of Bridge Structures Subjected to Spatially Varying Ground Motions, Engineering Structures, 79, 195-210.
- Siddiqui, F.M. ve Constantinou, M.C., 1989. Simplified Analysis Method for Multistorey Base-Isolated Structures on Viscoelastic Halfspace, Earthquake Engineering and Structural Dynamics,18, 1, 63-77.
- Simo, J.C. ve Kelly, J.M., 1984. Finite Element Analysis of the Stability of Multi-Layer Elastomeric Bearings, Engineering Structures, 6, 3, 162-174.
- Skinner, R.I., Kelly, J.M. ve Heine, A.J., 1975. Hysteretic Dampers for Eartquake Resistance Structers, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 3, 287-296.
- Soneji, B.B. ve Jangid, R.S., 2007. Passive Hybric Systems For Eartquake Protection of Cable-Stayed Bridge, Engineering Structures, 29, 57-70.

- Soneji, B.B., Jangid, R.S., 2006. Effectiveness of Seismic Isolation for Cable-Stayed Bridges, International Journal of Structural Stability and Dynamics , 6, 1, 77-96.
- Soyluk, K. ve Avanoğlu S.E., 2011. Soil–Structure Interaction Analysis of Cable-Stayed Bridges for Spatially Varying Ground Motion Components, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 35, 80-90.
- Soyluk, K. ve Dumanoğlu, A.A., 2000. Stochastic Analysis of Cable-Stayed Bridges Subjected to Multiple-Support Excitation, *Advances in Civil Engineering*, IV. International Congress, November, Gazimagusa, 3, 1249-1258.
- Soyluk, K., 2001. Değişerek Yayılan Yer Hareketi Etkisindeki Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Soyluk, K., 1997. Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Spanos, P.T.D., 1981. Stochastic Linearization in Structure Dynamics, Journal of Applied Mechanics, 34, 1, 1-8.
- Stanton, J.F. ve Reoder, C.W., 1982. Elastomeric bearings: Design, Construction and Materials, NCHRP, Reports 248, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Stanton, J.F., Scroggins, G., Taylor, A.W. ve Roeder, C.W., 1990. Stability of Laminated Elastomeric Bearings, Journal of Structural Engineering, 116, 1352-1371.
- Su, L., Ahmadi, G. ve Tadjbakhsh, I.G., 1989. A Comparative Study of Performances of Various Base Isolation Systems, Part I: Shear Beam Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 1, 11-32.
- Su, L., Ahmadi, G. ve Tadjbakhsh, I.G., 1991. Performance of Sliding Resilient-Friction Base Isolation System, Journal of Structural Engineering, 117, 1, 165-181.
- Sungur, I., 1993. Stochastic Response to Earthquake Forces of a Cable-Stayed Bridge, Engineering Structures, 15, 5, 307-314.
- Sweidan, B.N., 1990. Stochastic Response of Deck Arch Bridges to Correlated Support Excitations, Doktora Tezi, Michigan State University, Michigan.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayın No:25, İzmir.

- Tian, Z.Y.ve Lou, M.L., 2014. Traveling Wave Resonance and Simplified Analysis Method for Long-Span Symmetrical Cable-Stayed Bridges under Seismic Traveling Wave Excitation, Shock and Vibration, 1-12.
- Tongaokar, N.P. ve Jangid, R.S., 2000. Earthquake Response of Seismically Isolated Bridges, Journal of European Association for Earthquake Engineering, 1, 48-58.
- Tongaokar, N.P. ve Jangid, R.S., 2002. Earthquake Response of Bridges with Sliding Systems, Journal of European Association for Earthquake Engineering, 2, 19-33.
- Tongaokar, N.P. ve Jangid, R.S., 2003. Seismic Response of Isolated Bridges with Soil-Structure Interaction, Soil Dynamics and Engineering, 23, 287-302.
- Tonyalı, Z., Ateş, Ş. ve Adanur, S. 2015. Mesnetlerinden Farklı Yer Hareketlerine Maruz Kablo Köprülerin Stokastik Analizi. 3. Köprüler Viyadükler Sempozyumu, 08-10 Mayıs 2015, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Bursa Şubesi.
- Tsai, C.S, Chiang, T.C. ve Chen, B.J., 2003. Finite Element Formulations and Theoretical Study for Variable Curvature Friction Pendulum System, Engineering Structures, 25, 1719-1730.
- Tsai, C.S., 1997. Finite Element Formulations for Friction Pendulum Isolation Bearings, International Journal for Numerical Method in Engineering, 40, 1, 29-49.
- Tsopelas, P., Constantinou, M.C., Kim, Y.S. ve Okamoto, S., 1996. Experimental Study of FPS System in Bridge Seismic Isolation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, 65-78.
- Tsopelas, P., Okamoto, S., Constantinou, M.C., Ozaki, D. ve Fujii, S., 1994. Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of System Consisting of Sliding Bearing, Rubber Res. Force De., Technical Report MCEER-94-0002, State University of New York at Buffalo.
- Türker, H., 2005. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, Bildiriler Kitabı, 538-545.
- URL-1, <http://www.sismikizolasyon.com>, 28 Mayıs 2016.
- Uscinski, B. J., 1977. The Elements of Wave Propagation in Random Media, Mc Graw-Hill, New York.
- Wang, H., Li, J., Tao1, T., Wang, C. ve Li, A., 2015. Influence of Apparent Wave Velocity on Seismic Performance of A Super-Longspan Triple-Tower Suspension Bridge, Advances in Mechanical Engineering, 7, 6, 1-14.

- Wang, X.F. ve Gould, P.L., 1994. Effects of Pier Uplift and Sliding Isolation on Seismic Performance of Highway Bridges, Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, California, 1, 871-880.
- Wung, C.D. ve Der Kiureghian, A., 1989. STOCAL-II: Computer-Assisted Learning System for Stochastic Dynamic Analysis of Structures, Part I Theory and Development, Report No. UCB/SEMM-89/10, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA.
- Yang, C.Y., 1986. Random Vibration of Structures, First Edition, John Wiley, Inc., New York.
- Yurdakul, M. ve Ateş, Ş., 2011. Modeling of Triple Concave Friction Pendulum Bearings for Seismic Isolation of Buildings, *Structural Engineering and Mechanics*, 40, 3, 315-334.
- Yurdakul, M., Ateş, Ş. ve Altunışık, A.C., 2014. Comparison of The Dynamic Responses of Gulburnu Highway Bridge Using Single and Triple Concave Friction Pendulums, *Earthquakes and Structures*, 7, 4, 511-525.
- Zayas, V., Low, S. ve Mahin, S.A., 1987. The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report, EERC Technical Report, UBC/EERC, 87-01.
- Zayas, V., Low, S.S. ve Mahin, S.A., 1990. A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, *Earthquake Spectra*, 6, 2, 317-333.
- Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A. ve Bozzo, L., 1989. Feasibility and Performance Studies on Improving the Earthquake Resistance of New Existing Building Using the Friction Pendulum System, Report No. UCB/EERC 89-09, University of California, Berkeley.
- Zayas, V.A., S.S. ve Mahin, S.A., 1990. A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, *Earthquake Spectra*, 6, 2, 317-333.
- Zembaty, Z. ve Rutenberg, A., 1998a. On the Sensitivity of Bridge Seismic Response with Local Soil Amplification, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 10, 1095-1099.
- Zembaty, Z. ve Rutenberg, A., 1998b. Sensitivity analysis of spatial seismic effects from local soil amplification, Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Paris, September 6-11.
- Zerva, A., 1990. Response of Multiple-Span Beams to Spatially Incoherent Seismic Ground Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19, 6, 819-832.

- Zerva, A., 1991. Effect of Spatial Variability and Propagation of Seismic Ground Motions on The Response of Multiply Supported Structures, Probabilistic Engineering Mechanics, 6, 212, 221.
- Zerva, A., 1992b. Seismic Loads Predicted by Spatial Variability Models, Structural Safety, 11, 3-4, 227-243.
- Zerva, A., 1999. Differential Response Spectra for the Seismic Response of Lifelines, Proc. of the Fourth European Conference on Structural Dynamics, June, Prague, 2, 1153-1158.
- Zhang, D.Y., Li, X., Yan, W.M. , Xie, W.C. ve Pandey, W.D., 2013. Stochastic Seismic Analysis of A Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Arch Bridge Under Tridirectional Multiple Excitations, Engineering Structures, 52, 2013, 355-371.
- Zhang, Y.H., Li, Q.S., Lin J.H. ve Williams, F.W., 2009. Random Vibration Analysis of Long-Span Structures Subjected to Spatially Varying Ground Motions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 4, 620-629.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet YURDAKUL, 1984 yılında Trabzon'da doğdu. İlk Okulu Trabzon Kanuni İlk Öğretim Okulu ve Prof. Dr. İhsan Koz İlk Öğretim Okulu'nda, ortaokulu Prof. Dr. İhsan Koz İlk Öğretim Okulu'nda ve lise öğrenimini ise Trabzon Fatih Lisesi (Süper Lise)'nde tamamladı ve 2002 yılında mezun oldu.

2003 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans öğrenimini 2007 yılında birincilik ile tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde "Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnetli Yapıların Dinamik Davranışına Zemin Eğilebilirliğinin Etkisi" isimli yüksek lisans tezini tamamlayan YURDAKUL, aynı yılda Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmekte olup halen Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.