

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**AASHTO REHBER TEKNİK ŞARTNAMESİNE (AASHTO-GSID)
GÖRE KÖPRÜLERDE SİSMİK YALITIM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sami ARI

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

EYLÜL 2019

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**AASHTO REHBER TEKNİK ŞARTNAMESİNE (AASHTO-GSID)
GÖRE KÖPRÜLERDE SİSMİK YALITIM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sami ARI
(501101228)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ünal ALDEMİR

EYLÜL 2019

İTÜ, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü'nün 501101228 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sami ARI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AASHTO REHBER TEKNİK ŞARTNAMESİNE (AASHTO-GSİD) GÖRE KÖPRÜLERDE SİSMİK YALITIM TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ünal ALDEMİR**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ünal ALDEMİR**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şenol ATAÖĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Çağrı MOLLAMAHTOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **13 Eylül 2019**





Aileme,



ÖNSÖZ

Köprülerde sismik yalıtım tasarımı için yaptığım çalışmam sırasında bana destek veren danışman hocam Prof. Dr. Ünal Aldemir'e, Yrd.Doç.Dr. Arcan Yanık'a ve Prof. Dr. Erkan Özer ile Yük. İnş. Müh. Şehnaz Aktaş'a teşekkür ederim.

Eylül 2019

Sami ARI
(İnşaat Mühendisi)





İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Köprülerin Sismik Etkiler Altındaki Davranışı.....	3
2.2 Sismik Yalıtım Kavramıyla İlgili Genel Bilgiler	4
3. SİSMİK YALITIM ARAÇLARI	9
3.1 Elastomer Deprem Yalıtım Mesnetleri	9
3.1.1 Düşük sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetleri	11
3.1.2 Yüksek sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetleri	13
3.1.3 Kurşun çekirdekli deprem yalıtım mesnetleri	14
3.2 Kayma Esaslı Deprem Yalıtım Mesnetleri.....	14
3.2.1 Düz yüzeyli kayıcı deprem yalıtım mesnetleri	15
3.2.2 Eğri yüzeyli kayıcı deprem yalıtım mesnetleri	17
4. AASHTO GSİD İÇERİSİNDE ÖNERİLEN ANALİZ YÖNTEMLERİ	19
4.1 Basitleştirilmiş Yöntem.....	19
4.2 Tek Modlu Spektral Yöntem.....	22
4.3 Çok Modlu Spektral Yöntem	23
4.4 Zaman Tanım Alanında Çözüm Yöntemi	23
5. YALITIMLI KÖPRÜ HESABI	25
5.1 Köprüyle İlgili Bilgiler	25
5.2 Yer Hareketinin Tanımlanması	28
5.3 Köprü Matematik Modeli	41
5.4 Basitleştirilmiş Hesapla Ön Tasarım.....	43
5.5 Çok Modlu Davranış Spektrumu Analizi İle Doğrulama.....	48
5.6 Sismik Yalıtım Araçlarının Boyutlandırılması	52
5.6.1 Ortaayak mesnetlerinin boyutlandırılması	52
5.7 Zaman Tanım Alanında Çözüm	56
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	67
KAYNAKLAR	71



KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDTH	: Türkiye Deprem Tehlike Haritası
GSID	: Guide Specifications for Seismic Isolation Design
EC	: Eurocode
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
FPS	: Sürtülmeli Sarkaç Sistemi
GF	: Glass-filled Teflon (Cam dolgulu Teflon)
IBC	: International Building Code
LRB	: Kurşun çekirdekli elastomer mesnet
UF	: Unfilled Teflon (Dolgunsuz Teflon)
WT	: Woven Teflon (Dokuma Teflon)



SEMBOLLER

A_b	: Elastomer plan alanı
A_r	: Deforme olmuş elastomerin alt ve üst yüzeylerinin plandaki izdüşüm alanı
B_L	: Uzun periyotlar için geçerli efektif sönüme bağlı katsayı
C_{sm}	: Elastik sismik tepki katsayısı %5 sönüm için
C_{smd}	: Elastik sismik tepki katsayısı %ξ sönüm için
D_c	: Şekil katsayısı, basınç altındaki kayma şekil değiştirmesine bağlı
D_r	: Şekil katsayısı, dönmeden kaynaklı kayma şekil değiştirmesine bağlı
D_L	: Ölü yük
d	: Üstyapı toplam yer değiştirmesi
d_{isol}	: Yalıtım aracı yer değiştirmesi
d_y	: Yalıtım aracı akma yer değiştirmesi
d_{sub}	: Altyapı yer değiştirmesi
d_t	: Toplam tasarım yer değiştirmesi
E	: Elastisite modülü
E_c	: Elastomer katmanlarının basınç modülü
EDC	: Bir çevrimdeki enerji yitimi
F₀	: Kısa periyot için zemin faktörü
F	: Statik eşdeğer sismik yük
F_A	: 1. Sismik bölge için bağlatılara ait tasarım kuvveti
F_i	: İzolatör kuvveti, di deplasmanı altında
F_n	: Prototip testi sırasında izolatörde bir çevrimde meydana gelen maksimum negatif kuvvet
F_{n, max}	: Prototip testi sırasında izolatörde bir çevrimde meydana gelen maksimum negatif kuvvet, yaygın deplasman mertebeleri için
F_{n, min}	: Prototip testi sırasında izolatörde bir çevrimde meydana gelen minimum negatif kuvvet, yaygın deplasman mertebeleri için
F_p	: Prototip testi sırasında izolatörde bir çevrimde meydana gelen maksimum pozitif kuvvet
F_{p, max}	: Prototip testi sırasında izolatörde bir çevrimde meydana gelen maksimum pozitif kuvvet, yaygın deplasman mertebeleri için

$F_{p, min}$: Prototip testi sırasında izolatörde bir çevrimde meydana gelen minimum pozitif kuvvet, yaygın deplasman mertebeleri için
F_v	: Uzun periyot için zemin faktörü
f_1, f_2	: Viskoz damperdeki maksimum kuvveti hesaplamak için kullanılan faktörler
G	: Kayma modülü
I_g	: Yer çekimi ile gerçekleşen ivmelenme
K_d	: Akma sonrası rijitlik
K_{eff}	: Sistem efektif rijitliği
K_{isol}	: Yalıtım aracı efektif rijitliği
K_u	: Yalıtım aracı elastik rijitliği
k_{eff}	: Prototip testlerinde belirlenen efektif rijitlik
$k_{eff, di}$: Hesaplanan deplasman altındaki efektif rijitlik
k_{sub}	: Altyapı rijitliği
LL	: Hareketli yük
LL_s	: Sismik hareketli yük, hareketli yükün kütleyle dahil edilmesi
OT	: İlave düşey yük
P	: Maksimum düşey yük
PGA	: En büyük yer ivmesi, referans zemin sınıfı için
Q_d	: Karakteristik dayanım
S	: Elastomer tabakaların şekil faktörü
S_1	: Referans zemin sınıfı için yatay spektral ivme katsayısı
S_A	: Spektral ivme
S_D	: Spektral deplasman
S_{D1}	: Uzun periyot için yatay spektral ivme katsayısı, ilgili zemin faktörüyle çarpılmış
S_{DS}	: Kısa periyot için yatay spektral ivme katsayısı, ilgili zemin faktörüyle çarpılmış
S_s	: Uzun periyot için yatay spektral ivme katsayısı, referans zemin için
T_0	: Referans periyot
T_{eff}	: Efektif periyot
T_m	: m. moddaki periyot
T_r	: Toplam elastomer kalınlığı
T_s	: Köşe periyodu
t_i	: i numaralı elastomer kalınlığı
W	: Toplam düşey yükler DL+LL

Δ	: Elastomer kayma şekil değiştirmesi
Δ_n	: Test sırasında ölçölen maksimum negatif yer değiştirme
Δ_p	: Test sırasında ölçölen maksimum pozitif yer değiştirme
Δ_s	: Rötire sünme sıcaklık değişiminden meydana gelen yer değiştirme
ξ	: Sistemin eşdeğer sönüm oranı
ξ_d	: Viskoz damperlerin eşdeğer sönüm oranı
ξ_i	: İzolatörlerin eşdeğer sönüm oranı
γ_c	: Kayma şekil değiştirmesi, düşey yükler kaynaklı
$\gamma_{s,eq}$: Kayma şekil değiştirmesi, toplam deplasmana göre
γ_r	: Kayma şekil değiştirmesi, dönmeden kaynaklanan
ϵ_c	: Kısalma, düşey yükler kaynaklı
ϵ_y	: Minimum uzama
σ_s	: Ortalama basınç gerilmesi
θ	: Mesnetteki dönme
λ_a	: Yaşlanma etkileri faktörü
λ_c	: Kirlenme etkileri faktörü (kayıcı sistemler için)
$\lambda_{max, min}$: Sistem modifikasyon faktörleri, ısıl değişim, yaşlanma, hız ve malzeme parametreleri değişimine bağlı
λ_t	: Isıl etkiler faktörü
λ_v	: Hız etkileri faktörü



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1: Boyuna doğrultu hesap tablosu.	46
Çizelge 5.2: Enine doğrultu hesap tablosu.	47
Çizelge 5.3: Çok modlu spektral analiz ve basitleştirilmiş yöntem sonuçlarının karşılaştırılması (boyuna doğrultu).	49
Çizelge 5.4: Çok modlu spektral analiz ve basitleştirilmiş yöntem sonuçlarının karşılaştırılması (enine doğrultu).	49
Çizelge 6.1: Maksimum mesnet deformasyonlarının karşılaştırılması.	67
Çizelge 6.2: Kolon kesme kuvvetleri tablosu.	68



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Yalıtımlı ve yalıtımsız köprü deprem davranışı.....	5
Şekil 2.2: Rijitlik değişimine bağlı periyot ötelenmesi (Buckle vd., 2006).	6
Şekil 2.3: İdelalize edilmiş yalıtım aracı davranış modeli (AASHTO GSID, 1999). .	7
Şekil 2.4: Sismik yalıtımın sistem davranışına etkisi, periyot uzaması ve sönüm	8
Şekil 3.1: Pestalozzi Okulu'nda kullanılan donatısız kauçuk mesnet (Kelly ve Lee, 2018).	10
Şekil 3.2: Pestalozzi Okulu'nda yalıtım sistemi, kauçuk mesnet ve cam köpüğü tuğlalar	10
Şekil 3.3: Elastomer deprem yalıtım mesnedi (Arfen, 2019).	11
Şekil 3.4: Düşük sönümlü deprem yalıtım mesnedi histeretik kuvvet- yer değiştirme eğrisi.....	12
Şekil 3.5: Yüksek sönümlü deprem yalıtım mesnedi histeretik kuvvet- yer değiştirme eğrisi (Naeim ve Kelly, 1999).	13
Şekil 3.6: Kurşun çekirdekli deprem yalıtım mesnedi ve kuvvet deformasyon çevrim diyagramı (Tensa, 2015).	14
Şekil 3.7: Teflon (PTFE) paslanmaz çelik mesnet yüzeyleri arası tipik sürtünme kuvveti-yer değiştirme çevrimi, Basınç=20.7 MPa, En Yüksek Hız= 2.5 mm/sn (Constantinou vd., 2007).	16
Şekil 3.8: Kuzey Marmara Otoyolu V17 Viyadüğüne ait kayıcı mesnet.	16
Şekil 3.9: Kuzey Marmara Otoyolu V17 Viyadüğüne ait kenarayak ve üstyapı arasında bulunan hidrolik viskoz damperler.	17
Şekil 3.10: Sürtünmeli sarkaç sistem hareketi.	18
Şekil 3.11: Sürtünmeli sarkaç mesnet (Mageba, 2019).	18
Şekil 4.1: İdelalize edilmiş yalıtım aracı davranış modeli (AASHTO GSID, 1999).	21
Şekil 5.1: Ardgermeli tabliye enkesiti.	25
Şekil 5.2: Kolon kesiti.	25
Şekil 5.3: Orta ayak enkesiti.	26
Şekil 5.4: Köprü plan profili.	27
Şekil 5.5: TDTH Elastik ivme spektrumu.	28
Şekil 5.6: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Darfield-Yeni Zellanda (2010)-Boyuna Doğrultu).	29
Şekil 5.7: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Darfield-Yeni Zellanda (2010) -Boyuna Doğrultu).	30
Şekil 5.8: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Darfield-Yeni Zellanda (2010)-Enine Doğrultu).	31
Şekil 5.9: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Darfield-Yeni Zellanda (2010)-Enine Doğrultu).	32
Şekil 5.10: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Düzce-Türkiye (1999)-Boyuna Doğrultu).	33
Şekil 5.11: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Düzce-Boyuna Doğrultu).	34
Şekil 5.12: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Düzce-Türkiye (1999)-Enine Doğrultu).	35

Şekil 5.13: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Düzce-Türkiye (1999)-Enine Doğrultu).....	36
Şekil 5.14: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Landers-ABD (1992)-Boyuna Doğrultu).....	37
Şekil 5.15: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Landers-ABD (1992)-Boyuna Doğrultu).....	38
Şekil 5.16: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Landers-ABD (1992)-Enine Doğrultu).....	39
Şekil 5.17: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Landers-ABD (1992)-Enine Doğrultu).....	40
Şekil 5.18: Köprü SAP2000 modeli.....	41
Şekil 5.19: Köprü SAP2000 modeli.....	42
Şekil 5.20: Orta ayak başlık kirişi ve üstyapının mesnetlerle bağlantısı.....	42
Şekil 5.21: DBYBHY 2018 Yer değiştirme davranış spektrumu.....	43
Şekil 5.22: İdealize LRB mesnet çevrimi.....	44
Şekil 5.23: Boyuna yönde deprem için kompozit davranış spektrumu.....	48
Şekil 5.24: Enine yönde deprem için kompozit davranış spektrumu.....	48
Şekil 5.25: Modal analiz boyuna doğrultuda deprem mod şekli.....	50
Şekil 5.26: Modal analiz enine doğrultuda deprem mod şekli.....	51
Şekil 5.27: Orta ayaklar için seçilen mesnet özellikleri.....	52
Şekil 5.28: Kenar ayaklar için seçilen mesnet özellikleri.....	52
Şekil 5.29: Deplasman ve ivme değerleri gösterilen noktanın modeldeki yeri.....	57
Şekil 5.30: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Landers boyuna doğrultu).....	58
Şekil 5.31: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Landers enine doğrultu).....	59
Şekil 5.32: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Darfield boyuna doğrultu).....	60
Şekil 5.33: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Darfield enine doğrultu).....	61
Şekil 5.34: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Düzce boyuna doğrultu).....	62
Şekil 5.35: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Düzce enine doğrultu).....	63
Şekil 5.36: Landers depremi için kuvvet deformasyon çevrimi (boyuna doğrultu).....	64
Şekil 5.37: Darfield depremi için kuvvet deformasyon çevrimi (boyuna doğrultu).....	65
Şekil 5.38: Düzce depremi için kuvvet deformasyon çevrimi (boyuna doğrultu).....	66

AASHTO REHBER TEKNİK ŞARTNAMESİNE (AASHTO-GSID) GÖRE KÖPRÜLERDE SİSMİK YALITIM TASARIMI

ÖZET

Sismik yalıtımın köprülerde kullanımını oldukça yaygındır. Malzeme teknolojilerinin de gelişmesiyle birlikte her geçen gün sismik yalıtım konusu daha ekonomik ve estetik köprüler tasarlamak için tasarımcıların önünü açmaktadır.

Köprülerin sismik davranışları; ağırlıklı olarak üstyapıda yoğunlaşan kütle ve altyapıyı oluşturan kolonların sahip olduğu rijitliklere bağlı olarak değişim gösterir. Köprü üstyapısı genellikle köprü üzerindeki trafik yüklerine göre tasarlanmaktadır. Üstyapı kütlelerinin azaltılması pek mümkün olmadığında dinamik davranışı değiştirmek için altyapı rijitliğinde modifikasyona gitmek gerekmektedir. Bu modifikasyon altyapı ve üstyapının sismik yalıtım araçları ile ayrılması ile gerçekleştirilebilir.

Sismik yalıtım tasarımı, esasında doğrusal olmayan bir problemdir. Problemin çözümü için sismik yalıtım araçlarının nonlineer olarak tanımlanması ve bu şekilde çözüme ulaşılması gerekmektedir. Tasarım sürecinde bir optimizasyon yapılması amaçlandığı düşünülürse doğrusal olmayan çözümler çok zaman alacağından pratikte tasarım açısından uygun bir yöntem değildir. Yalıtım sistemlerinin doğrusallaştırılması, başka bir deyişle etkili rijitlikler kullanılarak yapılan yaklaşık çözümler literatürde mevcuttur.

Bu çalışma içerisinde AASHTO GSID rehber teknik şartnamesinde verilen hesap metotları takip edilerek ardgerme döşeme sistemine sahip bir karayolu köprüsü için sismik yalıtım tasarımı yapılmıştır. Basitleştirilmiş yöntem ve çok modlu spektral yöntemde; sismik yalıtım araçları doğrusallaştırılarak, etkili rijitlik değerleriyle ifade edilmiştir. Basitleştirilmiş yöntemde bu değerlerin elde edilmesi amacıyla bir hesap tablosu hazırlanmıştır. Çok modlu spektral yöntemde, basitleştirilmiş yöntemde belirlenen sismik yalıtım parametreleri kullanılmıştır. Her iki yöntem de iteratif yöntemlerdir. Etkili rijitlik tanımı yapılabilmesi için tasarımın başında hedef yer değiştirmeler belirlenmiş ve bu yerdeğiştirme değerlerine yakınsayacak mekanik parametreler elde edilmiştir.

Elde edilen mekanik parametrelere uygun mesnet tercihi yapıldıktan sonra seçilen mesnet boyutlarıyla ilgili stabilite tahkikleri yapılmış, kurşun çekirdek çapı, elastomer kalınlıkları, mesnet yüksekliği gibi değerler şartnameye uygun şekilde kontrol edilmiştir.

Yaklaşık metotların doğruluğunu sınamak amacıyla zaman tanım alanında çözüm yapılmıştır. Bölgenin deprenselliğine uygun olarak seçilen 3 farklı depreme ait bileşenler, davranış spektrumuna göre ölçeklenmiştir. Her bir depreme ait iki bileşen eşzamanlı olarak sisteme etkilerek çıkan değerlerin maksimumları dikkate alınmıştır.

Çalışma sonucunda iteratif doğrusal çözümlerin, zaman tanım alanındaki çözümle yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Zaman tanım alanındaki çözümün sistemin gerçek davranışına daha yakın sonuçlar vereceği kabulüne dayanarak, doğrusal metotların tasarımda oldukça faydalı bir araç olacağı sonucuna varılmıştır.



SEISMIC ISOLATION DESIGN OF BRIDGES ACCORDING TO AASHTO GUIDE SPECIFICATIONS FOR SEISMIC ISOLATION DESIGN

SUMMARY

Seismic isolation has a common use in bridge engineering. According to the innovations in material science and analysis methods seismic isolation design paves the way for designing more economic and esthetic bridges.

Seismic behavior of bridges depends on the mass of superstructure and stiffness of the substructure. Superstructure design is generally governed by the dead loads and traffic loads on the bridge. Therefore, mass is related to the girder dimensions and stiffness of superstructure becomes the key point to modify systems' period and seismic demands. The interaction between the superstructure mass and ground motion depends on the substructure stiffness. Seismic isolation reduces the seismic demands in two ways. Period shifting and energy dissipation.

Seismic isolation components such as elastomeric bearings, sliding bearings etc. modifies the behavior of structures. Most of the different seismic isolation strategies obtains similar results. But time dependent variations of seismic components or displacement limits related service conditions may lead the designer to a particular solution. According to possible conditional restrictions proper seismic isolation components is being selected. When the axial load to be carried by the bearing is critical or available fitting space for bearing is limited, sliding bearings might be a better solution. In a scenario where energy dissipation is more important, elastomeric bearing with a lead core (LRB) is very efficient.

AASHTO GSID is one of the most commonly used specification about seismic isolation design. This guide specification contains several solution methods for seismically isolated bridges. It is important to choose appropriate solution method in this case. Simplified method, single mode spectral method, multi-modal spectral method and time history method are given in the guide specification. First two methods is suitable for simple bridges, with few spans, without a significant curve and skew. Multi-modal spectral method is the most commonly applied method for the design of many types of bridges, the validity of this method depends on complexity of the bridge and seismic risk of the region. Time history method is being performed for complex structures at high seismic risk. Time history method is also being used to verify the final design or an existing structure. Even linear solutions are not adequate, and a time history solution is needed, it is reasonable to start the design procedure with linear methods. For preliminary design linear solution methods gives an opinion about the seismic behavior.

Seismic isolation is a nonlinear problem indeed. But nonlinear solutions are not very practical for design process. Design of a bridge is an optimization problem, so that many solutions have to be carried out for different material properties and structural element dimensions. Because of nonlinear methods takes much more time compared to linear methods some linearization methods has been developed.

In this study, the pathways given in the AASHTO GSID has been followed to design of a seismically isolated posttensioned girder bridge. An excel spreadsheet has been developed for linearization of the problem. Mass of the superstructure and stiffness values of the substructure predefined for the procedure. Properties of the isolators such

as characteristic strength (Q_d), isolators displacement (d), post-yielding stiffness of bearing (K_d) assumed in the beginning. For a convergent iteration, first assumption had a key point. Q_d assumed to resist all the service lateral loads and d assumed as the spectral displacement at one second period. After some iterations and changing these three parameters, a reasonable solution obtained. When the displacement calculated is converged to the assumed displacement the iterations are concluded. Stiffness properties defined, approximate damping of the system calculated according to the last iteration.

The properties obtained from the simplified method has been used in the multi-modal spectral method. Stiffness properties founded in the simplified method used in the first modal analysis. Response spectrum modified according to the calculated damping. Ordinates of the response spectrum divided by the damping coefficient for higher periods than 0.8 times effective period. In first and second trials displacements obtained from the multi-modal spectral analysis was different from the simplified method. After some modification on the stiffness values of the bearing these values converged. Seismic isolation devices designed according to the multi-modal spectral solution.

After the analysis lead core diameter, elastomeric layer thickness, bearing height, strain limits, horizontal-vertical bearing capacities and stability checks has been made.

Time history analysis has been used as a verification. Nonlinear properties of bearings defined in SAP2000 software. Other structural components (piers, girder) assumed to remain at linear limits. Two horizontal components of three suitable earthquake has been chosen from PEER Ground Motion Database. These ground motion records scaled with SEISMOMATCH software according to the design response spectrum. Scaled ground motions used in the analysis. Both orthogonal components of an earthquake applied concurrently. And envelope of the values of three cases taken in to account for verification.

Study shows; results of time history analysis and other linear solutions are consistent. For displacements, base shear, time history analysis results are lesser than linear methods. Hysteresis loop of bearings is similar to idealized bearing model.

As a result, it has been showed that analysis with elastic methods (after some iterations) produces close results with time history analysis. Having said that, this study doesn't take into account many variables. When soil structure interaction or nonlinear behavior of reinforced concrete elements are being considered or structural complexity is significant, reliability of linear solutions will be questionable. Even so this comparison shows that elastic solution methods are beneficial tools in design process and quite trustworthy for non-complex structures.





1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapılarda deprem tesirlerini azaltmak amacıyla sismik yalıtım uzun bir süredir kullanılmaktadır. Bu yalıtım araçları genellikle deprem kuvvetleri altında doğrusal olmayan davranış gösterirler. Dolayısıyla bu sistemlerin davranışlarını belirleyebilmek için doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir. Doğrusal olmayan analiz yöntemleri ise doğrusal analize göre daha fazla zaman almaktadır. Yapısal tasarımda elemanların boyutlarının belirlenmesi bir deneme yanılma sürecinin ardından gerçekleşir. Bu sebeple doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin tasarımda kullanılması pratik değildir. Sismik yalıtımın doğrusal çözümü için geliştirilen çeşitli yöntemler literatürde mevcuttur. Bu yöntemler; sismik yalıtım araçlarının yapacağı şekil değiştirmelerin öngörülmesi, buna bağlı olarak belirlenen etkili rijitliklerle problemin doğrusallaştırılmasına dayanmaktadır. Elbette sistemin gerçek davranışını gözlemlemek için doğrusal olmayan analiz yapmak daha isabetli sonuçlar verecektir. Ancak yapılan çalışmalar, doğrusal çözüm yöntemlerinin de sistemin davranışı hakkında tasarım için yeterli hassasiyette sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Bu yüzden sismik yalıtımlı hakkında fikir verebilecek doğrusal çözüm yöntemleri kullanılarak hızlı bir şekilde boyutlandırma yapmak mümkün olabilmektedir.

Çalışmada, ardgerme döşeme sistemine sahip bir karayolu köprüsü AASHTO GSID Rehber Teknik Şartnamesinde verilen doğrusal çözüm yöntemlerine göre çözülmüş, bu çözümden elde edilen değerler doğrultusunda sismik yalıtım araçları boyutlandırılmıştır. Daha sonra doğrusal çözümde kullanılan davranış spektrumuna uyumlu (ölçekli) yer hareketi kayıtları ve yalıtım araçlarının doğrusal olmayan rijitlikleri kullanılarak zaman tanım alanında analizi yapılmıştır. Çalışmada doğrusal yöntemler ve tahkik amaçlı yapılan zaman tanım alanındaki çözüme ait sonuçlar kıyaslanarak doğrusal yöntemlerin geçerliliği irdelenmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1 Köprülerin Sismik Etkiler Altındaki Davranışı

Köprüler; araç veya yayaların üzerinde hareket ettiği üstyapı ve bu üstyapıyı destekleyen altyapı adı verilen iki ana bileşenden meydana gelmektedir. Köprü kütlesinin büyük kısmı üstyapıda bulunduğu için, yer hareketi sırasında meydana gelen atalet kuvvetleri de bu seviyelerde daha yüksektir.

Yer hareketi ile üstyapı kütlesinin etkileşimi altyapı üzerinden gerçekleşmektedir. Altyapı rijitliği, altyapı ile üstyapının bağlantı şekli, deprem sırasında oluşacak talepleri ve yapı elemanları arasındaki yük akışını belirlemektedir.

Altyapı ile üstyapının moment aktaracak şekilde bağlandığı integral köprülerde; atalet kuvvetlerinin meydana getirdiği momentler, üstyapı ve altyapı arasında rijitliklerine bağlı olarak paylaşılmaktadır. Üstyapının moment aktarmayacak mesnetler üzerine oturtulduğu köprülerde ise yer hareketi üstyapıda ihmal edilecek kadar küçük kesit tesirleri oluşturmakta, üstyapıdan kaynaklı atalet kuvvetleri altyapı tarafından taşınmaktadır.

Köprüler yapısal basitliklerine rağmen (belki de tam olarak bu yüzden) deprem etkisi altında öngörülenden performansı gösteremeyebilirler. Kaliforniya, Japonya ve Güney Amerika'da gerçekleşen depremlerde, mevcut şartnameler buralarda gerçekleşen depremlerden daha az şiddetli depremleri öngörmemiş olmasına rağmen bazı köprülerde göçme veya ciddi hasarlar meydana gelmiştir (Priestley, 1996).

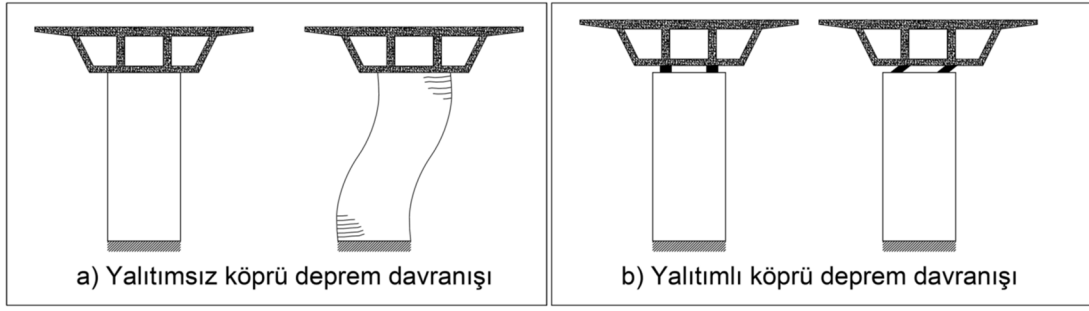
Depremler yapıların en zayıf oldukları noktaları ortaya çıkarıp, yapısal hasarların bu noktalarda yoğunlaşmasını sağlarlar (Priestley, 1996). Bina tipi yapılarda hiperstatiklik derecelerinin yüksek olması sebebiyle yapının bir bölgesinde bulunan zayıflık yüklerin sistemde yeniden dağıtılması ile telafi edilebilmektedir. Ancak köprülerin yapısal basitliği, yapısal sistem içerisinde farklı yük dağılım yollarının oluşmasına müsaade etmemektedir. Bu sebeple sistemin farklı kısımlarında meydana gelebilen bağımsız göçme modları yapıyı kullanılamaz hale getirebilmektedir.

Köprüler yapı zemin etkileşimi konusunda da bina tipi yapılara göre daha hassastır. Özellikle uzun köprülerde dinamik davranışın öngörülebilirliği sismik dalga yayılımının köprü ayaklarında eşzamanlı olmayan etkisi sebebiyle daha azdır. Pek çok köprü kumlu, siltli, sıvılaşma potansiyeline sahip zorlu zemin koşullarında inşa edilmekte dolayısıyla ayaklar arasında oluşan bağıl yer değiştirmeler oldukça yüksek olabilmektedir (Priestley, 1996).

2.2 Sismik Yalıtım Kavramıyla İlgili Genel Bilgiler

Sismik yalıtım, yapının dinamik özellikleri üzerinde değişiklikler yaparak, deprem sırasında yapıda meydana gelecek tesirlerin azaltılmasını hedefleyen bir tekniktir. Yapı kütlelerinin büyük kısmını oluşturan köprü üstyapısı, fiziksel olarak köprü altyapısından (dolayısıyla yer hareketinin yatay bileşenlerinden) ayrılarak, deprem kaynaklı atalet kuvvetlerinde önemli düzeyde azalma sağlanmaktadır. Burada elbette altyapı ve üstyapı tamamen birbirinden ayrılmamaktadır ancak aradaki yük iletimini sağlayan yalıtım araçlarının yatay rijitlikleri oldukça düşük olduğundan aktarılan yük bu yalıtım araçlarının yatay kapasiteleri ile sınırlı kalmaktadır. Bu sayede düşük bir ilave maliyetle veya ilave maliyet olmaksızın yeni tasarlanan bir köprüde daha iyi bir deprem performansı elde etmek mümkün olabilmektedir. Sismik olarak yetersiz olduğu tespit edilen köprülerde ise sismik yalıtım yapılarak, yapısal elemanların güçlendirilmesine gerek kalmadan köprülerin deprem performansında iyileşme sağlanabilmektedir.

Köprü üstyapısı ile altyapısının ayrılması, (başka bir deyişle köprünün sismik yalıtımı) iki yapının arasına yerleştirilen yatay rijitliği düşük mekanik yalıtım aygıtlarıyla gerçekleşmektedir. Bu yalıtım aygıtlarına sismik yalıtım mesnetleri veya izolatörleri adı verilir. Sismik yalıtımlı köprülerde; yer hareketi sırasında, izolatörlerde meydana gelen deformasyonlar altyapı elemanlarındakine kıyasla önemli ölçüde daha büyük olduğundan, köprü üstyapısından köprü altyapısına aktarılan atalet kuvvetleri büyük oranda azaltılmaktadır.



Şekil 2.1: Yalıtımlı ve yalıtımsız köprü deprem davranışı.

Sismik yalıtım en basit şekliyle rijitliğin azaltılması ile sağlanan periyot uzamasının yapının kütesine etkiyen atalet kuvvetlerinin düşürülmesi olarak tanımlanabilir. Sismik yalıtım araçları ayrıca sönüme de ciddi katkıda bulunmaktadır, periyot uzamasıyla birlikte bu araçların sağladığı sönüm de davranış spektrumu ordinatlarında düşüşlere neden olarak sistemin sismik taleplerini azaltmaktadır.

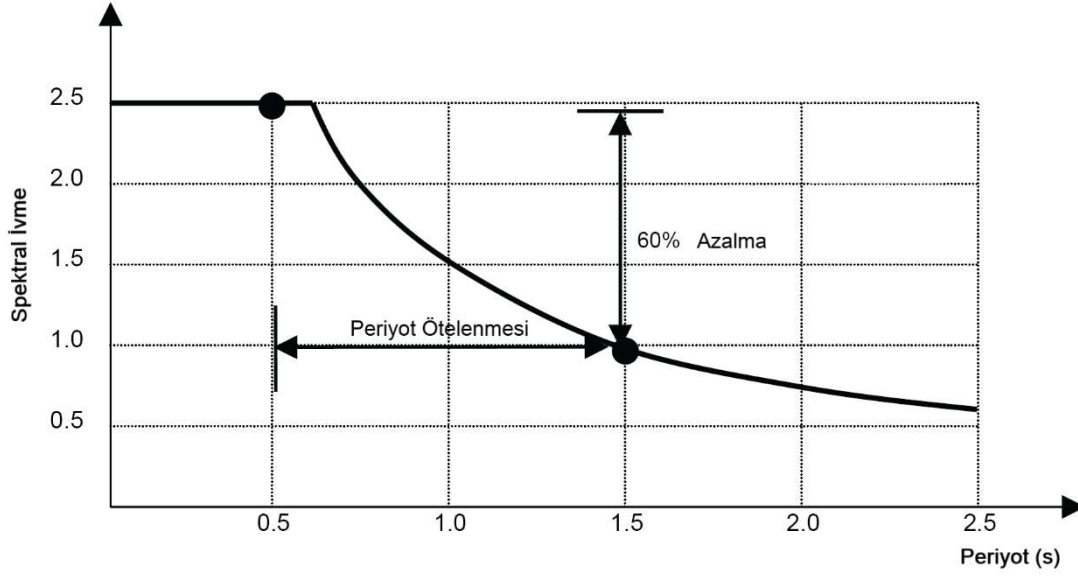
Sismik yalıtım araçlarının şu özelliklere sahip olması beklenmelidir:

- Yapının sahip olduğu periyodun uzatılmasını sağlayacak bir fleksibiliteye sahip olması,
- Köprü altyapısı ile üstyapısı arasındaki bağıl deplasmanları sınırlamak için enerji yitimi sağlaması,
- Servis durumunda oluşacak yatay ve düşey yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilecek dayanıma sahip olması.

FLEKSİBİLİTE (ESNEKLİK)

Sismik yalıtım araçlarının düşük rijitlikleri, köprülerin hâkim periyotlarını değiştirerek, yalıtımlı köprülerin yalıtımsız köprülere göre daha uzun periyoda sahip olmasını sağlar. Sismik yalıtımla uzayan periyodun, yer hareketinin baskın olduğu periyotlardan önemli ölçüde daha büyük olması, köprüde oluşan tepkileri azaltmaktadır.

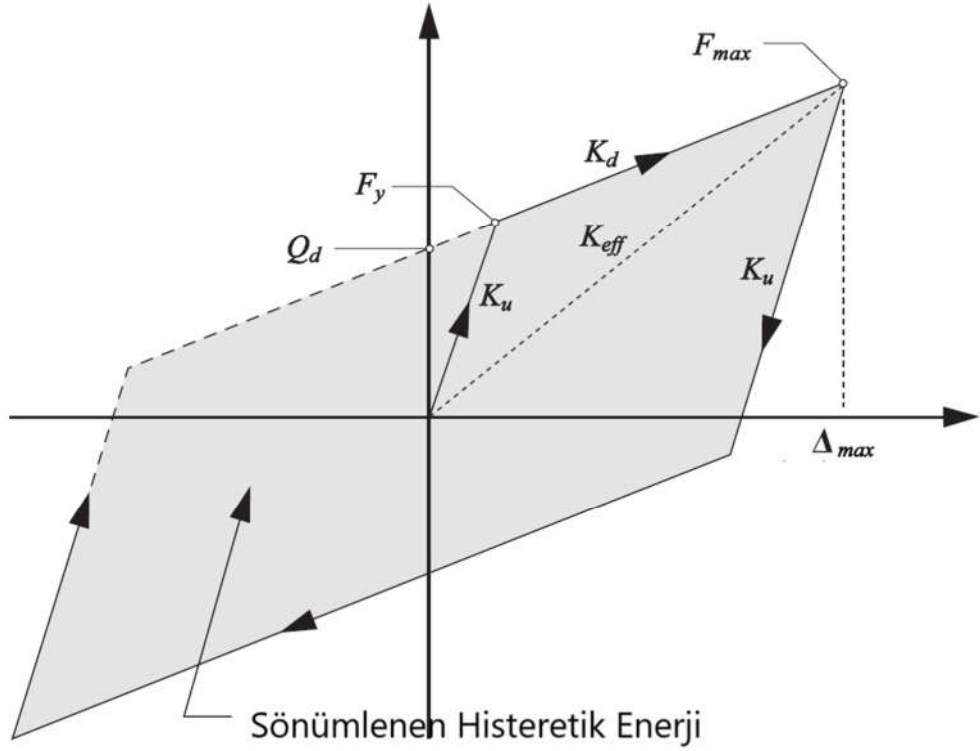
$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.1)$$



Şekil 2.2: Rijitlik değişimine bağlı periyot ötelenmesi (Buckle vd., 2006).

ENERJİ YİTİMİ

Sismik yalıtım araçlarının düşük rijitliği, sismik tepkileri azaltmakta ancak üstyapıda daha büyük yer değiştirmeler meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple daha büyük genişleme derzleri ve oturma mesafeleri gerekli hale gelmektedir. Üstyapıda oluşacak deplasmanları sınırlamak için de, yalıtım araçlarının bir tür enerji sönmüleme mekanizmasına sahip olmaktadır. Bu mekanizmalar genellikle histeretik bir davranışa sahiptir ancak sürtünme ile enerji yitimi sağlayan sistemler de mevcuttur.



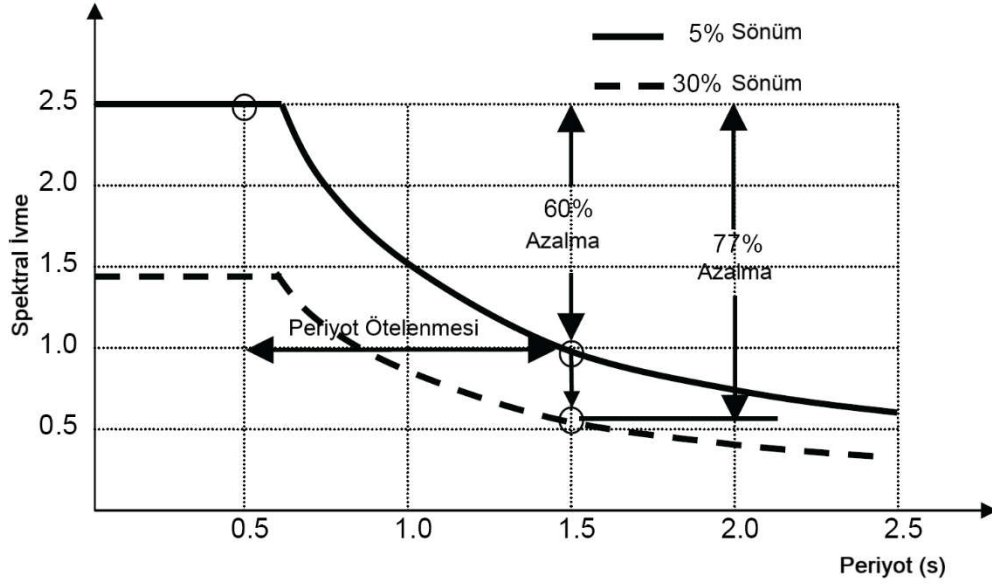
Şekil 2.3: İdelalize edilmiş yalıtım aracı davranış modeli (AASHTO GSID, 1999).

Yalıtım cihazlarının inelastik davranışı için pek çok malzeme modeli mevcuttur, bu malzeme modelleri pek çok yapısal analiz yazılımının içerisinde de bulunmaktadır. Ancak zaman-tanım alanında doğrusal olmayan çözümler, tasarım sürecinde pratik olarak pek kullanışlı değildir. Bu sebeple yalıtım araçlarının efektif elastik rijitliklerinin ve eşdeğer viskoz sönümlerinin elde edilerek analizlerde kullanıldığı basitleştirilmiş yöntemler kullanılmaktadır.

Eşdeğer viskoz sönüm oranı, β_e , hidrolik viskoz sönümleyicilerde ve histeretik sönümleyicilerde aynı şekilde hesaplanır. Kuvvet-yer değiştirme grafiğinde, bir çevrim içerisinde kalan alan sönümlenen histeretik enerjiyi, aşağıdaki formül ise eşdeğer viskoz sönüm oranını vermektedir.

$$\beta_e = \frac{\text{Sönümlenen Histeretik Enerji}}{2\pi k_e D_{maks}^2} \quad (2.2)$$

Sönüm artışıyla birlikte yer değiştirmelerde olduğu geldiği gibi atalet kuvvetlerinde de azalma meydana gelmektedir.



Şekil 2.4: Sismik yalıtımın sistem davranışına etkisi, periyot uzaması ve sönüm (Constantinou vd., 2011).

Sismik yalıtım araçlarının yatay rijitlikleri rüzgar, fren yükü gibi işletme yüklerini köprü kullanımını durdurmuyacak şekilde taşıyacak seviyede olması gerekmektedir. Genel yaklaşım işletme yükleri belirli rijitliğe sahip olan yalıtım araçlarının sismik yükler altında akma sınırını aşarak sismik yalıtım için gerekli fleksibiliteye ulaşmasını sağlamaktadır. Sürtünme tipi mesnetlerde ise sürtünme kuvvetinin işletme yüklerinin üzerinde kalması ve sismik yükler altında sürtünme kuvvetinin yenilerek üst yapının yalıtım aracı üzerinde hareket edebilmesi hedeflenir.

3. SİSMİK YALITIM ARAÇLARI

Sismik yalıtım araçları elastomer deprem yalıtım mesnetleri ve kayma esaslı deprem yalıtım mesnetleri olarak iki ana gruba ayrılabilir. Bu mesnet türlerinin birbirlerine göre farklı konularda üstünlükleri bulunmaktadır. Aşağıda yalıtım araçlarının seçiminde göz önüne alınan bazı faktörler bulunmaktadır:

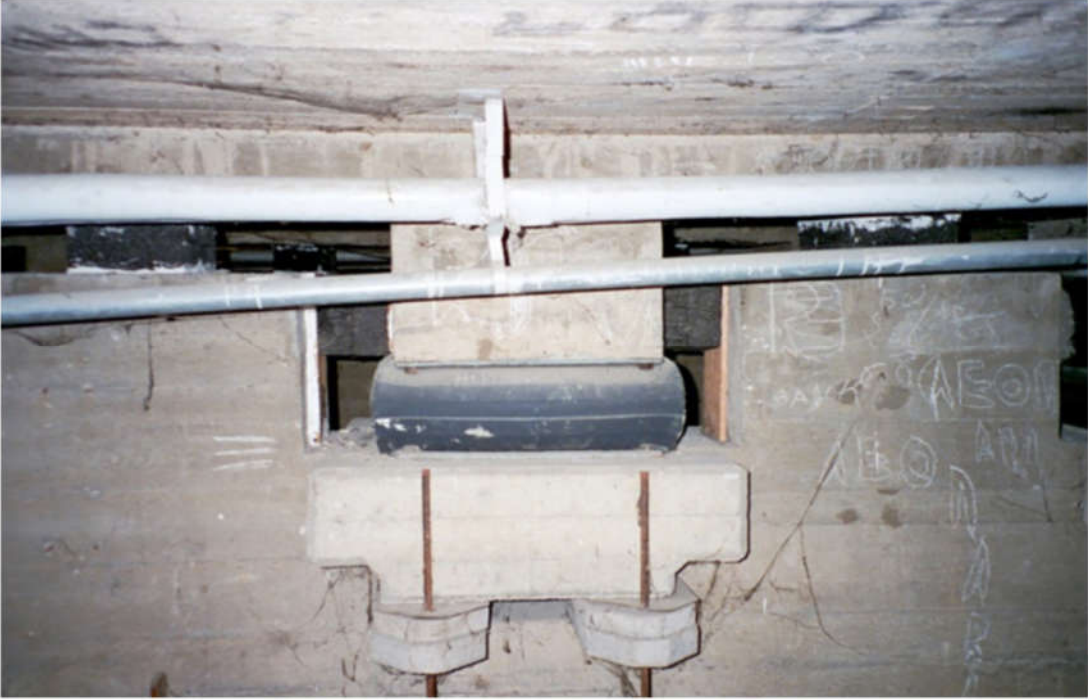
- Eksenel yük taşıma kapasiteleri (kayıcı sistemler bu bakımdan elastomer içerikli araçlara göre daha yüksek taşıma kapasitelerine sahiptir),
- İşletme açısında izin verilebilen deplasman limitleri (yüksek sönümlü sistemlerde deprem sırasında oluşan yer değiştirmeler daha küçüktür),
- Mesnetin yerleştirileceği alanın sınırlı olması (kayıcı mesnetler genel itibariyle daha küçük boyutlara sahip olmaktadır),
- İşletme yükleri altında köprünün kullanımını aksatmayacak yeterli hareket sınırlama kapasitesine sahip olma (rüzgar, fren yükü, genleşme, vs.),
- Kullanılan araçların güvenilirliği (malzeme özelliklerinin zamana ve saha şartlarından etkilenip etkilenmediği).

3.1 Elastomer Deprem Yalıtım Mesnetleri

Doğal kauçuktan yapılan mesnetler ilk olarak Makedonya-Üsküp'te Pestalozzi Okulu binasının deprem güvenliğini sağlamak için kullanılmıştır. Bu mesnetler geniş kauçuk bloklar halinde bulunmakta, içerisinde bugün kullanılan çelik plakalar bulunmadığından yapının ağırlığı altında %25 oranında sıkışmaktadır. Mesnetlerin düşey rijitliği yatay rijitliğinin yalnızca birkaç katıdır. Sistem 1982 yılında Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü tarafında sarsma tablasında test edilmiştir. Düşey rijitliğin düşük olması sebebiyle yatay yer hareketinin, düşey salınma (rocking) hareketleri de yarattığı görülmüştür. Bu binada rüzgar veya hareketli yüklerden kaynaklanacak yatay hareketleri önlemek için cam köpüğü tuğlalar da kullanılmıştır. Yapı hala kullanılmakta ve zaman zaman gözlenmektedir (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 3.1: Pestalozzi Okulu'nda kullanılan donatısız kauçuk mesnet (Kelly ve Lee, 2018).



Şekil 3.2: Pestalozzi Okulu'nda yalıtım sistemi, kauçuk mesnet ve cam köpüğü tuğlalar (Kelly ve Lee, 2018).

Günümüzde kullanılan elastomer deprem yalıtım mesnetleri, kükürtleme ve basınç altında fırınlama yöntemiyle birbirine yapışan çelik plakalar ve kauçuk malzemeden meydana gelmektedir.

Mesnetlerin çelik plakalarla güçlendirilmesi ile stabilite sorunlarının önüne geçilmiş, mesnetlerin düşey rijitlikleri arttırılmıştır. Bu sayede düşey yükleri güvenli bir şekilde taşıyan mesnetlerin yatayda fleksibilitesinin yüksek olması sağlanmıştır.

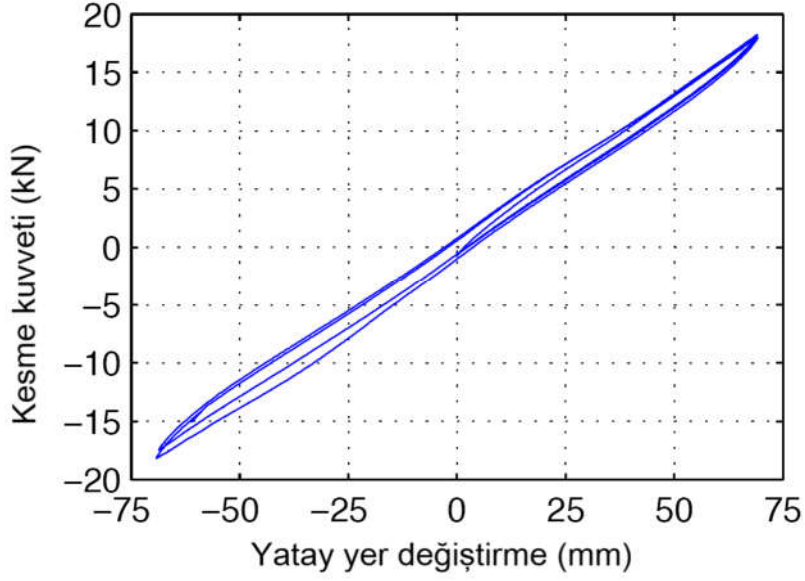


Şekil 3.3: Elastomer deprem yalıtım mesnedi (Arfen, 2019).

Elastomer deprem yalıtım mesnetleri; düşük sönümlü, yüksek sönümlü ve kurşun çekirdekli olmak üzere üç alt başlığa ayrılabilir.

3.1.1 Düşük sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetleri

Düşük sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetlerinde (low damping rubber bearings-LDRB) çelik plakalarla elastomer malzeme birlikte kullanılmaktadır. Mesnet kayma şekil değiştirme limitlerine ulaştığı durumda, eşdeğer sönüm oranını (ξ) %10'un altında kalıyorsa bu mesnetler düşük sönümlü kabul edilir (Constantinou ve diğ., 2017). Yaygın olarak kullanılan düşük sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetlerinde eşdeğer sönüm oranı %2 - %3 mertebelerinde değişmektedir (Warn ve Ryan, 2012).



Şekil 3.4: Düşük sönümlü deprem yalıtım mesnedi histeretik kuvvet- yer değiştirme eğrisi

(Warn ve Ryan, 2012).

Düşük sönümlü deprem yalıtım mesnetleri; kolayca üretilebilir, basit modellenebilir ve mekaniksel davranışları çevre şartlarından az etkilenir. Bu elemanların dezavantajı ise sönüm oranlarının düşük olması sebebiyle deplasman kontrolünü sağlamak için ilave sönümleyicilere ihtiyaç duyabilmeleridir (Aldemir ve Aydın, 2005). Köprülerde yaygın uygulama olarak üstyapı deplasmanı deprem takozlarıyla sınırlanır. Mesnetler üstyapı ile deprem takozları arasındaki mesafe kadar deformasyon yaparak yalıtım görevlerini yerine getirirler ancak bu değerin üzerinde bir deprem talebi oluştuğu durumda doğrusal çözüme uygun olmayan bir durum yaratılmış olur.

Düşük sönümlü deprem yalıtım mesnetlerinin yatay rijitlikleri basitçe denklem 3.1'deki gibi kabul edilebilir.

Burada,

G Elastomer yalıtım mesnedine ait kayma modülü

A_b Elastomer malzemenin çelik plakalar arasında kalan plan alanı

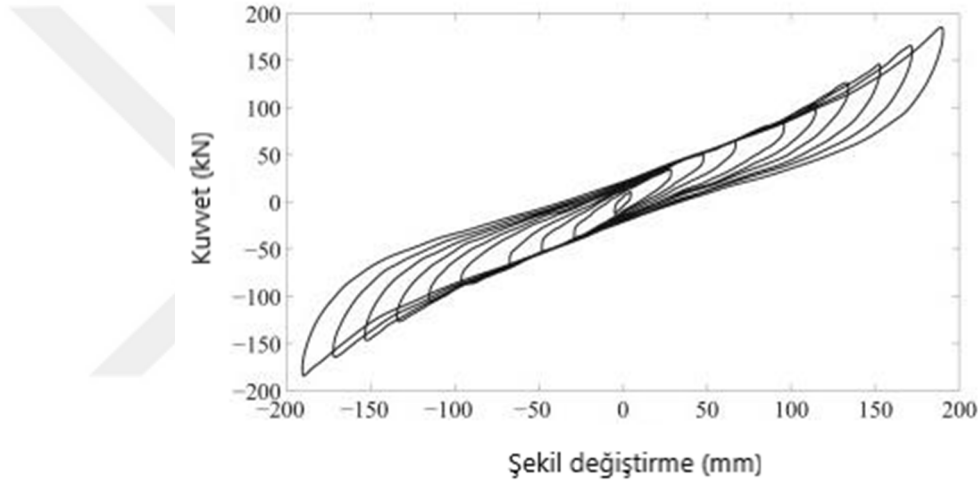
T_E Toplam elastomer katman kalınlığı

$$K_h = \frac{G \cdot A_b}{T_E} \quad (3.1)$$

3.1.2 Yüksek sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetleri

Yüksek sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetleri (high damping rubber bearings-HDRB), elastomer imalatı sırasında ilave edilen yüksek saflıkta karbon, petrol veya reçine ve başka malzemeler sayesinde daha yüksek sönüm değerlerine sahip olabilmektedir (Naeim ve Kelly, 1999). Bu mesnetler de yine düşük sönümlü mesnetlerde olduğu gibi çelik plakalarla elastomer katmanların yapıştirılmasıyla imal edilmektedir. Kayma deformasyonu %100'e eriştiğindeki eşdeğer sönüm oranları %10-%20 arasında değişkenlik göstermektedir.

Yüksek sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetlerinde sönüm ne histeretik ne de viskozdur, ikisi arasında karma bir davranış modeline sahiptir (Naeim ve Kelly, 1999).



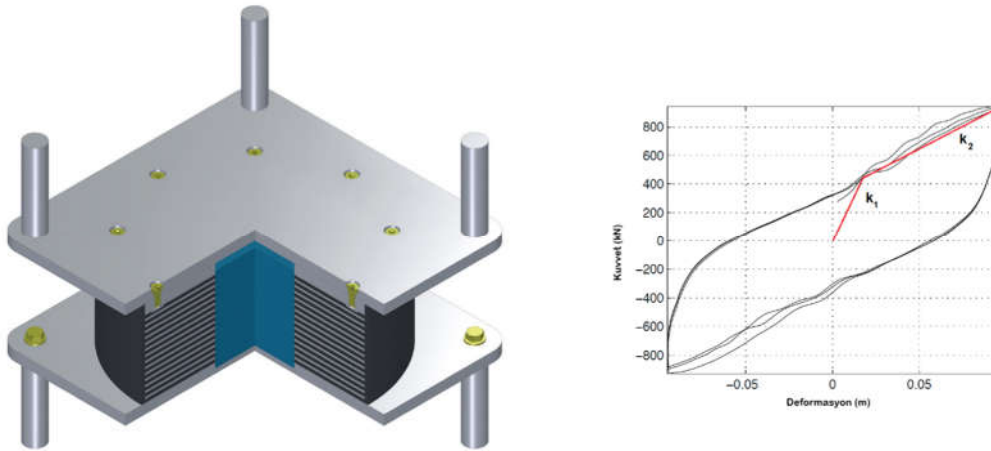
Şekil 3.5: Yüksek sönümlü deprem yalıtım mesnedi histeretik kuvvet- yer değişirme eğrisi (Naeim ve Kelly, 1999).

Bu mesnetler, ilave bir sönümleyiciye ihtiyaç duymadan deplasmanları sınırlayabildikleri gibi, trafik veya yeraltı raylı sistemlerinin yaratabileceği yüksek frekanslı düşey doğrultulu titreşimleri de filtreleyebilmektedir (Naeim ve Kelly, 1999).

Yüksek sönümlü elastomer deprem yalıtım mesnetlerinin modellenmesinde, mesnedin doğrusal olmayan rijitliği ve histeretik ile viskoz arasında kalan sönümü dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla eşdeğer doğrusal hesapta kabul edilecek etkin rijitlik ve etkin sönüm değerleri uygun yükleme hızlarına göre elde edilen değerler olmalı, bu değerler mesnet üreticisi tarafından verilmelidir.

3.1.3 Kurşun çekirdekli deprem yalıtım mesnetleri

Kurşun çekirdekli mesnetler (lead rubber bearing- LRB) ilk olarak Yeni Zelanda'da (1975) üretilmiş, yaygın olarak Yeni Zelanda, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılmıştır. Yapısal olarak düşük sönümlü yalıtım mesnetlerine oldukça benzemektedir. Çelik plakalar arasında elastomer katmanları katmanları bulunmaktadır. Düşük sönümlü yalıtım mesnetlerinden farklı olarak bu mesnetlerin ortasına yerleştirilmiş silindirik şekilde kurşun malzeme yer almaktadır. Kurşun çekirdekli mesnet içerisine boşluksuz sıkı bir şekilde yerleştirilmektedir (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 3.6: Kurşun çekirdekli deprem yalıtım mesnedi ve kuvvet deformasyon çevrim diyagramı (Tensa, 2015).

Kurşun çekirdekli mesnetler, kurşunun akma sınırına ulaşana kadar lineer davranış göstermektedir. Bu sayede servis durumunda oluşabilecek yanıl yükler elastik bir şekilde karşılanmaktadır. Deprem durumunda ise kurşun çekirdek akma limitine ulaşmakta bu sayede sistemde enerji yitimi oluşturulmaktadır. Kurşun çekirdekli mesnetler oldukça yüksek sönüm oranlarına ulaşabildikleri ve servis durumu için yeterli başlangıç rijitliklerine sahip oldukları için yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.2 Kayma Esaslı Deprem Yalıtım Mesnetleri

Tamamen kayıcı sistem kullanarak sismik yalıtım sağlamak en kolay ve en eski yalıtım metodudur. Yöntem 1909 yılında İngiltere'de bir tıp doktoru olan Johannes Avetican Calantarients tarafından bulunmuştur.

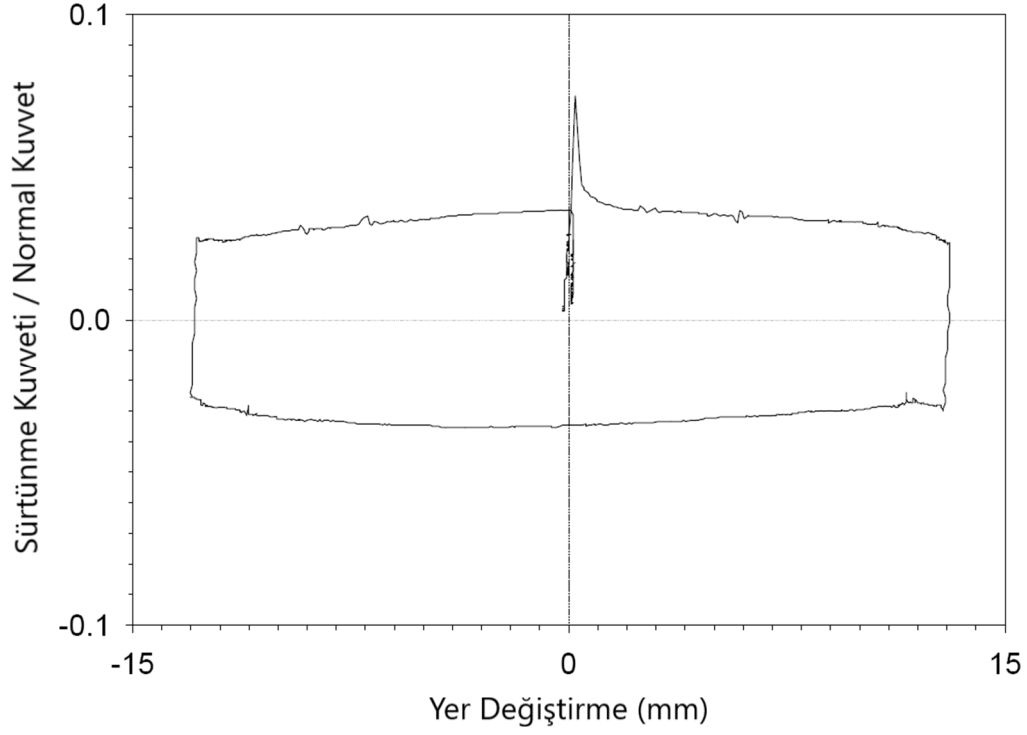
Kendisi yapı temeliyle zemin arasına talk ile bir ara yüzey oluşturulmasını bu sayede deprem sırasında yapıda oluşacak atalet kuvvetlerinin azalmasını amaçlamıştır (Naeim ve Kelly, 1999).

Günümüzdeki kayıcı sistemlerde ise düz veya eğri kayma yüzeylerine sahip kayıcı mesnetler kullanılmaktadır. Kayıcı yüzeyler ise genellikle paslanmaz çelik üzerine politetrafloroetilen (PTFE) malzeme kaplanmasıyla elde edilmektedir (Warn ve Ryan, 2012).

3.2.1 Düz yüzeyli kayıcı deprem yalıtım mesnetleri

Düz yüzeyli kayıcı mesnetlerde yanal yüklere karşı koyan kuvvet, kayıcı mesnedin sahip olduğu sürtünme kuvvetidir. Bu kuvvet mesnete etkiyen düşey kuvvet ile sürtünme katsayısının çarpımından daha büyük olamayacağından, yalıtım sistemi tarafından aktarılacak kuvvet sınırlandırılmış olmaktadır. Çevrimsel yanal yükler altında düz yüzeyli kayıcı mesnetlerin histeresis eğrileri ideal elastoplastik davranış gösterdiği söylenebilir (Kelly, 2001). Ancak kayıcı mesnetler üzerinde yapılan deneyler statik durumdaki sürtünme kuvveti ile hareket halindeki sürtünme kuvvetinin farklılık gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Şekil 3.7 de görüldüğü üzere hareketin başlama noktasındaki sürtünme katsayısı oldukça yüksektir. Hareket devam ederken oluşan çevrimde ise sürtünme katsayısı belirli sabit bir değere yaklaşmaktadır. Bu sebeple modellemede kullanılacak sürtünme katsayısı dinamik davranışa uygun olmalıdır (Constantinou vd., 2007). Sürtünme katsayısı sıcaklık, hareket hızı, temas yüzeyi gibi parametrelere göre değişkenlik gösterir.

Düz yüzeyli kayıcı mesnetlerde hareketi geri döndürecek bir mekanizma bulunmadığından genellikle ilave aygıtlarla beraber kullanılır. Bu ilave aygıtlar elastomer mesnet, sönümleyici vb olabilir. Bazı köprülerde ayakların bir kısmı serbest bırakılıp bir kısmı tutularak hareketin geri döndürülmesi yapının rijitliği ile sağlanabilmektedir. Şekil 3.8 ve 3.9'da verilen köprüde orta ayaklardaki bazı mesnetler orta ayakla sabitlenmiş, kenar ayakta ise hidrolik viskoz damperler kullanılarak yer değiştirme sınırlandırılmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.7: Teflon (PTFE) paslanmaz çelik mesnet yüzeyleri arası tipik sürtünme kuvveti-yer değiştirme çevrimi, Basınç=20.7 MPa, En Yüksek Hız= 2.5 mm/sn (Constantinou vd., 2007).



Şekil 3.8: Kuzey Marmara Otoyolu V17 Viyadüğüne ait kayıcı mesnet.

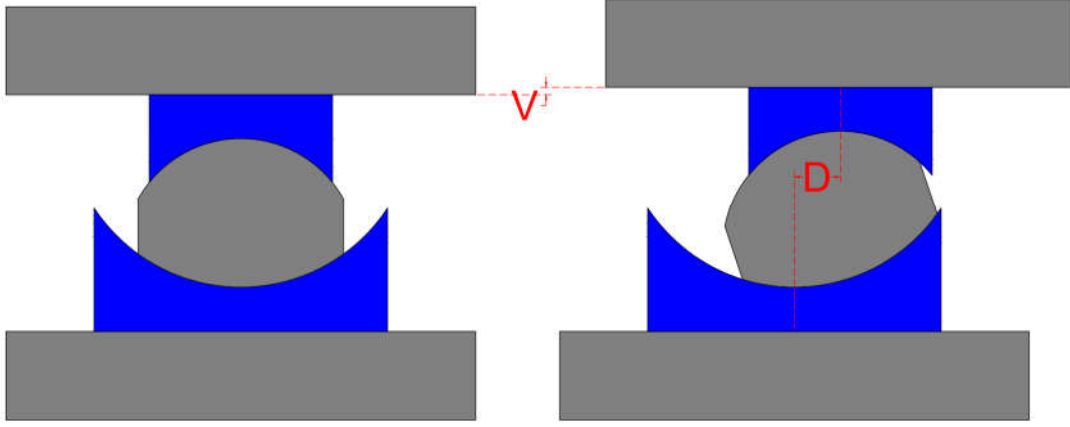


Şekil 3.9: Kuzey Marmara Otoyolu V17 Viyadüğüne ait kenarayak ve üstyapı arasında bulunan hidrolik viskoz damperler.

3.2.2 Eğri yüzeyli kayıcı deprem yalıtım mesnetleri

Kayıcı mesnetlerde deprem sonrası gerçekleşen deplasmanların geri döndürülmesi önemli bir sorundur. Mesnetleri depremden sonra eski konumlarına getirebilmek için ilave yayların veya elastomer bir çekirdeğin bulunduğu çeşitli mesnet tipleri geliştirilmiştir. FPS (friction pendulum system) adı verilen sürtümlü sarkaç sistemlerde ise ilave bir araç gerektirmeden nihai deplasmanı geri döndürülebilmektedir. Sürtümlü sarkaç sistemler, konkav yüzeyleri özel kaygan malzeme ile kaplanmış paslanmaz çelik elemanlar arasında serbest halde bulunan kayıcı elemandan oluşmaktadır. Sistem yatayda hareket gerçekleştirildiğinde mesnet düşeyde yükselmektedir. Yatay hareketin oluşmasını sağlayan kuvvet ortadan kalktığında ise sistem üzerine etkiyen düşey yük sarkaç sistemini eski konumuna geri döndürmektedir. Sürtümlü sarkaç sistemde mesnedin etkili rijitliği ve sistemin periyodu konkav yüzeylerin çapı tarafından kontrol edilmektedir. Yüzeyler arasındaki sürtünme ile de sönüm sağlanmaktadır (Naeim ve Kelly, 1999).

Sürtümlü sarkaç mesnetler beraber hareket eden sarkaç sayısına bağlı olarak multi-lineer olarak modellenebilirler.



Şekil 3.10: Sürtünmeli sarkaç sistem hareketi.



Şekil 3.11: Sürtünmeli sarkaç mesnet (Mageba, 2019).

4. AASHTO GSİD İÇERİSİNDE ÖNERİLEN ANALİZ YÖNTEMLERİ

AASHTO GSİD (Sismik Yalıtım Rehber Teknik Şartnamesi) içerisinde sismik yalıtım analizi için dört ayrı prosedür önerilmektedir:

Yöntem 1: basitleştirilmiş yöntem

Yöntem 2: tek modlu spektral yöntem

Yöntem 3: çok modlu spektral yöntem

Yöntem 4: zaman tanım alanında çözüm yöntemi

Çözüm yöntemi, AASHTO LRFD Köprü Tasarım Şartnamesi 4.7.4.3.1’de tanımlanan şekilde belirlenecektir. Buna göre köprünün bulunduğu bölgenin depremselliği, köprünün kurpta olması, açıklık adedi, köprünün kullanım önemi gibi faktörler önem taşımaktadır.

Yalıtımlı sistemlerin doğru bir şekilde analiz edebilmek için yalıtım araçlarının elastik olmayan davranışlarını ve değişken sönüm oranlarını dikkate almak gerekmektedir. Yalıtım araçlarının (mesnetler) elastik ötesi davranışları bilineer olarak modellenemez, Ancak yük çevrimi sırasında yalıtım araçlarının mekanik özelliklerinde değişimler olması kaçınılmazdır. Bu sebeple bilineer davranışın modellenmesi yalıtım araçlarının sahip olduğu mekanik özelliklerin alt ve üst sınırlarının ortalaması şeklinde düşünülebilir.

Doğrusal çözüm yapılacağı durumlarda ise efektif rijitliklere göre hesap yapılması gerekmektedir. Ancak analizin başında oluşacak deplasman değerleri bilinmediği için efektif rijitliğe ulaşmak için ardışık çözümler yapılması gerekmektedir.

4.1 Basitleştirilmiş Yöntem

Basitleştirilmiş yöntem; verevliği düşük, kurpta olmayan veya kurp yarı çapı yüksek olan, tek serbestlik dereceli olarak değerlendirilebilecek basitlikte, başka bir deyişle birinci titreşim periyodunun etkin olduğu köprülerde uygulanabilmektedir.

Analiz iki doğrultuda bağımsız olarak gerçekleştirilerek sonuçlar uygun bir şekilde birleştirilir. Viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı sistemlerde ise bu yöntemin kullanılması uygun olmayacaktır.

Basitleştirilmiş yöntemi ön boyutlandırma için kullanmak uzun süren karmaşık çözümleri tekrarlanan önüne geçerek tasarım sürecini oldukça hızlandırmaktadır.

Bu yöntemde eşdeğer statik deprem yükü;

$$F = C_{smd} \cdot W \quad (4.1)$$

$$C_{smd} = \frac{C_{sm}}{B_L} = \frac{S_{D1}}{T_{eff} \cdot B_L} < \frac{S_{DS}}{B_L} \quad (4.2)$$

$$B_L = \left(\frac{\xi}{0.05} \right)^{0.3} \quad (4.3)$$

B_L = uzun periyotlar için sönüm katsayısı

ξ = eşdeğer viskoz sönüm oranı

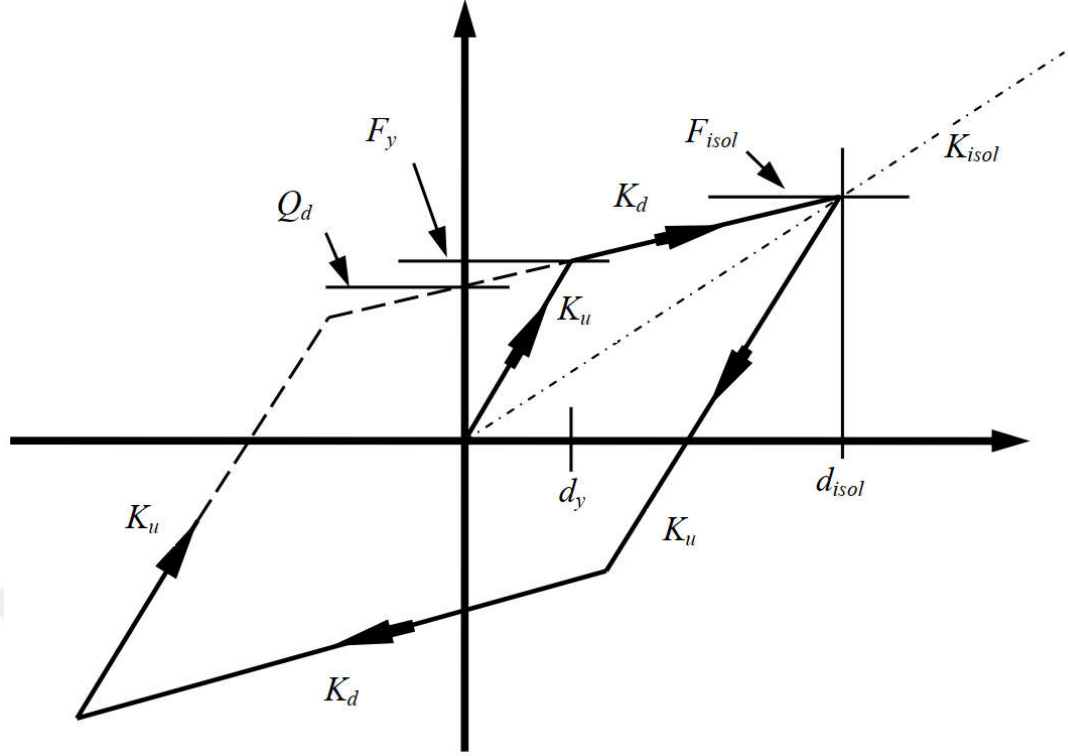
W = yalıtım sistemi üzerine etkiyen toplam düşey yük

Eşdeğer viskoz sönüm oranı, ξ , yalıtım sistemi tarafından sönümlenen enerjiye bağlı olarak hesaplanabilir. Sistemin karakteristik özellikleri daha sonra yapılan testlerle de tahkik edilmelidir.

Eşdeğer viskoz sönüm aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\xi = \frac{\text{her çevrimde meydana gelen enerji yitimi}}{2 \cdot \pi \cdot \sum(k_{eff} d_i^2)} \quad (4.4)$$

Burada k_{eff} , yalıtım cihazının efektif rijitliği, d_i , ise yalıtım cihazının yaptığı deplasmanı göstermektedir. Enerji yitimi ise yalıtım cihazı hysteresis eğrisi içerisinde kalan alandan elde edilebilir.



Şekil 4.1: İdelalize edilmiş yalıtım aracı davranış modeli (AASHTO GSID, 1999). Sönüm katsayısı B_L 'nin hesabında %30'u aşan sönümler için maksimum 1.7 değeri kabul edilir. Gerçekten viskoz sönüme sahip sistemler için sönüm oranı %50'yi aştığında is $B_L = 2.0$ alınabilir.

Sistem deplasmanı, davranış spektrumundan faydalanarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$d = \frac{\left(\frac{T_{eff}^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot g \cdot \frac{S_{D1}}{T_{eff}}\right)}{B_L} = \left(\frac{g}{4 \cdot \pi^2}\right) \left(\frac{S_{D1} \cdot T_{eff}}{B_L}\right) \quad (4.5)$$

Yukarıdaki denklem davranış spektrumun uzun periyotları için geçerlidir.

Sistemin efektif periyodu aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$T_{eff} = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} \cdot g}} \quad (4.6)$$

Burada K_{eff} sistemin sahip olduğu toplam rijitliği ifade eder. Kenar altyapı rijitlikleri ile mesnet rijitlikleri seri bağlı yaylar olarak düşünülerek toplam rijitlik değerleri elde edilir.

$$K_{eff} = \frac{k_{sub} \cdot k_{eff}}{k_{sub} - k_{eff}} \quad (4.7)$$

Bilineer idealize malzeme modeline göre eşdeğer viskoz sönüm oranı aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$\xi = \frac{2 \cdot \sum_j [Q_{d,j} \cdot (d_{isol,j} - d_{y,j})]}{\pi \cdot \sum_j [K_{eff,j} (d_{isol,j} + d_{sub,j})^2]} \quad (4.8)$$

4.2 Tek Modlu Spektral Yöntem

Tek modlu spektral yöntem AASHTO LRFD Köprü Tasarım Şartnamesi 4.7.4.3.2b’de tanımlandığı şekilde uygulanmaktadır. Burada basitleştirilmiş yöntemde yapılan parametrik çözümler yerine sistemin statik olarak çözümünden elde edilen verilere dayanan ve sistemin baskın periyodunun elde edilmesi sağlanmaktadır.

Bu yöntemde P_0 düzgün yayılı yükü altında $v_s(x)$ yer değiştirmeleri hesaplanır. Bu yer değiştirmeler birim köprü ağırlığı ile birlikte kullanılarak α , β , ve γ katsayıları elde edilir.

$$\alpha = \int v_s(x) dx \quad (4.9)$$

$$\beta = \int w(x) \cdot v_s(x) dx \quad (4.10)$$

$$\gamma = \int w(x) \cdot v_s^2(x) dx \quad (4.11)$$

Bu katsayılar kullanılarak köprünün titreşim periyodu buna bağlı olarak da köprü boyunca değişken olan $p_e(x)$ yük fonksiyonu elde edilir ve eşdeğer statik çözüm yapılır.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{p_0 \cdot g \cdot \alpha}} \quad (4.12)$$

$$p_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x) v_s(x) \quad (4.13)$$

4.3 Çok Modlu Spektral Yöntem

Bu yöntem AASHTO LRFD Köprü Tasarım Şartnamesi 4.7.4.3.3 de verilen şekilde uygulanır.

Ancak spektral çözüm için kullanılacak olan %5 sönüme göre hazırlanmış davranış spektrumu $0.8 T_{eff}$ değeri aşıldıktan sonra sönüm katsayısı ile azaltılır. Spektral çözüm bu davranış spektrumuyla yapılır. Buradaki amaç sönümün daha yüksek periyotlarda göz önüne almak, düşük periyotlarda ise yalıtım cihazlarının sağladığı sönümü ihmal etmektir.

Modal analizde yalıtım araçları etkili rijitlikleriyle tanımlanır. Hesapta kabul edilen etkili rijitlikler sistemin periyotlarını değiştirdiği için öngörülen yer değiştirmeler analizin ilk adımında elde edilemeyebilir. Bu sebeple basitleştirilmiş yöntemde elde edilen rijitlikler spektral çözümlerde de hedef yer değiştirmeleri sağlayacak şekilde güncellenmelidir. Hedef yer değiştirmeler yalıtım araçlarının rijitlikleri değiştirilerek elde edildikten sonra iterasyonlar sonlandırılır, son hesap adımındaki kesit tesirleri analizde kullanılabilir.

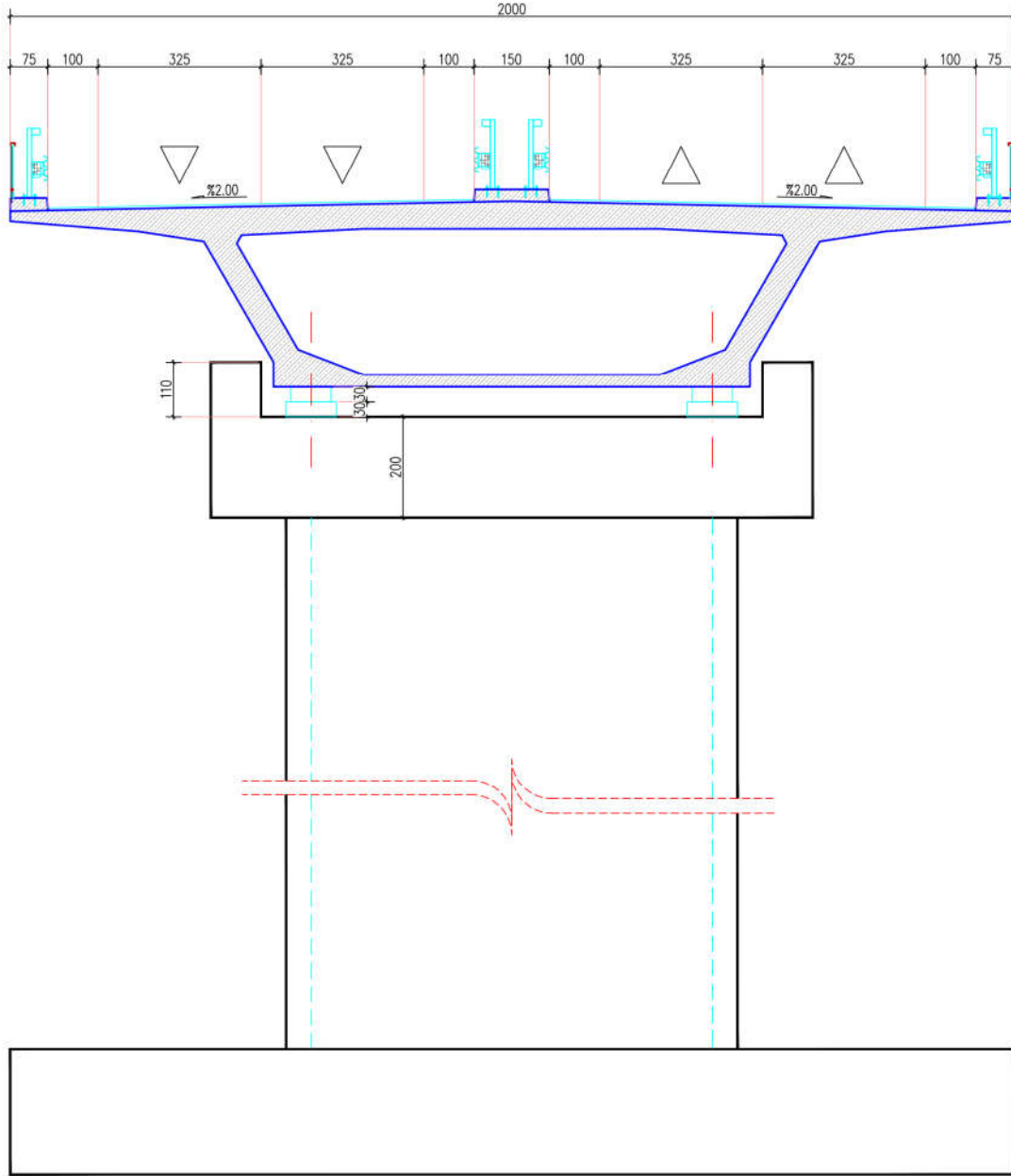
4.4 Zaman Tanım Alanında Çözüm Yöntemi

Zaman tanım alanında çözüm AASHTO LRFD Köprü Tasarım Şartnamesi 4.7.4.3.4'de tanımlandığı şekilde uygulanacaktır. Geometrik karmaşıklığa sahip, deprem tehlikesinin yüksek olduğu köprülerde özellikle bu yöntem önerilmektedir.

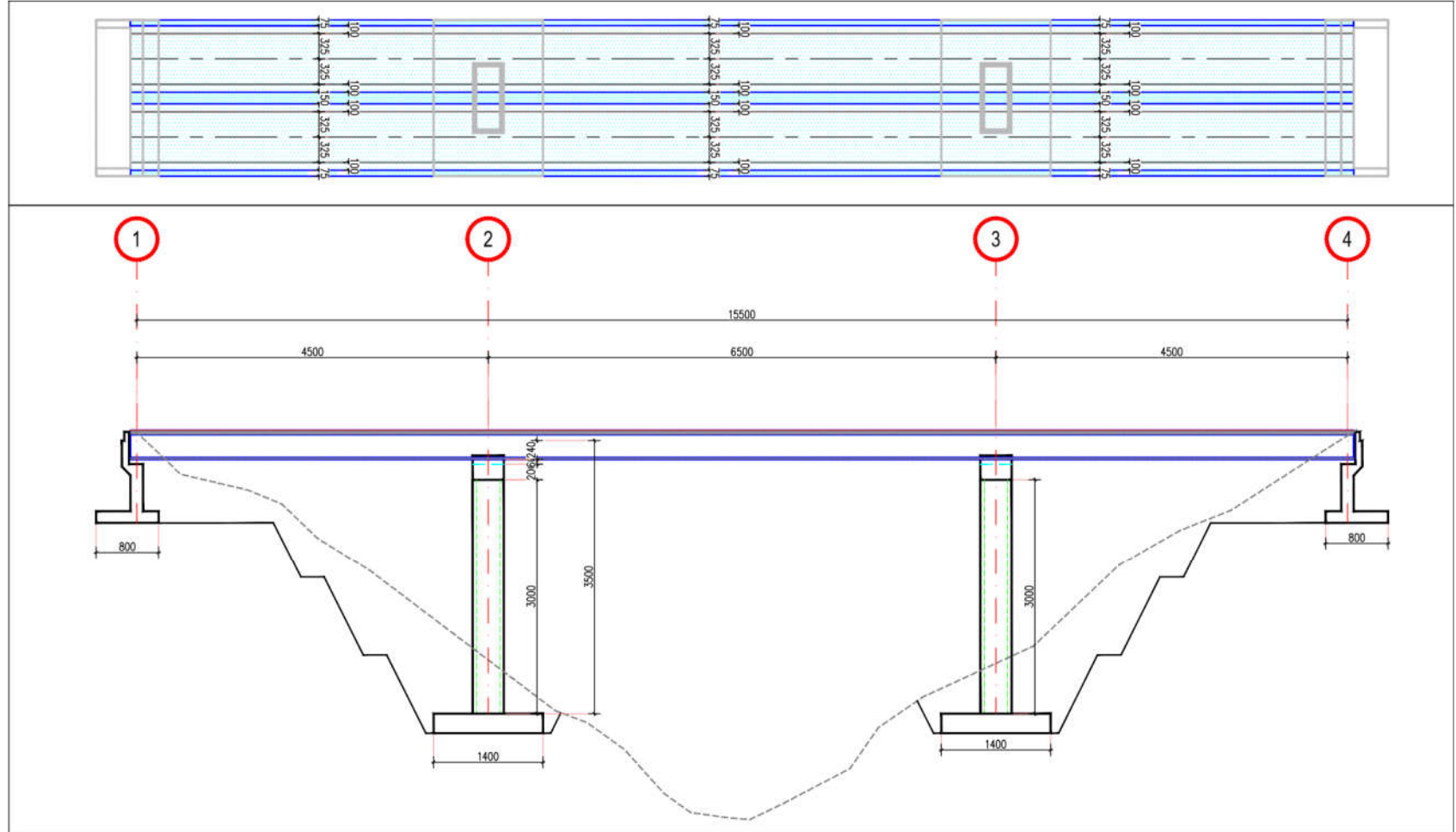
Zaman tanım alanında çözümde yalıtım araçları doğrusal olmayan özellikleriyle tanımlanır. Yalıtım araçlarına ait parametreler AASHTO GSID Bölüm 13'de bahsedilen testler sonucu elde edilir. Bu testler üretici firmalar tarafından gerçekleştirilirler.

Zaman tanım alanında çözüm için en az üç depreme ait bölgenin depremselliğine uygun kayıt takımları seçilmelidir. Her bir kayıt takımının birbirine dik bileşenleri eş zamanlı olarak modele uygulanmalıdır. Kullanılan kayıt takımı sayısı 3 ve 7 arasında ise elde edilen kesit tesiri ve yer değiştirmelerin maksimumları dikkate alınırken; 7 ve üzeri depreme ait kayıt takımı kullanıldığında ortalama değerler dikkate alınır.





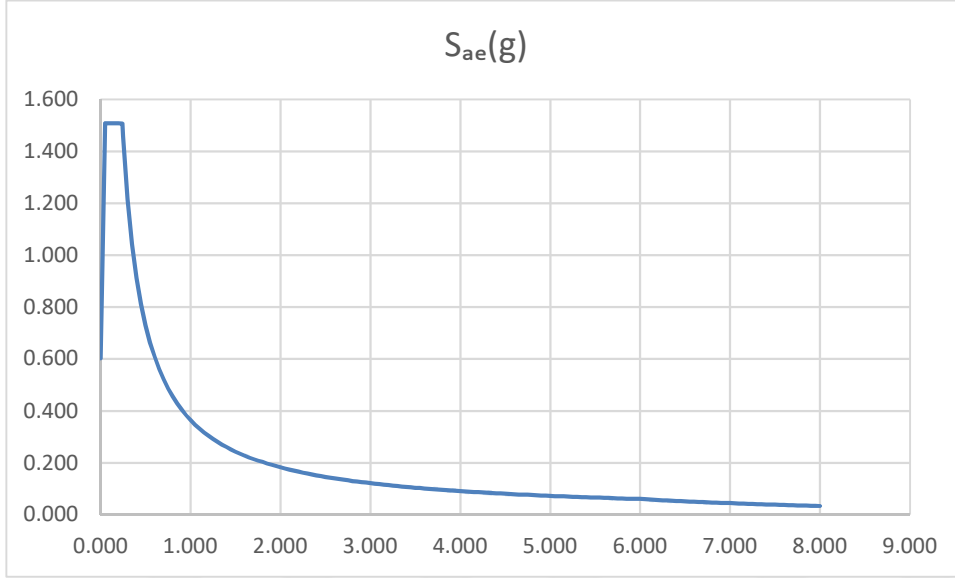
Şekil 5.3: Orta ayak enkesiti.



Şekil 5.4: Köprü plan profili.

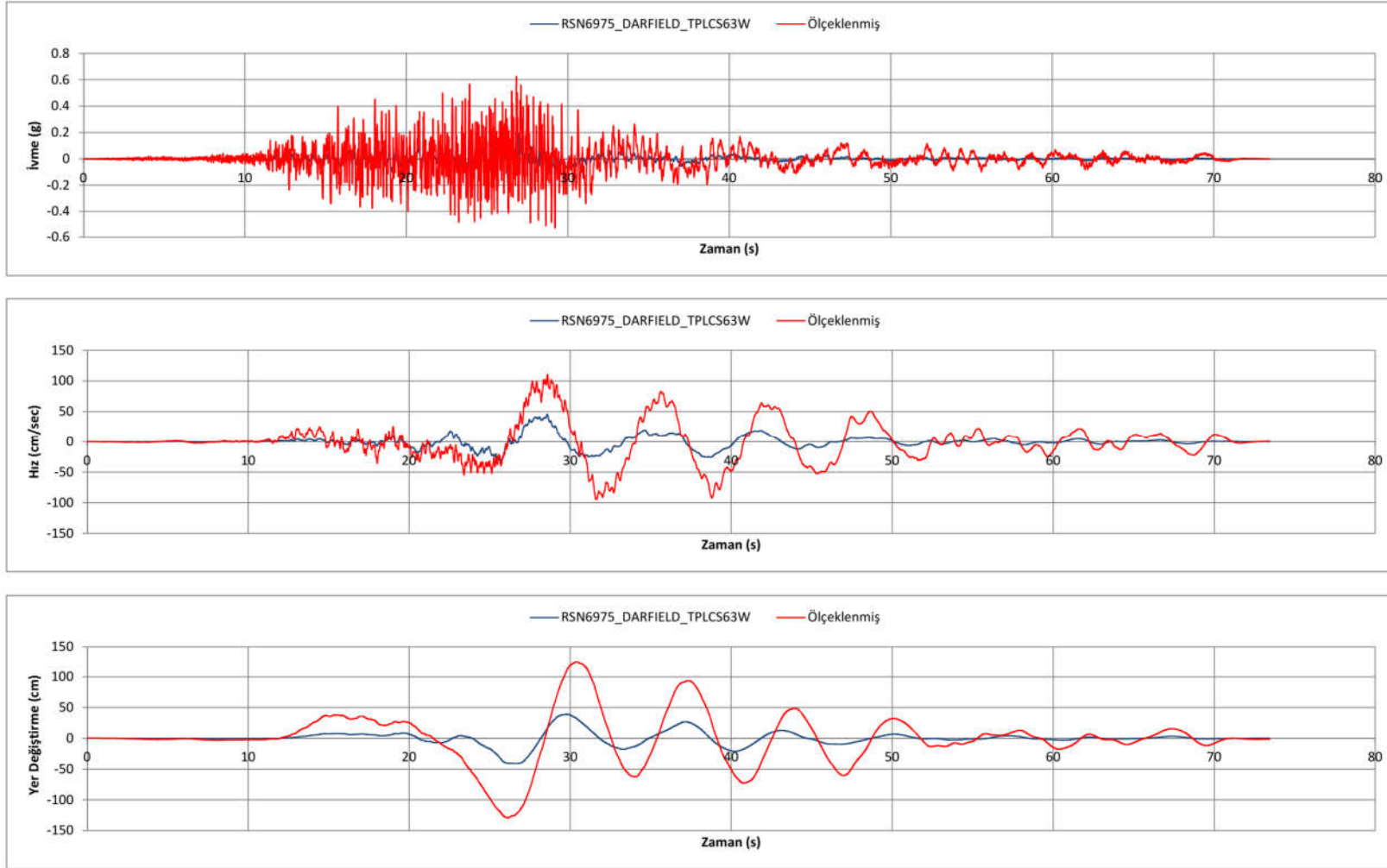
5.2 Yer Hareketinin Tanımlanması

Yer hareketi, Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndaki (TDTH) değerlere göre belirlenmiştir. DD-2 deprem düzeyi, ZB yerel zemin sınıfı için 40.7677° enlem ve 30.0168° boylamındaki değerlere göre davranış spektrumu oluşturulmuştur. Davranış spektrumu spektral çözümlerde ve ivme kayıtlarının ölçeklenmesinde kullanılmıştır.

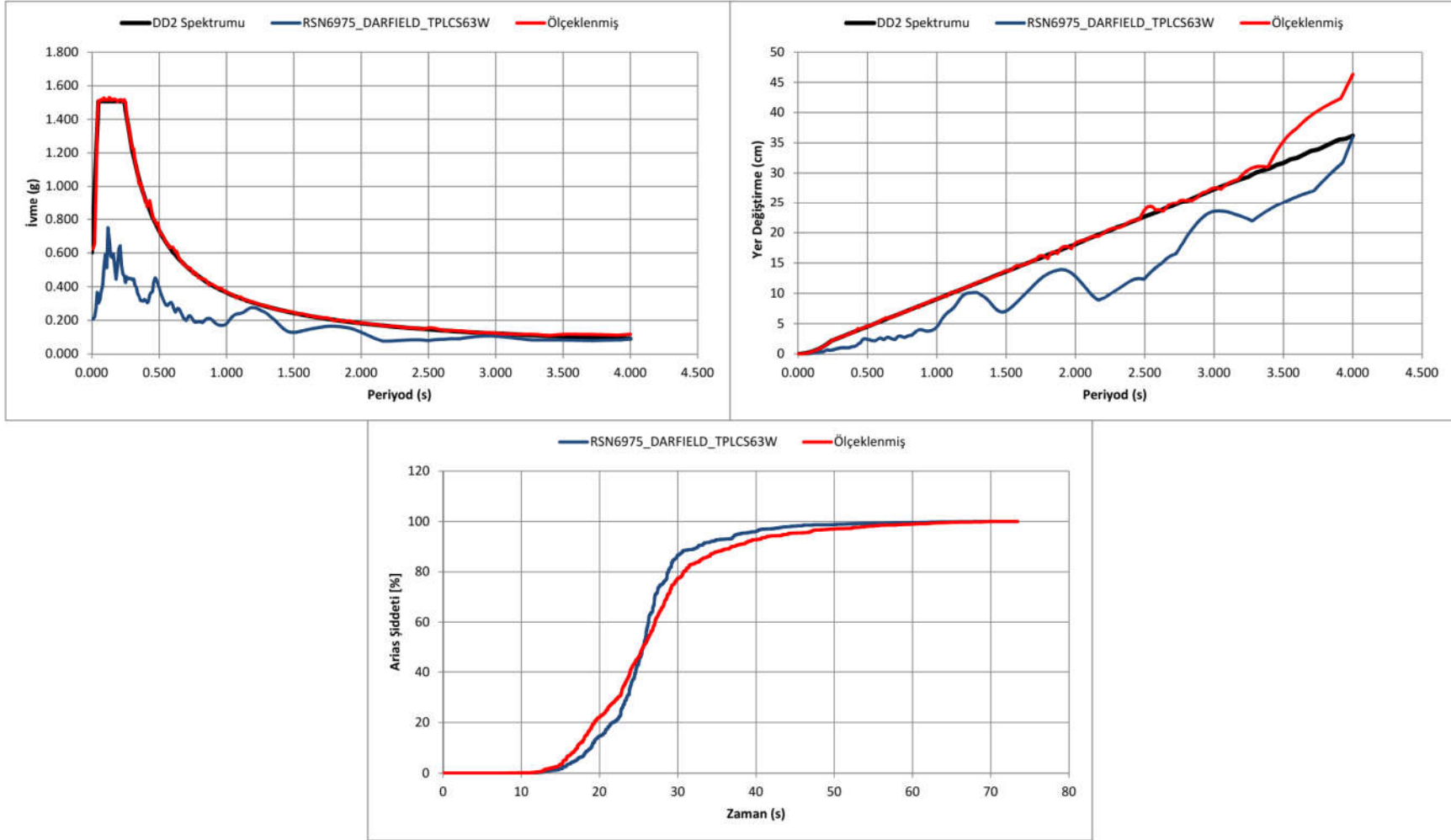


Şekil 5.5: TDTH Elastik ivme spektrumu.

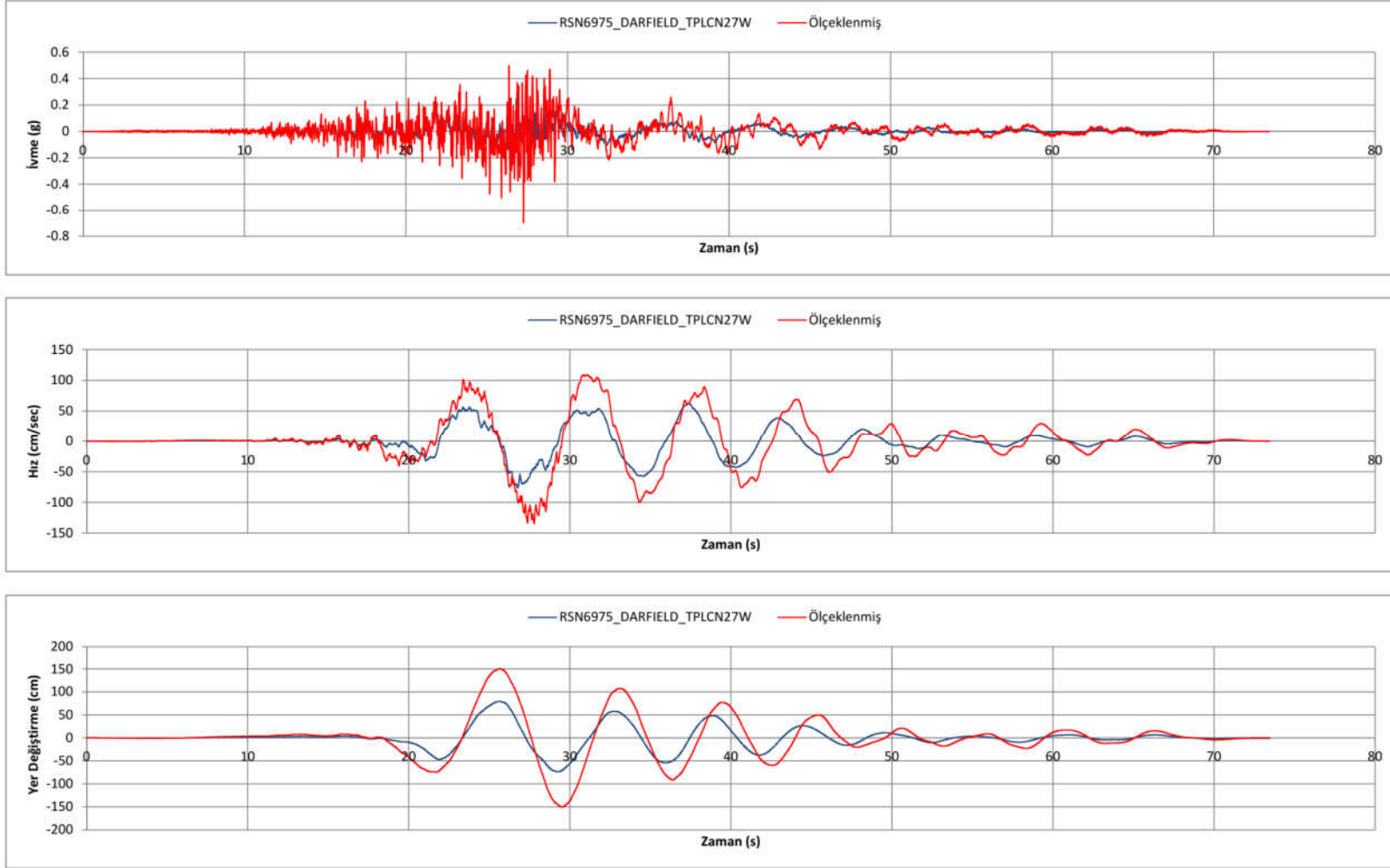
Zaman tanım alanında çözüm için kullanılacak ivme kayıtları için “PEER Ground Motion Database” kullanılmış, köprünün bulunduğu bölgenin depremselliğine uygun kayıtlar seçilmiştir. Seçilen kayıtlar “Seismomatch” adlı yazılım kullanılarak davranış spektrumuna uyumlu olacak şekilde ölçeklenmiştir. Zaman tanım alanında çözüm için 3 farklı depreme ait bileşenler kullanılmıştır. Bu 3 depremin bileşenleri enine ve boyuna doğrultuda eşzamanlı olarak etkilerek maksimum deplasman ve kesit tesiri değerleri analiz sonucu olarak dikkate alınmıştır.



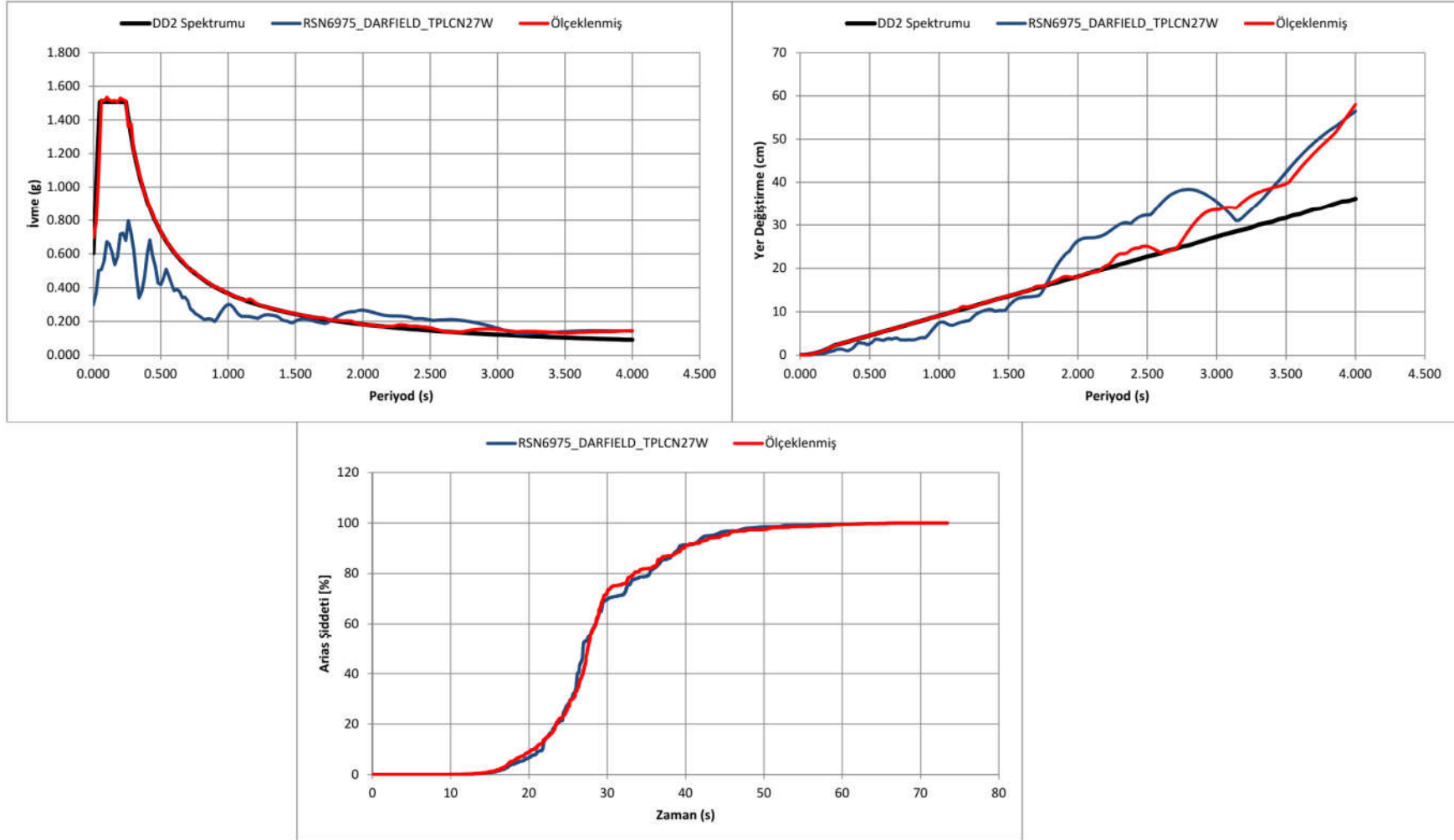
Şekil 5.6: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Darfield-Yeni Zelanda (2010)-Boyuna Doğrultu).



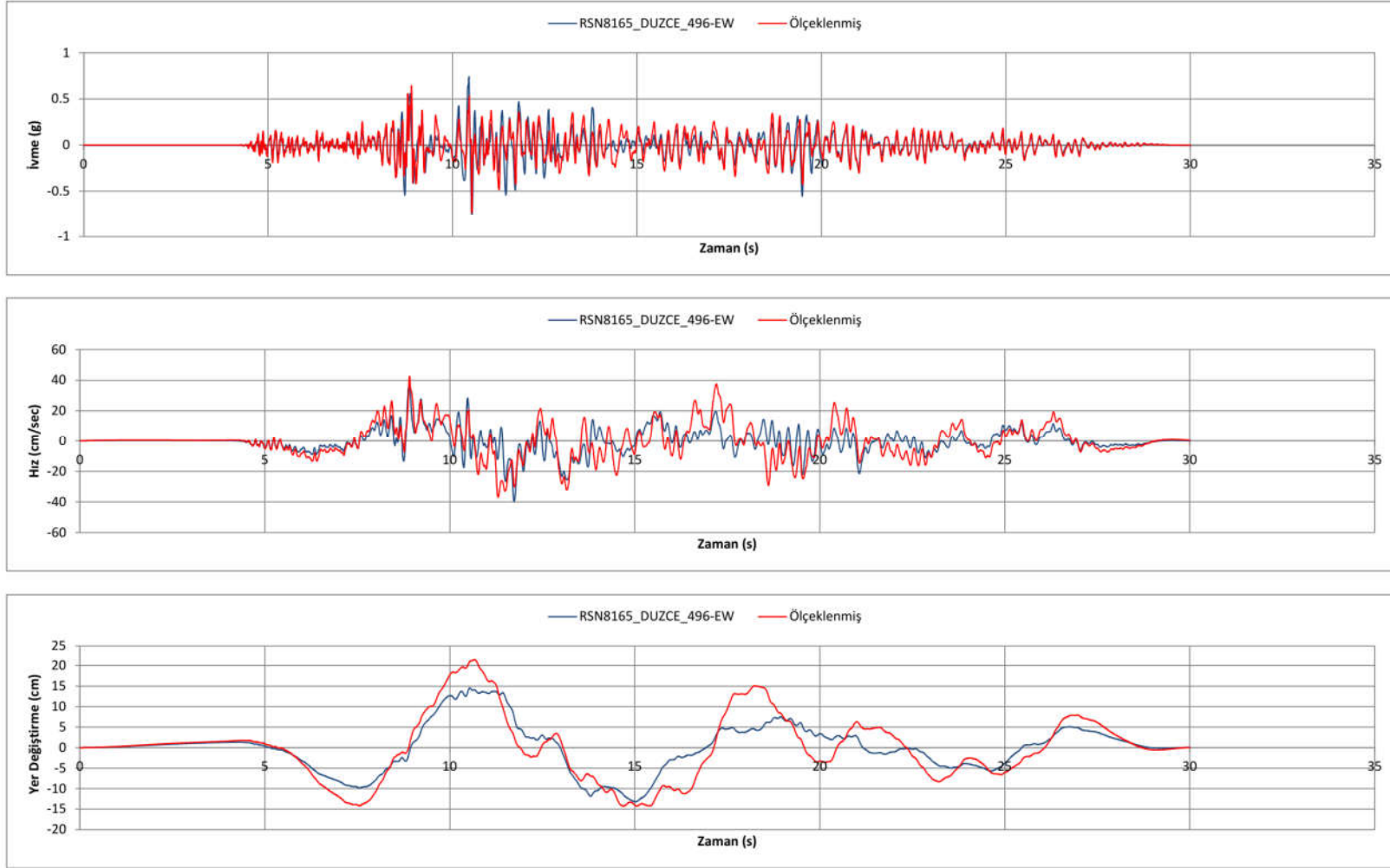
Şekil 5.7: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Darfield-Yeni Zellanda (2010) -Boyuna Doğrultu).



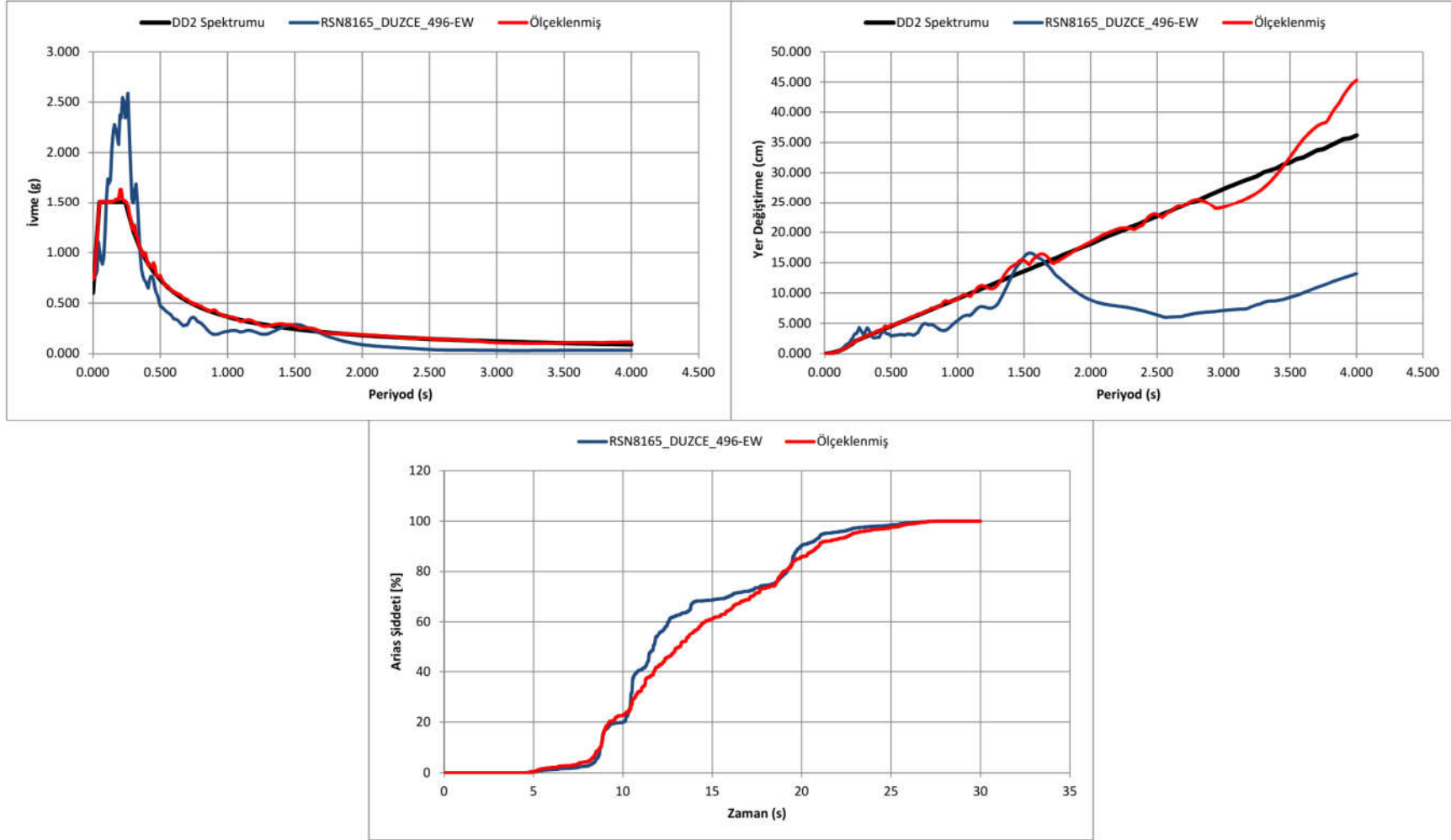
Şekil 5.8: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Darfield-Yeni Zelanda (2010)-Enine Doğrultu).



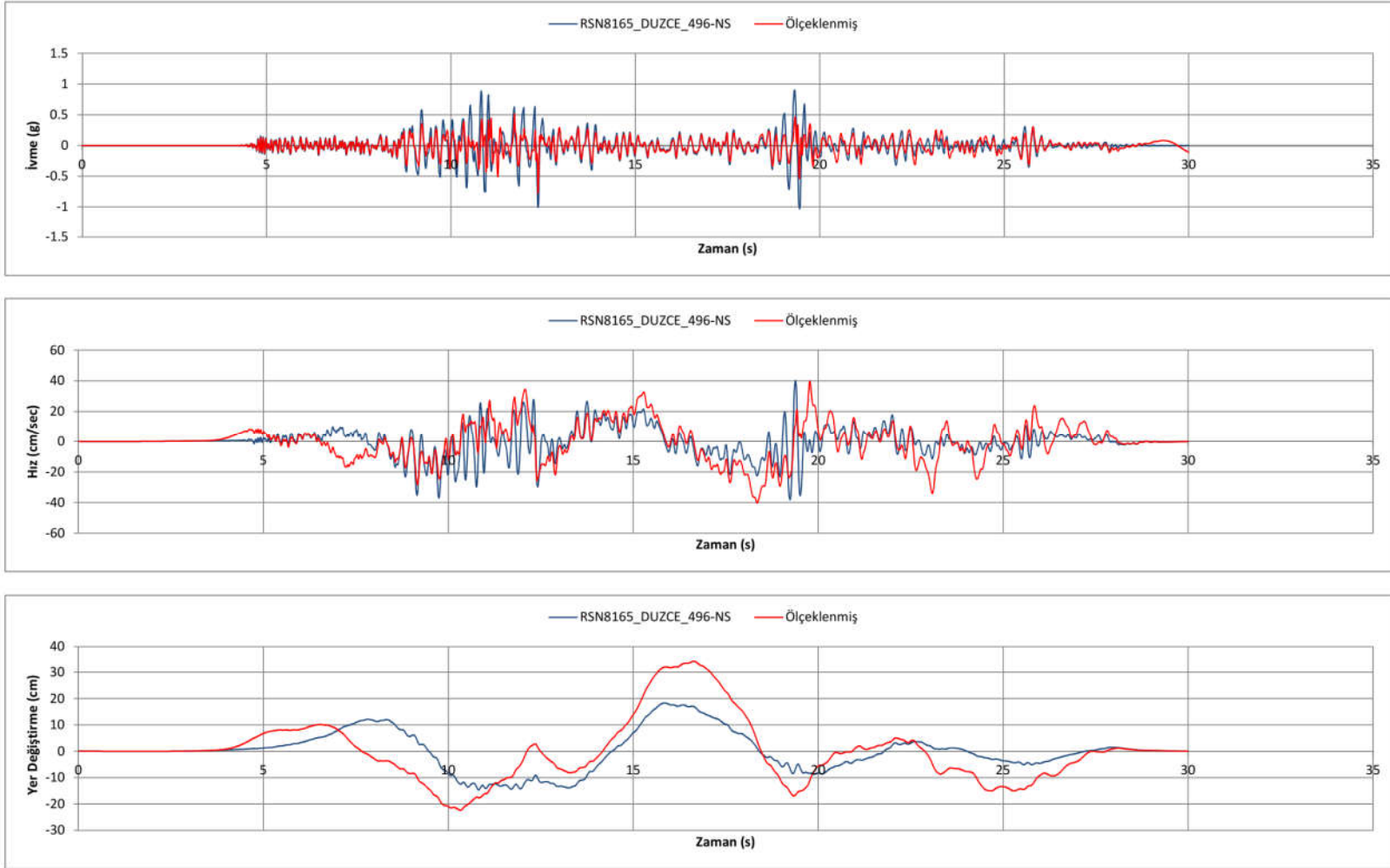
Şekil 5.9: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Darfield-Yeni Zellanda (2010)-Enine Doğrultu).



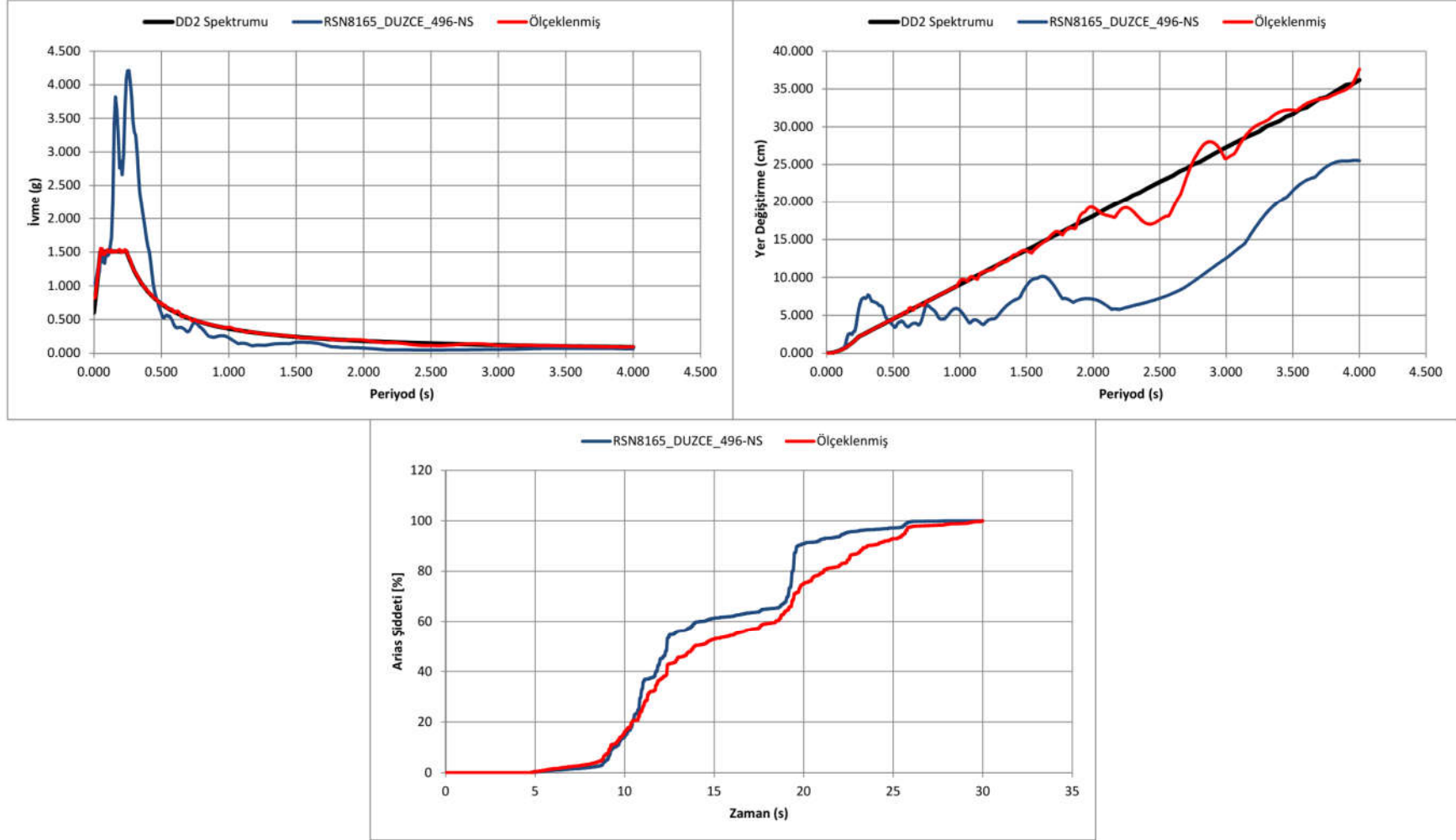
Şekil 5.10: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Düzce-Türkiye (1999)-Boyuna Doğrultu).



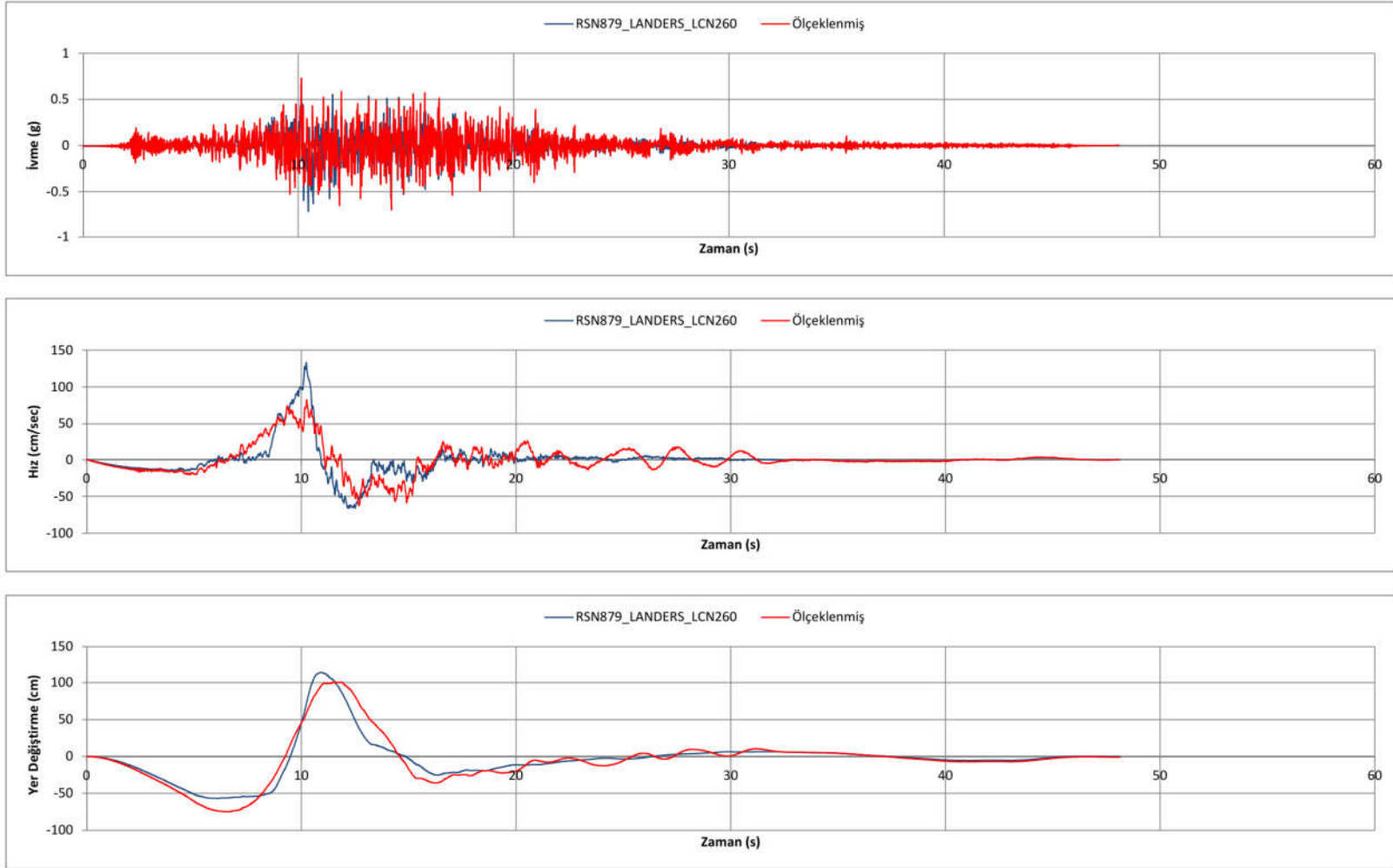
Şekil 5.11: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Düzce-Boyuna Doğrultu).



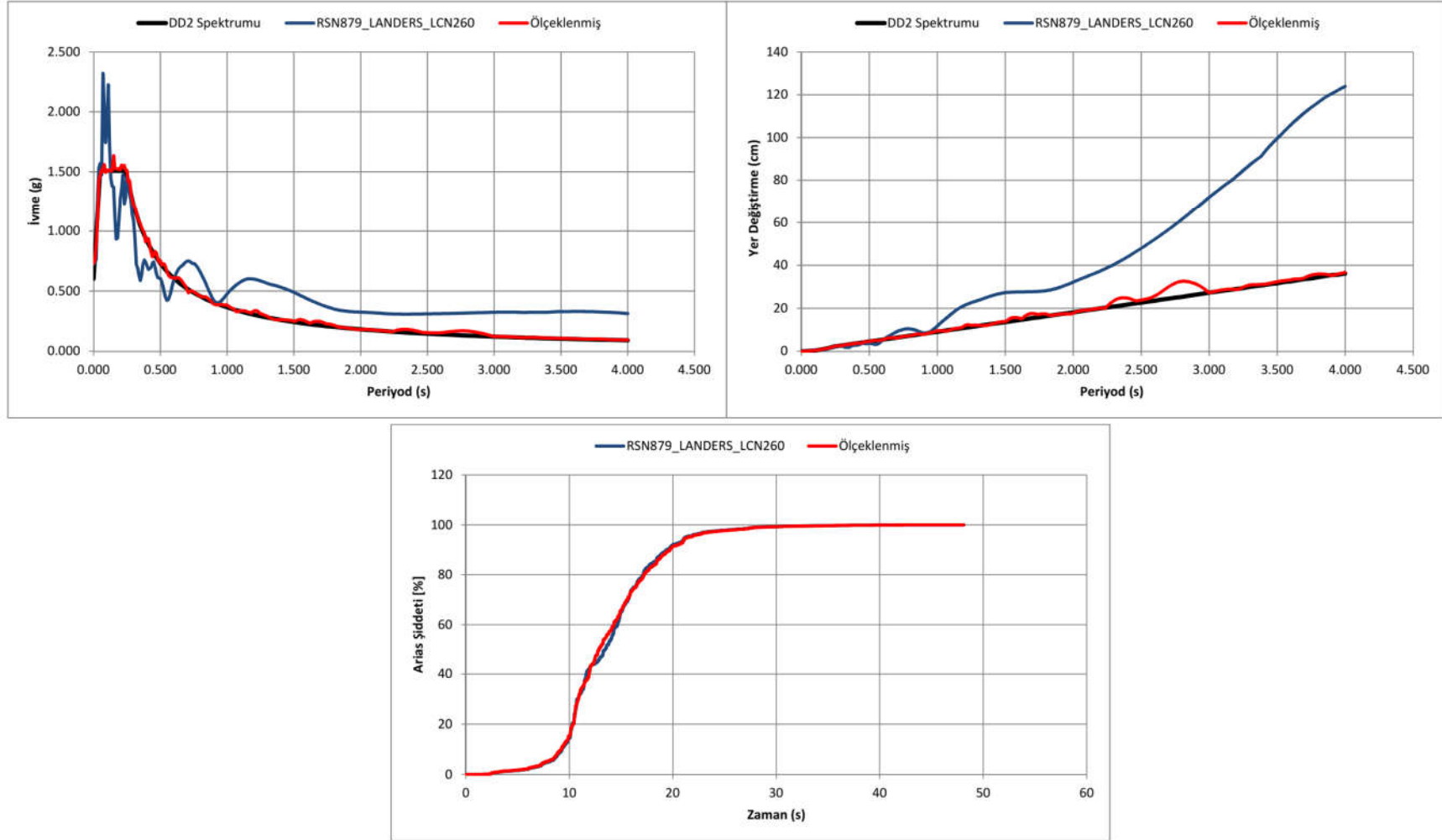
Şekil 5.12: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Düzce-Türkiye (1999)-Enine Doğrultu).



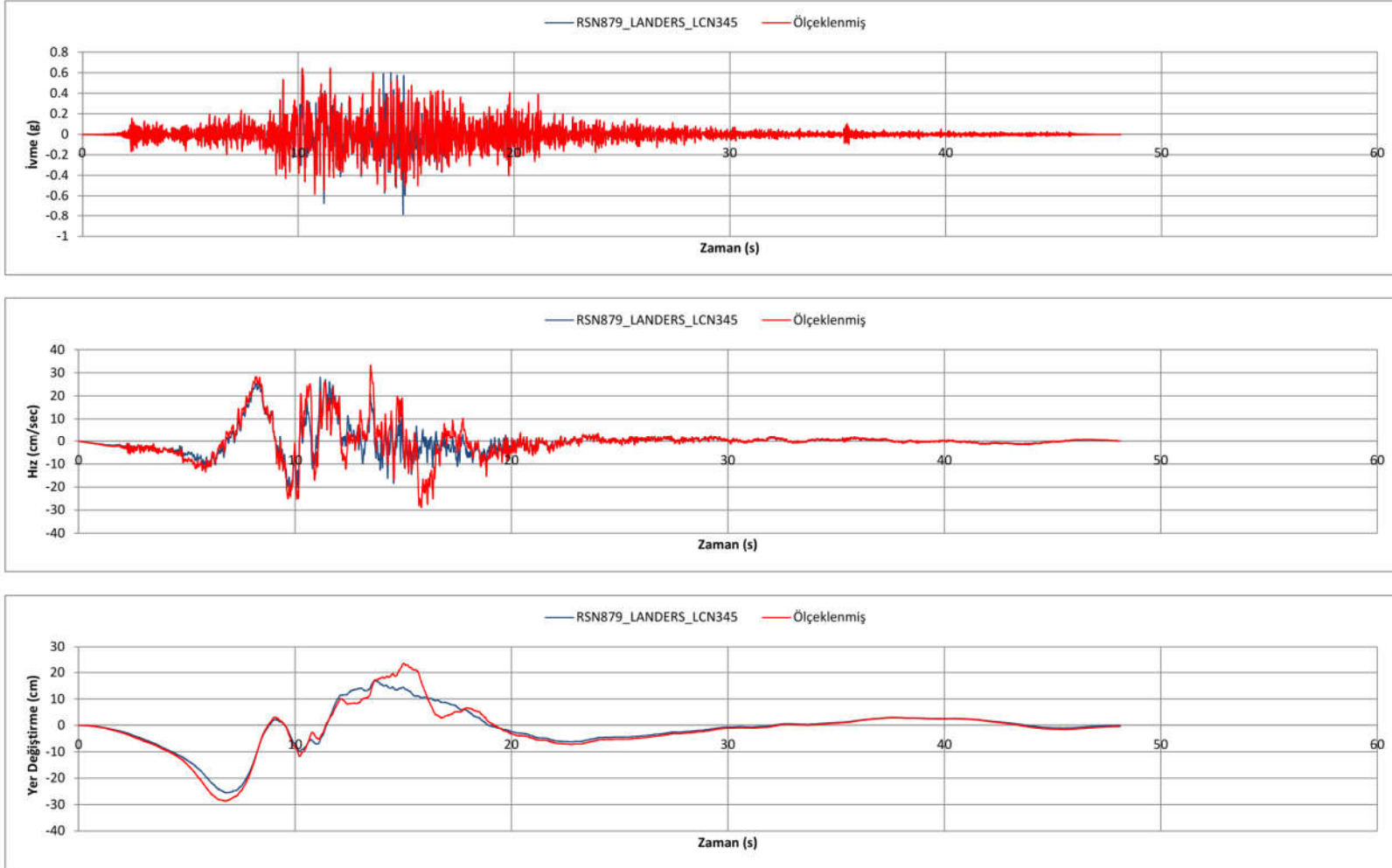
Şekil 5.13: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Düzce-Türkiye (1999)-Enine Doğrultu).



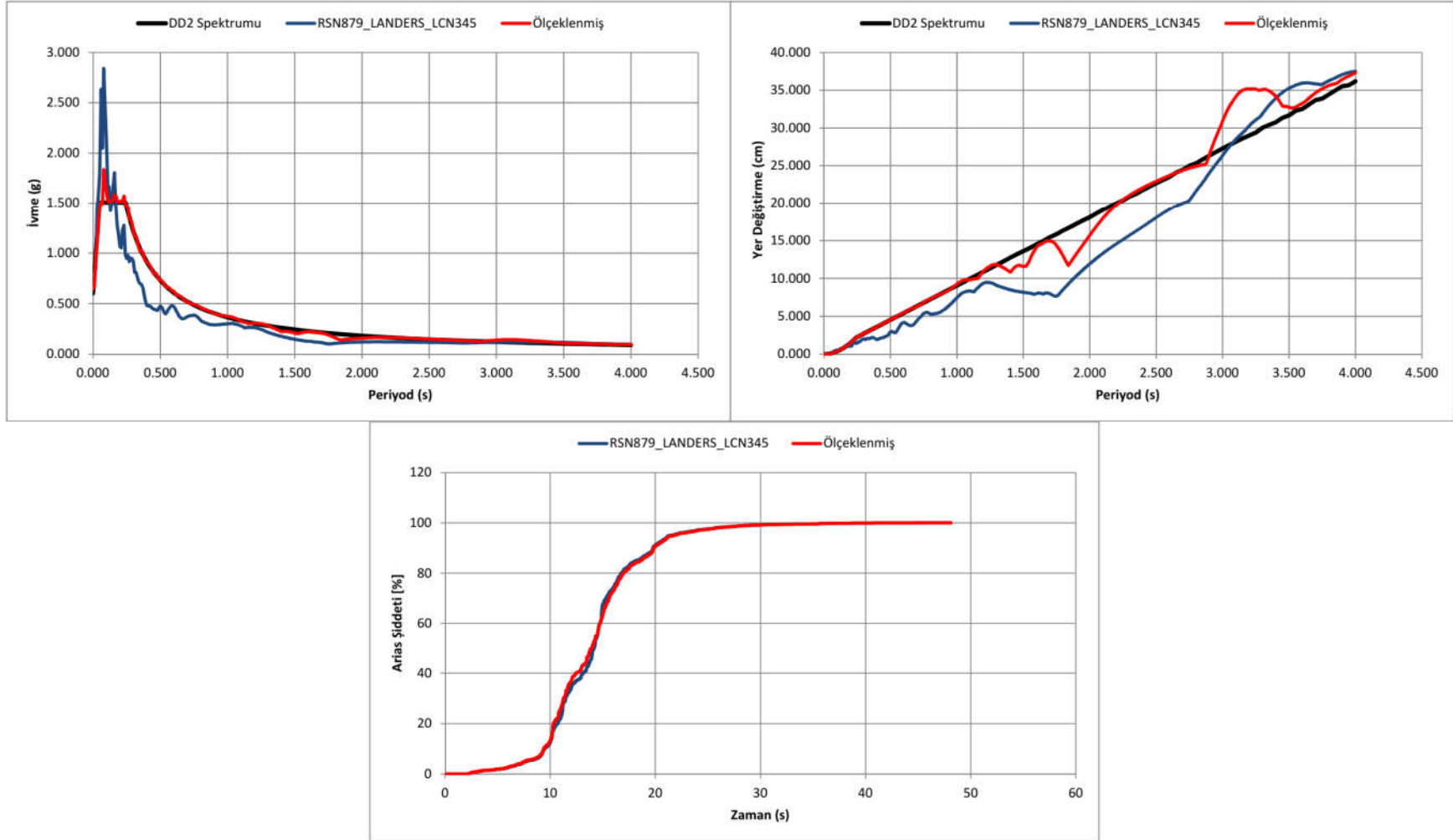
Şekil 5.14: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Landers-ABD (1992)-Boyuna Doğrultu).



Şekil 5.15: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Landers-ABD (1992)-Boyuna Doğrultu).



Şekil 5.16: Deprem kayıtları ve ölçeklenmiş kayıtlar (Landers-ABD (1992)-Enine Doğrultu).



Şekil 5.17: Deprem spektrumu, ölçeklenmiş spektrumu arias şiddeti (Landers-ABD (1992)-Enine Doğrultu).

5.3 Köprü Matematik Modeli

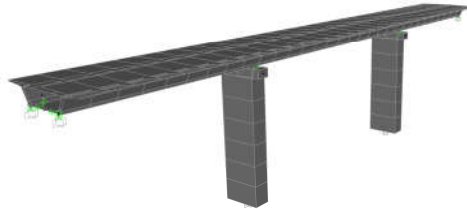
Köprü matematik modeli SAP2000 programı ile oluşturulmuştur. Orta ayaklar ve köprü üstyapısı çubuk eleman olarak modellenmiştir. Betonarme elemanların hesabında brüt kesit rijitlikleri kullanılmıştır. Başlık kirişi ve üstyapının, mesnetlerin buldukları seviyeye bağlanabilmesi için rijit link elemanlar kullanılmıştır. Mesnetleri temsil eden link elemanlar SAP2000 link seçenekleri arasındaki “rubber isolator” kullanılarak modellenmiştir.

SAP2000 elemanların kütlelerini otomatik olarak hesaplayıp, dinamik hesap için düğüm noktalarına dağıtıldığı için kütle dağılımını yansıtmak ve köprünün davranışına uygun mod şekilleri elde etmek için üstyapıyı ve kolonları temsil eden çubuk elemanlar parçalara ayrılmıştır.

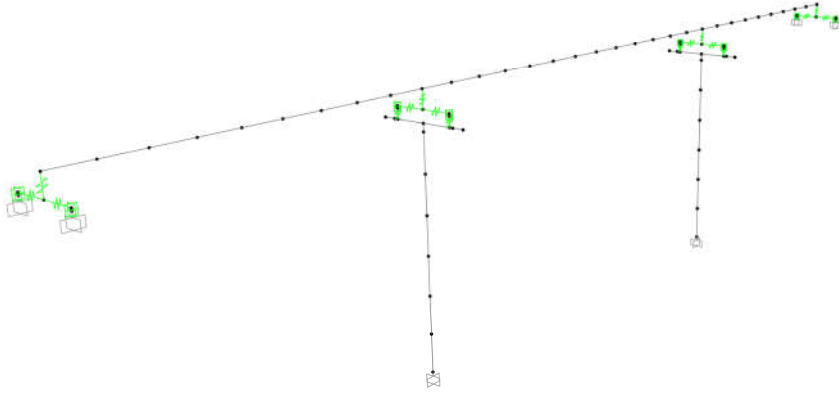
Kenar ayaklar tamamen rijit kabul edilmiştir. Kenar ayakların, orta ayaklara göre bağıl rijitlikleri (burada zeminle etkileşim halinde bulunan bir kenarayaktan söz etmek gerekir) köprü davranışını etkileyebilmektedir. Ancak çözümü yapılan köprü ayaklarının oldukça yüksek olması ve kenar ayak temellerinin sağlam kayaya oturuyor olması sebebiyle bu etki göz ardı edilmiştir.

Kolon temelleri ankastre bağı kabul edilmiştir. Zeminin belirgin bir şekilde; yatayda ve düşeyde salınım yapabildiği (sway-rocking) durumlarda bu yaklaşım uygun olmayabilir ancak bu çalışma içerisinde daha çok yalıtım araçlarının davranışları incelendiğinden ankastre sınır şartı kabul edilebilir bir yaklaşım olarak düşünülebilir.

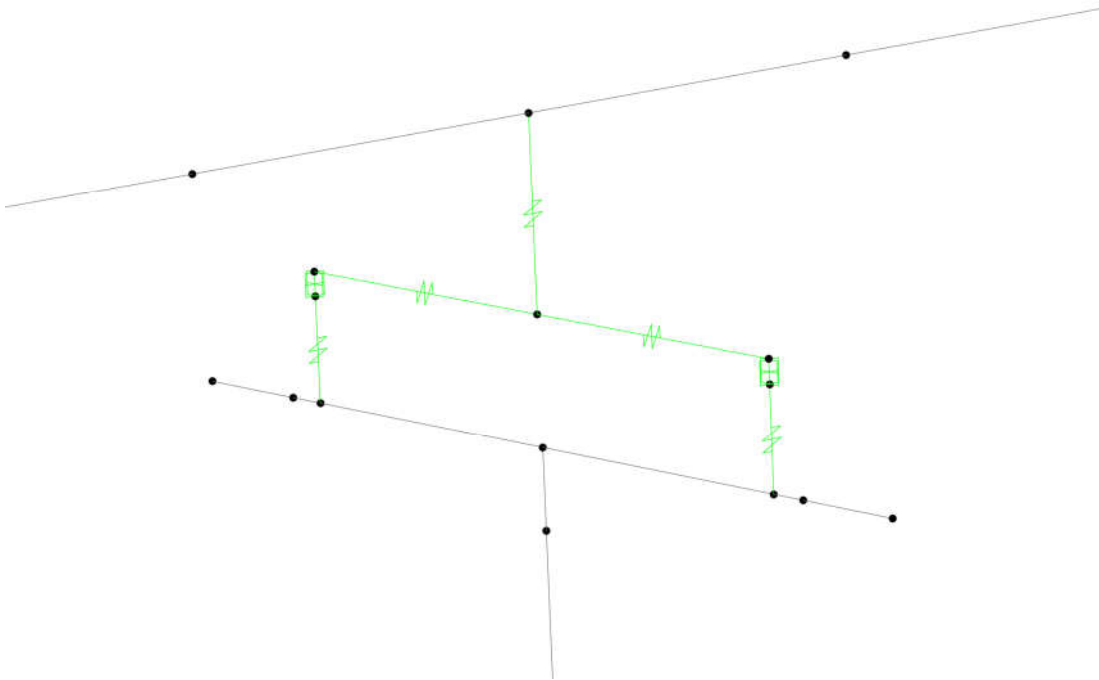
Kullanılan beton sınıfları, üstyapıda C50, kolon ve başlık kirişlerinde C35 olarak seçilmiştir.



Şekil 5.18: Köprü SAP2000 modeli.



Şekil 5.19: Köprü SAP2000 modeli.

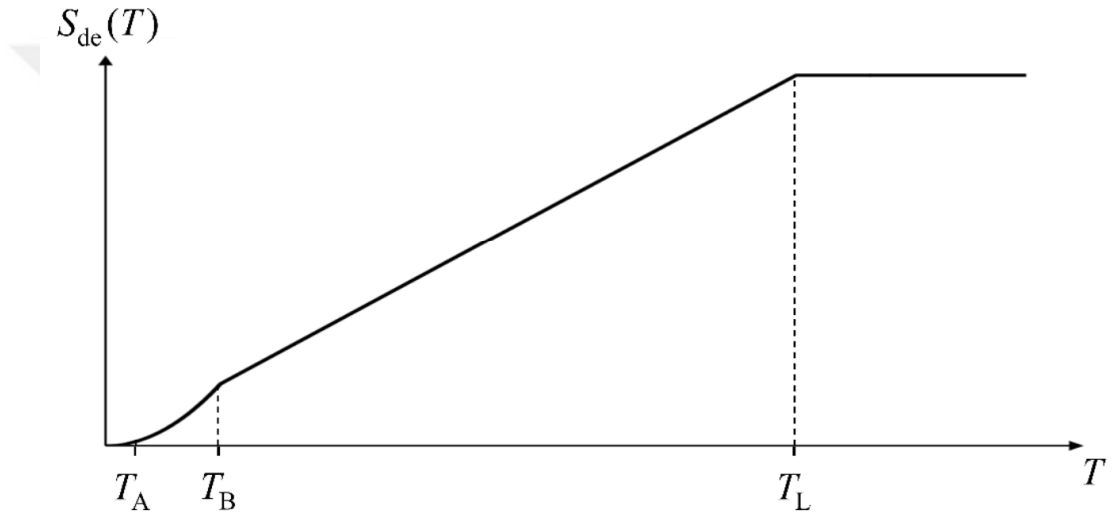


Şekil 5.20: Orta ayak başlık kirişi ve üstyapının mesnetlerle bağlantısı.

5.4 Basitleştirilmiş Hesapla Ön Tasarım

Basitleştirilmiş yöntemde köprü tek serbestlik dereceli sisteme indirgenerek çözüme gidilmektedir. Bunun için yapının kütlesi bilinmekte ancak rijitlik değerleri, seçilen yalıtım aracının özelliklerine göre değişmektedir. LRB mesnetin elastic ötesi davranışı da düşünüldüğünde hesapta kullanılacak deplasman parametrelerinin de bu doğrusal olmayan problem için öngörülmesi gereken bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

Tek serbestlik dereceli sistemin (T_B den büyük periyotlar için) spektral çözümünden elde edilecek deplasman aşağıdaki gibidir:



Şekil 5.21: DBYBHY 2018 Yer değiştirme davranış spektrumu.

$$d = \left(\frac{g}{4 \cdot \pi^2} \right) (S_{D1} \cdot T_{eff}) \quad (5.1)$$

Başlangıç kabulü olarak 1 sn periyodundaki deplasman kabul edilebilir. Bu değer sistemin efektif periyodu hesaplandıktan sonra yenilecek ve çözümlerin yakınsamasını sağlayacak şekilde rijitliği etkileyen parametreler değiştirilecektir.

LRB mesnetlerin bilineer davranışı karakteristik dayanım (Q_d) ve kurşun çekirdeğin akmasından sonraki rijitlik (K_d) verilerek tanımlanabilir. Buradan elde edilen efektif rijitlik ve maksimum deplasmana bağlı olarak çizilen çevrim eğrisinin içerisindeki alan sönüm alanını belirlemektedir.



Şekil 5.22: İdealize LRB mesnet çevrimi.

Yukarıda verilen grafikte dıştaki çevrim; mesnetin kapasitesini içteki çevrim ise hesap sonucu elde edilen deplasman altındaki durumu göstermektedir.

$$\xi = \frac{2 \cdot \sum_j [Q_{d,j} \cdot (d_{isol,j} - d_{y,j})]}{\pi \cdot \sum_j [K_{eff,j} (d_{isol,j} + d_{sub,j})^2]} \quad (5.2)$$

Efektif sönüm oranı hesaplandıktan sonra sönüm katsayısı elde edilir ve bu sönüm katsayısı ile sistemin efektif rijitliğine bağlı olan sistemin deplasmanı hesaplanır. %30 sönüm oranının altında kalan durumlarda sönüm katsayısı aşağıdaki gibidir:

$$B_L = \left(\frac{\xi}{0.05} \right)^{0.3} \quad (5.3)$$

Tek serbestlik dereceli sistemin deplasmanı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$d = \left(\frac{g}{4 \cdot \pi^2} \right) \left(\frac{S_{D1} \cdot T_{eff}}{B_L} \right) \quad (5.4)$$

Aşağıda enine ve boyuna deprem durumları için yapılan hesap tablosu (excel spreadsheet) verilmiştir. Verilen tablo yapılan iterasyonların son basamağıdır. Hesap tablosunda kullanılan terimlerin açıklamaları aşağıda verilmektedir.

W_{SS} : Üst yapı ağırlığı (kN)

W_{PP} : Orta ayakların hesaba katılan ağırlığı (kN)

W_{eff} : Hesapta kullanılan efektif kütle (kN)

$SD1$: Spektrum 1 sn periyodu

n : Ayaktaki mesnet adedi

d : Öngürülen üst yapı deplasmanı

Q_d : Karakteristik dayanım (kN)

K_d : Kurşun akma sonrası rijitliği (kN/m)

T_{eff} : Efektif period (s)

ξ : Eşdeğer viskoz sönüm oranı

B_L : Sönüm katsayısı

Çizelge 5.1: Boyuna doğrultu hesap tablosu.

BASİTLEŞTİRİLMİŞ YÖNTEM													
Adım A1,A2	WSS kN	WPP kN	Weff kN	SD1 g	n ad								
	62345.65	12600.00	74945.65	0.365	2								
Adım B1.1	d Qd Kd	0.092 8103.22 37865.67	Öngörülen deplasman (m) Karakteristik dayanım (kN) Kurşun akma sonrası rijitliği (kN/m)										
Adım	A1 W j kN	B1.2 Q d,j kN	B1.2 K d,j kN/m	A1 K sub,j kN/m	B1.3 α_j	B1.3 K eff,j kN/m	B1.5 d isol,j m	B1.6 K isol,j kN/m	B1.8 d sub,j m	B1.10 F sub,j kN	B1.10 Q d,j (d isol,j-dy,j)	B1.10 K eff,j (d isol,j + d sub,j) ²	
Kenar ayak	9050.18	1176.27	5496.63	5000000.00	0.00	18262.15	0.09	18329.09	0.00	1680.12	79.59	154.57	
Orta ayak	22122.65	2875.34	13436.21	110000.00	0.57	39825.32	0.06	62426.86	0.03	3663.93	99.75	337.08	
Orta ayak	22122.65	2875.34	13436.21	110000.00	0.57	39825.32	0.06	62426.86	0.03	3663.93	99.75	337.08	
Kenar ayak	9050.18	1176.27	5496.63	5000000.00	0.00	18262.15	0.09	18329.09	0.00	1680.12	79.59	154.57	
TOPLAM	62345.65	8103.22	37865.67		Σ K eff,j Adım	116174.92 B1.4					358.68	983.30	
Adım B1.10	T eff ξ	1.61 0.23	Efektif periyot (sn) Eşdeğer viskoz sönüm oranı										
Adım B1.11	B L (B-15) B L d	1.59 0.092	Sönüm katsayısı Adım B1.1 ile karşılaştırma (m)										

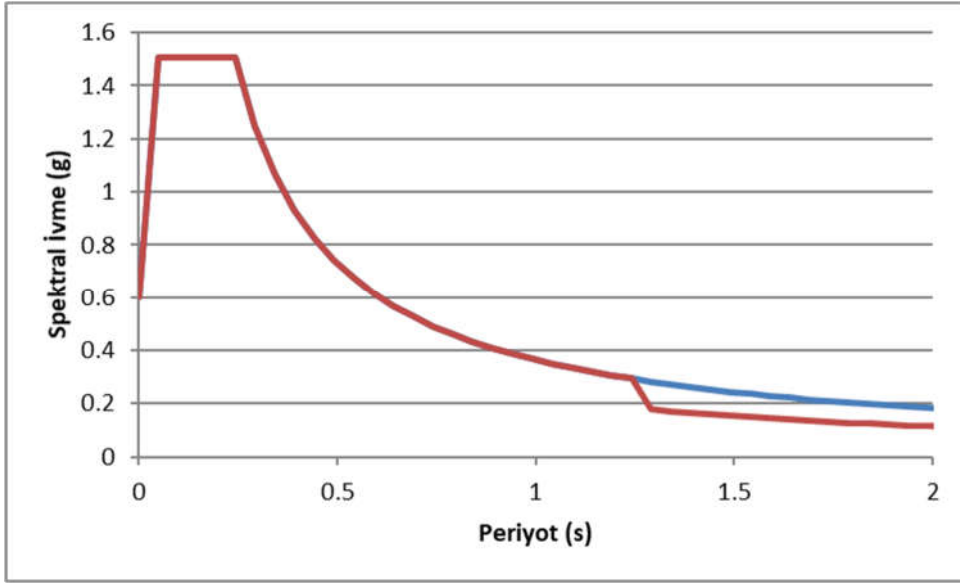
Çizelge 5.2: Enine doğrultu hesap tablosu.

BASİTLEŞTİRİLMİŞ YÖNTEM												
Adım A1,A2	WSS kN	WPP kN	Weff kN	SD1 g	n ad							
	62345.65	12600.00	74945.65	0.365	2							
Adım B1.1	d Qd Kd	0.079 8103.22 37865.67	Öngörülen deplasman (m) Karakteristik dayanım (kN) Kurşun akma sonrası rijitliği (kN/m)									
Adım	A1 W j	B1.2 Q d,j	B1.2 K d,j	A1 K sub,j	B1.3 α_j	B1.3 K eff,j	B1.5 d isol,j	B1.6 K isol,j	B1.8 d sub,j	B1.10 F sub,j	B1.10 Q d,j (d isol,j-dy,j)	B1.10 K eff,j (d isol,j + d sub,j) ²
	kN	kN	kN/m	kN/m		kN/m	m	kN/m	m	kN		
Kenar ayak	9050.18	1176.27	5496.63	5000000.00	0.00	20363.79	0.079	20447.07	0.00	1608.74	64.32	127.09
Orta ayak	22122.65	2875.34	13436.21	421666.67	0.13	48294.02	0.070	54540.62	0.01	3815.23	132.13	301.40
Orta ayak	22122.65	2875.34	13436.21	421666.67	0.13	48294.02	0.070	54540.62	0.01	3815.23	132.13	301.40
Kenar ayak	9050.18	1176.27	5496.63	5000000.00	0.00	20363.79	0.079	20447.07	0.00	1608.74	64.32	127.09
TOPLAM	62345.65	8103.22	37865.67			Σ K eff,j Adım	B1.4				392.88	856.98
Adım B1.10	T eff ξ	1.48 0.29	Efektif periyot (sn) Eşdeğer viskoz sönüm oranı									
Adım B1.11	B L (B-15) B L d	1.70 0.079	Sönüm katsayısı Adım B1.1 ile karşılaştırma (m)									

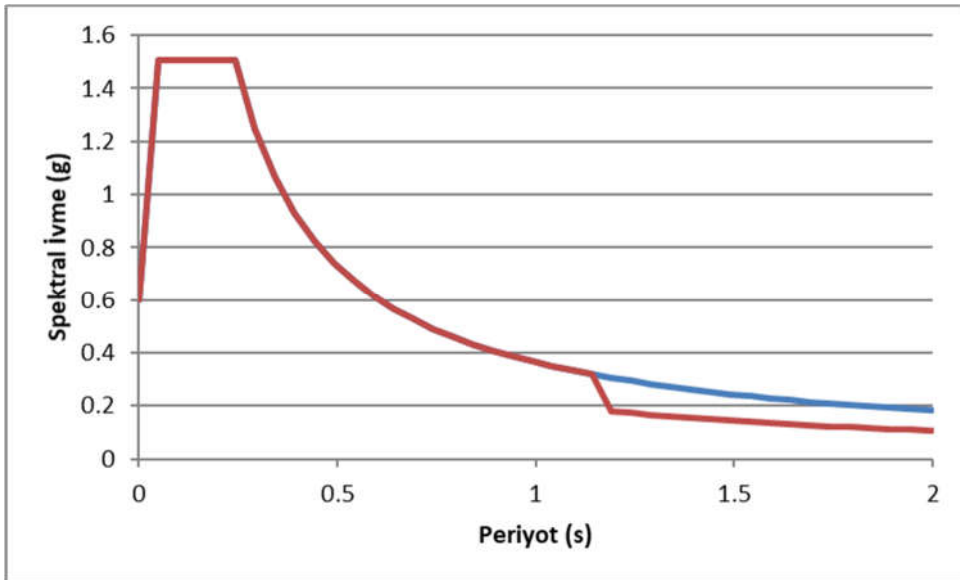
5.5 Çok Modlu Davranış Spektrumu Analizi İle Doğrulama

Basitleştirilmiş yöntemden elde edilen sonuçlar mesnet seçimiyle ilgili bilgi vermektedir. Burada seçilen değerler çok modlu spektral analiz ile tekrarlanarak, bu özelliklere sahip mesnetler seçilerek tasarım süreci sonlandırılacaktır.

Basitleştirilmiş yöntemle enine ve boyuna durum için hesaplanan sönüm katsayısı ile davranış spektrumu modifiye edilerek hesaplar tekrarlanmıştır.



Şekil 5.23: Boyuna yönde deprem için kompozit davranış spektrumu.



Şekil 5.24: Enine yönde deprem için kompozit davranış spektrumu.

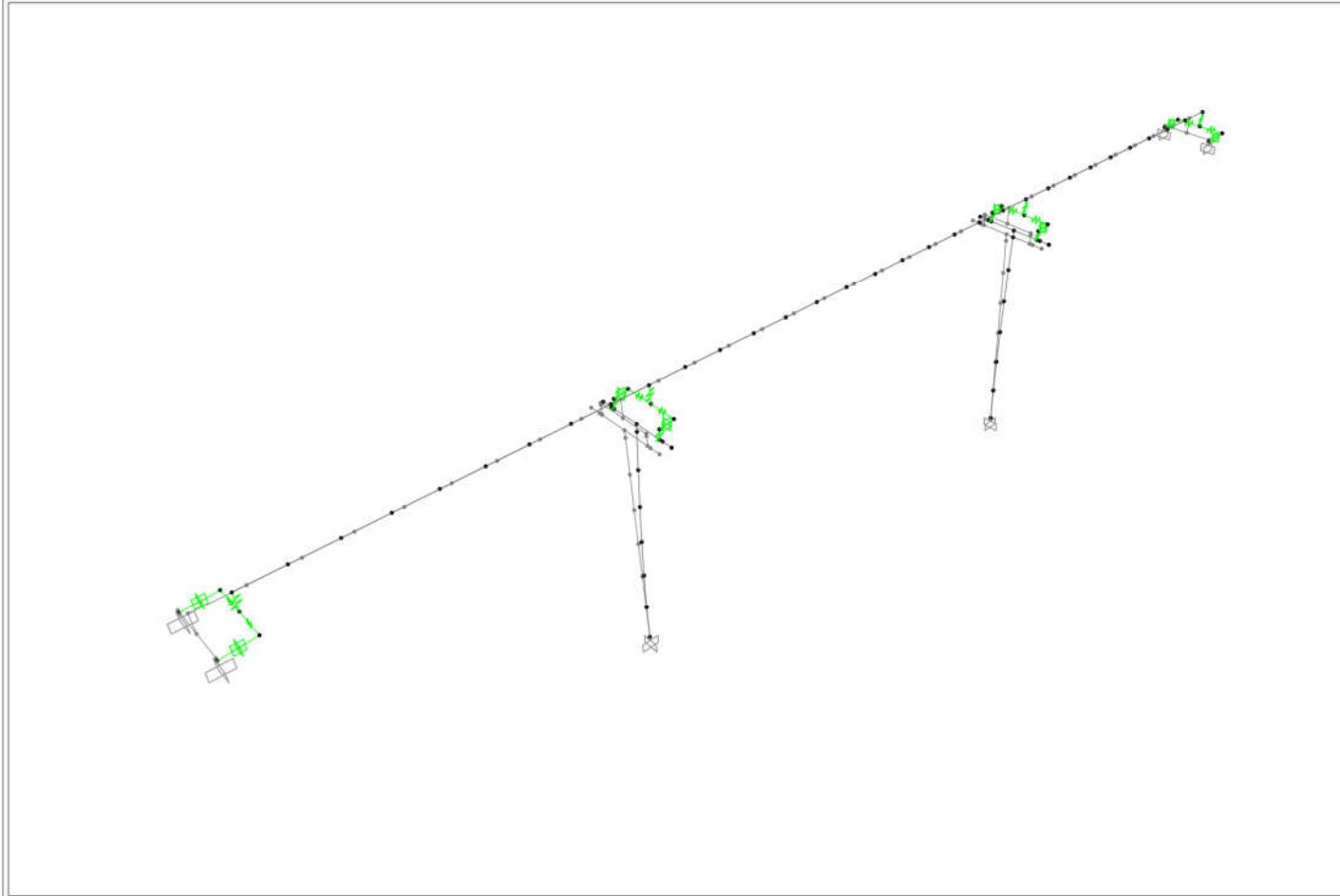
Kompozit spektrum; 0.8 Teff'in üzerindeki periyotlar için spektrum ordinatının sönüm katsayısına (BL) bölünmesi ile elde edilir. Çok modlu spektral analizde bu değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.3: Çok modlu spektral analiz ve basitleştirilmiş yöntem sonuçlarının karşılaştırılması (boyuna doğrultu).

Adım	B2.1	B2.1	B2.3	B2.6	B2.8
	Q d,i	K d,i	K isol,i	d isol,i	K isol,i
Kenar ayak	588.14	2748.31	9164.55	0.09	9127.38
Orta ayak	1437.67	6718.10	31213.43	0.06	31205.73
Orta ayak	1437.67	6718.10	31213.43	0.06	31205.73
Kenar ayak	588.14	2748.31	9164.55	0.09	9127.38
					80666.23

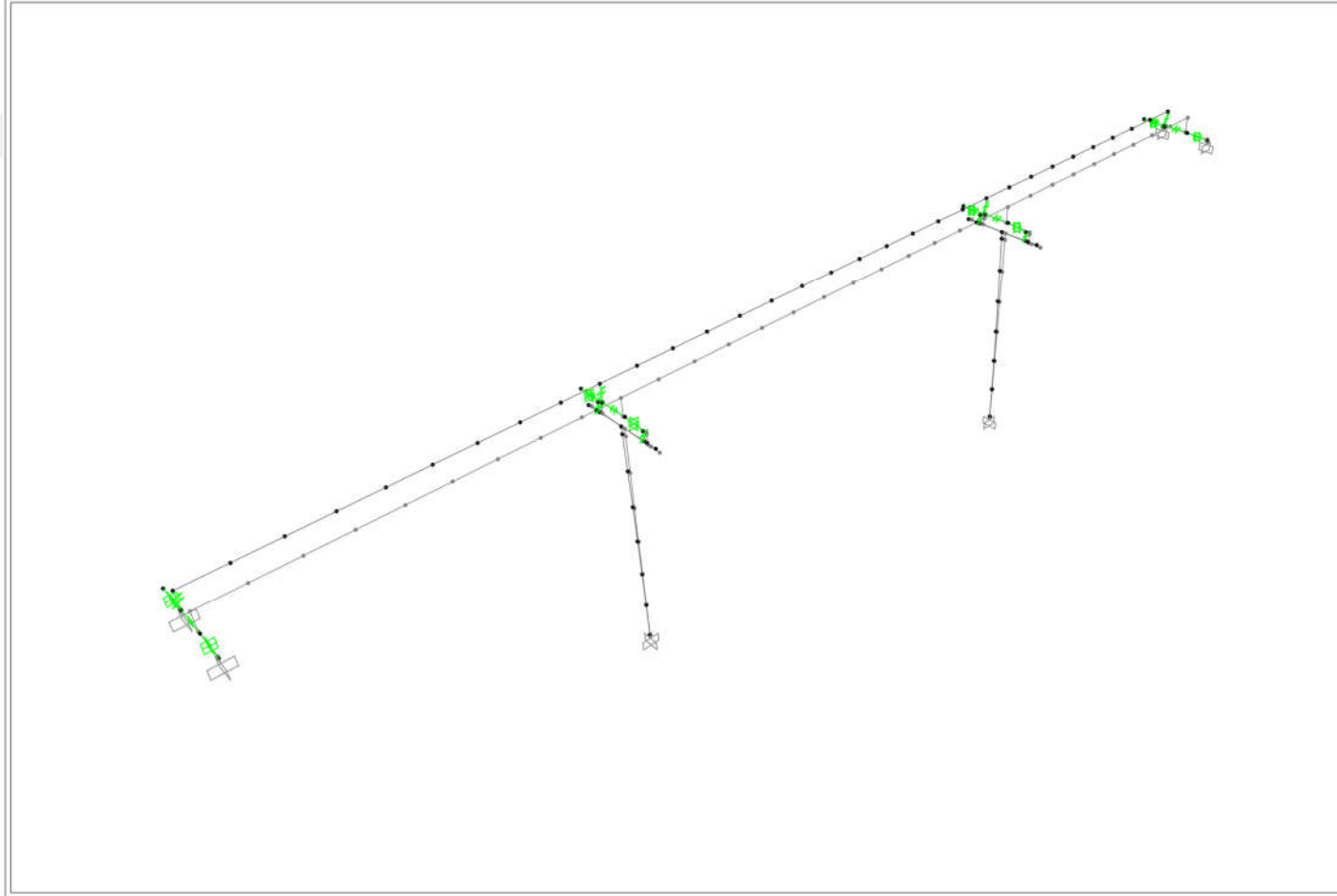
Çizelge 5.4: Çok modlu spektral analiz ve basitleştirilmiş yöntem sonuçlarının karşılaştırılması (enine doğrultu).

Adım	B2.1	B2.1	B2.3	B2.6	B2.8
	Q d,i	K d,i	K isol,i	d isol,i	K isol,i
Kenar ayak	588.14	2748.31	10223.53	0.079	10193.09
Orta ayak	1437.67	6718.10	27270.31	0.069	27553.88
Orta ayak	1437.67	6718.10	27270.31	0.069	27553.88
Kenar ayak	588.14	2748.31	10223.53	0.079	10193.09
					75493.94



SAP2000 v14.2.2 - File:M-002 - Deformed Shape (MODAL) - Mode 1 - T = 1.50772; f = 0.66325 - KN, m, C Units

Şekil 5.25: Modal analiz boyuna doğrultuda deprem mod şekli.



SAP2000 v14.2.2 - File:M-002 - Deformed Shape (MODAL) - Mode 2 - T = 1.30839; f = 0.76430 - KN, m, C Units

Şekil 5.26: Modal analiz enine doğrultuda deprem mod şekli.

Modal analiz için basitleştirilmiş yöntemden elde edilen mesnet efektif rijitlikleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre enine ve boyuna modlardaki periyotların el hesabına yakın olduğu görülmüştür. Mesnet deformasyonlarında da oldukça yakın deplasman değerlerine ulaşılmıştır. Bu durumda Çizelge 5.3 ve 5.4’te verilen özelliklere sahip mesnet seçiminin uygun olacağı görülmektedir. B2.6 sütunundaki değerler çok modlu spektral analizden elde edilen sonuçları B2.8 sütunu ise mesnet efektif rijitliklerini ifade etmektedir.

5.6 Sismik Yalıtım Araçlarının Boyutlandırılması

Yapılan doğrusal çözümlere uygun LRB mesnet, TENSA firmasının kataloğundan seçilmiştir. Bununla birlikte gerekli stabilite tahkikleri ve boyutlandırmayla ilgili hesaplar aşağıda verilmektedir.

d_{Ed} 350mm	ISOLATOR	RUBBER DIAMETER	TOTAL OVERALL HEIGHT (INCLUDING EXTERNAL PLATES)	OVERALL PLATE SIZE	TOTAL RUBBER THICKNESS	SHAPE FACTOR	VERTICAL STIFFNESS	EFFECTIVE HORIZONTAL STIFFNESS AT d_{bd}	EFFECTIVE DAMPING AT d_{bd}	YIELDING DISPLACEMENT	HORIZONTAL YIELDING LOAD	HORIZONTAL DESIGN DISPLACEMENT (EN 1998)	HORIZONTAL DESIGN LOAD	MAX VERTICAL STATIC LOAD SLU	MAX VERTICAL SEISMIC LOAD	
		D (mm)	H_{tot} (mm)	L x L (mmxmm)	T_q (mm)	S (-)	K_v (kN/mm)	K_{eff} (kN/mm)	X_{eff} (%)	d_y (mm)	F_y (kN)	d_{bd} (mm)	H_{ebd} (mm)	N_{SLU} (kN)	N_{SEISM} (kN)	
	RUBBER HARD	TLRI-1200-HM-180/315	1200	336	1250X1250	180	27.7	7113	10.9	25	24	1491	292	3168	25850	18250
		$G_{sin} = 1.4 \text{ MPa}^*$ $\xi_{eff} = 15\%*$														

Şekil 5.27: Orta ayaklar için seçilen mesnet özellikleri.

d_{Ed} 350mm	ISOLATOR	RUBBER DIAMETER	TOTAL OVERALL HEIGHT (INCLUDING EXTERNAL PLATES)	OVERALL PLATE SIZE	TOTAL RUBBER THICKNESS	SHAPE FACTOR	VERTICAL STIFFNESS	EFFECTIVE HORIZONTAL STIFFNESS AT d_{bd}	EFFECTIVE DAMPING AT d_{bd}	YIELDING DISPLACEMENT	HORIZONTAL YIELDING LOAD	HORIZONTAL DESIGN DISPLACEMENT (EN 1998)	HORIZONTAL DESIGN LOAD	MAX VERTICAL STATIC LOAD SLU	MAX VERTICAL SEISMIC LOAD	
		D (mm)	H_{tot} (mm)	L x L (mmxmm)	T_q (mm)	S (-)	K_v (kN/mm)	K_{eff} (kN/mm)	X_{eff} (%)	d_y (mm)	F_y (kN)	d_{bd} (mm)	H_{ebd} (mm)	N_{SLU} (kN)	N_{SEISM} (kN)	
	RUBBER HARD	TLRI-850-HM-176/225	850	314	900X900	176	24.4	3355	5.6	25	24	762	292	1622	12850	7500
		$G_{sin} = 1.4 \text{ MPa}^*$ $\xi_{eff} = 15\%*$														

Şekil 5.28: Kenar ayaklar için seçilen mesnet özellikleri.

5.6.1 Ortaayak mesnetlerinin boyutlandırılması

Analizde kullanılan karakteristik dayanıma göre kurşun çekirdek kalınlığı hesabı;

Imperial

$$d_L = \sqrt{\frac{Q_d}{0.9}} \quad (5.5)$$

SI

$$d_L = \sqrt{\frac{Q_d}{6212.2816}} = \sqrt{\frac{1340.82}{6212.2816}} = 0.4646 \text{ m}$$

Elastomer plan alanının hesabı;

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot (B^2 - d_L^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (1.2^2 - 0.46^2) = 0.9615 \text{ m}^2 \quad (5.6)$$

Toplam elastomer kalınlığı hesabı;

$$T_r = \frac{G \cdot A_b}{K_d} = \frac{1400 \cdot 0.9615}{6257.46} = 0.2151 \text{ m} \quad (5.7)$$

Kurşun akma sonrası rijitliğinin hesabı;

$$K_d = \frac{G \cdot A_b}{T_r} \quad (5.8)$$

Elastomer tabaka sayısı;

$$n = \frac{T_r}{t_r} = \frac{0.2151}{0.009} = 23 \text{ adet} \quad (5.9)$$

Toplam mesnet yüksekliği;

$$\begin{aligned} H &= n \cdot t_r + (n - 1) \cdot t_s + 2 \cdot t_c \\ &= 23 \cdot 9 + (23 - 1) \cdot 4 + 2 \cdot 14 \\ &= 323 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Uygulamalar optimum performans için kurşun çekirdeğin belirli aralıklarda olmasını önermektedir. Seçilen menfezde kurşun çapının B/3 değerinden büyük olduğu görülmektedir.

$$\frac{B}{3} \geq d_L \geq \frac{B}{6} \quad (5.11)$$

AASHTO GSID Bölüm-12.2’de deplasmanların geri döndürülebilmesi için minimum akma sonrası rijitlik önerilmektedir. Buna göre tasarım deplasmanının yarısını (0.5d_t) deplasmanı üzerindeki düşey yüklerin 1/80’i kadar bir kuvvetle geri döndürebilmelidir.

$$K_d = \frac{G \cdot A_b}{T_r} > K_{d,min} = \frac{0.025 \cdot W}{d} \quad (5.12)$$

$$K_d = 6257.46 > K_{d,min} = \frac{0.025 \cdot 11061}{0.059} = 4686.86 \frac{kN}{m}$$

Şekil değiştirme limitleri kontrolleri;

$$\sigma_s = \frac{W}{A_b} = \frac{11061}{0.9615} = 11504.4035 \frac{kN}{m^2} \quad (5.13)$$

Şekil faktörü;

$$S = \frac{A_b}{\pi \cdot B \cdot t_r} = \frac{0.9615}{\pi \cdot 1.2 \cdot 0.009} = 28.3372 \quad (5.14)$$

Basınç kuvveti sebebiyle oluşan kayma şekil değiştirmesi;

$$\gamma_c = \frac{D_c \cdot \sigma_s}{G \cdot S} = \frac{1 \cdot 11504.40}{1400 \cdot 28.34} = 0.29 \quad (5.15)$$

Tasarım deplasmanına göre kayma şekil değiştirmesi;

$$\gamma_{s,eq} = \frac{d_t}{T_r} = \frac{0.059}{0.2151} = 0.2743 \quad (5.16)$$

Dönme sebebiyle oluşan kayma şekil değiştirmesi;

$$\gamma_r = \frac{D_r \cdot B^2 \cdot \theta}{t_r \cdot T_r} = \frac{0.375 \cdot 1.2^2 \cdot 0.01}{0.009 \cdot 0.2151} = 2.7893 \quad (5.17)$$

Toplam kayma şekil değiştirmesi;

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5 \cdot \gamma_r \leq 5.5 \quad (5.18)$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5 \cdot \gamma_r = 1.9589 \leq 5.5$$

Elastisite modülü;

$$E = 3 \cdot G = 3 \cdot 1.4 = 4.2 \text{ MPa} \quad (5.19)$$

Elastomer tabakaların sıkışma modülü;

$$\begin{aligned} E_b &= E \cdot (1 + 0.67 \cdot S^2) = 4.2 \cdot (1 + 0.67 \cdot 28.34^2) \\ &= 2.26 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Atalet momenti;

$$I = \pi \cdot \frac{B^4}{64} = 0.1018 \text{ m}^4 \quad (5.21)$$

Mesnet dönme rijitliği;

$$K_\theta = \frac{E_b \cdot I}{T_r} = \frac{2263.8 \cdot 0.1018}{0.2151} = 1071219 \text{ kNm} \quad (5.22)$$

Mesnette şekil değiştirme olmadığı durumdaki kritik yük kapasitesi;

$$P_{cr(\Delta=0)} = \pi \cdot \sqrt{K_d \cdot K_\theta} = 257210 \text{ kN} \quad (5.23)$$

$$\frac{P_{cr(\Delta=0)}}{P_{DL} + P_{LL}} = \frac{257210}{11061 + 2112} = 19.5 \geq 3 \quad (5.24)$$

Mesnet düşey yük kapasitesi yeterlidir.

Mesnedin şekil değiştirdiği durumdaki yük kapasitesi;

$$\delta = 2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{B} \right) = 2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0.0885}{1.2} \right) = 2.994 \quad (5.25)$$

$$A_r = B^2 \cdot \frac{(\delta - \sin \delta)}{4} \quad (5.26)$$

$$A_{gross} = \pi \cdot \frac{B^2}{4} \quad (5.27)$$

$$\frac{A_r}{A_{gross}} = \frac{(\delta - \sin \delta)}{\pi} = \frac{(2.994 - \sin 2.994)}{\pi} = 0.9062 \quad (5.28)$$

$$P_{cr(\Delta)} = \frac{A_r}{A_{gross}} \cdot P_{cr(\Delta=0)} = 0.9062 \cdot 257210 = 233080 \text{ kN} \quad (5.29)$$

$$\frac{P_{cr(\Delta)}}{1.2 \cdot P_{DL} + P_{SL}} = \frac{233080}{1.2 \cdot 11061 + 2400} = 14.87 \geq 1 \quad (5.30)$$

Mesnet şekil değiştirmiş durum için de oldukça yeterli taşıma kapasitesine sahiptir.

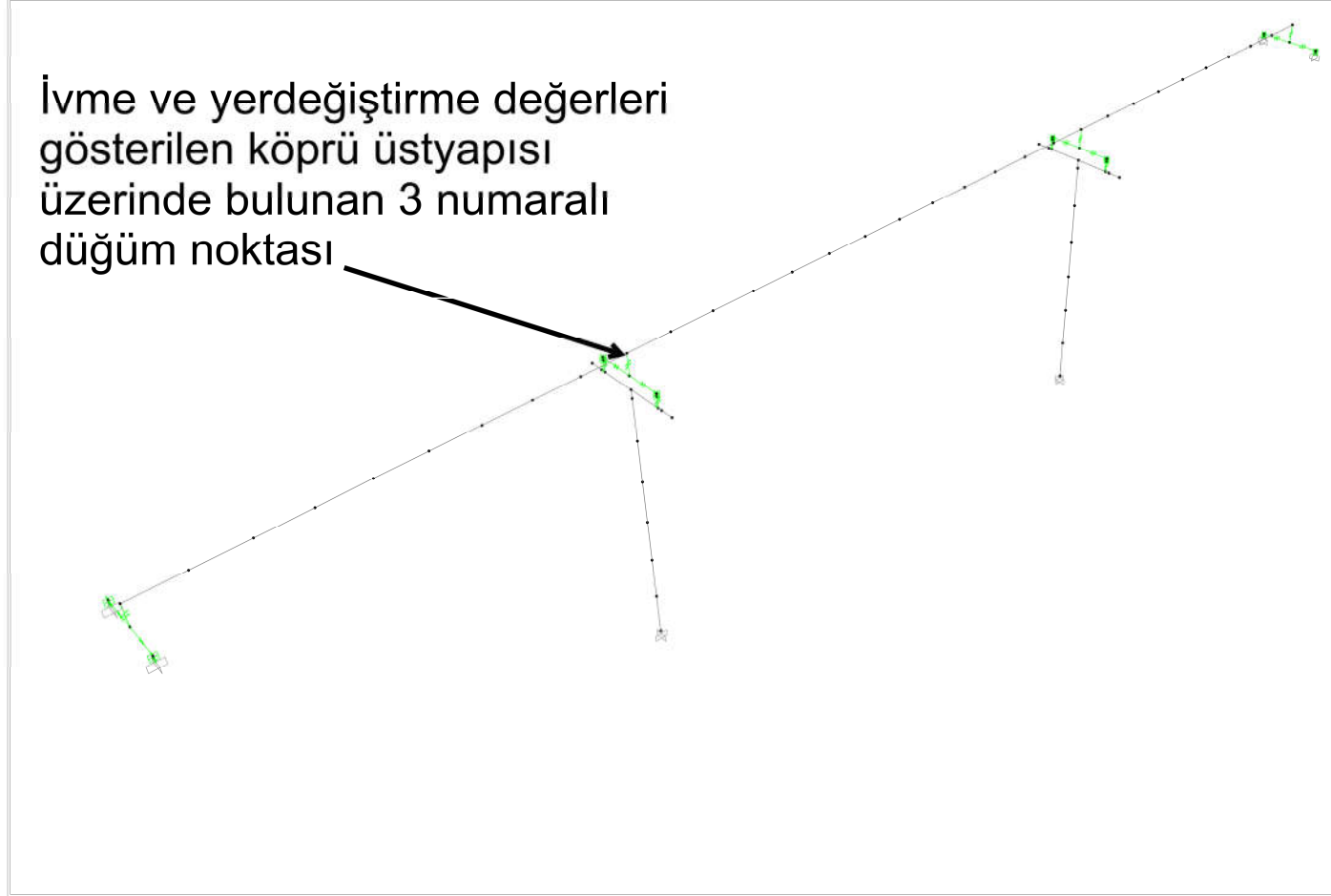
5.7 Zaman Tanım Alanında Çözüm

Zaman tanım alanında çözüm daha önce Bölüm 4.2’de verilen ivme kayıtları kullanılarak, direkt integrasyon yöntemiyle yapılmıştır. Sönüm katsayıları %5 sönüm oranına denk gelecek şekilde Sap2000 programın ilgili modülüne hesaplatılmıştır. Mesnetlerin histeretik sönümü ise deformasyonlarına bağlı olarak hesaba dahil olmaktadır.

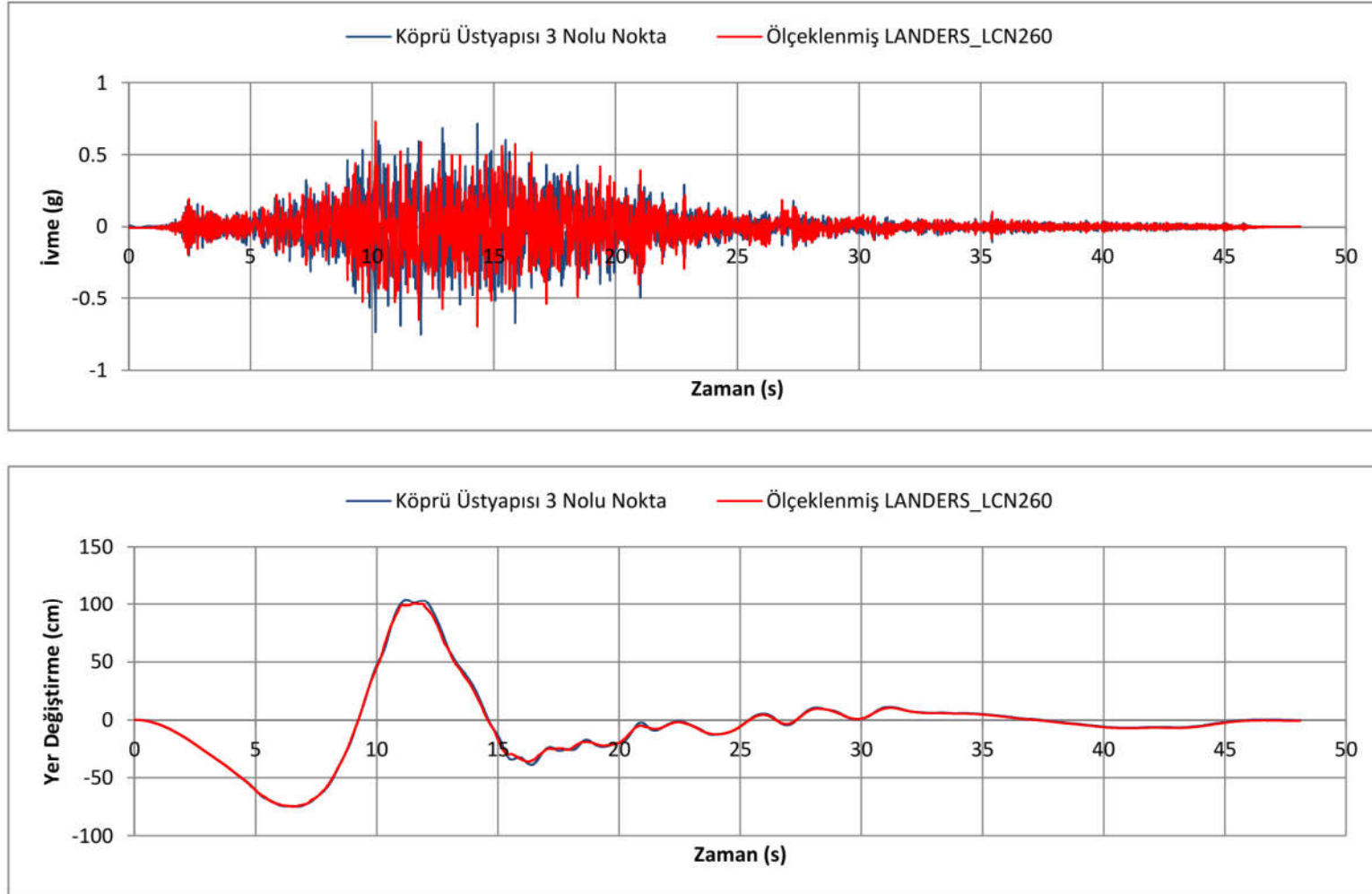
Çözümde mesnetlerin elastik ötesi davranış özellikleri Sap2000 programında bulunan “rubber isolator” link elemanı ile modellenmiştir. Bu link eleman Bouc-Wen model olarak adlandırılmaktadır. Mesnetler harici yapısal elemanlar elastik sınırları aşmadığından brüt kesit rijitlikleri ile tanımlanmıştır. Aslında betonarme elemanlar için çatlama kesit rijitlikleri dikkate alınarak yapılacak bir analizin gerçek davranışa daha yakın sonuç vereceği bilinmektedir. Ancak daha önceki analizlerde altyapı rijitlikleri brüt kesite göre alındığından ve çalışmada analiz yöntemleri arasındaki sonuçlar kıyaslanmak istendiğinden bu davranış göz ardı edilmiştir.

SAP2000 programı ile elde edilen mesnet yük çevrim eğrileri ideal mesnet modeli ile oldukça uyumludur.

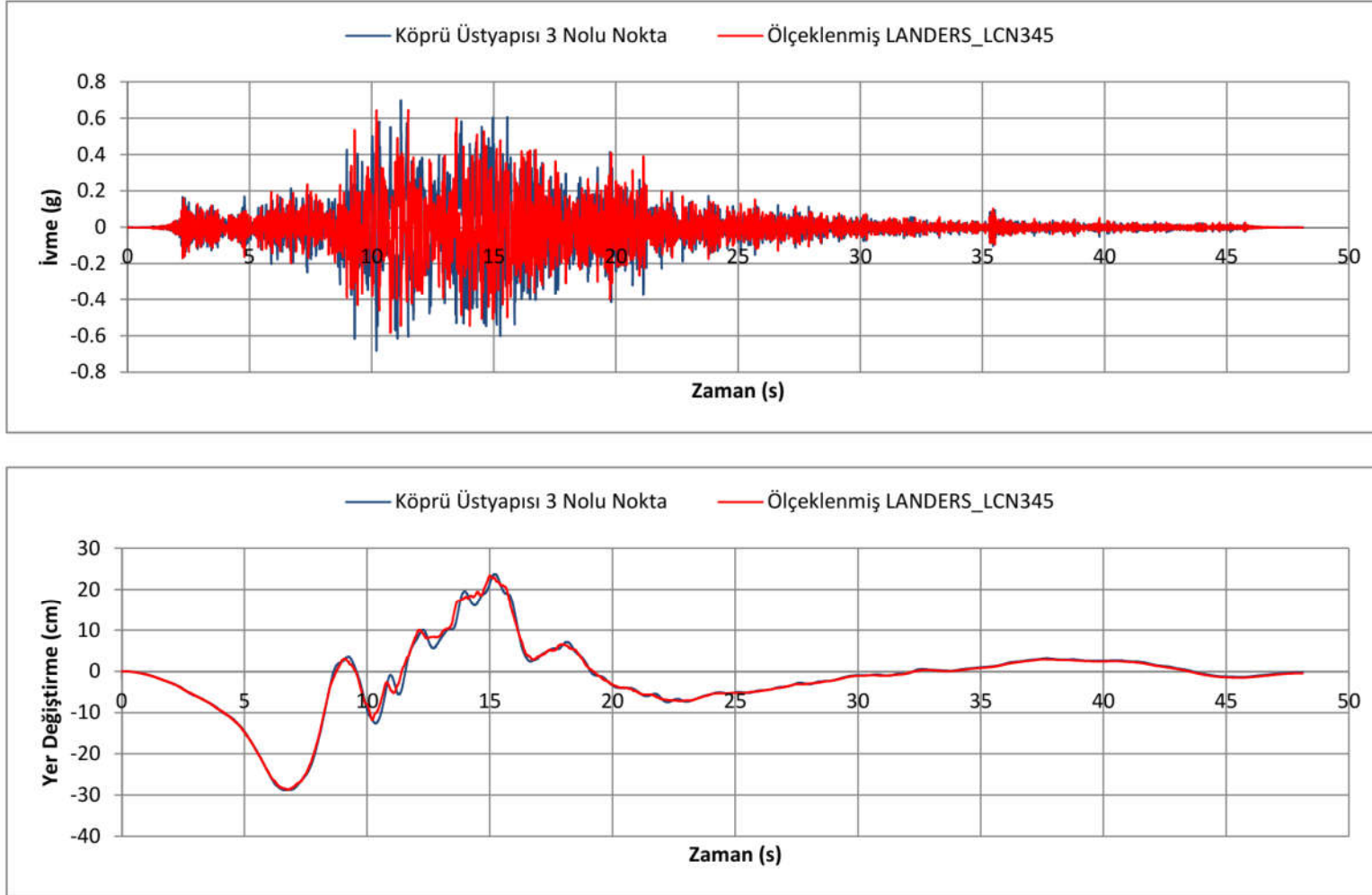
Aşağıda ayrıca köprü üst yapısı üzerinde bulunan 3 numaralı düğüm noktasına ait ivme ve yer değiştirme değerleri ilgili deprem kayıtlarına ait değerlerle karşılaştırılmıştır.



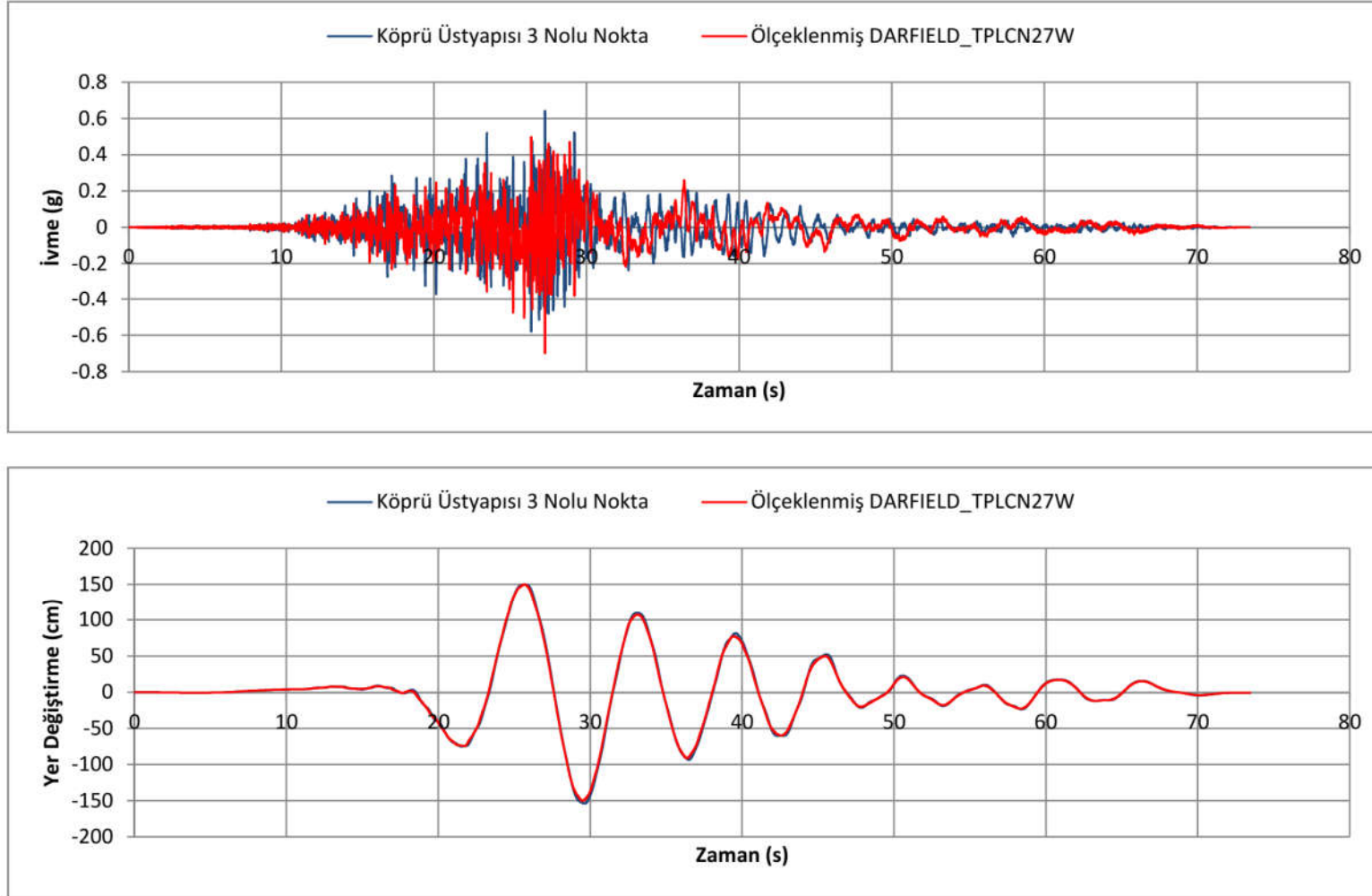
Şekil 5.29: Deplasman ve ivme değerleri gösterilen noktanın modeldeki yeri.



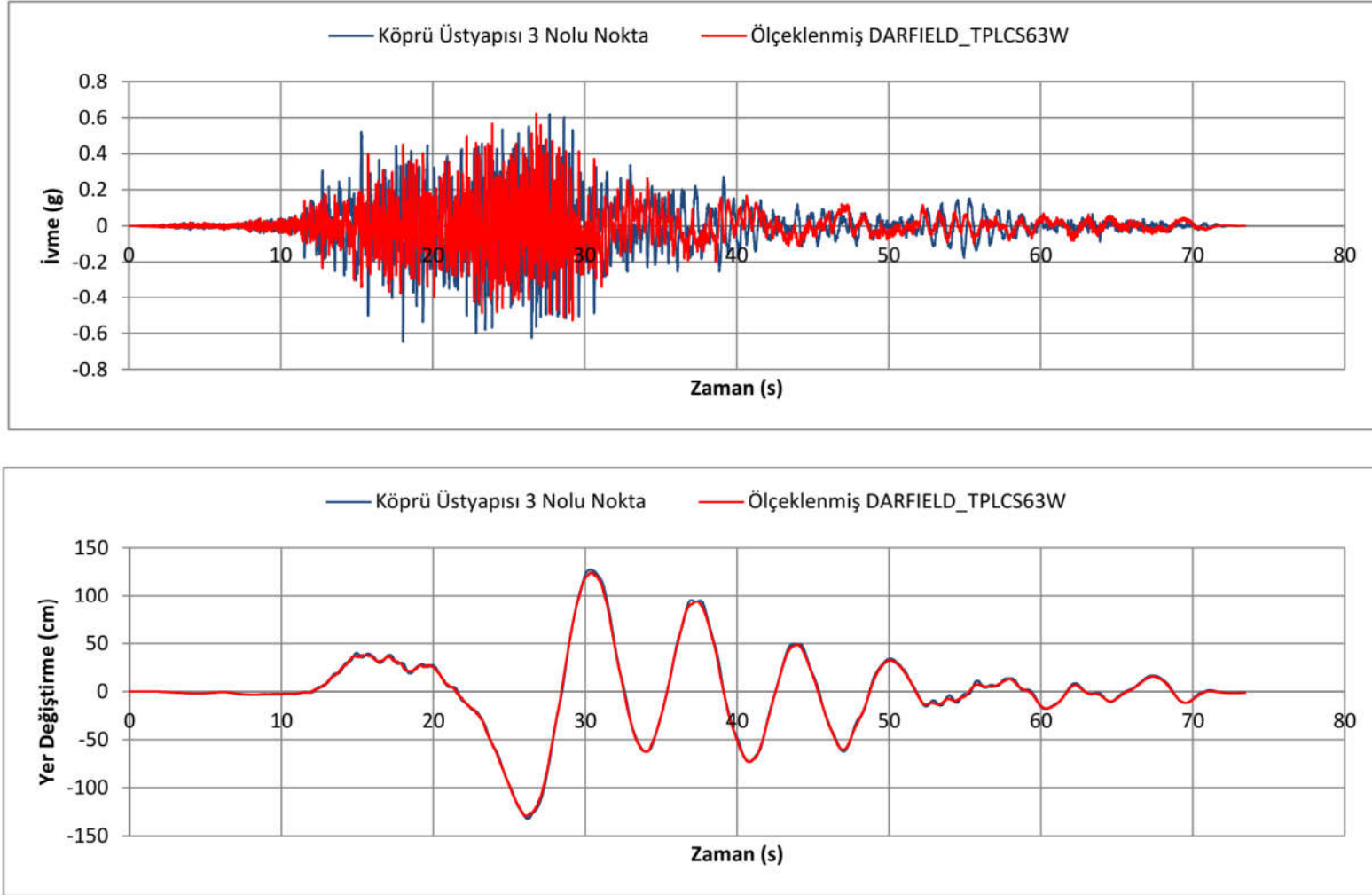
Şekil 5.30: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Landers boyuna doğrultu).



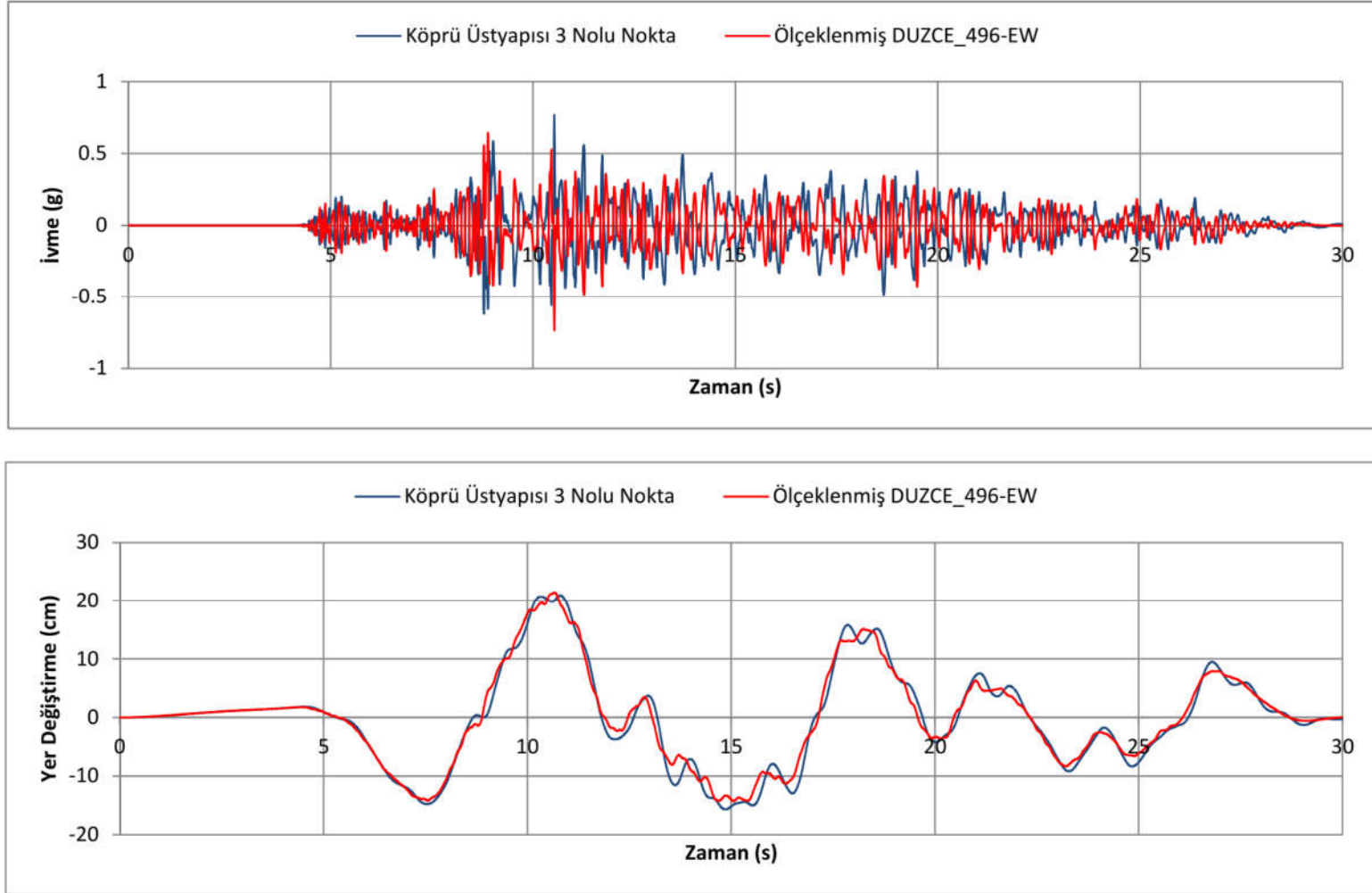
Şekil 5.31: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değıştirme grafikleri (Landers enine doğrultu).



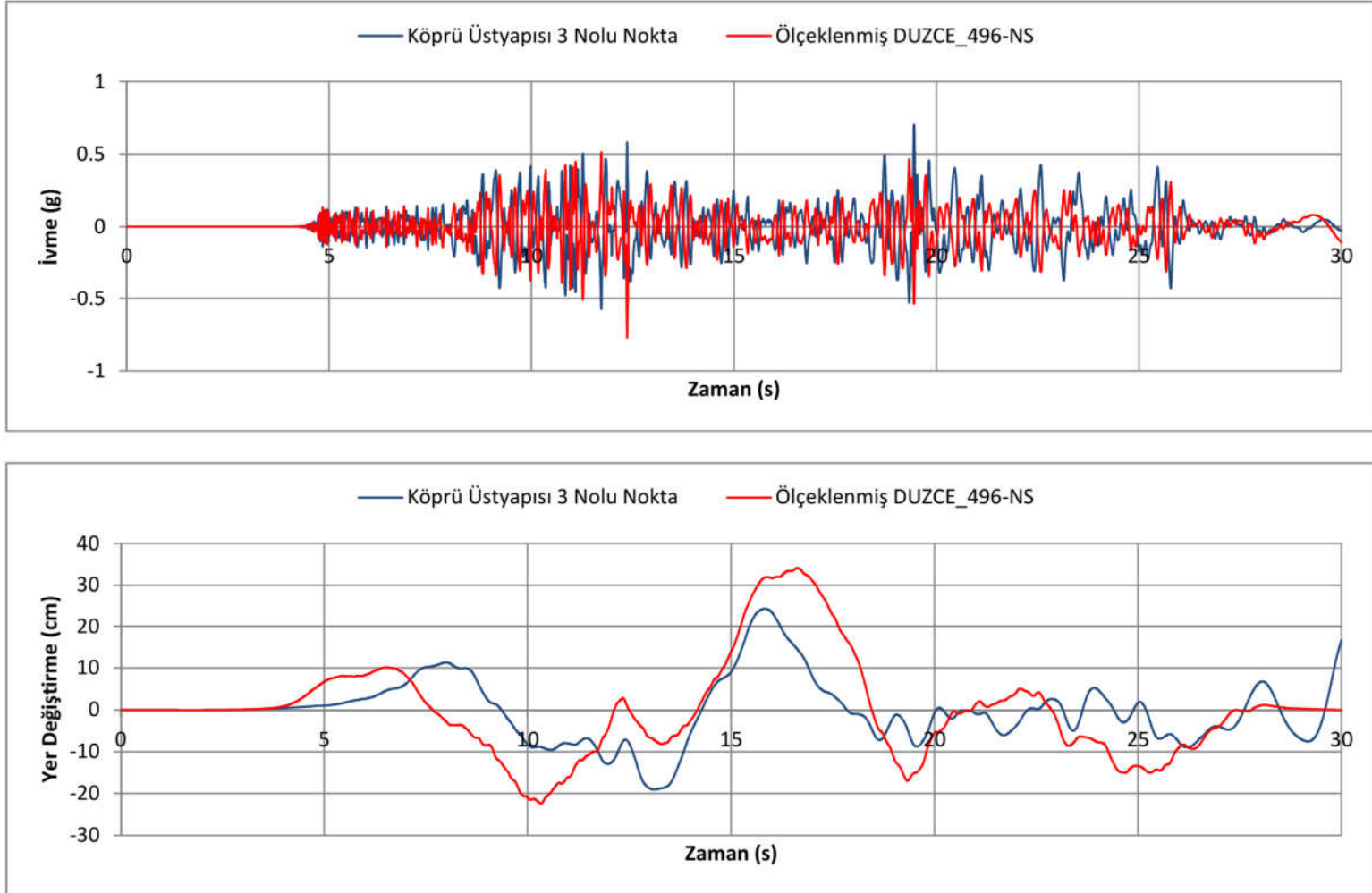
Şekil 5.32: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Darfield boyuna doğrultu).



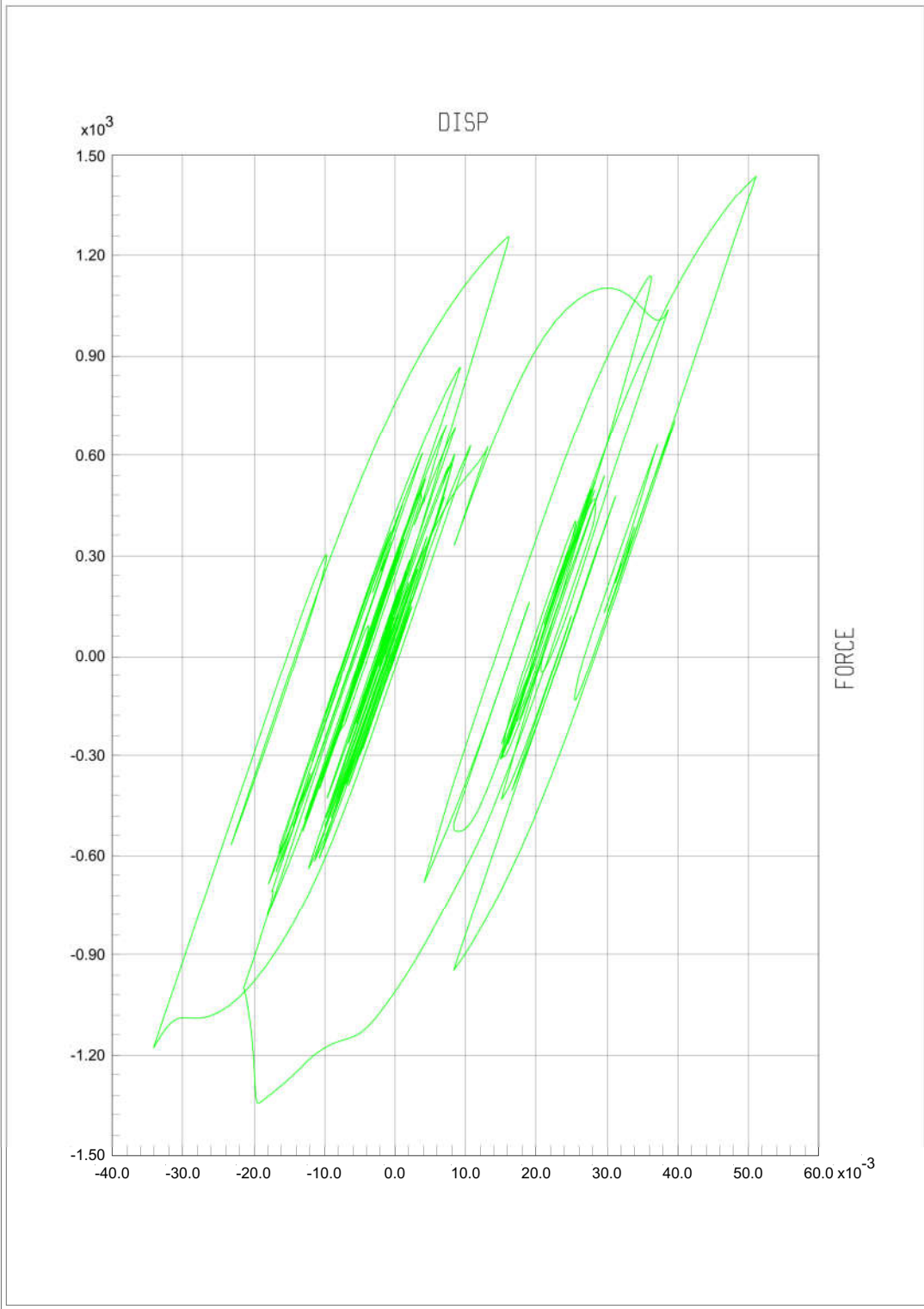
Şekil 5.33: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Darfield enine doğrultu).



Şekil 5.34: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Düzce boyuna doğrultu).

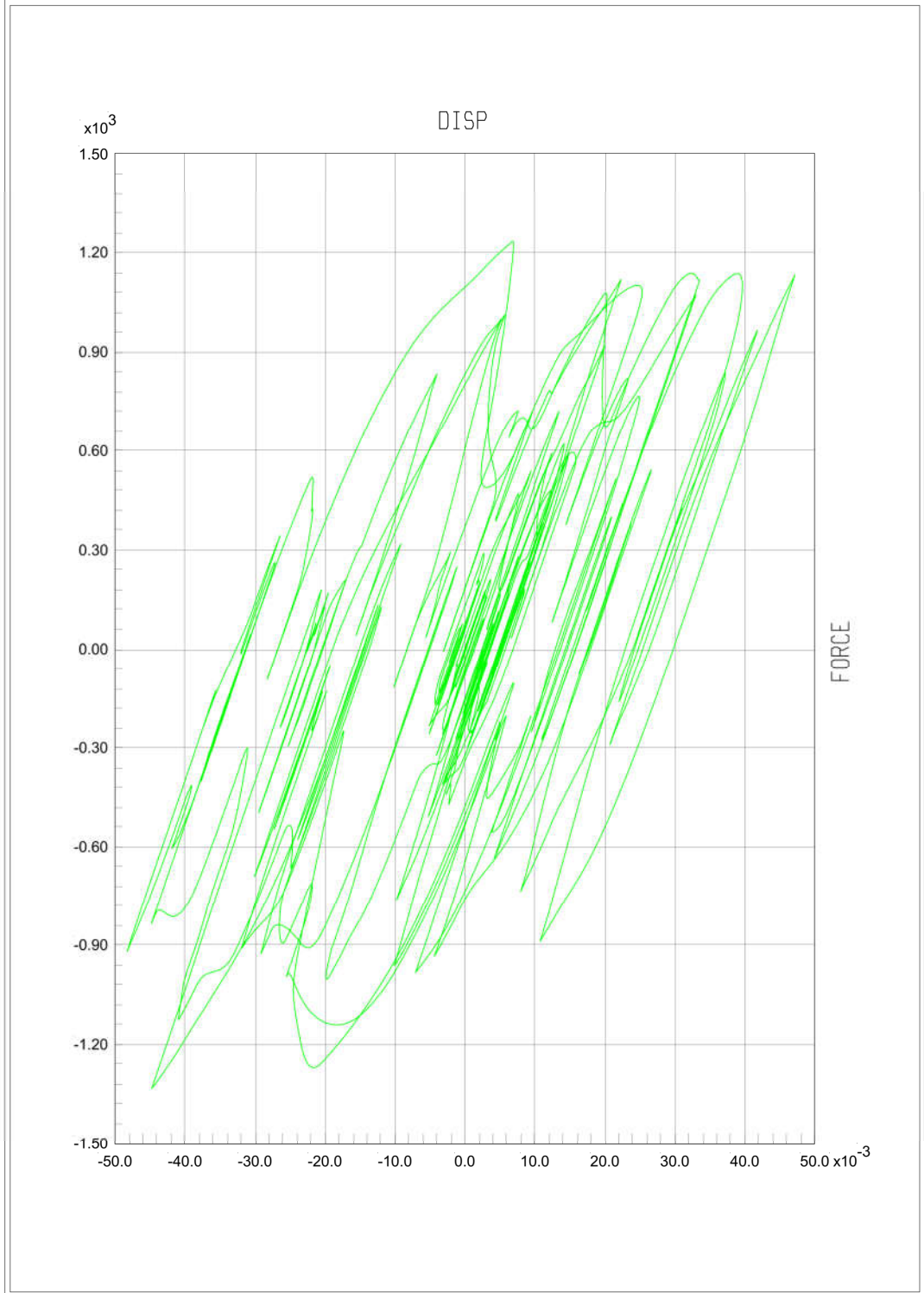


Şekil 5.35: Köprü üst yapısı ile ölçeklenmiş yer hareketine ait ivme ve yer değiştirme grafikleri (Düzce enine doğrultu).



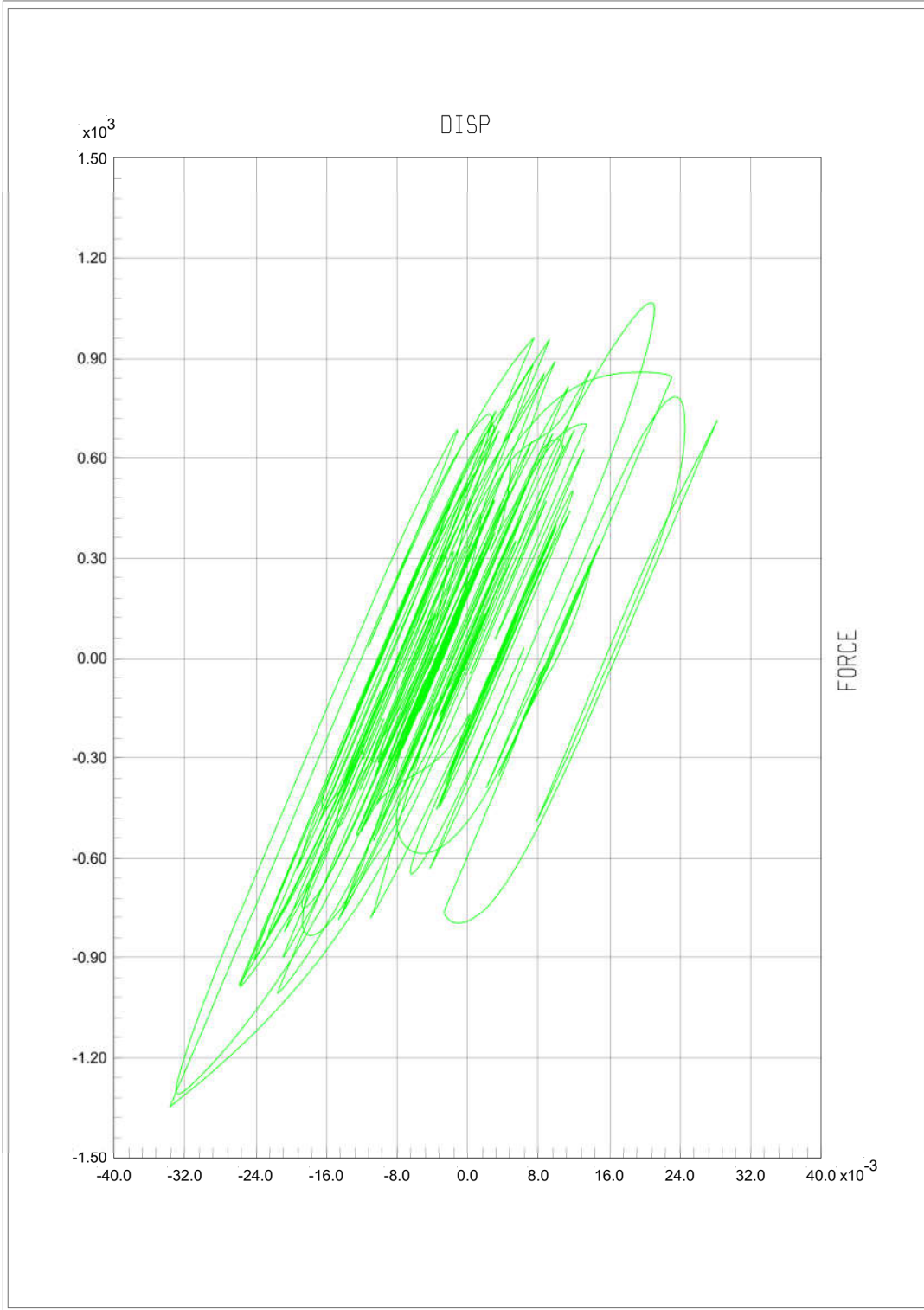
SAP2000 v14.2.2 - File:M-003 - Case:LANDERS - KN, m, C Units
Force: Link BRG_PIER_2_1 at End-I Shear 2-2 Vs Disp
Min is -1.343e+03 at -1.9247e-02 Max is 1.439e+03 at 5.1142e-02

Şekil 5.36: Landers depremi için kuvvet deformasyon çevrimi (boyuna doğrultu).



SAP2000 v14.2.2 - File:M-003 - Case:DARFIELD - KN, m, C Units
Force: Link BRG_PIER_2_1 at End-I Shear 2-2 Vs Disp
Min is -1.332e+03 at -4.4756e-02 Max is 1.233e+03 at 6.8798e-03

Şekil 5.37: Darfield depremi için kuvvet deformasyon çevrimi (boyuna doğrultu).



SAP2000 v14.2.2 - File:M-003 - Case:DUZCE - KN, m, C Units
Force: Link BRG_PIER_2_1 at End-I Shear 2-2 Vs Disp
Min is -1.347e+03 at -3.3704e-02 Max is 1.066e+03 at 2.0797e-02

Şekil 5.38: Düzce depremi için kuvvet deformasyon çevrimi (boyuna doğrultu).

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Yapılan çalışma sonucunda basitleştirilmiş yöntem ve buna bağlı çok modlu spektral çözüm ile yapılacak sismik yalıtım tasarımının; düzgün bir geometriye sahip, elastik ötesi davranışın mesnetler dışında oldukça kısıtlı olduğu köprülerde güvenilir sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Birbirini izleyen adımlarda elde edilen sonuçlar oldukça tutarlıdır. Ancak bu çalışmada; yapı-zemin etkileşimi, yapısal elemanların elastik ötesi davranışı, üstyapının hareketini kısıtlayacak işletme koşulları gibi etkenler dikkate alınmadığı unutulmamalıdır. Zemin koşullarına, köprü geometrisine bağlı olarak bu değişkenlerin yapının davranışına önemli derecede etki edeceği durumlarda; doğrusal çözüm yöntemlerinin gerçek davranıştan uzak sonuçlar vereceği bilinmelidir.

Doğrusal çözüm yöntemlerinin ön tasarım için oldukça faydalı bilgiler sağladığı görülmüştür. Daha rafine analizler yapılacağı durumlarda dahi doğrusal yöntemlerle yola çıkmak yapısal tasarımın doğasında bulunan deneme yanılma sürecini oldukça kısaltacaktır.

Çizelge 6.1’de görüleceği üzere basitleştirilmiş yöntem ve çok modlu spektral yöntemle elde edilen mesnet deformasyonları birbirine oldukça yakındır. Çok modlu spektral yöntemde, basitleştirilmiş yöntem ile bulunan rijitlik değerleri kullanıldığı ve yapının etkin periyodunun tek serbestlik dereceli eşdeğer sisteme yakın olduğu düşünüldüğünde benzer sonuçlar elde edilmesi makuldür.

Çizelge 6.1: Maksimum mesnet deformasyonlarının karşılaştırılması.

	Basitleştirilmiş Çözüm		Çok Modlu Spektral Çözüm		Zaman Tanım Alanında Çözüm	
	Boyuna mm	Enine mm	Boyuna mm	Enine mm	Boyuna mm	Enine mm
Kenarayak	92	79	92	79	70	56
Ortaayak	59	70	59	69	51	62
Ortaayak	59	70	59	69	52	62
Kenarayak	92	79	92	79	67	56

Analizi yapılan köprünün düzenli bir köprü olması, köprü enine ve boyuna serbestliklerinin birbirinden bağımsız olmasını sağlamaktadır. Bu sayede tek serbestlik dereceli sistem çözümü ile çok modlu spektral çözüm birbiri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Kullanılan iki yöntemde de sismik yalıtım araçları doğrusal kabul edilmiştir. Mesnetlerin doğrusal olarak tanımlanabilmesi için başlangıçta bir hedef deplasman seçilmiştir. Bu hedef deplasman köprünün işletme koşullarına, köprüde kullanılacak genişleme derzi mesafesine uygun olarak seçilmiştir. Kullanılan etkin rijitlik değerleri belirlenen hedef deplasmana göre hesaplanmaktadır.

Yalıtım araçlarının sisteme sağladığı sönüm ise yalıtım aracının histeretik eğrisi içerisinde kalan alana göre belirlenmektedir. Bu alan mesnetin sahip olduğu karakteristik dayanıma bağlı olarak değişiklik gösterir. Yaklaşık yöntemlerde hesaplanan sönüm katsayısı kullanılarak kompozit davranış spektrumu oluşturulmuştur. Kompozit davranış spektrumunda mesnetlerin sağladığı sönüm, sistem etkili periyodunun 0.8 katından daha büyük olan periyotlarda dikkate alınmıştır.

Zaman tanım alanındaki çözümde, üç farklı depreme ait kayıt takımları köprüye eş zamanlı olarak etkilmiştir. Bu çözümde mesnetler nonlineer olarak tanımlanmıştır. Zaman tanım alanındaki çözümde elde edilen sonuçlar yaklaşık yöntemlerle elde edilen sonuçlara oldukça yakındır. Çizelge 6.1’de görüleceği üzere zaman tanım alanında çözümle bulunan deformasyon değerleri yaklaşık çözümlere göre daha düşüktür.

Çizelge 6.2’de çok modlu spektral yöntem ve zaman tanım alanında çözüme ait kolon kesme kuvvetleri verilmiştir. İki çözüm yöntemindeki sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

Çizelge 6.2: Kolon kesme kuvvetleri tablosu.

Çok Modlu Spektral Çözüm		Zaman Tanım Alanında Çözüm	
V2 (Boyuna) KN	V3 (Enine) KN	V2 (Boyuna) KN	V3 (Enine) KN
-6758.45	-9836.58	-5317.15	-9086.95
6677.84	9836.58	5292.29	9808.31
-6758.45	-9836.58	-5317.15	-9086.95
6677.84	9836.58	5292.29	9808.31

Bu çalışma içerisinde analizi yapılan köprünün düzenli bir köprü olması farklı yöntemlerle elde edilen sonuçların örtüşmesini sağlamaktadır. İleriki çalışmalarda yatay veya düşey kurpta bulunan, ayakların verev yerleştirildiği, farklı yükseklikte çok fazla ayağa sahip köprülerde de benzer çalışmalar yapılarak, yaklaşık çözüm yöntemlerinin geçerli olduğu sınırlar belirlenebilir.

Başka bir konu da yapısal elemanların elastik ötesi davranışıdır. Sismik yalıtım uygulanan yapılar için şartnamelerin genel yaklaşımı yapısal elemanların plastik şekil değiştirmelerini sınırlama yönündedir. Örneğin AASHTO içerisinde, sismik yalıtımlı köprüler için deprem davranış katsayılarında (R) azaltma yapılmaktadır. Bu çalışmada ise kolonlarda ve üstyapıda elastik malzeme tanımı yapılmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda, sismik yalıtım ve sistemin sünekliği arasındaki ilişki incelenebilir.



KAYNAKLAR

- AASHTO,** (2011). *Guide specifications for LRFD Seismic Design, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington, D.C.
- AASHTO,** (1999). *Guide specifications for seismic isolation design, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington, D.C.
- AFAD Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.** (2018). Ankara: AFAD.
- Aldemir, Ü. & Aydın, E.** (2005). Depreme Dayanımlı Yapı Tasarımında Yeni Yaklaşımlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 435, 2005-1, 81-89.
- ARFEN Elastomerik Mesnetler.** Erişim: 04.09.2019, <http://arfen.com.tr/elastomerik-mesnetler>.
- Bouc R** (1971) Modèle mathématique d'hystérésis. *Acustica* 21:16–25. (A mathematical model for hysteresis)
- Buckle, I. & Eeri, M. & Mayes R.L.** (1990). Seismic Isolation History, Application, and Performance- A World View. *Earthquake Spectra*, Vol.6, No.2, 161-201.
- Buckle, I. & Constantinou, M.C. & Dicleli, M. & Ghasemi, H.** (2006). *Seismic Isolation Of Highway Bridges* (Technical Report). University at Buffolo, State University of Newyork, MCEER-06-SP07.
- Chen W. F. & Duan L.** (2014). *Bridge Engineering Handbook-Seismic Design*. London: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Chopra, A. K.** (2012). *Dinamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering (4.edition)*. Boston: Prentice Hall.
- Clough, R. W. & Penzien, J.** (1975). *Dynamics of Structures*. USA: McGraw-Hill.
- Constantinou, M.C. & Tsopelas P. & Kasalanati A. & Wolff E.D.** (1999). *Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings* (Technical Report). University at Buffolo, State University of Newyork, MCEER-99-0012.
- Constantinou, M.C. & Whittaker A. S. & Kalpakidis Y. & Fenz D.M. & Warn G.P.** (2007). *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading* (Technical Report). University at Buffolo, State University of Newyork, MCEER-07-0012.
- Constantinou, M.C. & Kalpakidis I. & Filiatrault A. & Ecker Lay R.A.** (2011). *LRFD- Based Analysis and Design Procedurs for Bridge Bearings and Seismic Isolators* (Technical Report). University at Buffolo, State University of Newyork, MCEER-11-0004.

- Dicleli, M. & Mansour, M.** (2003). Seismic Retrofitting of Highway Bridge in Illinois Using Friction Pendulum Seismic Isolation Bearings and Modeling Procedures. *Engineering Structural*, Vol.25, No.9, 1139-1156.
- Fenz, D. M. & Constantinou, M.C.** (2008). *Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multispherical sliding bearings*. (Technical Report). University at Buffalo, State University of Newyork, MCEER-08-0018.
- Fenz, D. M. & Eeri, S.M. & Constantinou, M.C. Eeri, M.** (2008). Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, Vol.24, No.4, 1011-1028. DOI: 10.1193/1.2982531.
- Gazi, H.** (2015). *Sismik İzolasyonlu Binaların Deprem Yükleri Altındaki Olasılıksal Davranışı*. (Doktora tezi). Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kelly, J.M. & Lee, J.J.** (2018). Vertical Flexibility in Isolation Systems. *Civil Engineering Research Journal*, Vol.4, Issue.1, 1-11. DOI: 10.19080/CERJ.2018.04.555629.
- Kelly, T. E.** (2001). *Base Isolation of Structures*. Wellington, New Zealand: Holmes Consulting Group Ltd.
- Koval, V.** (2015). *Improved Simplified Methods for Effective Seismic Analysis and Design of Isolated and Damped Bridges in Western and Eastern North America* (Phd Thesis). Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto.
- MAGEBA Seismic isolator bearings Reston Pendulum Product Brochure**. Erişim: 04.09.2019, <https://www mageba-group.com/en/794/Detail.htm>.
- Mayes, R. L. & Buckle, I. G. & Kelly T. E. & Jones, L. R.** (1992). AASHTO Seismic Isolation Design Requirements for Highway Bridges. *Journal Of Structural Engineering*, Vol.118, No.1, 284-304.
- Mokha, A. S. & Constantinou, M.C. & Reinhorn, A. M.** (1990). *Experimental study and analytical prediction of earthquake response of a sliding isolation system with spherical surface*. (Technical Report). University at Buffalo, State University of Newyork, NCEER-90-0020.
- Mosqueda, G. & Whittaker, A. S. & Fenves, G. L** (2004). Characterization and modeling of friction pendulum bearings subjected to multiple components of excitation. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. Vol.130 No.3, 433-442.
- Naeim, F. & Kelly, J. M.** (1999). *Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice*. Newyork: John Wiley & Sons, Inc.
- Naeim, F.** (2001). *The Seismic Design Handbook* (2.edition). Newyork: Springer Science+Business Media, LLC.
- Nagarajaiah, S. & Reinhorn, A. M. & Kelly T. E. & Constantinou, M. C.** (1991). Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures. *Journal Of Structural Engineering*, Vol.117, No.7, 2034-2054.
- PEER Pacific earthquake engineering resource center: NGA database**. Erişim: 04.09.2019, <https://ngawest2.berkeley.edu>.

- Politopoulos, I. & Sollogoub, P.** (2005). Vulnerability of elastomeric bearing isolated buildings and their equipment. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.9 No.4, 525-546.
- Politopoulos, I. & Pham, H.K.** (2009). Sensitivity of Seismically Isolated Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 38, 989-1007.
- Priestley M.J.N. & F. Seible & Calvi G.M.** (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Ray, T. & Sarlis, A. A. & Reinhorn, A. M. & Constantinou, M. C.** (2013). Hysteretic models for sliding bearings with varying frictional force. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. DOI: 10.1002/eqe.2373.
- Sarebanha, A.** (2018). *Experimental and Numerical Simulation of Seismically Isolated Critical Facilities Under Extreme Seismic Loading* (Phd Thesis). Structural Engineering Department, University Of California, San Diego.
- Simo, J. C. & Kelly, J. M.** (1983). Finite element analysis stability of multilayer elastomeric bearings. *Engineering Structural*, Vol.6, No.4, 162-174.
- Skinner, R. I. & Kelly, T. E. & Robinson B.** (2011). *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*. Wellington, New Zealand: Holmes Consulting Group Ltd.
- TENSA,** (2015). *Products Catalogue 07 Seismic Isolators*.
- TDTH 2018 Türkiye Deprem Tehlike Haritası.** Erişim: 04.09.2019, <https://tdth.afad.gov.tr>.
- Tsopelas, P. C. & Constantinou, M.C.** (1997). Study of Elastoplastic Bridge Seismic Isolation System. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. Vol.123 No.4, 489-498.
- Tsopelas, P. C. & Rossis, P. C. & Constantinou, M.C. & Buchanan, R. & Reinhorn, A. M.** (2005). *3D-BASIS-ME-MB: computer program for nonlinear dynamic analysis of seismically isolated structures*. (Technical Report). University at Buffalo, State University of New York, MCEER-05-0009.
- Warn, G. P. & Whittaker, A. S. & ASCE M.** (2006). Property Modification Factors for Seismically Isolated Bridges. *Journal Of Bridge Engineering*, Vol.11, No.3, 371-377. DOI: 10.1061/_ASCE_1084-0702_2006_11:3_371_.
- Warn, G. P. & Ryan, K. L.** (2012). A review of seismic isolation for buildings historical development and research needs. *Buildings*, 2, 300-325. DOI:10.3390/buildings2030300
- Wei, C.** (2013). *Seismic Analysis and Response of Highway Bridges with Hybrid Isolation* (Phd Thesis). Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno.

Wen Y.K. (1976) Method for random vibration of hysteretic systems. J Eng Mech Div 102(EM2):246–263



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Sami ARI
Doğum Tarihi ve Yeri : UŞAK, 1985
E-posta : cesamiari@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 09/2009-02/2011 Akbatı AVYM İnşaatı, İstanbul, Demirkaya İnşaat (Alt Yüklenici Firma), Şantiye Şefi
- 02/2012- 05/2013 Trump Towers Metro-Metrobüs Bağlantı Tüneli, İstanbul, Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., Hakediş ve Saha Kontrol Mühendisi
- 05/2013 - 11/2013 İş GYO Tuzla Operasyon Merkezi İnşaatı, İstanbul, Perspektif Yapı (Altyüklenici), Teknik Ofis Şefi
- 09/2014- 09/2016 Kuzey Marmara Otoyolu, İstanbul, Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., Tasarım Koordinatörü
- 09/2016- Devam Ediyor, Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. Tasarım Ofisi, İstanbul, Tasarım Mühendisi