

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

128593

BİNALARDAKİ DEĞERLİ EKİPMANLARIN SİSMİK
TİTREŞİMLERDEN KORUNMASI

İnş.Müh. Hasan KORUCU

F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı

: Prof.Dr.R.Faruk YÜKSELER

R. Yükseler

Prof. Dr. R. Faruk YÜKSELER

İSTANBUL, 2002

H. Özkul

Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL

T. Kocatürk

Prof. Dr. Turgut KOCA TÜRK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iii
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇELİK HALAT İZOLATÖRLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI.....	5
3. ÇELİK HALAT İZOLATÖRLERİN MODELLENMESİ.....	12
3.1 Yatay Yönde Test Ve Modelleme.....	12
3.2 Düşey Yönde Test Ve Modelleme.....	14
4. EKİPMANLAR İÇİN ÇELİK HALAT İZOLASYON SİSTEMLERİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK ÇÖZÜMLERİ.....	38
4.1 Ekipmanın Ve İzolasyon Sisteminin Tanımlanması.....	38
4.2 Alet Düzenegi Ve Deneysel Program.....	39
4.3 Test Sonuçları.....	40
4.4 Çok Rijit Çelik Halat Sistemlerin Analitik İncelenmesi.....	42
5. CEVABIN ANALİTİK TAHMİNİ.....	67
5.1 Büyük Salınımlar İçin Hareket Denklemleri.....	67
5.2 Küçük Salınımlarda Hareket Denklemleri.....	69
5.3 Basitleştirilmiş Analiz Yöntemi.....	70
5.4 Deneysel Ve Analitik Sonuçların Karşılaştırılması.....	73
5.5 Basitleştirilmiş Analiz Yöntemine Nümerik Bir Yaklaşım: Newmark'ın Nonlineer Cevap Analizi.....	74
5.5.1 Modal Analiz İle Çözümlerin Elde Edilmesi.....	74
5.5.1.1 El Centro Yer Hareketi İçin Modal Analiz.....	75
5.5.1.2 Taft Yer Hareketi İçin Modal Analiz.....	76
5.5.2 Akış Diyagramı.....	78
5.5.3 Bilgisayar Programının Yazılması Ve Sonuçların Elde Edilmesi.....	79
5.5.3.1 El Centro Yer Hareketi İçin Analiz.....	79
5.5.3.2 Taft Yer Hareketi İçin Analiz.....	88
5.5.3.3 Uç Değerlerin Birleştirilmesi.....	96
5.5.3.4 Elde Edilen Sonuçların Deneysel Ve Analitik Sonuçlar İle Karşılaştırılması.....	97
6. SONUÇ.....	120
KAYNAKLAR.....	122
ÖZGEÇMİŞ.....	125

SİMGE LİSTESİ

A	Boyutsuz nicelik
a	İzolatörler arasındaki uzaklığın yarısı
a_n	Deneysel sonuçlardan elde edilmiş katsayı
A_0	Deneysel sonuçlardan elde edilmiş katsayı
b_M	Deneysel sonuçlardan elde edilmiş katsayı
C	İntegral sabiti
D	Uzaklık
F	Kuvvet
F_0	Deplasmana bağlı iskelet eğri
F_D	Yükleme ve boşaltma kolları arasındaki deplasmana bağlı yarı fark
F_N	Kuzeydeki izolatöre ait kuvvet
F_S	Güneydeki izolatöre ait kuvvet
F_y	Akma kuvveti
h	İzolatörlerin kütle merkezine uzaklığı
I_0	Kütle merkezinden geçen yatay eksene göre atalet momenti
I	Atalet momenti
K	Sistem rijitliği
K_r	Dönme rijitliği
K_x	Burulma yönünde rijitlik
K_z	Düşey yönde rijitlik
m	Kütle
M	Deneysel sonuçlardan elde edilmiş katsayı
n	Boyutsuz nicelik
N	Deneysel sonuçlardan elde edilmiş katsayı
Q	Karakteristik dayanım
Q_1	Deneysel sonuçlardan elde edilmiş katsayı
Q_2	Deneysel sonuçlardan elde edilmiş katsayı
r	Atalet yarıçapı
S_a	Spektral ivme
S_d	Spektral deplasman
T	Periyod
U	Deplasman
U_N	Kuzeydeki izolatöre ait deplasman
U_S	Güneydeki izolatöre ait deplasman
u_x	Yatay deplasman
u_z	Düşey deplasman
\dot{u}_{gx}	Harekete ait yatay ivme
\dot{u}_{gz}	Harekete ait düşey ivme
W	Ağırlık
W_D	Moment-dönme bağıntısı altındaki enerji
W_S	Maksimum deplasmanlarda depo edilen gerilme enerjisi
Y	Akma deplasmanı
y_n	Genelleştirilmiş koordinat
Z	Histeretik boyutsuz bir nicelik
α	Boyutsuz nicelik
β	Boyutsuz nicelik
ϕ_n	Mod şekli
Φ	Modal matris
γ	Boyutsuz nicelik
ω_n	Serbest titreşim frekansı

ω_x Burulma frekansı
 ω_z Düşey frekans
 ξ Eşdeğer viskoz sönüm oranı



KISALTMA LİSTESİ

CM	Kütle Merkezi
SRSS	Square Root of Sum of Squares (Karelerin toplamının karekökü)



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 8 sargılı helis çelik halat izolator	4
Şekil 1.2 4 sargılı kemer çelik halat izolator	4
Şekil 2.1 Montaj metotları	6
Şekil 2.2 Bir kabinin çelik halat izolatorlerle ile taşınması	6
Şekil 2.3 Çelik halat izolatorlerin kullanım usulleri	7
Şekil 2.4 Kemer ve helis çelik halat izolatorlerin kullanım alanları	8
Şekil 2.5 Kemer ve helis çelik halat izolatorlerin kullanım alanları	9
Şekil 2.6 Çeşitli büyüklükteki kompakt çelik halat izolatorler	10
Şekil 2.7 Kompakt çelik halat izolatorlerin kullanım alanları	11
Şekil 3.1 Helis ve kemer çelik halat izolatorlerin geometrik özellikleri	20
Şekil 3.2 Çelik halat izolatorlerin burulma yönünde test düzeneği	21
Şekil 3.3 İkili doğrusal modele ait parametreler	21
Şekil 3.4 Burulma hareketine maruz bırakılan No.1 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	22
Şekil 3.5 Burulma hareketine maruz bırakılan No.2 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	23
Şekil 3.6 Burulma hareketine maruz bırakılan No.3 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	24
Şekil 3.7 Sabit yükseklik korunarak gerçekleştirilen No.5 çelik halat izolatöre ait test düzeneği	25
Şekil 3.8 Çelik halat izolatorlerin basınç – çekme yönündeki testine ait düzenek	25
Şekil 3.9 Kesme hareketine maruz bırakılan No.5 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	26
Şekil 3.10 Çelik halat izolatorlerin basınç-çekme yönünde tipik kuvvet-deplasman grafiği	27
Şekil 3.11 Basınç – çekme yönünde devirsel hareket için kuvvet – deplasman grafiği	28
Şekil 3.12 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.1 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	29-30
Şekil 3.13 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.2 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	31-32-33
Şekil 3.14 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.3 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	34-35-36
Şekil 3.15 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.4 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması	37
Şekil 4.1 Test edilen ekipman kabini	53
Şekil 4.2 Sarsma tablasındaki izole edilmiş kabine ait görüntüler (a) Önden görünüm, (b) İzolasyon Sistemi (No.3)	54
Şekil 4.3 Alet düzeneği diyagramı	55
Şekil 4.4 Ölçü aletlerinin yerleşimi	56
Şekil 4.5 Taft N21E hareketine ait yer ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası	57
Şekil 4.6 Taft N21E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 5 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası	58
Şekil 4.7 Taft N21E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 7 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası	59
Şekil 4.8 El Centro S00E hareketine ait yer ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası	60
Şekil 4.9 El Centro S00E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 5 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası	61
Şekil 4.10 El Centro S00E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 7 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası	62

Şekil 4.11 Pacoima Barajı S74W hareketine ait yer ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası	63
Şekil 4.12 Test edilen izole edilmiş ekipmanın ağırlık merkezine ait deplasman tanım alanı .	64
Şekil 4.13 Taft 7 nci kat hareketi ile test izole edilmiş kabine ait moment–dönme grafikleri .	65
Şekil 4.14 Sistem 4'e ait moment – dönme grafikleri.....	66
Şekil 5.1 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği	81
Şekil 5.2 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği	83
Şekil 5.3 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği	85
Şekil 5.4 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği	87
Şekil 5.5 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği.....	89
Şekil 5.6 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği.....	91
Şekil 5.7 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği.....	93
Şekil 5.8 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği.....	95
Şekil 5.9 Çelik halat izolatörler tarafından taşınan ekipmana ait model.....	102
Şekil 5.10 Ekipmana ait serbest cisim diyagram	103
Şekil 5.11 Taft Yer Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması	104
Şekil 5.12 Taft 5 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	105
Şekil 5.13 Taft 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	106
Şekil 5.14 El Centro Yer Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	107
Şekil 5.15 El Centro 5 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması	108
Şekil 5.16 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması	109
Şekil 5.17 Pacoima Yer Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	110
Şekil 5.18 Taft 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	111
Şekil 5.19 El Centro Yer Hareketi için, üst seviye yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	112
Şekil 5.20 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması	112
Şekil 5.21 Taft 7 nci Kat Hareketi için, izolatör yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	113
Şekil 5.22 El Centro Yer Hareketi için, izolatör yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	114
Şekil 5.23 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, izolatör yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	114
Şekil 5.24 Taft 7 nci Kat Hareketi için, izolatör düşey deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	115
Şekil 5.25 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, izolatör düşey deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması	116
Şekil 5.26 Taft 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	117
Şekil 5.27 Taft 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	117
Şekil 5.28 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması.....	118

Şekil 5.29 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması	118
Şekil 5.30 Harmonik titreşim için sistem 1'e ait analitik moment – dönme ilişkisi.....	119



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Test edilen çelik halat izolatörlerin geometrik özellikleri	17
Çizelge 3.2 İzolatör modellerinin burulma ve kesme yönlerindeki parametreleri	18
Çizelge 3.3 Düşey yöndeki çelik halat izolatör modeline ait F_0 fonksiyonu katsayıları.....	19
Çizelge 3.4 Düşey yöndeki çelik halat izolatör modeline ait F_D fonksiyonu katsayıları.....	19
Çizelge 4.1 Deney programında kullanılan deprem titreşimlerine ait karakteristik özellikler ..	43
Çizelge 4.2 İzole edilmiş ekipmanın, Taft Yer Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir ...	44
Çizelge 4.3 İzole edilmiş ekipmanın, Taft 5 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir ..	45
Çizelge 4.4 İzole edilmiş ekipmanın, Taft 7 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir ..	46
Çizelge 4.5 İzole edilmiş ekipmanın, El Centro Yer Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir ..	47
Çizelge 4.6 İzole edilmiş ekipmanın, El Centro 5 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir ..	48
Çizelge 4.7 İzole edilmiş ekipmanın, El Centro 7 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir ..	49
Çizelge 4.8 İzole edilmiş ekipmanın, Pacoima Barajı Yer Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir ..	50
Çizelge 4.9 Deneylelerden elde edilen, izole edilmiş kabine ait dinamik özellikler	54
Çizelge 4.10 Ekipmanın Sistem 4 için analitik uç cevapları ve izole edilmemiş kabinin deneysel uç cevapları	52
Çizelge 5.1 Nonlineer sistemler için Newmark Metodu.....	78
Çizelge 5.2 Değiştirilmiş Newton – Raphson iterasyonu	79
Çizelge 5.3 El Centro Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 1)....	80
Çizelge 5.4 El Centro Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 2)....	82
Çizelge 5.5 El Centro Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1)....	84
Çizelge 5.6 El Centro Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 2)....	86
Çizelge 5.7 Taft Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 1).....	88
Çizelge 5.8 Taft Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 2).....	90
Çizelge 5.9 Taft Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1).....	92
Çizelge 5.10 Taft Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1).....	94
Çizelge 5.11 Deneysel ve analitik uç cevap değerlerinin karşılaştırılması	98-99
Çizelge 5.12 Sistem 1'e ait Şekil 4.22'deki Moment – Dönme grafiklerinden elde edilmiş özellikler	100
Çizelge 5.13 Basitleştirilmiş Yöntemde kullanılan Sistem 1'e ait karakteristik değerler	101

ÖNSÖZ

Çelik halat izolatörler, askeri donanım ve endüstriyel makinelerin şok ve titreşim izolasyonlarında oldukça fazla uygulama imkânı bulmuş sistemlerdir. Günlük hayatımızda, birçok alanda kullandığımız bu sistemler hakkında çok fazla yayınlanmış çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında, çelik halat sistemlerin çalışma prensipleri ve bu sistemler üzerinde yapılmış deneysel ve analitik çalışmalar anlatılmıştır. Bu çalışmalarda yenilik olarak, Newmark'ın nonlineer cevap analizi metodu kullanılarak yazılan bir bilgisayar programı vasıtasıyla yeniden analiz edilmiş, deneysel ve analitik sonuçlara ne kadar yaklaşık sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir.

Yüksek lisans eğitimi ve tez çalışmam boyunca, mesleğimin gerektirdiği görevler ve sorumluluklar nedeniyle yaşadığım aksaklıkları olgunlukla karşılayan, eğitimimi mesleğimle birlikte yürütebilmem konusunda sürekli bana destek olan, yaşadığım zorlukları, yol göstererek çözümleneme yardımcı olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak kariyerimde ilerlememde etken olan tez danışmanım, hocam Prof.Dr.R.Faruk YÜKSELER'e sonsuz teşekkür ederim. Özellikle bilgisayar programlama konusunda yardımcı olan ve bilgilerini esirgemeyen Araş.Gör.Dr.Serap ÇABUK ve Yrd.Doç.Dr.Özden ÇAĞLAYAN'a vakit ayırdıkları için minnettarım. Yoğun iş tempomuza rağmen, eğitimimi her açıdan destekleyen komutanım Dz.Y.Müh.Alb.Nail ÜNLÜ'ye, aynı desteği yeni görev yerimde de esirgemeyen ve fazlasıyla sürdüren komutanlarım Dr.Müh.Alb.Musa YILDIRIM, Müh.Yb.Ahmet KOCAKAYA ve Hv.Y.Müh.Bnb.Nazan KOCATÜRK TEKEL'e şükranlarımı sunarım. Tez çalışmam boyunca destek olan ve bilgisayarımı âdeta bana terk eden ev arkadaşım, kardeşim Hv.Müh.Tğm. İzzet TÜR'e müteşekkîrim.

ÖZET

Çelik halat izolatörler, askeri donanım ve endüstriyel makinelerin şok ve titreşim izolasyonlarında oldukça fazla uygulama imkanı bulmuştur. Bu tez çalışmasında, bu araçların, binalardaki değerli ekipmanların sismik açıdan korunmaları bakımından kullanılabilirlikleri incelenmiştir. İnceleme, New York – Buffalo Eyalet Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi öğretim üyelerinden G.F.Demetriades, M.C.Constantinou ve A.M.Reinhorn'un, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nde (National Center for Earthquake Engineering Research) yaptıkları deneysel çalışmalara dayanmaktadır. Taşınacak ekipmanın çelik halat izolatörler üzerine yerleştirilmeleri ve sismik hareket sonucu çelik halat izolatörlerin sergiledikleri davranışların deneysel ve analitik sonuçları sunulmuştur. Çelik halat izolatörlerin rijit konfigürasyonlarda kullanılmasının, diğer yerleştirme metotlarına kıyasla, ekipmanın sismik cevabını iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından, çelik halat izolatörlerin histeretik davranışlarını açıklayan matematiksel modeller geliştirilmiş, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nde yapılan deneylerle de bu modellerin doğrulukları saptanmıştır. Sismik cevabın analitik tahminlerinin deney sonuçları ile iyi bir uyum gösterdiği ispatlanmıştır. Demetriades, Constantinou ve Reinhorn'un yaptıkları bu çalışmalara ilave olarak, analitik çözüm için, nümerik analiz metodları kullanılarak yeni bir yaklaşım yapılmış, elde edilen sonuçlar, deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu sonuçlarla iyi bir uyum sergiledikleri gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ekipman, sismik, izolasyon, çelik halat, binalar

ABSTRACT

Wire rope isolators have found numerous applications in the shock and vibration isolation of military hardware and industrial machinery. In this study, the usefulness of these devices for seismic protection of equipment in buildings is investigated. The investigation depends on the experimental studies of G.F.Demetriades, M.C.Constantinou and A.M.Reinhorn at National Center for Earthquake Engineering Research – State University of New York at Buffalo. Installation methods of entirely supporting equipment on wire rope isolators are experimentally and analytically studied. It is found that the use of wire rope isolators in stiff configurations may substantially improve the seismic response of equipment in comparison to other installation methods.

Mathematical methods for describing the hysteretic behavior of wire rope isolators are developed by Demetriades, Constantinou and Reinhorn and experimentally calibrated and verified at National Center for Earthquake Engineering Research. Analytical predictions of seismic response are shown to be in good accord with experimental results. In addition to the studies of Demetriades, Constantinou and Reinhorn, in this study, a new approach is made by using numerical analysis methods for analytical solutions, and these solutions are compared with the experimental and analytical results, and is shown to be in good accord with these results.

Keywords: equipment, seismic, isolation, wire rope, buildings

1. GİRİŞ

Sismik zemin izolasyonu, geniş bir çevre tarafından kabul görmeye başlayan ve gittikçe artan bir ilgiyle çalışma odağı olan bir tasarım tekniğidir. Sismik izolasyonun prensibi, deprem sırasında yapıya etkiyen yer hareketinin yatay bileşeninin, yapıya aktarılırken azaltılmasını sağlayacak bir yüzeyin, yapının temelinde oluşturulması prensibine dayanır. Bu yüzeyin meydana gelmesiyle, kat ivmelerinde, kat kesme kuvvetlerinde ve katlar arası sapmalarda önemli derecede azalma meydana gelir ve binanın kendisiyle birlikte taşıdığı ekipmanı da hasardan korur (Naeim, F. ve Kelly, J.M., 1999).

Yapısal sisteme iletilen sismik kuvvetler, izolasyon sisteminin esnekliği ve enerji yutma özelliği sayesinde yapıya indirgenmiş şekilde etkir. Esneklik etkisi, izole edilmiş yapının ana periyodunu, izolasyon etkisini deprem enerjisinin yutulması ile oluşturacak şekilde, deprem hareketinin baskın periyodunun üzerinde değerlere çıkarır (Naeim, F. ve Kelly, J.M., 1999). Bu arzulanan etki, kuvvetli deprem hareketinde 200-500 mm arasında meydana gelecek izolasyon sistemi deplasmanları sayesinde sağlanacaktır. Deplasmanlar büyük gibi görünseler de, bina ölçüleriyle kıyas edildiklerinde küçük kalırlar ve kararsızlık sorunları hariç olmak üzere, izolasyon sistemi tarafından karşılanırlar (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992).

Aynı prensip, inşa edilmiş sıradan binalardaki hassas ekipmanların, deprem sırasında meydana gelecek yüksek yer ivmelerinden doğrudan korunması ve izole edilmesinde de kullanılabilir. Fakat deprem hareketleri, güçlü titreşimlerde, elastik olmayan davranış gösteren sıradan metotlarla inşa edilmiş binalara etkiğinde, üst katlara artarak etkiyen bir yük aktarır ve frekans, geniş aralıklara yayılır (Lin, J. ve Mahin, S.A., 1985). Bu şartlarda izolasyon zorlaşır. Etkili bir izolasyon gerçekleştirmek için, izole edilmiş ekipmanın periyodunu, binaların etkin izolasyonu için gereken periyot değerinden daha büyük değerlere ulaştırmak gereklidir. Bu durum, tek parça halindeki ekipmanlarda, kabul edilemeyecek kadar büyük deplasmanlara neden olur. Ayrıca, tek parça halindeki ekipmanlar için, çok esnek izolasyon sistemleri inşa etmek, pratik olarak mümkün değildir. Çünkü bu tür sistemler, genellikle, taşınan ekipmanın ağırlığını taşıyabilecek kapasiteye sahip değildirler.

Bu problemleri gidermek için Japon inşaat endüstrisi, çok parçalı ekipmanları taşıyabilen, bilgisayar katları için özel izolasyon sistemleri geliştirmiştir (Fujita, T., 1991). Bu sistemler, az sürtünmeli kayıcı mesnetler, çok tabakalı elastomer mesnetler ya da pnömatik izolatörlerden ibarettir.

Tek parça halindeki ekipmanların sismik açıdan korunması, periyodun büyütülmesine gerek kalmadan, deprem enerjisinin, rijit ve yüksek enerji sönümleyici bir sistem sayesinde yutulmasıyla da sağlanabilir. Bu tür bir sistem, küçük deplasmanlara izin vererek, bir dereceye kadar korunma sağlar. Sismik koruma amaçlı, viskozitesi yüksek sıvı içine yerleştirilmiş spiral-çelik yaylı sistem üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır (Makris, N. ve Constantinou, M.C., 1992). Sistem, güçlü sismik yer hareketlerine maruz bırakılmış, narin ekipmanları taşıyabilen kabinler kullanmıştır. İzole edilmiş ekipman, 3.5 Hz' lik bir frekansa sahip olurken, izolasyon seviyesinde 10 mm' yi aşmayan deplasmanlara izin vermiş, izole edilmemiş ekipmana kıyasla, ivmelerde 2 kat azalma gözlenmiştir. Bu yay-viskoz sönümleyici sistem, çok geniş kullanım alanı bulmuş bir titreşim izolasyonu sisteminden esinlenerek geliştirilmiştir.

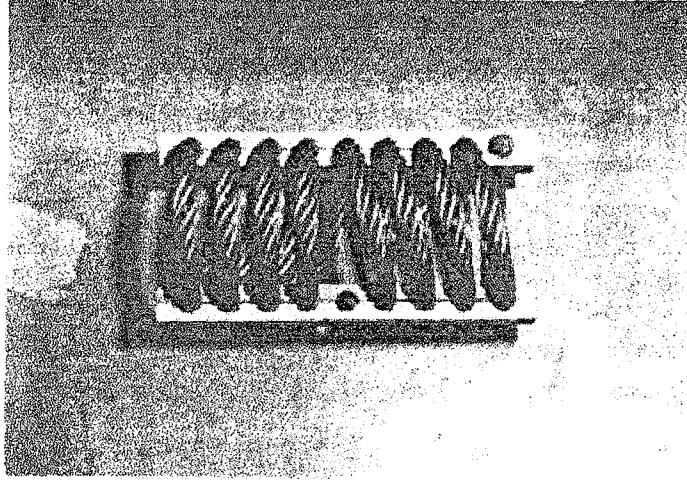
Bu çalışmada, ekipmanların, şok ve titreşim izolasyonlarında kullanılan bir sistemden bahsedilmiştir. Çelik halat izolatörler, helis formunda sarılmış çelik halatların, metal tutucular arasına yerleştirilmesi ile oluşturulan montaj araçlarıdır (Şekil 1.1). Yapılan çalışmalar ve araştırma - geliştirme faaliyetleri sonucunda, çelik halat izolatörler iki grupta sınıflandırılmışlardır: Kemer çelik halat izolatörler ve tutucu çubuklarla kenetlenmiş helis çelik halat izolatörler (Şekil 1.2) (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992).

Bu çalışma, titreşime maruz kalan katlara bağlanmış, tek parça halindeki hassas bir ekipmanın sismik izolasyonunun, çelik halat izolatörler kullanılarak yapılmış deneysel ve analitik araştırmaların sonuçlarını içermektedir. Bu araştırmalar, New York - Buffalo Eyalet Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi öğretim üyelerinden G.F.Demetriades, M.C.Constantinou ve A.M.Reinhorn'un, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nde (National Center for Earthquake Engineering Research) yaptıkları deneysel çalışmalara dayanmaktadır. Helis ve kemer tipi çelik halat izolatörler, çeşitli konfigürasyonlar uygulanarak, hassas ekipman kabinlerinin taşınmasında kullanılmıştır. Önce, helis ve kemer tipi çelik halat izolatörler, narin bir ekipman kabinini dört ayrı konfigürasyonda taşımak için kullanılmışlardır. İzolatörler, titreşim modunda, dört sistemde, 1 ile 6 Hz arasında değişen bir ana frekans sergilemişlerdir. İzole edilmiş olan ekipmana, 7 katlı bir yapıya etkiyen deprem hareketinin filitrelenmiş kaydından elde edilen kat ivmeleri, sarsma tablasında (shake table) uygulanmıştır. Ekipman yapıya hem sıradan bir şekilde yerleştirilerek, hem de izolatör ile bağlanarak deneyler yapılmış, her iki durum için de sonuçlar kaydedilmiştir.

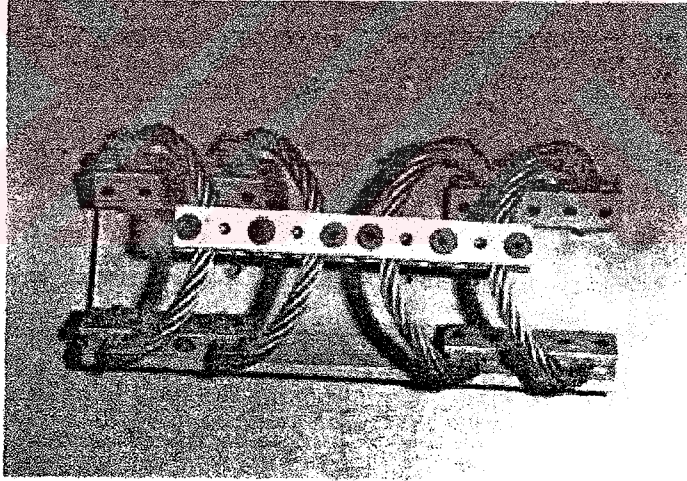
Sonuçlar göstermiştir ki, çelik halat izolatörlerin değişik modelleri kullanılarak taşınan ekipmanlar, sabit, ankastre ya da kayıcı mesnet sistemleri ile taşınanlara göre, ivmenin ekipmana aktarılmasında kayda değer azalmalara sebep olmaktadır. Bu deneysel sonuçların hepsi bu çalışmada anlatılmıştır. Ayrıca, çelik halat izolatörlerin dinamik davranışları analitik modellerle açıklanarak sunulmuştur. Bu analitik modeller, test edilen ekipmanın dinamik davranışı ile oldukça uyumlu sonuçlar vermişlerdir. Daha sonra, analitik çözüm için, bir nümerik analiz metodu kullanılarak yaklaşım yapılmış, elde edilen sonuçlar deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çalışmada sırasıyla, çelik halat izolatörlerin özellikleri ve kullanım alanları, çelik halat izolatörlerin modellenmesi, ekipmanlar için çelik halat izolatör sistemler hakkında yapılan deneysel ve analitik çalışmalardan, sistem cevabının analitik tanımlamasından, analitik tanımlamaya yapılan nümerik yaklaşım ve bu nümerik yaklaşımın deneysel ve analitik sonuçlarla olan uyumundan bahsedilecektir.





Şekil 1.1 8 sargılı helis çelik halat izolatör. (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 1.2 4 sargılı kemer çelik halat izolatör. (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

2. ÇELİK HALAT İZOLATÖRLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

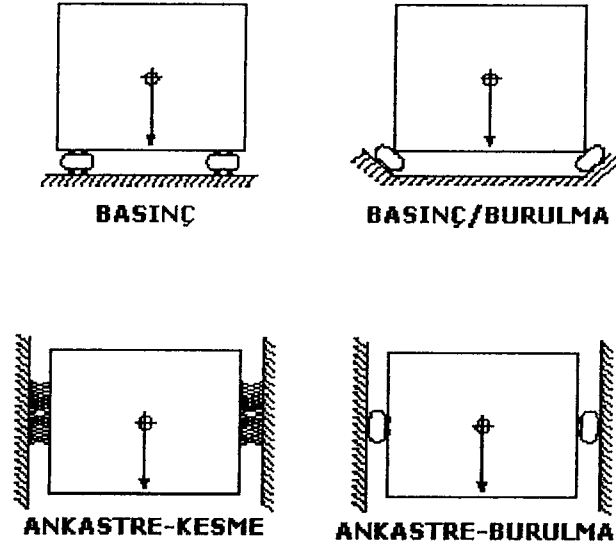
Çelik halat izolatörler, paslanmaz çelik kablolar, alodın korumalı alüminyum alaşımdan yapılmış tutucu çubuklar ve çinko kaplanmış çelik alaşımlı bağ vidalarından müteşekkildirler. Her üç yönde esnekliğe, geniş deplasman kapasitesine ve birbirine geçmiş kablolar arasındaki kayma ve sürtünme sonucu oluşan sönümlenme yeteneğine sahiptirler. Enerji yutulması, her üç yönde de eşzamanlı olarak meydana gelir. Helis, kemer ve kompakt olmak üzere üç türe ayrılabilirler. Güçlü metal dizaynları sayesinde çok eksenli izolasyon sağlarlar, bakım istemezler ve kötü çevre şartlarına dayanıkdırlar. Çelik halat izolatörlerin performansı kimyasallardan, yağlardan, oksitlenmeden, korozyondan ve ısdan etkilenmez. Çelik halat izolatörler, -100 °C ile +260 °C arası sıcaklıkta, etkin bir davranış sergilerler. 4 N' dan 16000 N' a kadar taşıma kapasitesine sahiptirler. Bu izolatörler, endüstri ve savunma ekipmanlarında, elektronik sistemlerde, hassas makinelerde ve diğer narin ekipmanlarda şok ve titreşim izolasyonu amacıyla oldukça yaygın uygulama imkanı bulmuştur (ENIDINE Inc. internet sitesi, www.enidine.com).

Kemer ve helis çelik halat izolatörlerin tipik kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

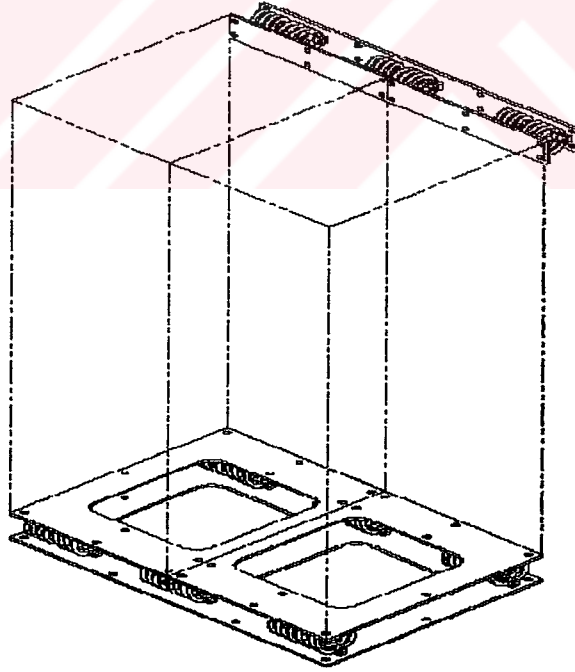
- Gemi kasaları, konteynırları
- Gemi elektronik cihazları
- Pompa, jeneratör ve kompresörlerde titreşim izolasyonu
- Elektronik kabinler
- Kimyasal işleme cihazları
- Uçuş sistemleri
- Nükleer güç santrallerinde boru süspansiyonu
- Taşınabilir muhafazalar
- Hassas mobil cihazlar
- Askeri cihazlar
- Hassas ekipmanların titreşim izolasyonu
- Sismik izolasyon uygulamaları
- Yüksek sıcaklıkta izolasyon uygulamaları

A.B.D. Silahlı Kuvvetleri'ndeki kullanım alanları:

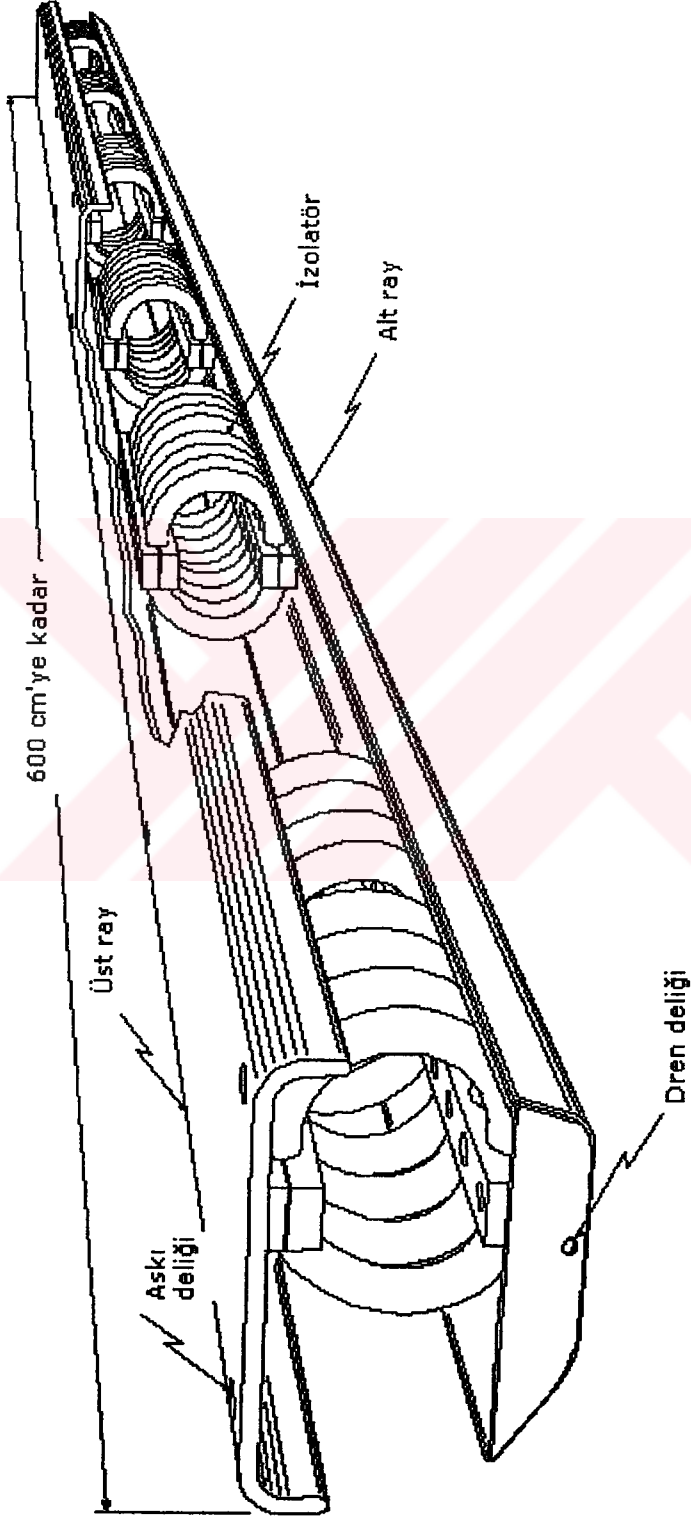
- PHALYNX füze sistemleri
- IFTA sığınakları
- TAC3 ve TAC4 kompüter askıları
- MSS konteynerleri
- Tomahawk füze istasyonları
- LANTIRN hedef kabuğu
- JSIPS korunakları



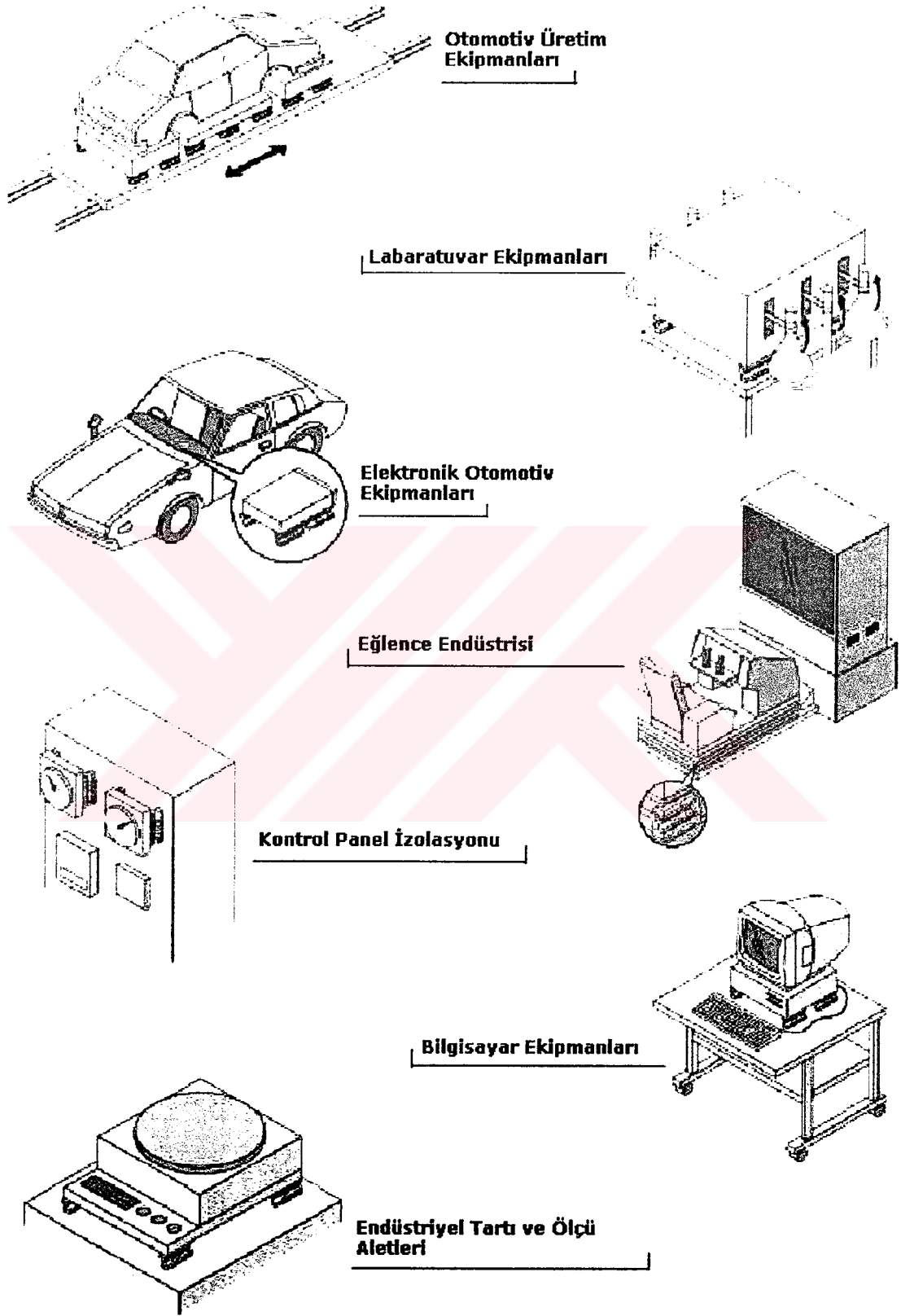
Şekil 2.1 Montaj metotları. (ENIDINE Inc. internet sayfası, www.enidine.com)



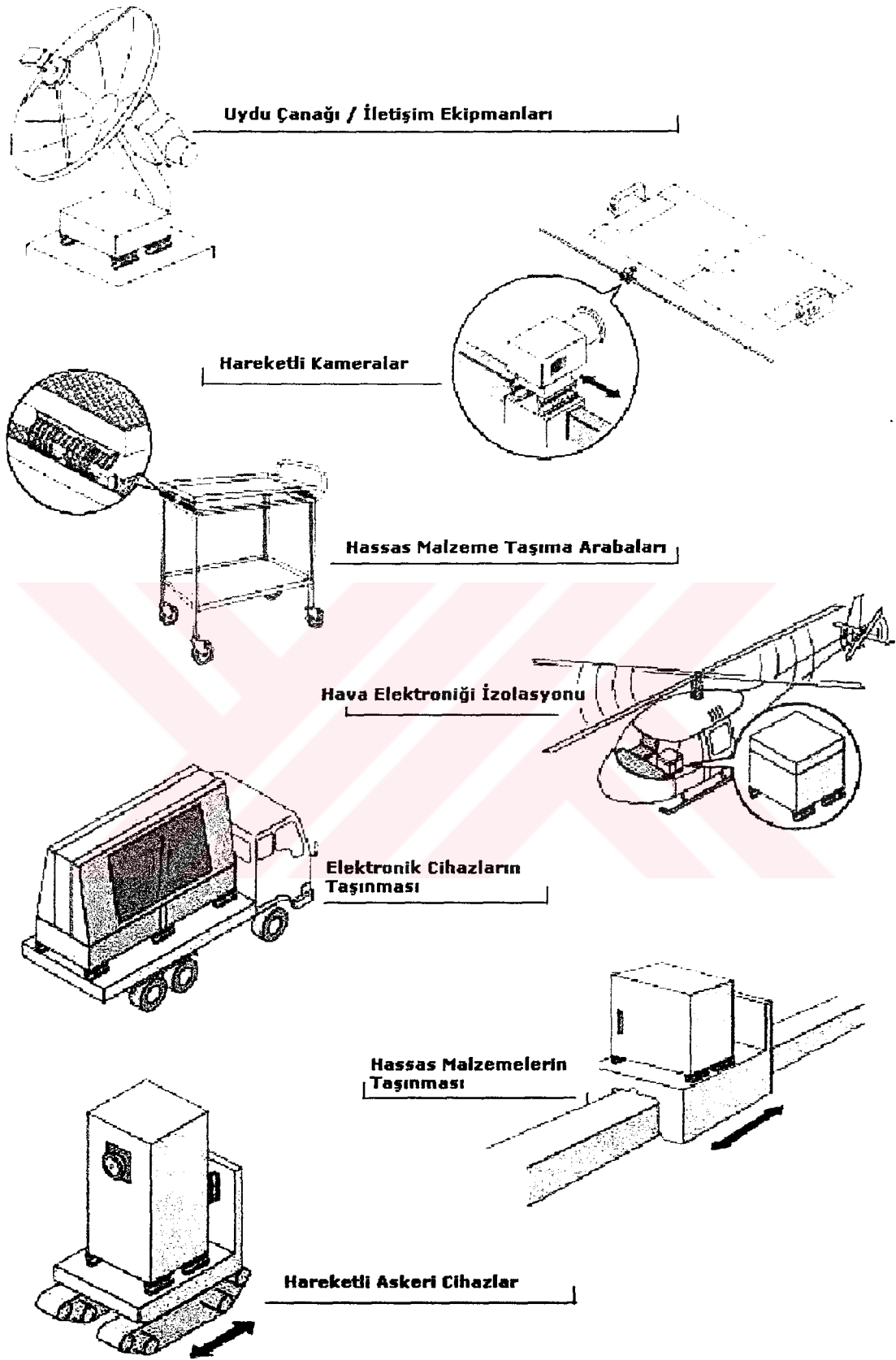
Şekil 2.2 Bir kabinin çelik halat izolatörler ile taşınması. (AEROFLEX International internet sitesi, www.aeroflex.com)



Şekil 2.3 Çelik halat izolatörlerin kullanım usulleri. (AEROFLEX International internet sitesi, www.aeroflex.com)



Şekil 2.4 Kemer ve helis çelik halat izolatörlerin kullanım alanları. (ENIDINE Inc. internet sayfası, www.enidine.com)

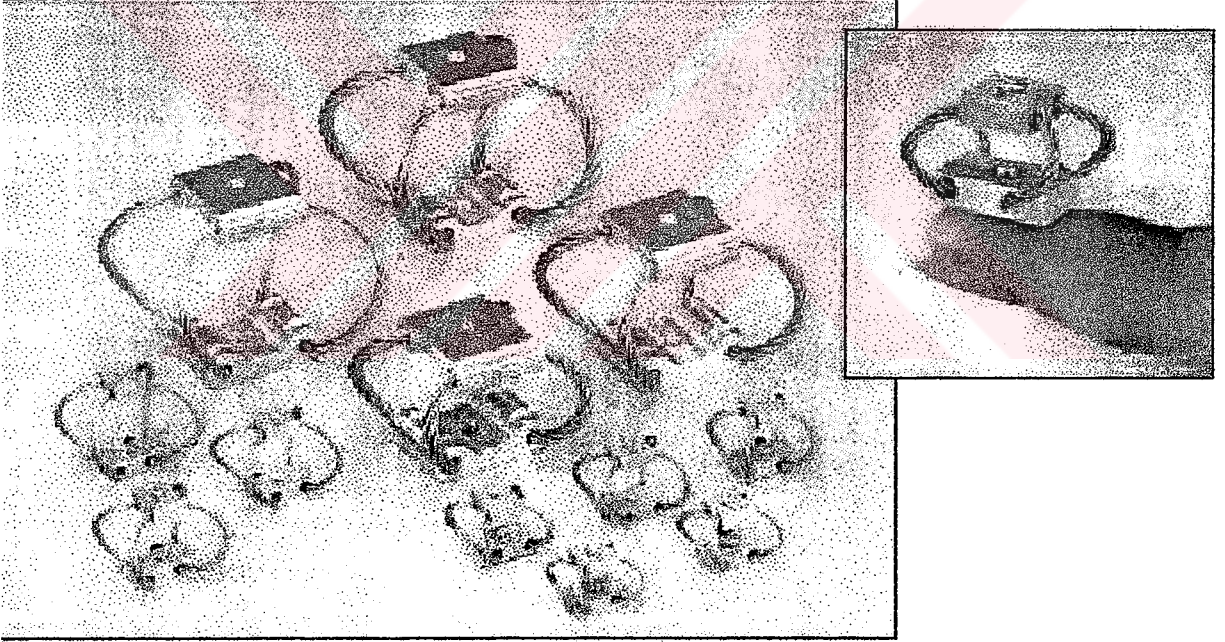


Şekil 2.5 Kemer ve helis çelik halat izolatörlerin kullanım alanları. (ENIDINE Inc. internet sayfası, www.enidine.com)

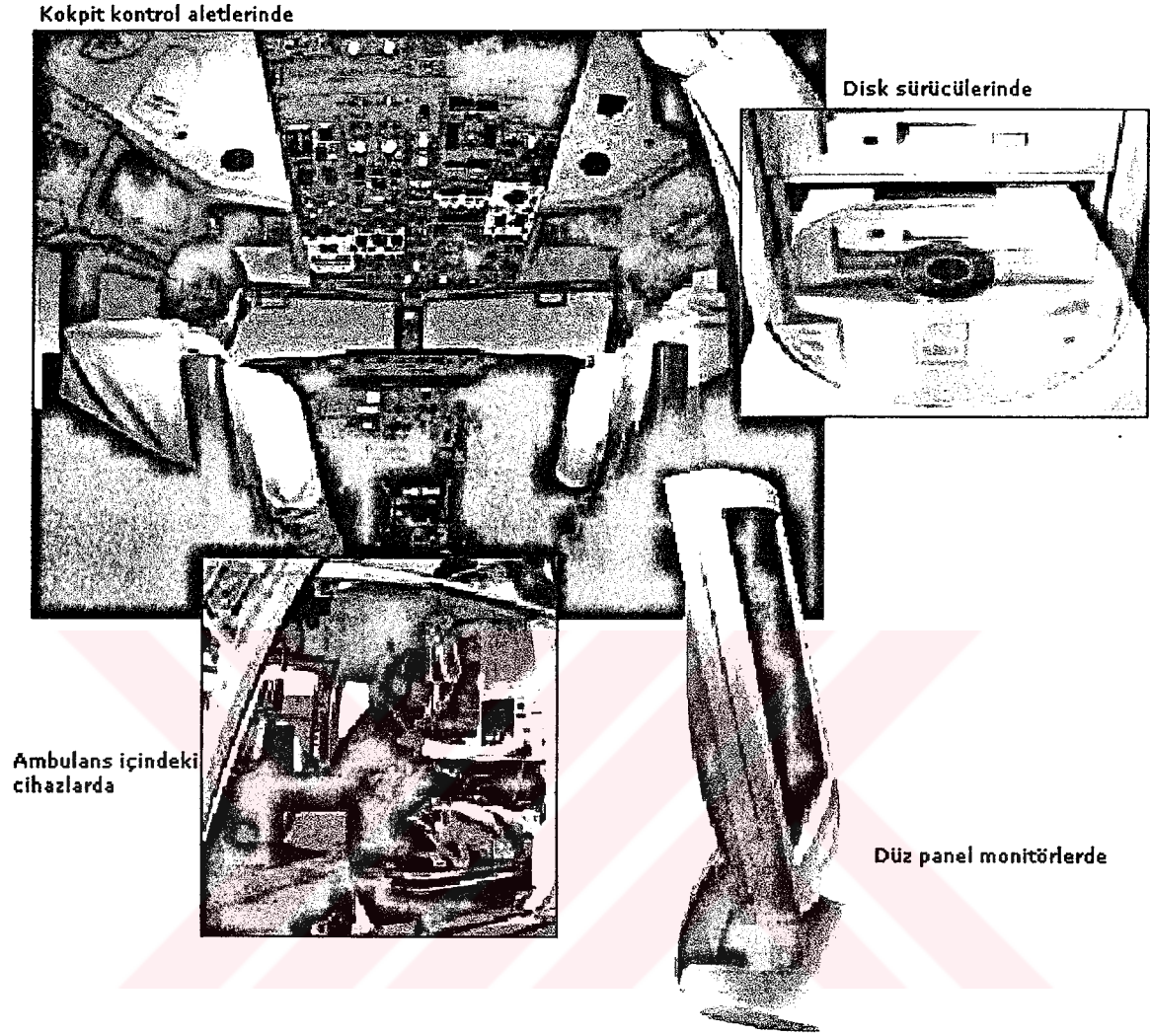
Çok küçük sistemlerin izolasyonunda kullanılan çelik halat izolatörler de kompakt çelik halat izolatörler olarak adlandırılırlar (ENIDINE Inc. internet sayfası, www.enidine.com). Bu izolatörler, 45 g ile 34 kg arası kütle taşıma kapasitesine sahip olup, askeri ve endüstriyel standartların çoğuna uyumluluk gösterirler. Davranış prensibi ve malzeme olarak diğer çelik halat izolatörler ile aynı özelliği gösterirler.

Bu izolatörlerin kullanım alanları ise şöyle sıralanabilir:

- Disk sürücüleri
- Tıbbi cihazlar
- Hassas mobil elektronik cihazlar
- Elektronik kabinler
- Küçük pompa ve motorlar
- Hassas öğelerin denizyolu ile taşınmaları
- Uçuş sistemleri



Şekil 2.6 Çeşitli büyüklükteki kompakt çelik halat izolatörler. (ENIDINE Inc. internet sayfası, www.enidine.com)



Şekil 2.7 Kompakt çelik halat izolatörlerin kullanım alanları. (ENIDINE Inc. internet sayfası, www.enidine.com)

3. ÇELİK HALAT İZOLATÖRLERİN MODELLENMESİ

Çelik halat izolatorler kablo çapına, kablo sayısına, kablo uzunluğuna, sarmal sayısına ve uygulanan kuvvetin yönüne bağlı olarak farklı davranışlar sergilerler.

Yatay ve düşey doğrultulardaki dinamik karakterlerini tayin etmek maksadıyla, belirli bir genlik, frekans ve başlangıç yüküne sahip sinüzoidal hareket yüklemesi yapılarak birtakım izolatorler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992). Her durumda da, deplasman kontrolü yapılabilen hidrolik cihazlar ile hareket verilmiş ve izolator ile cihaz arasına yerleştirilen bir yük hücresi ile uygulanan yükler kaydedilmiştir.

Bu deney için beş tip çelik halat izolator seçilmiştir. Bu çelik halat izolatorlerin geometrik karakterleri Şekil 3.1'e bağlı olarak Çizelge 3.1'de sunulmuştur. İzolatorlerin ilk dördü daha sonra, ağırlığını taşıdıkları bir ekipman kabininin izolasyonunda kullanılmışlardır. Bu izolatorlere sarsıntı tablası testi sırasında basınç / çekme ve burulma hareketleri eşzamanlı olarak etmiştir (Şekil 3.1). Buna bağlı olarak, test bu iki yöne münhasır kalmıştır.

Beşinci izolator (Çizelge 3.1'de No.5) kilitli dökümlerle taşınan bir bilgisayar ekipmanının izolasyonunda kullanılmıştır. Bu uygulamada, izolatorün düşey hareketi engellenmiş, sadece kesme kuvvetine maruz bırakılmıştır (Şekil 3.1). Buna mukabil, sadece bu yönde test edilmiştir.

Çelik halat izolatorler, doğrusal olmayan histeretik davranış sergilerler. İzole edilmiş ekipmanın ağırlığının izolatorler tarafından taşındığı uygulamalarda izolatorler, üç yönde de, eşzamanlı olarak, harekete maruz kalırlar. Bu nedenle, bu üç yönde etkiyen kuvvetlerin etkileşim içinde olmaları beklenir. İzolatorlerin modellenmesinde, bu etkileşimin önemli olmadığı ve her izolatorün de, üç ana yön doğrultusunda (eksenel, burulma ve kesme) yerleştirilmiş üç histeretik etkileşimsiz yay elemanı olarak modellenebileceği kabul edilmiştir (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992).

3.1 YATAY YÖNDE TEST VE MODELLEME

Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından gerçekleştirilen bu deneylerde, 1 ve 4 numaralı izolatorler (Çizelge 3.1), Şekil 3.2'deki düzenekte görüldüğü gibi burulma yönünde teste tabi tutulmuşlardır. Düzenek, düşey yönde de sınırlı derecede yer değiştirmeye izin vererek burulma yönünde hareket sağlamaktadır. Bu durum, izolatorlerin pratik kullanımda, yatay deformasyon sırasında boyca küçülme davranışlarını simgeler. Bununla birlikte,

tertibat, büyük yatay deplasmanlarda, izolatörlerin bazı rijitleşmelere maruz kaldıklarının gözlenmesi nedeniyle, kesin olarak aktüel şartları gösteremez. Bu rijitleşme, modellemede göz ardı edilir.

Testler 0.1, 1, 2 ve 5 Hz. frekans ve 6.4, 12.7 ve 19.1 mm. genlikteki beş devirli hareket uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kaydedilen kuvvet – deplasman grafikleri her beş devir, simetri ve frekans serbestliği için de durağan histeretik davranış sergilemiştir.

Kaydedilen davranış, klasik histeretik davranışı temsil eder ve Bouc (1971)'un ikili doğrusal histeretik modeli ile kolayca modellenebilir. Modelin Wen (1976) tarafından oluşturulmuş en genel formu:

$$F = \alpha \frac{F_y}{Y} U + (1 - \alpha) F_y Z \quad (3.1)$$

olup, formülde F=kuvvet, U=deplasman ve Z, aşağıdaki diferansiyel denklemlerle verilen bir histeretik boyutsuz niceliktir:

$$Y\dot{Z} + \gamma |\dot{U}| Z |Z|^{n-1} + \beta \dot{U} |Z|^n - A \dot{U} = 0 \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte α , β , γ , A ve n histeretik bağıntısının şeklini kontrol eden boyutsuz nicelikler ve F_y ile Y, sırasıyla, akma kuvveti ve akma deplasmanıdır. \dot{A} , zamana bağlı değişimi gösterir.

Costantinou ve Adnane (1987), A=1 ve $\beta + \gamma = 1$ için, Özdemir'in (1976) öne sürdüğü modelin, bir viskoplastisite modeline dönüştüğünü göstermişlerdir. Çelik halat izolatörlerin analitik modellemesi için $\beta=0.1$, $\gamma=0.9$, A=1 ve n=1 değerleri kullanılmıştır. Akma deplasmanı Y için uygun değerler, aşağıdaki eşitlikler yoluyla, her durum için ayrı ayrı hesaplanarak, F_y ve α 'nın deneysel sonuçlarından türetilmiştir:

$$F_y = Q + K_x Y \quad (3.3)$$

$$\alpha = \frac{K_x Y}{F_y} \quad (3.4)$$

Burada Q karakteristik dayanım, K_x ise Şekil 3.3'de verilen ikili doğrusal model için burulma yönündeki rijitliktir. α ise, akma sonrası rijitliğin, akma öncesi rijitliğe oranıdır.

1 ve 4 numaralı izolatörlerin burulma yönündeki modele ait parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Deneysel ve analitik kuvvet – deplasman grafiklerinin karşılaştırmaları Şekil 3.4 –

3.6'da sunulmuştur. Bu grafiklerde, analitik modelin deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

5 numaralı izolatörün testinde, kesmede oluşan deformasyon sırasında, izolatörün sabit boyunun korunduğu farklı bir tertibat uygulanmıştır. Şekil 3.7, bu tertibatı göstermektedir. İki izolatör, tahrik edici tarafından hareket verilen bir plakaya bağlanmış durumdadır. Tek bir izolatör için sonuçlar, kaydedilen kuvvetin ikiye bölünmesiyle elde edilmiştir. 5 numaralı izolatörün kesme yönünde gösterdiği davranış, diğer izolatörlerin burulma yönünde gösterdiği davranış ile nitel olarak aynıdır. Denklem 3.1 ve 3.2'ye dayanan modelleri, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir. Modele ait parametreler, Çizelge 3.2'de verilmiştir.

3.2 DÜŞEY YÖNDE TEST VE MODELLEME

Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından gerçekleştirilen deneylerde bütün izolatörler, Şekil 3.8'deki gibi bir tertibat ile düşey yönde (basınç – çekme) test edilmişlerdir. İzolatörlerin düşey yöndeki histeretik davranışları, farklı basınç ve çekme rijitliğine göre asimetri sergilemiştir. Şekil 3.10, bu davranışın göstergesidir. Basınç ve çekme için elde edilen kuvvet – deplasman grafiği, 3 numaralı izolatöre aittir. İzolatör, çekmede artan bir rijitleşme davranışı gösterirken, basınçta elastoplastik bir davranış sergilemektedir. Şekil 3.11, aynı izolatörün, 0.1 Hz.'den 5 Hz.'e değişen frekanslarda devirsel harekete maruz kaldığında sergilediği davranışa ait grafiği göstermektedir. Grafiklerin yükleme ve boşalma kolları arasındaki fark olarak tanımlanan enerji sönmülmesinin, basınçta ve çekmede farklı olduğu gözlenmiştir.

Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilen türe ait asimetric davranış tanımlayan histeretik modeller, Denklem 3.1 ve 3.2'ye ait modelin türetilmesi ile elde edilebilir. Kuvvet – deplasman ilişkisi Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından aşağıdaki gibi yazılmıştır:

$$F = F_0(U) + F_D(U)Z \quad (3.5)$$

Burada F_0 deplasmana (U) bağlı iskelet eğriyi ve $F_D(U)$ ise deplasmana bağlı, grafiğin yükleme ve boşalma kolları arasındaki yarı farkı simgeler. Z ise $[-1,1]$ kapalı aralıkta değerler alan histeretik boyutsuz bir niceliği temsil eder ve Denklem 3.2 ile tanımlanmıştır. Denklem 3.5'in iki bölümü, sırasıyla, rijitlik ve histeretik enerji sönmülmesini gösterir.

Deneysel sonuçları gösteren kuvvet – deplasman grafikleri, Şekil 3.10'da olduğu gibi, F_0 ve F_D fonksiyonlarının aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi ifade edilebileceğini göstermiştir:

$$F_0(U) = Q_1 \left[A_0 - \exp \left(\sum_{n=1}^N a_n U^n \right) \right] \quad (3.6)$$

$$F_D(U) = Q_2 \exp \left[\sum_{m=0}^M b_m U^m \right] \quad (3.7)$$

Q_1 , A_0 , a_n , N , Q_2 , M ve b_m her izolatörün deneysel sonuçlarının regresyon analizinden elde edilmiş katsayılardır. Test edilmiş çelik halat izolatörler için, bu katsayılara ait değerler Çizelge 3.3 ve 3.4'de sunulmuştur.

Denklem 3.2, 3.5, 3.6 ve 3.7'ye ait modelin tam bir tanımlaması için, Denklem 3.2'deki β , γ , A ve n parametrelerinin tayin edilmesi gereklidir. Bu denkleme ait analitik çözümler, $Z - U$ grafiğinin yükselen ve düşen kolları için ayrı olarak mümkündür. Z ve \dot{U} 'nın sıfırdan büyük olduğu yükselen kol için Denklem 3.2 şu formda yazılmıştır:

$$\dot{Z} + (\beta + \gamma)Z^n \left(\frac{\dot{U}}{Y} \right) = A \left(\frac{\dot{U}}{Y} \right) \quad (3.8)$$

Kamke (1959) tarafından çözüm

$$Z = \left(-\frac{A}{\beta + \gamma} \right)^{1/n} y(t) \quad (3.9)$$

$$\int \frac{dy}{1 + y^n} = A \left(-\frac{\beta + \gamma}{A} \right)^{1/n} \left(\frac{U}{Y} \right) + C \quad (3.10)$$

olarak bulunmuştur. Burada C , integral sabitidir. Buna ilave olarak Denklem 3.8 de şu şekilde yazılmıştır:

$$Y \frac{dZ}{dU} = A - (\beta + \gamma)Z^n \quad (3.11)$$

$\lim \frac{dZ}{dU} = 0$ için Z 'nin maksimum değeri elde edilir:

$$Z_{\max} = \left(\frac{A}{\beta + \gamma} \right)^{1/n} \quad (3.12)$$

Düşen kol için çözüm, Denklem 3.9 ve 3.10'da, Z , $-Z$ ve $\beta + \gamma$, $-(\beta + \gamma)$ ile değiştirilerek elde edilebilir.

Denklem 3.9 ve 3.10, Denklem 3.2'ye ait modelin değerden bağımsız olduğunu – örneğin hız

değerinden bağımsız – göstermiştir. Daha doğrusu, sadece hız, işareti yükselen ve düşen kolları tayin etmektedir. İlave olarak, Denklem 3.12, $Z_{\max}=1$ olacak şekilde A , β ve γ ($A=\beta+\gamma$) sabitlerinin değerlerini sınırlamaktadır. Z için açık tanımlama sadece $n=1$ veya $n=2$ için mümkündür (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992):

$$Z = \frac{A}{\beta + \gamma} \left\{ 1 - \exp \left[-(\beta + \gamma) \frac{U}{Y} \right] \right\} + C \quad n=1 \text{ için} \quad (3.13)$$

$$Z = \left(\frac{A}{\beta + \gamma} \right)^{1/2} \tanh \left[(\beta + \gamma)^2 \frac{U}{Y} \right] + C \quad n=2 \text{ için} \quad (3.14)$$

$Z_{\max}=1$ olacak şekilde verilen $A = \beta + \gamma$ için, Denklem 3.13 ve 3.14, Z 'nin birim adım fonksiyona düz bir yaklaşımı temsil ettiğini göstermişlerdir. n 'nin artan değerleri yaklaşımlarda, adım fonksiyonun kendisini doğurduğu tahmin edilen, $n \rightarrow \infty$ durumu ile adım fonksiyonuna yakın sonuçlar vermiştir. İlginç olanı, β ve γ 'nin gerçek değerleri hiç bir rol oynamamıştır. Daha doğrusu, sadece bunların toplamları rol oynamıştır.

Analitik çözümlerin sonuçlarına ve basınç – çekme grafiklerinin analitik ve deneysel kıyaslamalarına dayanarak elde edilen model parametreleri için aşağıdaki değerler seçilmiştir:

$A=3.0$, $\beta=0.0$, $\gamma=3.0$ ($A=\beta+\gamma$) ve $n=1$. Deplasman niceliği Y 'nin değerleri Çizelge 3.4 'de verildiği gibi her izolatör için farklıdır. Basınç – çekme modunda test edilen dört izolatörün deneysel ve analitik kuvvet – deplasman grafiklerinin karşılaştırması Şekil 3.12 – 3.15'de sunulmuştur. Bu grafiklerin her biri, devirsel hareketin başlangıcından önce izolatöre verilen başlangıç basınç kuvveti ve beş devirli hareket içindir. 4 numaralı izolatörün rijitliği için grafikler düşük genlikteki deplasmanlar içindir. Açık ki, analitik model, deneysel davranışı iyi bir kesinlikle sağlamaktadır (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992).

Çizelge 3.1 Test edilen çelik halat izolatörlerin geometrik özellikleri. (1 in.=25.4 mm) .
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

ETİKET	TİP	TEST YÖNÜ	SARGI SAYISI	HALAT ÇAPI (inch)	L (inch)	W (inch)	H (inch)
İZOLATÖR 1	KEMER	BASINÇ / BURULMA	2	0.500	11.25	4.60	4.75
İZOLATÖR 2	HELİS	BASINÇ / BURULMA	8	0.500	7.00	5.60	4.90
İZOLATÖR 3	KEMER	BASINÇ / BURULMA	4	0.500	11.25	4.60	4.75
İZOLATÖR 4	HELİS	BASINÇ / BURULMA	8	0.625	10.50	6.00	4.70
İZOLATÖR 5	HELİS	KESME	8	0.375	8.50	4.13	3.00

Çizelge 3.2 İzolatör modellerinin burulma ve kesme yönlerindeki parametreleri. (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN)
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

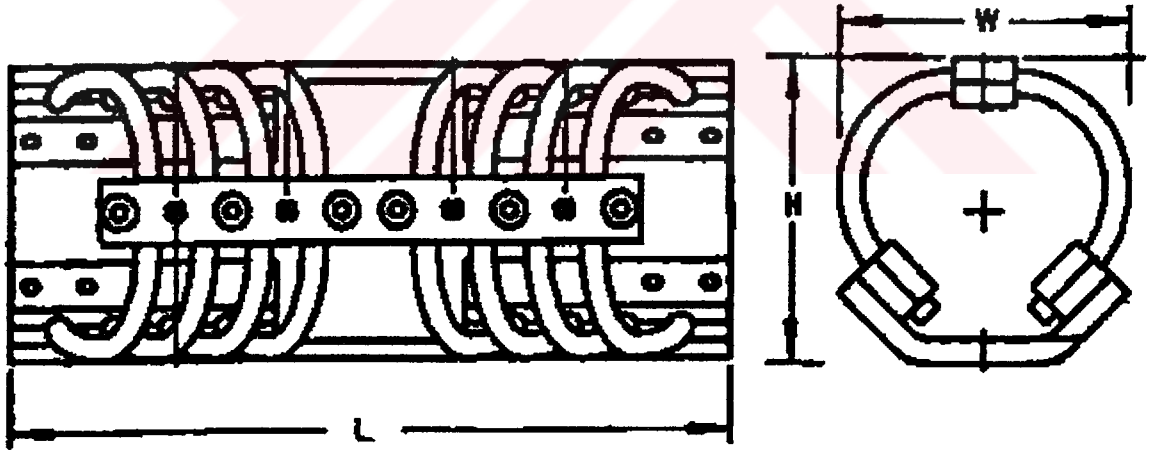
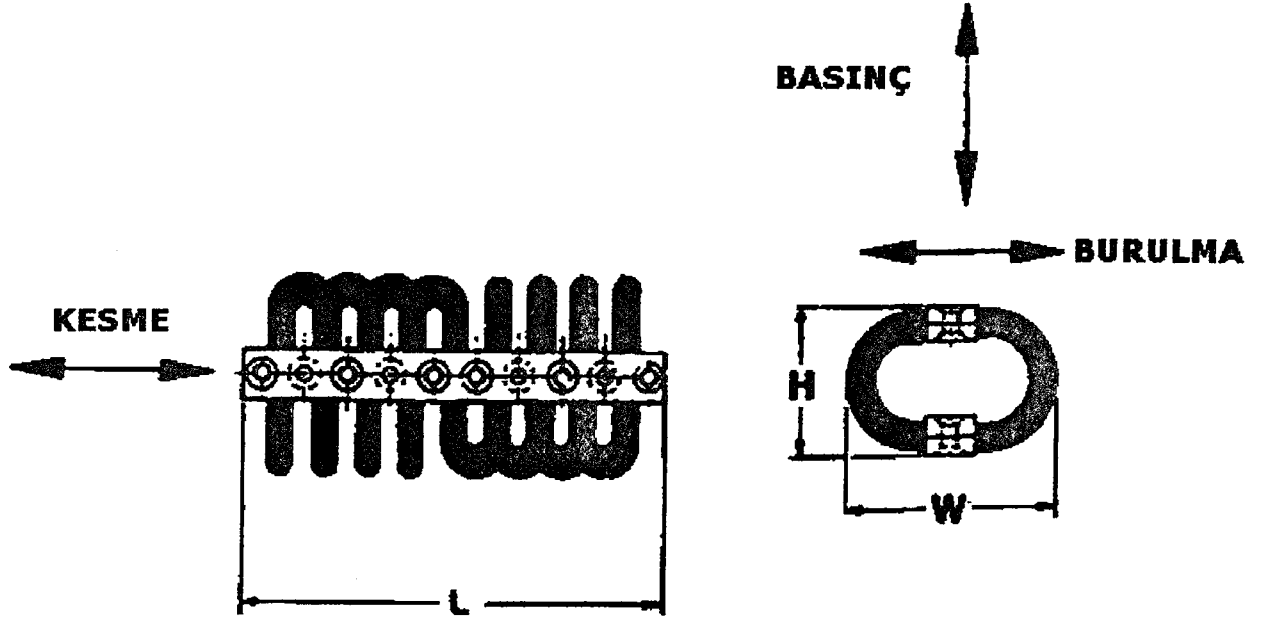
	YÖN	K _x (Kip/in)	Y (inch)	Q (Kip)	F _y (Kip)	α
İZOLATÖR 1	BURULMA	0.172	0.010	0.013	0.0147	0.1169
İZOLATÖR 2	BURULMA	0.171	0.010	0.028	0.0294	0.0581
İZOLATÖR 3	BURULMA	0.365	0.015	0.030	0.0355	0.1543
İZOLATÖR 4	BURULMA	0.684	0.015	0.100	0.1103	0.0931
İZOLATÖR 5	KESME	0.240	0.010	0.014	0.0164	0.1463

Çizelge 3.3 Düşey yöndeki çelik halat izolator modeline ait F_0 fonksiyonu katsayıları.
(1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN) . (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M.,
1992)

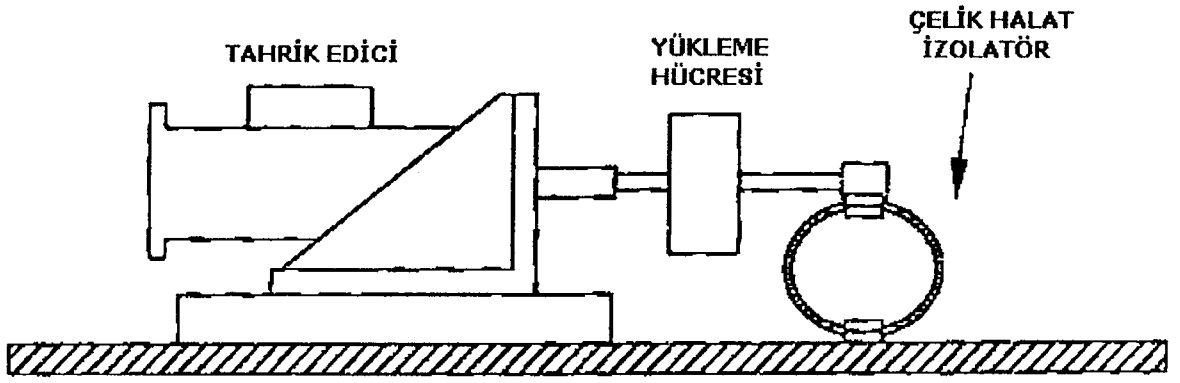
	Q_1 (Kip)	A_0	N	a_1 (in ⁻¹)	a_2 (in ⁻²)	a_3 (in ⁻³)
İZOLATÖR 1	- 0.290	1.00	3	1.7860	0.3510	0.202
İZOLATÖR 2	- 0.790	1.04	3	0.8523	- 0.0367	0.151
İZOLATÖR 3	- 0.470	1.00	1	2.0797	-	-
İZOLATÖR 4	- 0.905	1.00	3	1.3120	- 0.5730	0.336

Çizelge 3.4 Düşey yöndeki çelik halat izolator modeline ait F_D fonksiyonu katsayıları.
(1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN) . (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M.,
1992)

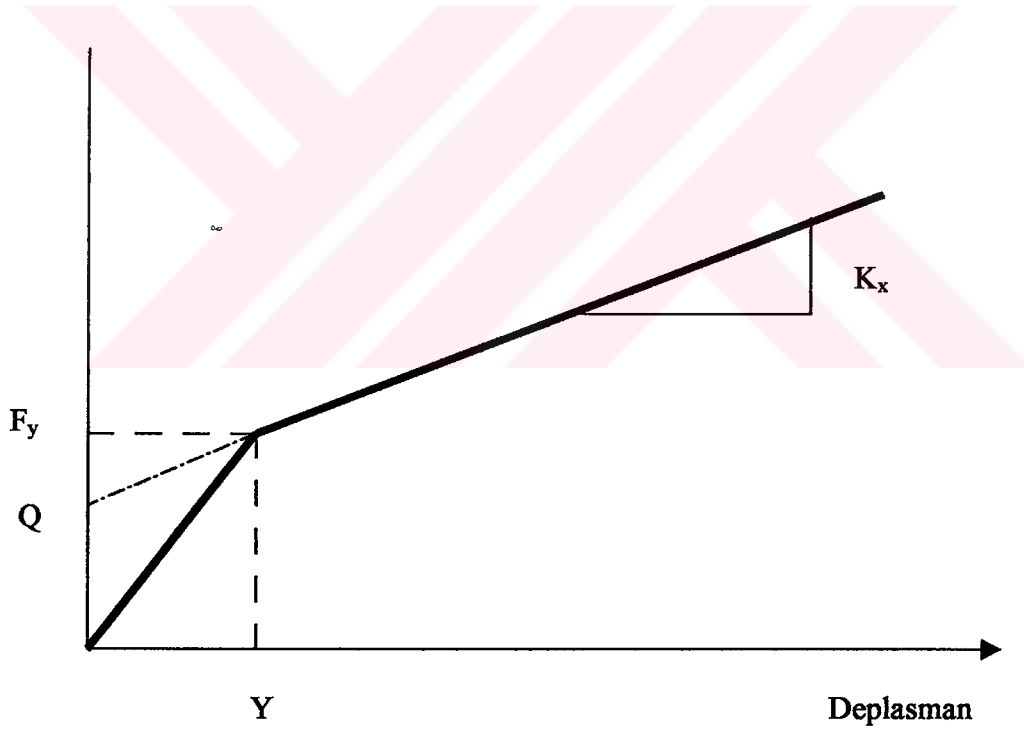
	F_D Fonksiyonu Katsayıları						Y
	Q_2	M	b_0	b_1	b_2	b_3	
İZOLATÖR 1	0.001	3	3.555	3.555	1.5734	1.132	0.100
İZOLATÖR 2	0.001	1	4.701	4.701	0.6496	-	0.100
İZOLATÖR 3	0.001	1	4.090	4.090	0.8960	-	0.100
İZOLATÖR 4	0.001	1	5.882	5.882	1.2300	-	0.055



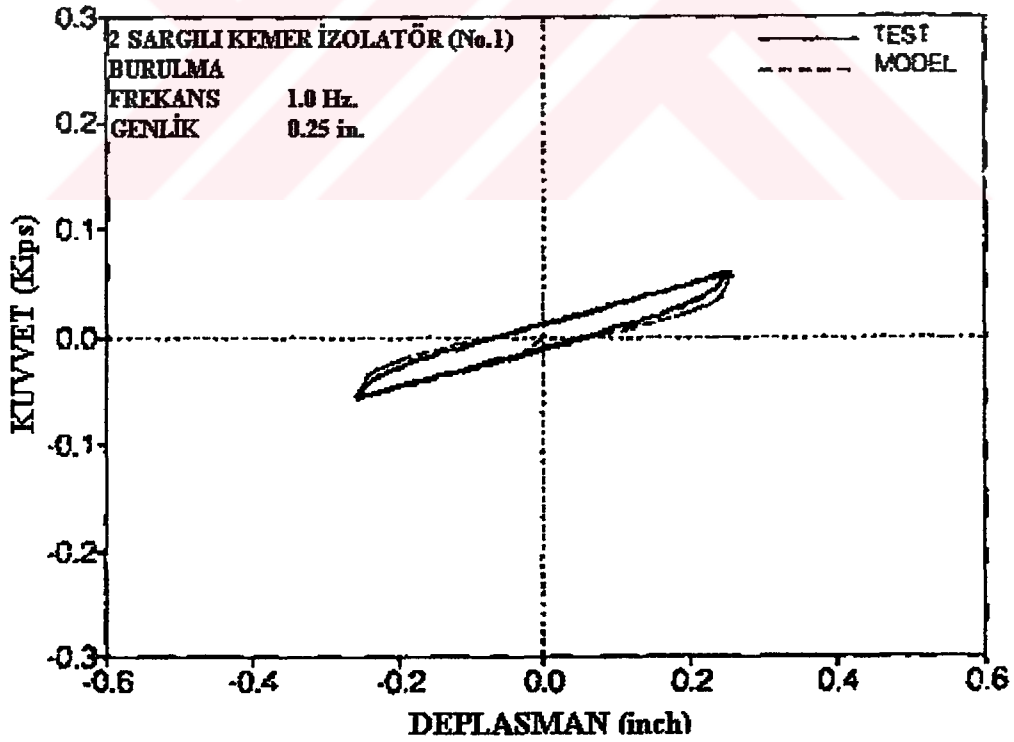
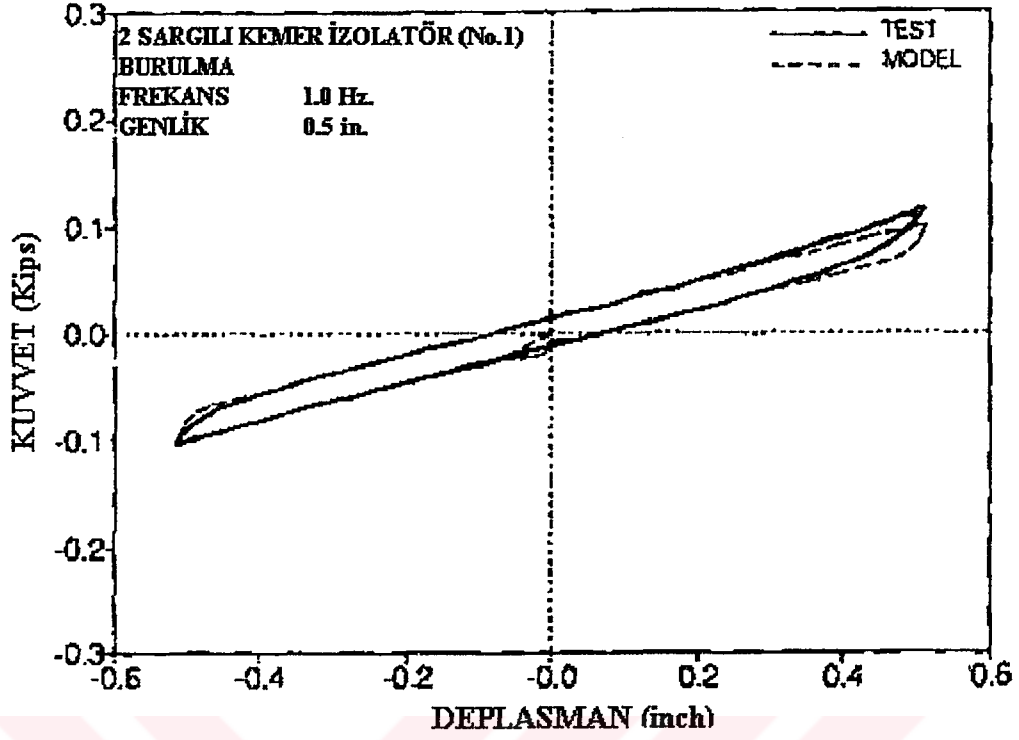
Şekil 3.1 Helis ve kemer çelik halat izolatörlerin geometrik özellikleri.
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



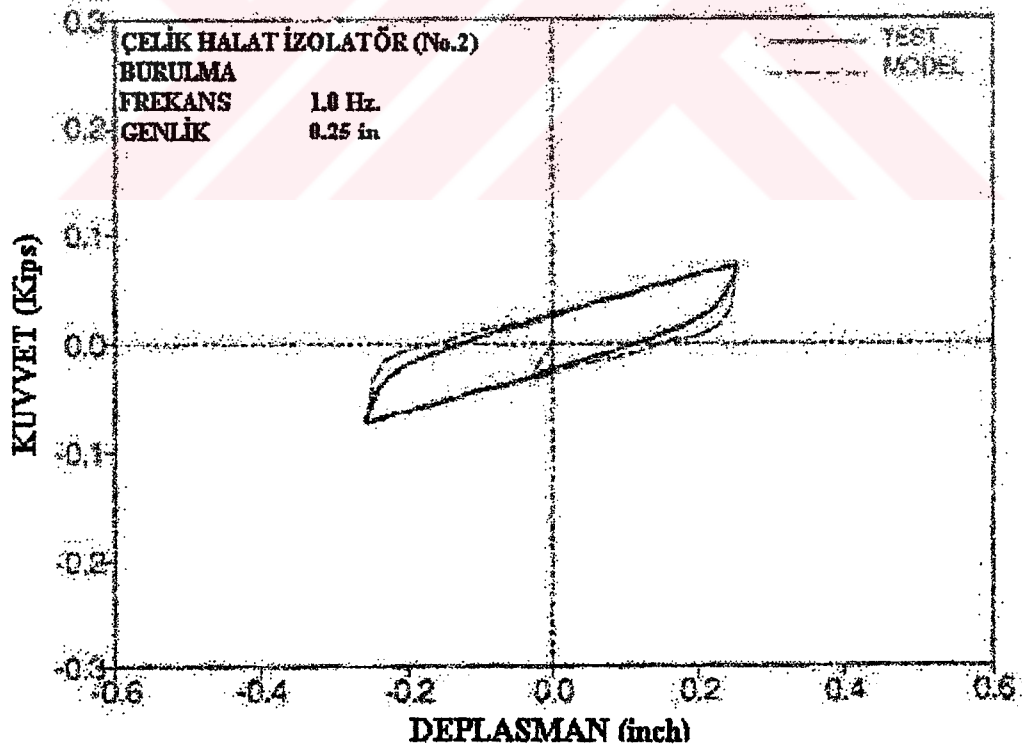
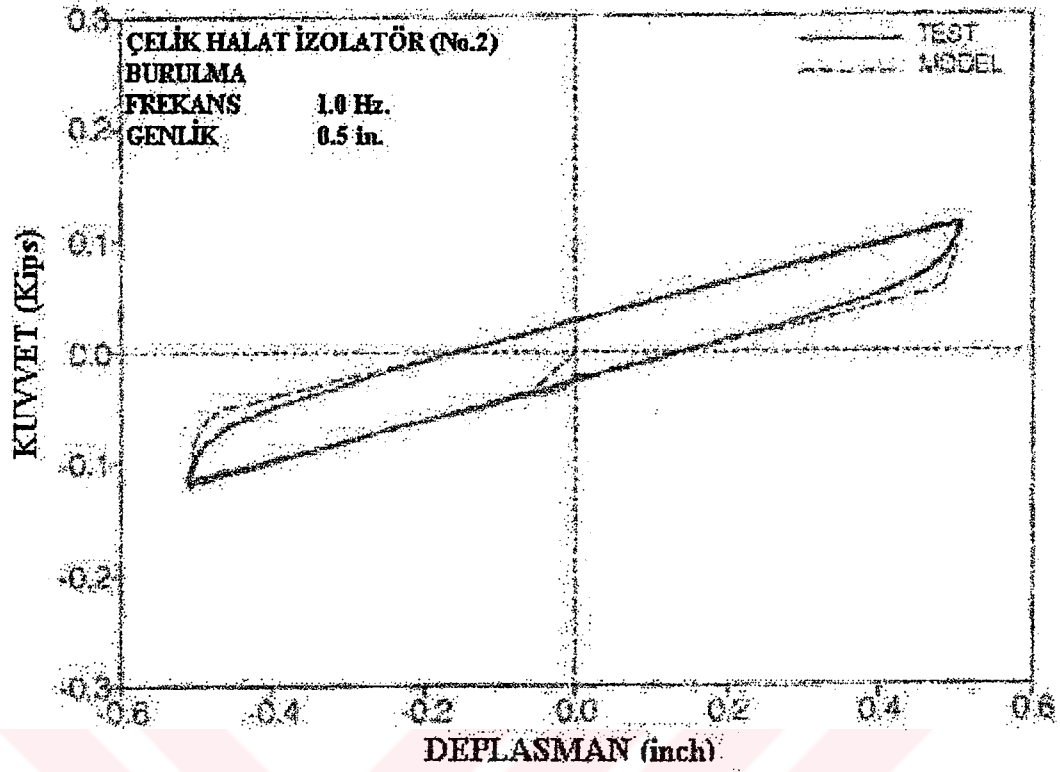
Şekil 3.2 Çelik halat izolatörlerin burulma yönünde test düzeneği.
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



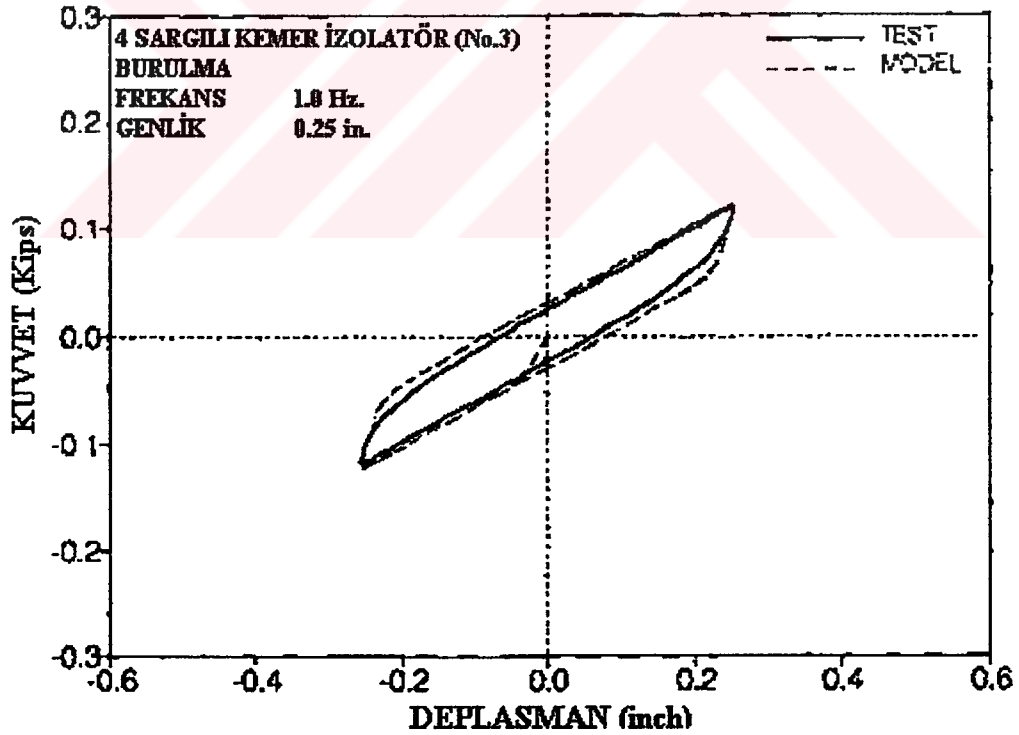
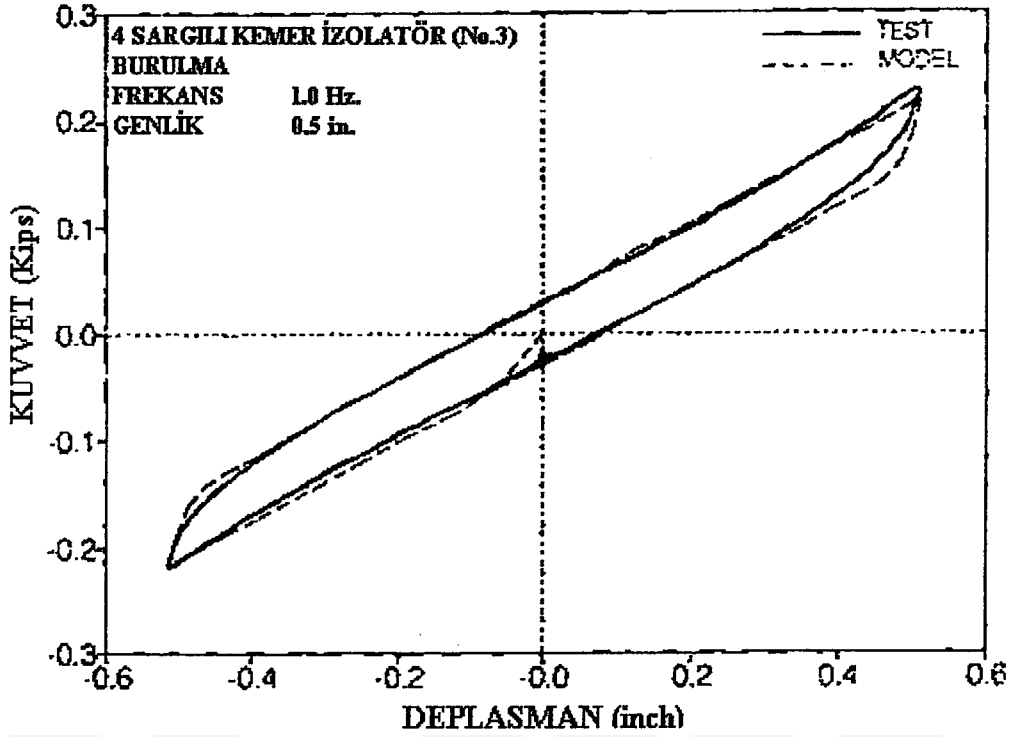
Şekil 3.3 İkili doğrusal modele ait parametreler. (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



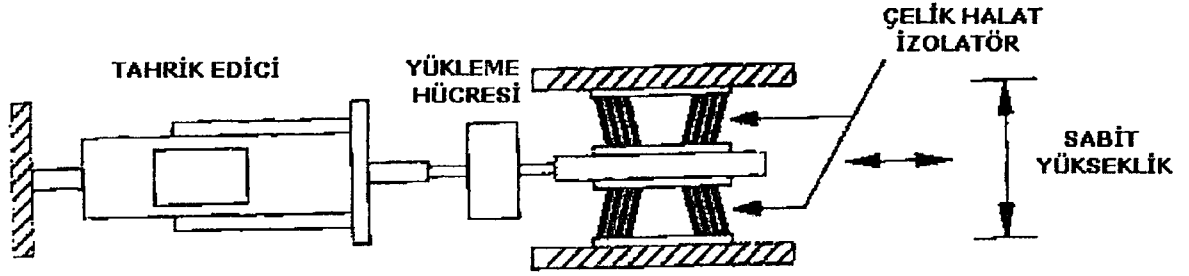
Şekil 3.4 Burulma hareketine maruz bırakılan No.1 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip=4.46 kN).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



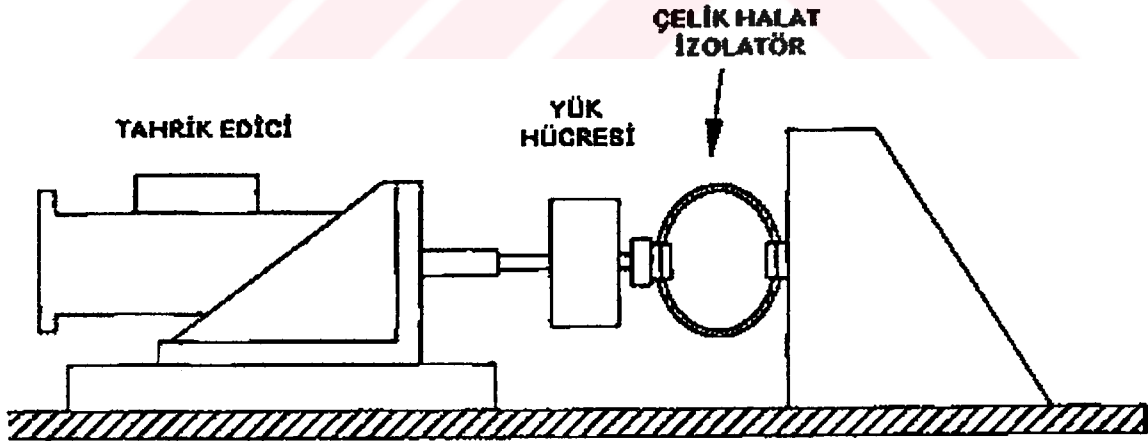
Şekil 3.5 Burulma hareketine maruz bırakılan No.2 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



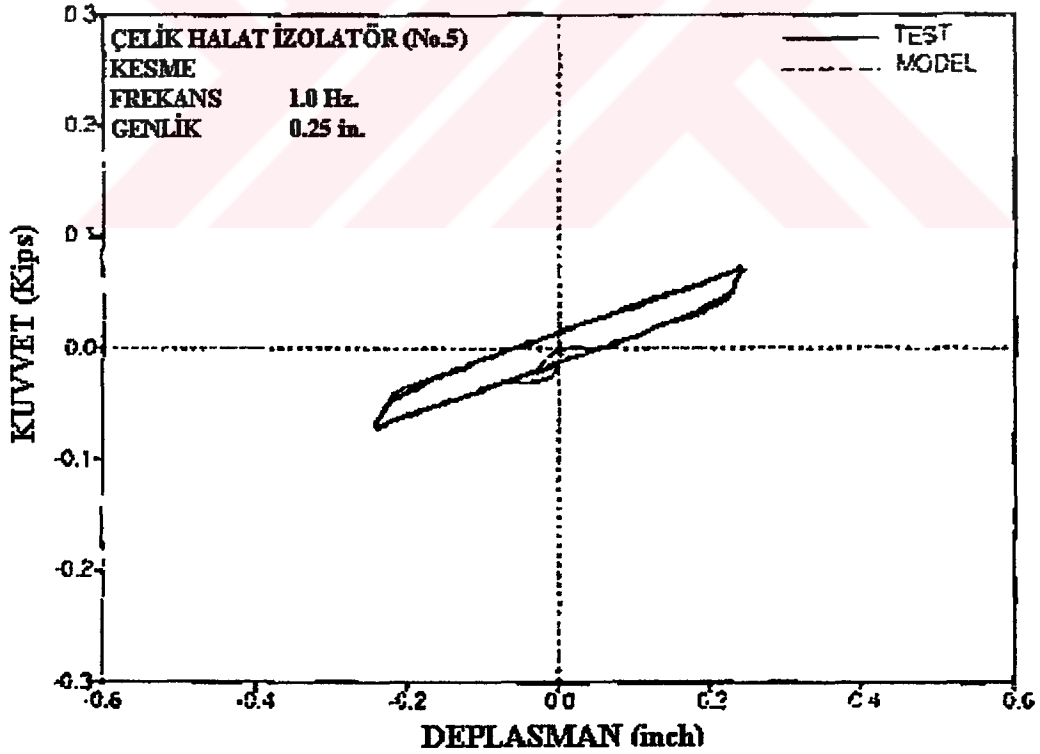
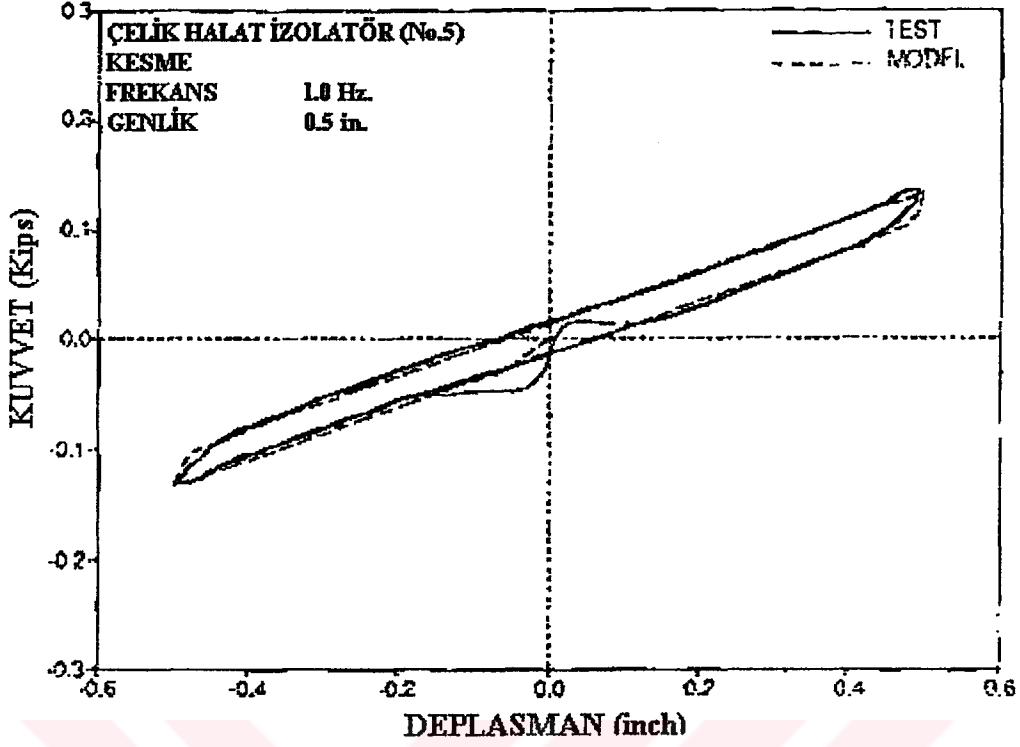
Şekil 3.6 Burulma hareketine maruz bırakılan No.3 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



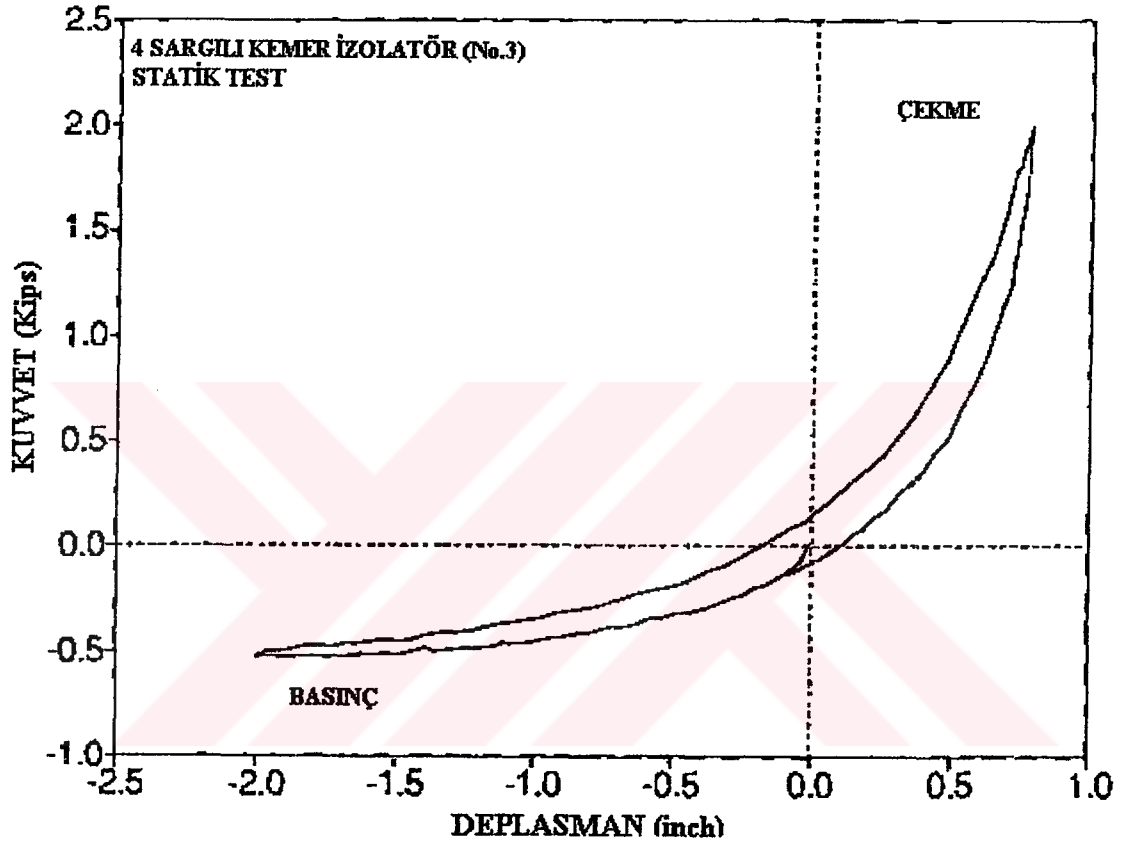
Şekil 3.7 Sabit yükseklik korunarak gerçekleştirilen No.5 çelik halat izolatöre ait test düzeneği. (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



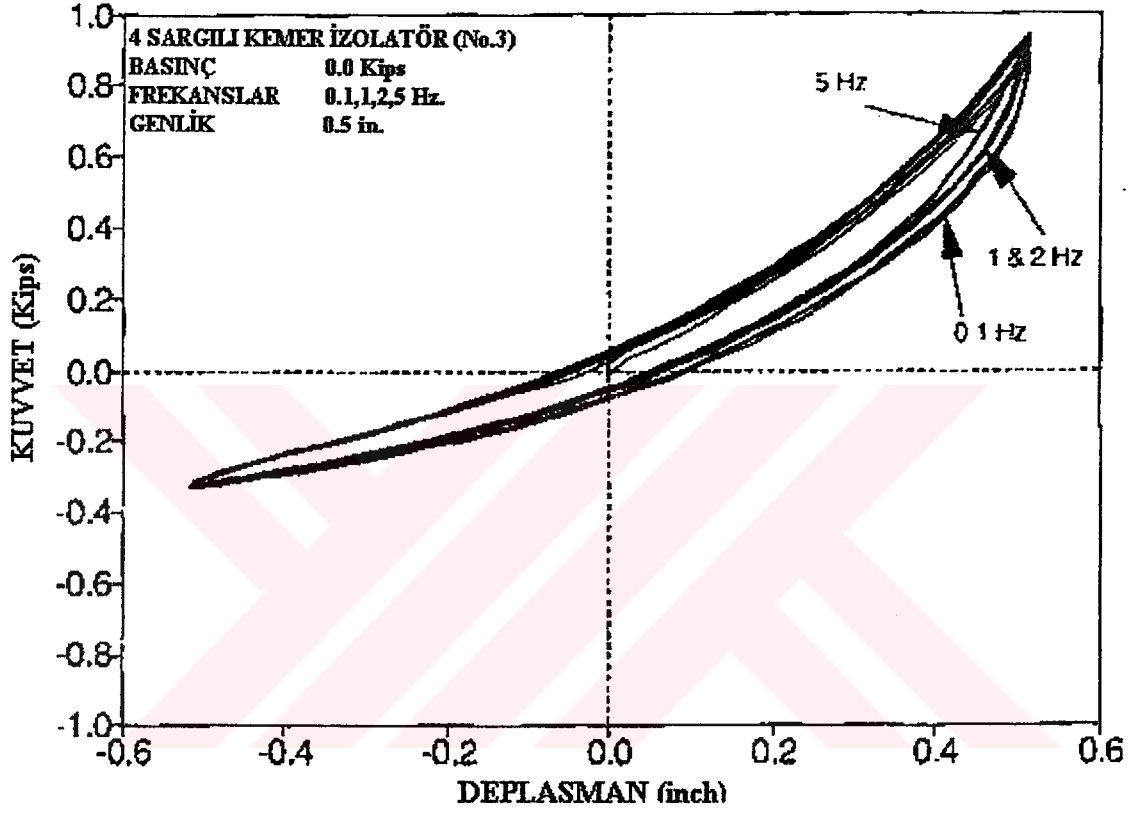
Şekil 3.8 Çelik halat izolatörlerin basınç – çekme yönündeki testine ait düzenek. (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



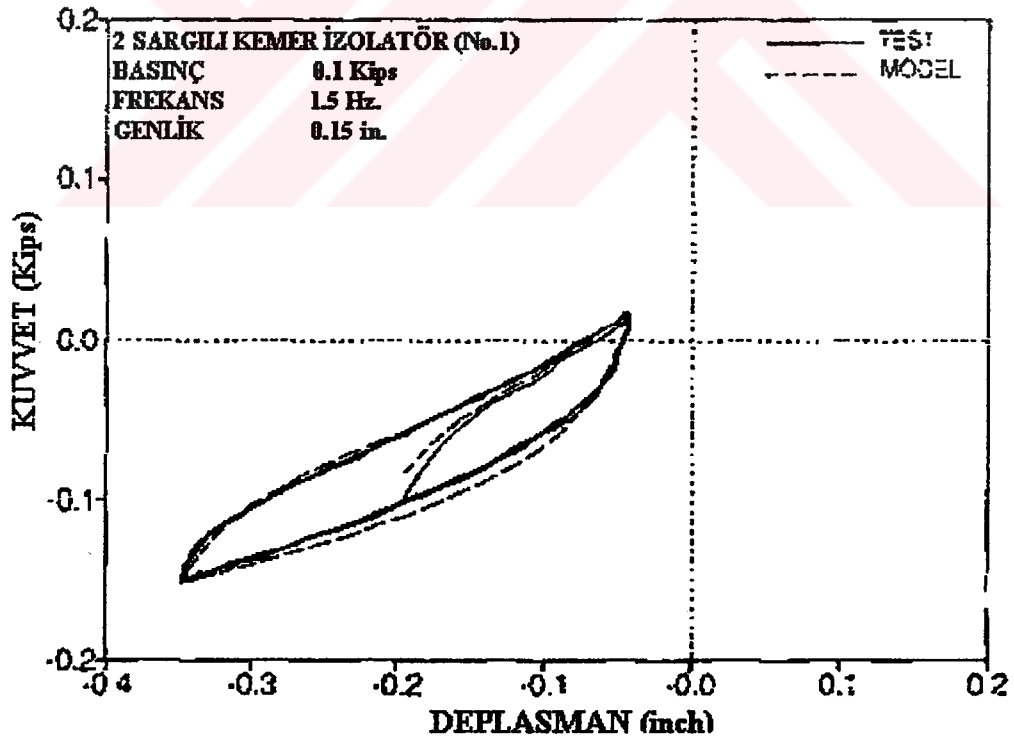
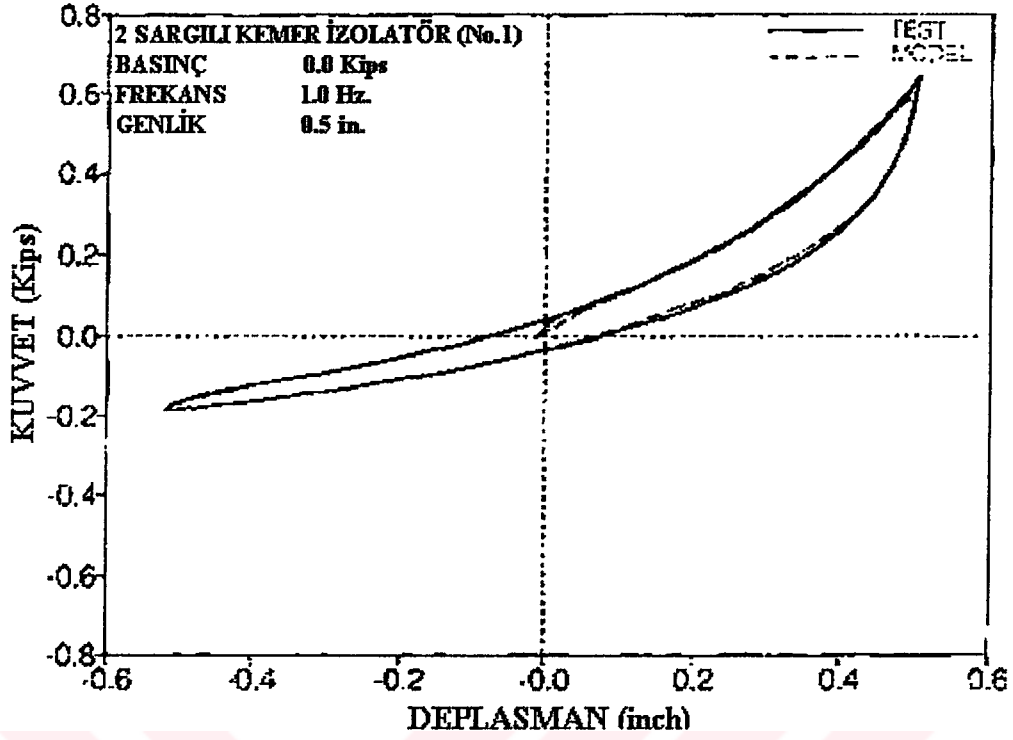
Şekil 3.9 Kesme hareketine maruz bırakılan No.5 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



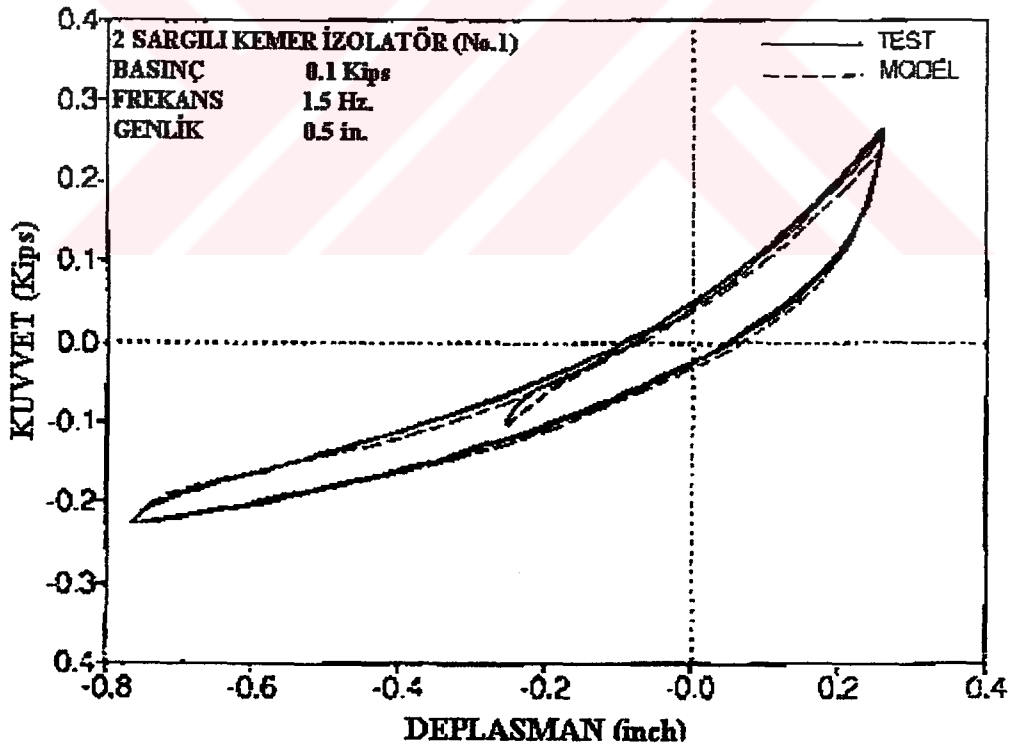
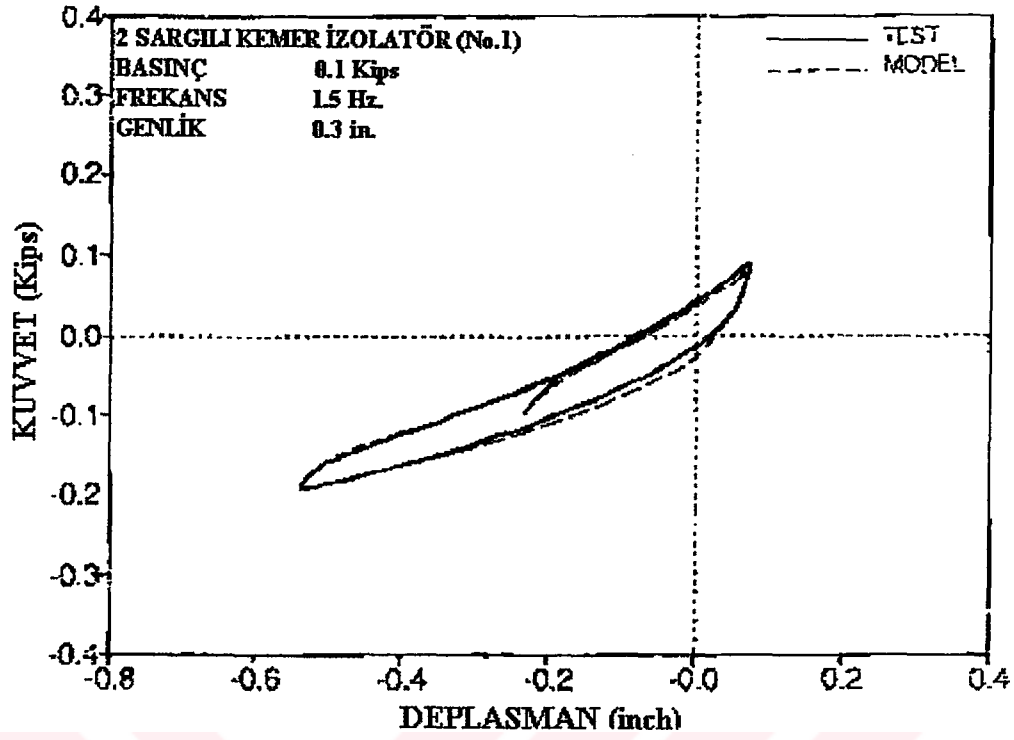
Şekil 3.10 Çelik halat izolatörlerin basınç – çekme yönünde tipik kuvvet – deplasman grafiği (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



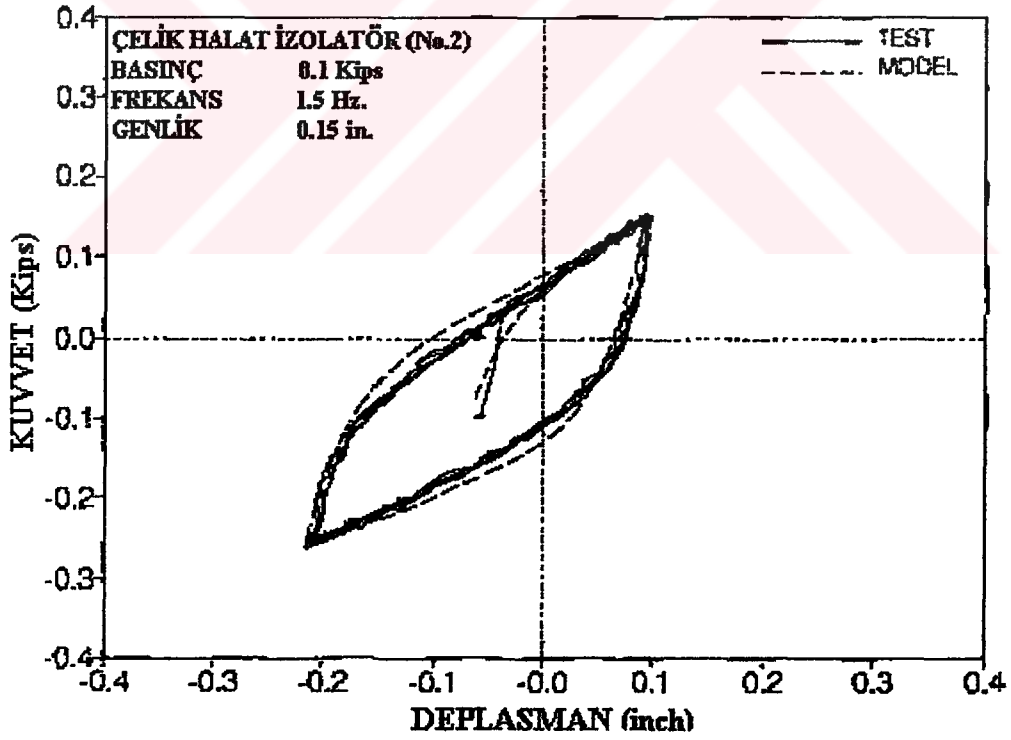
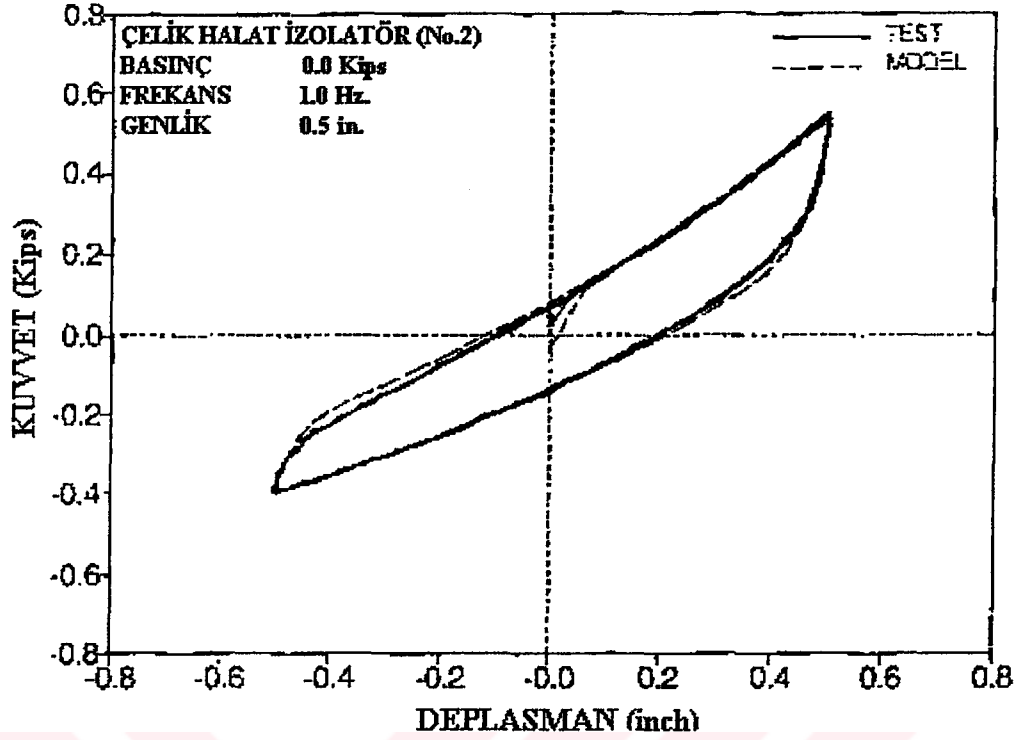
Şekil 3.11 Basınç – çekme yönünde devrinsel hareket için kuvvet – deplasman grafiği
 (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M.,
 1992)



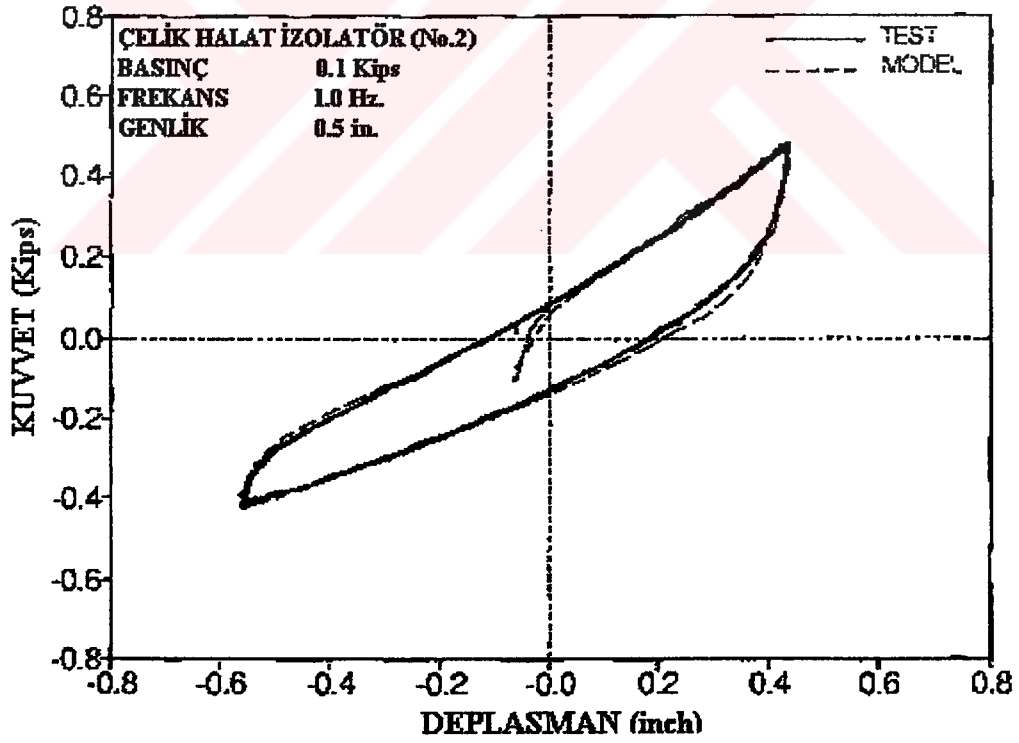
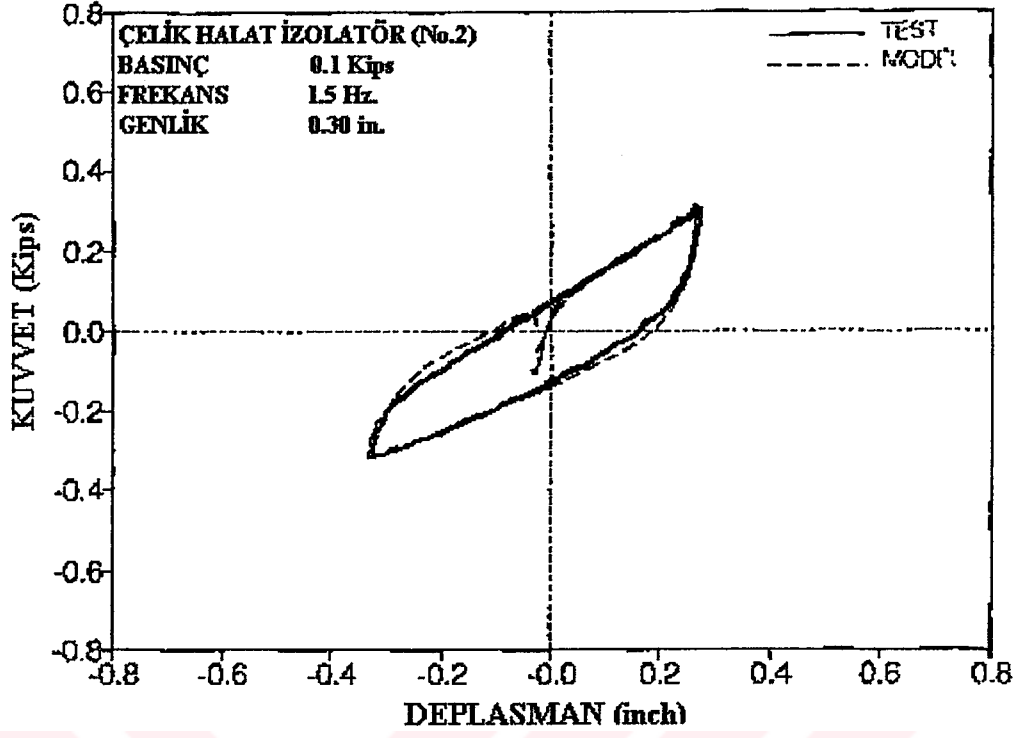
Şekil 3.12 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.1 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



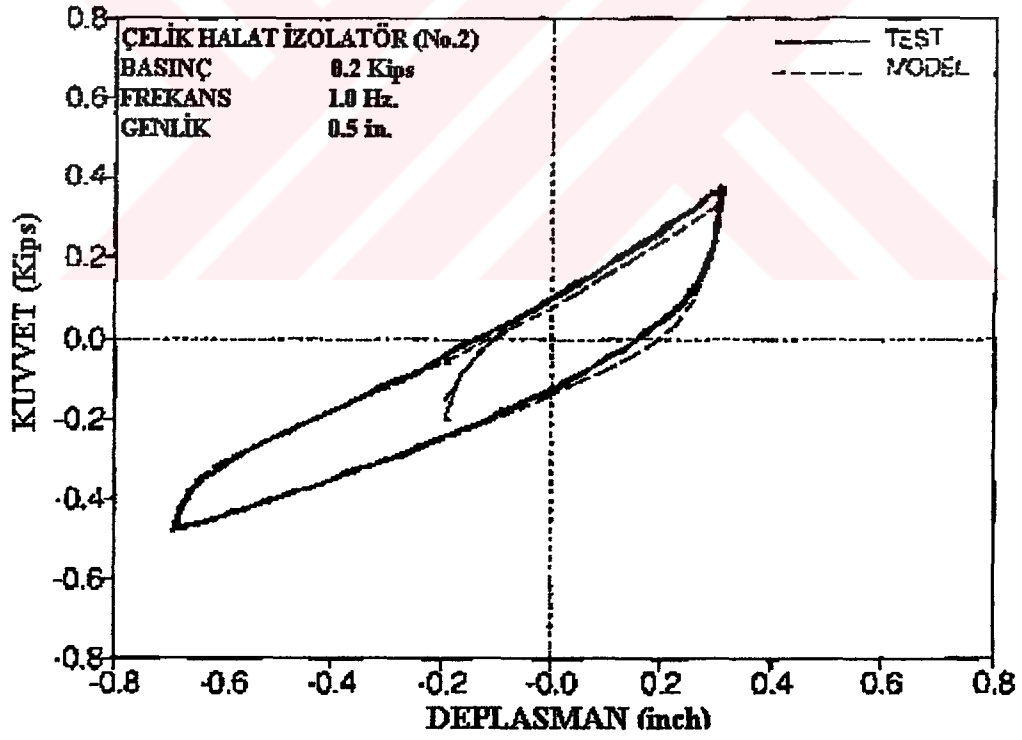
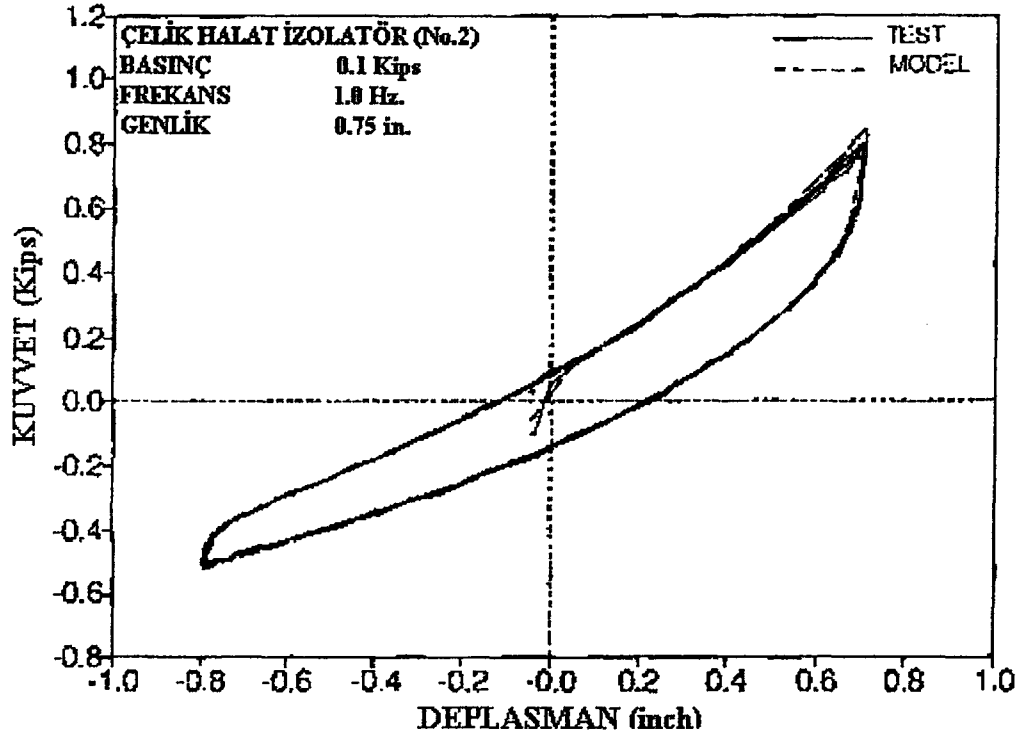
Şekil 3.12 Devamı.



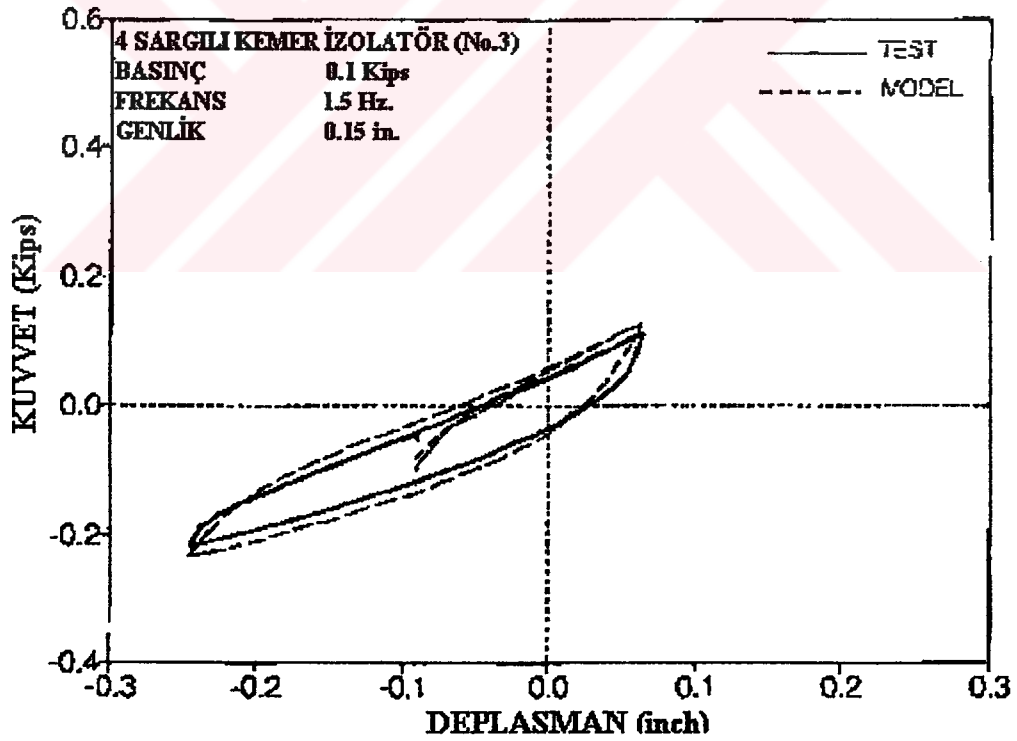
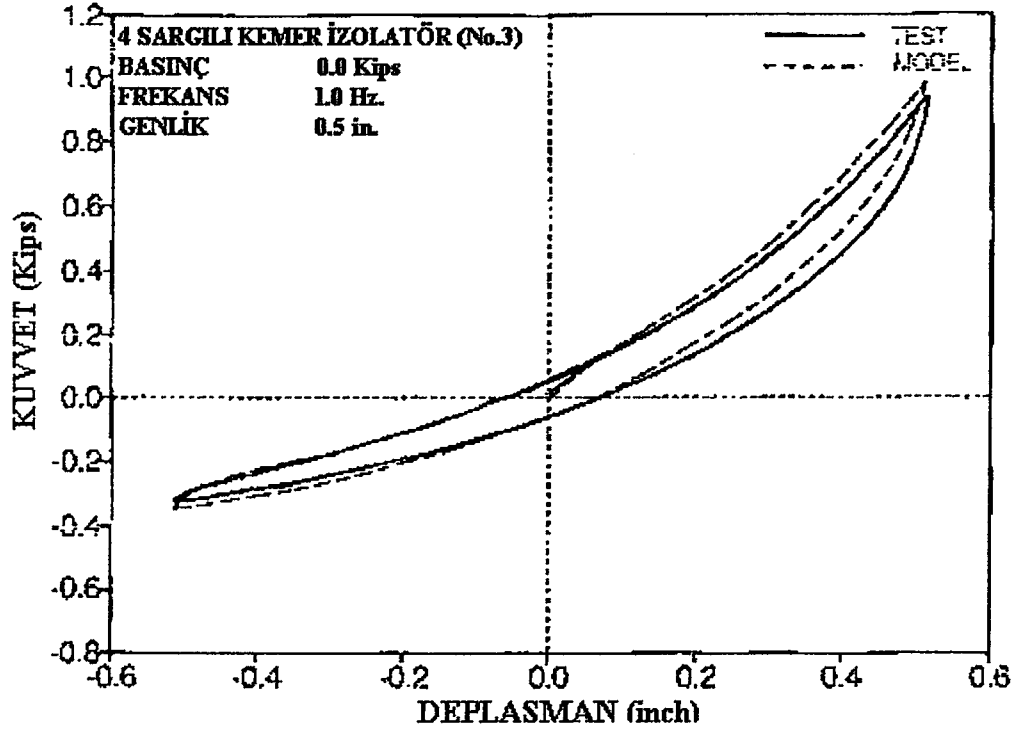
Şekil 3.13 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.2 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN).
 (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



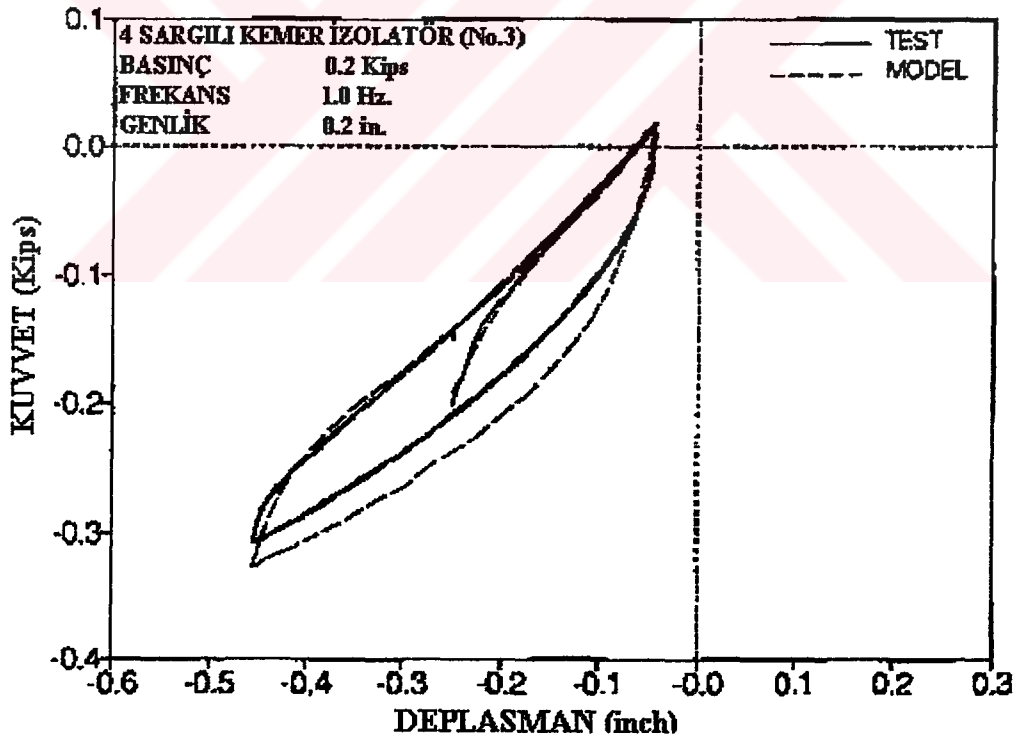
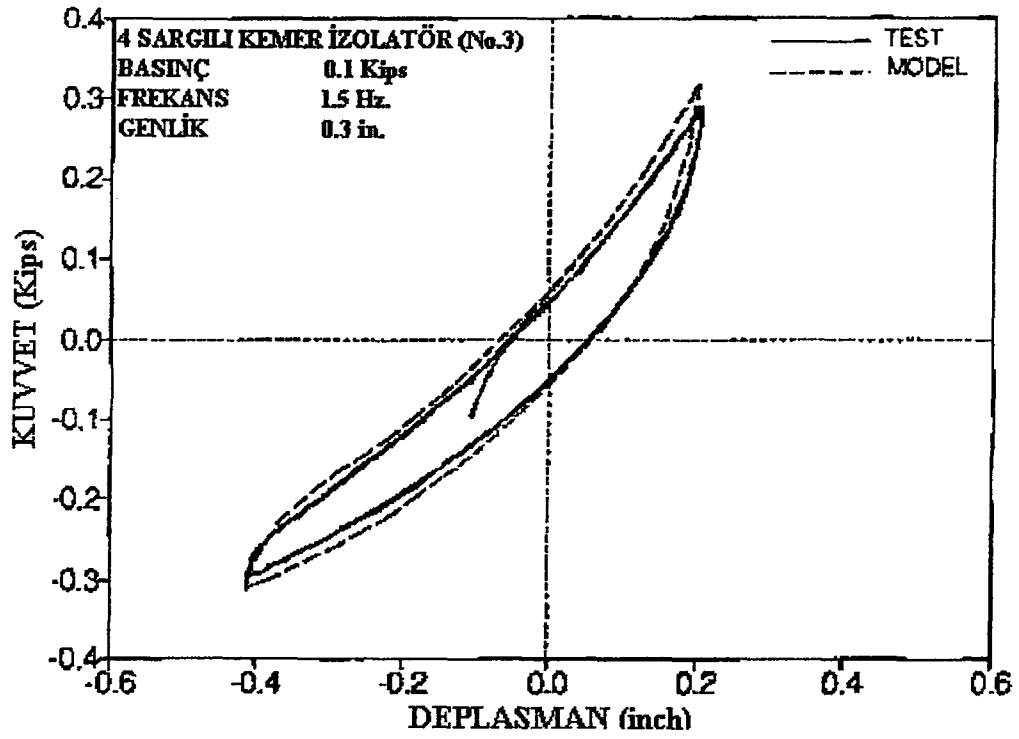
Şekil 3.13 Devamı.



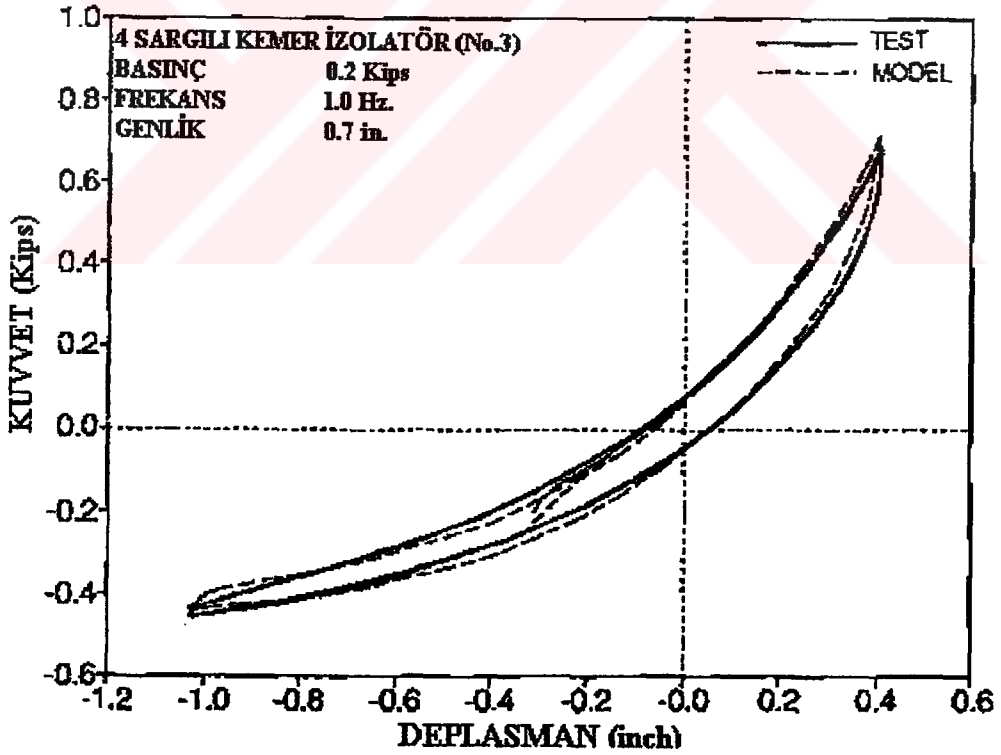
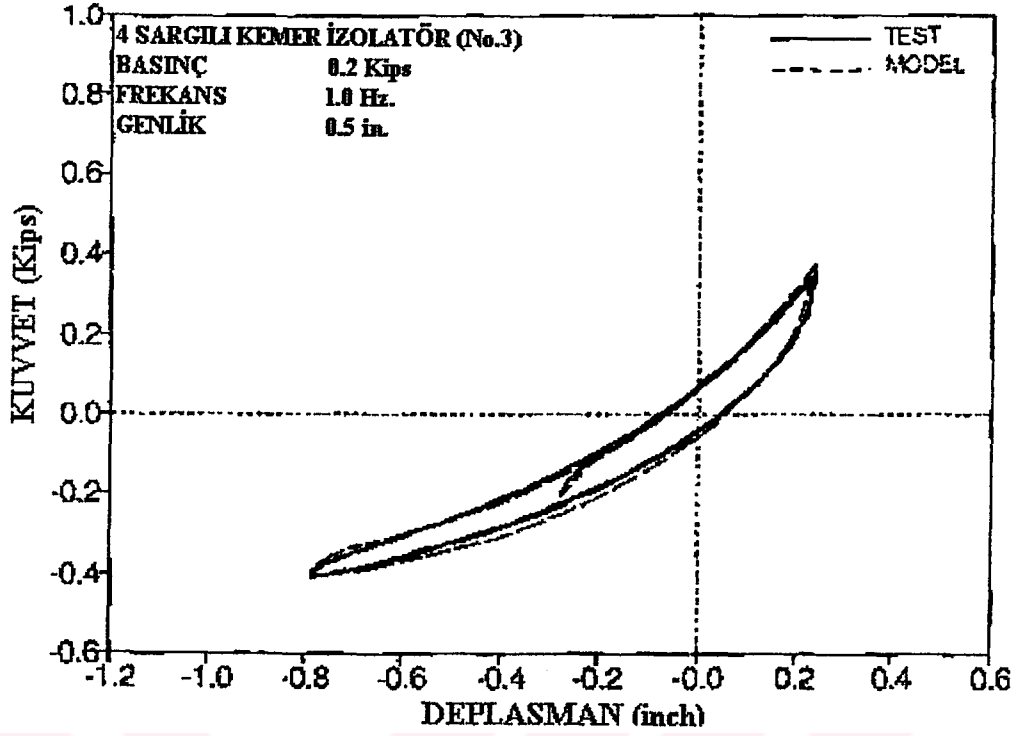
Şekil 3.13 Devamı.



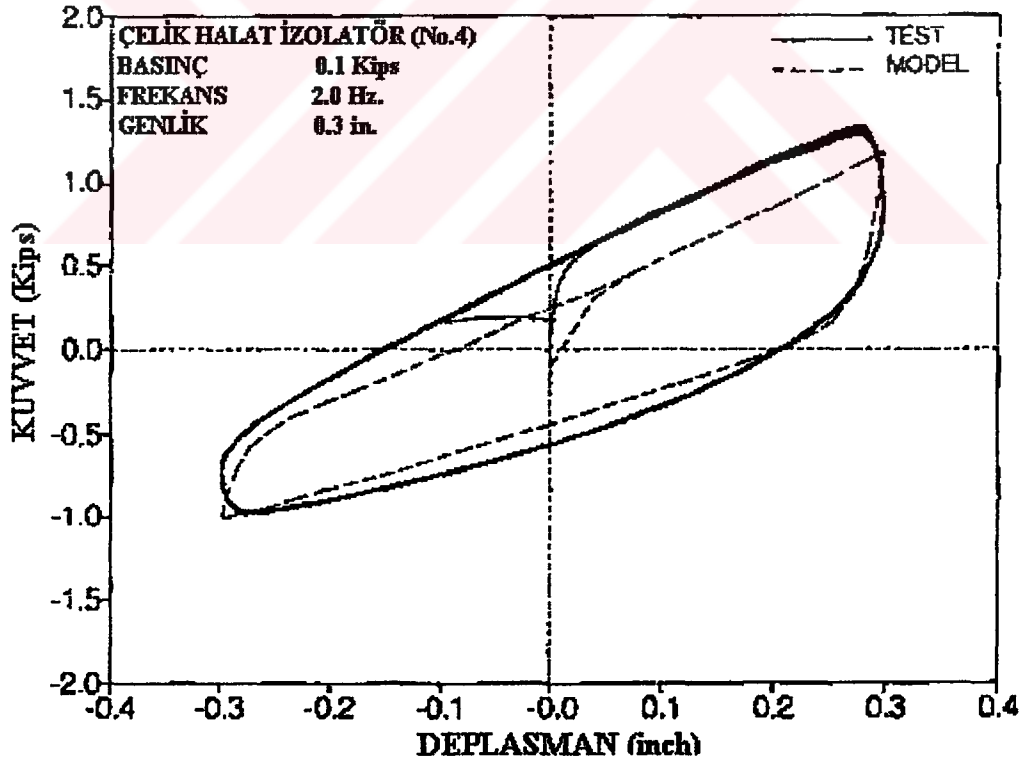
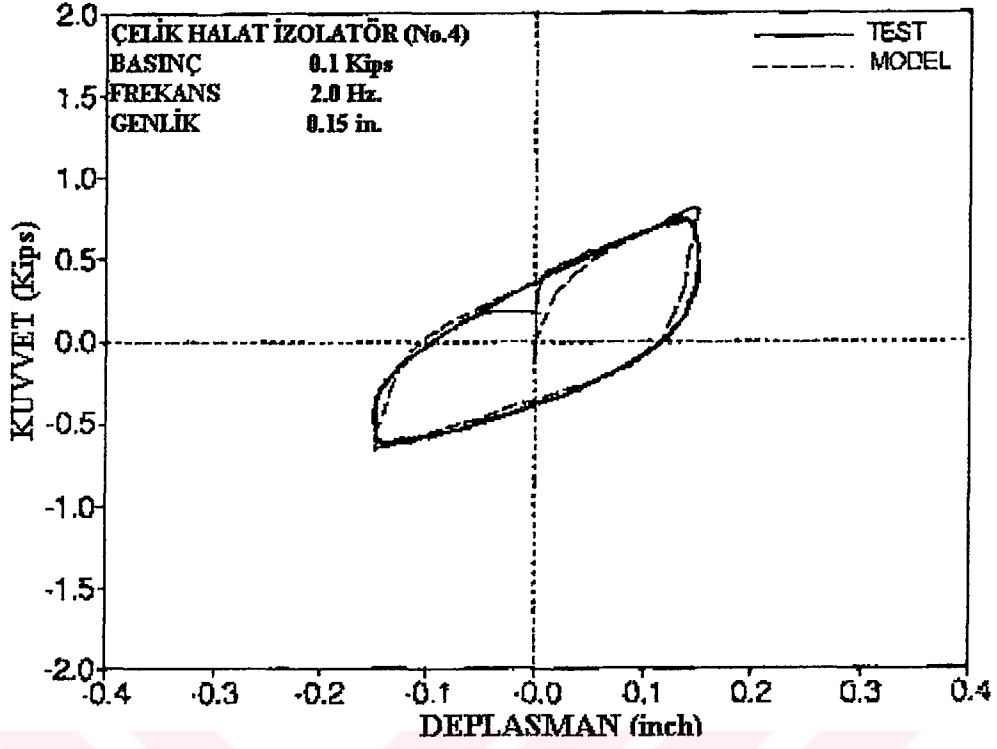
Şekil 3.14 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.3 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 3.14 Devamı.



Şekil 3.14 Devamı.



Şekil 3.15 Basınç – çekme hareketine maruz bırakılan No.4 izolatöre ait kuvvet – deplasman grafiklerinin deneysel ve analitik karşılaştırılması (1 in.=25.4 mm, 1 Kip =4.46 kN).
 (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

4. EKİPMANLAR İÇİN ÇELİK HALAT İZOLASYON SİSTEMLERİNİN DENEYSSEL VE ANALİTİK ÇÖZÜMLERİ

Çelik halat izolasyon sistemlerin işlerliğini belirlemek ve bu sistemler için geliştirilen matematik modellerin geçerliliğini doğrulamak amacıyla, bir ekipman kabini Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından sarsma tablasında test edilmiştir. Kabin, izole edilmiş ve izole edilmemiş durumlar için deprem hareketlerine tabi tutulmuştur. Test edilen bütün sistemlerde kabin, dört adet çelik halat izolatör tarafından taşınmıştır. Hassas bir konfigürasyona sahip olan kabin, gerçek salınım hareketine karşı koymuştur. Farklı rijitliklere sahip üç sistem test edilirken, bir dördüncü sistem ise sadece analiz edilmiştir. Deneysel ve analitik çalışmaların sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Analitik modelleme ve analitik modele yapılan nümerik yaklaşım ise 5 nci bölümde izah edilmiştir.

4.1 EKİPMANIN VE İZOLASYON SİSTEMİNİN TANIMLANMASI

Test edilen ekipman Şekil 4.1'de gösterilmiştir (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992). Ekipman 1880 mm.(74 in.) yüksekliğe ve 599 x 762 mm.(22 in. x 30 in.) plan ölçülerine sahiptir. Sadece aksenal yönde kenar levhalarıyla birbirine birleştirilmiş beş adet yatay diyafram (izolatör seviyesi, 1, 2, 3 ncü seviyeler ve üst seviye) içermektedir. 1784 N (400 lbs) ağırlıkta olup, ağırlık merkezi 1 nci seviye yüksekliğinde ve kabinin plan görünümünün geometrik merkezinde olduğu kabul edilmiştir. Kabinin aksenal doğrultusuna paralel ve kütle merkezinden geçen yatay eksendeki ekipman atalet yarıçapı 580 mm.(22.83 in.) olarak belirlenmiştir.

Üç adet test edilen ve bir adet de analiz edilen konfigürasyonlarda izolasyon sistemi, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, yatay doğrultuda 463.6 mm.(18.25 in.) uzaklığa yerleştirilmiş dört adet çelik halat izolatöre sahiptir. Sismik hareket, izolatörleri basınç ve burulmaya maruz bırakacak şekilde düşey ve yatay yönlerde etkimiştir. Dört izolasyon sistemi, sistem 1, 2, 3 ve 4 olarak isimlendirilmiştir. Sistem 1, No.1 izolatörü (Çizelge 3.1), sistem 2, No.2 izolatörü,vs. içermektedir.

4.2 ALET DÜZENEGİ VE DENEYSEL PROGRAM

Alet düzeneği yirmi bir adet kanal içermektedir. Bu kanallardan onbeş tanesi – dokuz ivme ölçer ve altı deplasman sensörü – ekipman cevabını izlerken, geri kalanı – üç ivmeölçer ve üç deplasman sensörü – sarsma tablasının mukbelesini izlemektedir. Şekil 4.3 ve 4.4, düzenek diyagramını göstermektedir.

Ekipman, izole edilmiş ve izole edilmemiş durumlar için yatay yönde test edilmiştir. İzole edilmemiş ekipmana ait tanıma testleri, 10.3 Hz. ana frekansı ve yatay yönde %0.6 vizkoz sönüm oranını vermiştir. Deprem hareketi 1952 Taft (Kern Kırsalı, California, Taft Lincoln Okul Tüneli, N21E bileşeni ve düşeyi), 1940 El Centro (Imperial Vadisi, California, S00E bileşeni ve düşeyi) ve 1971 Pacoima Barajı (San Fernando, California, S74W bileşeni ve düşeyi) kayıtlarını içermektedir. Bu deprem hareketlerinin özellikleri Çizelge 4.1’de listelenmiştir. Taft ve El Centro hareketleri, kat hareketleri üretmek amacıyla 7 katlı gerçek bir bina üzerinden filtrelenmiştir.

Bu yedi katlı bina, ABD. – Japonya işbirliği ile yapılan bir araştırma programı doğrultusunda, Tsukuba, Japonya’da gerçek boyutlarda yalancı dinamik (pseudo – dynamic) test tekniği kullanılarak test edilen bir öngerilmeli betonarme yapıdır (Okamoto, S., Nakata, S., Kitagawa, Y., Yoshimura, M. ve Kaminosono, T. 1985). Bu yapı için elde edilmiş bilgi ve deneysel veri, IDARC programı kullanılarak, yapı için detaylı bir inelastik model geliştirilmesini sağlamıştır (Park, Y.J., Reinhorn, M. Ve Kunnath, S.K. 1987). Bu test sonucunda elde edilen yapının beşinci ve yedinci katlarına ait ivme kayıtları, sarsma tablası deneylerinde veri olarak kullanılmıştır. Tipik bir kat ağırlığına oranla, ekipman ağırlığının çok küçük olması ($\approx 1/1000$), analiz sırasında ekipman – yapı etkileşiminin ihmal edilmesine imkân tanımıştır.

Şekil 4.5 – 4.11, sarsma tablası tarafından üretilen yer ve kat ivme tanım arahklarının yatay bileşenlerini ve bunlara ait ivme ve deplasman spektralarını göstermektedir. İvmenin düşey bileşenleri yapıya değiştirilmeden aktarılmıştır. Yapının üst katlarında yer hareketinin yatay bileşenleri önemli derecede büyütme ve filtrelemeye tabi tutulmuştur. Üst katlara ait %5 sönümlenmiş ivme spektrası, 7 katlı sünek yapının ana periyodunu içeren 0.4 – 0.8 saniye aralığında hatırı sayılır bir büyüme göstermiştir. El Centro hareketinin 7 nci kat spektrasının, ekipmanın tasarımı için gerekli olan kat cevap spektrası olarak elverişli olduğu belirlenmiştir (Chen, Y.Q. ve Soong, T.T. 1988). Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından yapılan bu deneysel programda kullanılan titreşim hareketleri, Makris (1992a ve 1992b) tarafından gerçekleştirilen, aynı kabinin farklı bir izolasyon sistemi ile izole edildiği deneyde kullanılan

titreşim hareketleri ile özdeştir.

4.3 TEST SONUÇLARI

Kabinin izole edilmiş ve izole edilmemiş durumlarda kaydedilen cevapları, Çizelge 4.1 – 4.8’de sunulmuştur. Çizelge 4.2 – 4.8’deki sonuçlara bakılarak hızlı bir yorum yapılabilmektedir. Sistem 2 ve sistem 3 etkili olmamıştır. Bu iki sisteme ait kabin ivmeleri, çoğu durumda, izole edilmemiş kabine ait ivmelerden daha fazla olmuştur. Buna rağmen sistem 1, en güçlü titreşimlerde (Taft 7 nci kat ve Pacoima Yer), ivmeleri neredeyse iki kat azaltmayı başarmıştır.

Bu davranışı açıklamak için her üç sistem de serbest titreşim testlerine tabi tutularak dinamik özellikleri belirlenmiştir. İzole edilmiş kabinin ağırlık merkezinde meydana gelen yatay deplasmanın zaman tanım aralığı Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu deplasman tamm aralıklarından, hareketin ilk yarım devir verilerine bakılarak, sistem 1 ve 3 için serbest titreşimin etkin periyodu ve buna bağlı olarak eşdeğer viskoz sönüm oranını belirlemek mümkün olmuştur. Sönüm oranı, logaritmik azaltma metodu ile elde edilmiştir (Clough,R.W. ve Penzien,J. 1975). Çelik halat izolatörlerin nonlineer histeretik davranışlarına bağlı olarak genliğe dayanan bu dinamik özellikler Çizelge 4.9’da listelenmiştir. Periyod değerleri, sistem 3’ün (4 sargılı izolatör), sistem 1’den (2 sargılı izolatör) iki kat daha rijit olduğunu göstermiştir. Buna ilave olarak, sistem 1, enerji sönümleme açısından sistem 3’ten önemli derecede fazla kapasiteye sahip olmuştur. Bu durum, sistem 1’in daha iyi performans göstermesinin birinci nedenidir.

Bunun kanıtı, iki sistemin Taft 7 nci kat titreşimi için deneysel cevabın karşılaştırılmasıyla elde edilebilir (Çizelge 4.4). Bu iki sistem ağırlık merkezinde, sırasıyla, serbest titreşim sonuçlarının geçerli olduğu aralıkta kalan 56 mm. ve 114 mm. (2.2 in. ve 4.5 in.) deplasmana maruz kalmışlardır. Verilen hareketin cevap spektrasından (Şekil 4.7) ve Çizelge 4.10’daki dinamik özelliklerin kullanılmasıyla, sistem 3’ün cevabının sistem 1’inkinin hemen hemen iki katı fazla olduğu kolayca kanıtlanabilir.

Sistem 1’in yüksek enerji sönümleme yeteneği, Taft 7 nci kat testindeki, iki sistemin moment – dönme ilişkisinin karşılaştırılmasıyla da gözlenebilir. İlk olarak izole edilmiş kabin, salınma cevap verir (Çizelge 4.2 – 4.8’deki, izolatörün yatay ve düşey deplasman değerlerini kıyaslayınız). Buna bağlı olarak, dinamik özellikleri, izolatörler tarafından tabanda oluşturulan M momenti ve tabandaki θ dönmesi arasındaki ilişkiden elde edilebilir. Düşey

izolatör deplasmanının deneysel tanım alanı kullanılarak, her izolator tarafından tabana aktarılan düşey kuvvetin zaman tanım alanını elde etmek için Denklem 3.2, 3.5, 3.6 ve 3.7 nümerik olarak birleştirilmiştir. İzolatörler arasındaki uzaklığın yarısı a olarak gösterilirse (Şekil 4.1 ve 4.3);

$$M = 2(F_S - F_N)a \quad (4.1)$$

$$\theta = \frac{U_S - U_N}{2a} \quad (4.2)$$

olur. Burada F_S ve U_S , güney yönüne yerleştirilmiş izolatöre ait kuvvet ve deplasman, F_N ve U_N ise kuzey yönüne yerleştirilmiş izolatöre ait kuvvet ve deplasmandır (Şekil 4.3). Şekil 4.13, Taft 7 nci kat testi için sistem 1 ve sistem 3 için $M - \theta$ grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklerin, münferit izolatörlerin kuvvet – deplasman grafiklerine benzemeyen simetrik histeretik davranış sergilemesi dikkat çekicidir (Şekil 3.11).

Serbest titreşimin etkin periyodu T ve eşdeğer viskoz sönüm oranı ξ 'nin dinamik özellikleri

$$T = 2\pi \left(\frac{I}{K_r} \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (4.4)$$

denklemlerinden elde edilmiştir. Burada $K_r = M - \theta$ eğrisinin eğiminden elde edilen dönme rijitliği, $I =$ izolasyon sisteminin merkezinden geçen eksene göre kabinin atalet momenti ($I = mr^2 + mh^2$), $W_D =$ moment – dönme bağıntısı altındaki enerji ve $W_S =$ maksimum deplasmanlarda depo edilen gerilme enerjisidir (Clough,R.W. ve Penzien,J. 1975). Bu değerler, sistem 1 için $T = 0.93$ sn. ve $\xi = 0.11$, sistem 3 için $T = 0.62$ sn. ve $\xi = 0.05$ 'dir. İzolatörlerin yatay esnekliğinin etkisiz olması nedeniyle periyotlar, serbest titreşim testindeki emsallerinden daha düşük kalmışlardır. Sönüm oranları, serbest titreşim testlerinde elde edilenlerle neredeyse özdeşler.

Deneysel sonuçların önceki analizleri göstermiştir ki, çelik halat izolatörlerde sönüm, deformasyonun genliğine bağlıdır. Güçlü deprem hareketleri esnasında beklenen büyük deformasyonlarda sönüm oranı yetersiz kalabilir. Bu durum, test edilen sistem 2 ve sistem 3'ün etkisiz kalmasının nedenidir. İvmeleri azaltmada etkin olan sistem 1, makul derecede

sayılabilecek 0.1 değerinde kritik sönüm oranına sahiptir. Çok rijit çelik halat izolatörlerin kullanılmasıyla sönüm kapasitesi arasındaki ilişki, bir sonraki alt başlıkta analitik olarak açıklanmıştır.

4.4 ÇOK RİJİT ÇELİK HALAT SİSTEMLERİN ANALİTİK İNCELENMESİ

Çok rijit çelik halat sistemlerin davranışlarını anlamak maksadıyla, No.4 tipinde 4 adet helis çelik halat izolatör içeren bir sistem analitik olarak incelenmiştir (Şekil 3.15, Çizelge 3.1 ve Bölüm 3). İzolatörler, test edilen sistemlerdeki gibi yerleştirilmiştir. Analizler, Bölüm 5'te anlatılan nümerik integrasyon ve dinamik denge denklemleriyle gerçekleştirilmiştir. Sadece yatay titreşimler için hesaplanan cevap değerleri Çizelge 4.10'da listelenmiş ve izole edilmemiş ekipman için bulunan ilgili deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Analitik sonuçlar, kabinin esnekliği hesaba katılmadığından bazı hatalar içerebilir. Kabinin esnekliğinin katkısı, çok rijit çelik halat sistemlerin analizinde önemli olabilir. Analitik sonuçların doğru oldukları düşünüldüğünde, çelik halat sistemin, verilen bütün hareketler için kabinin sismik performansı üzerinde iyileştirmelere sebep olduğu gözlenmiştir. Çizelge 4.10'daki iki duruma bakıldığında (Taft 7 nci kat ve Pacoima yer), Denklem 4.3 ve 4.4 ile dinamik özellikleri, Taft 7 nci kat titreşimi için $T = 0.14$ sn. ve $\xi = 0.23$, Pacoima titreşimi için $T = 0.19$ sn. ve $\xi = 0.3$ olarak belirlenen sisteme ait moment – dönme grafiği çizilmiştir. Sönüm, cevabı kontrol etmeye yetecek kadar büyük olmuştur. İzole edilmemiş kabine kıyasla, çelik halat mesnetli kabinin performansında önemli derecede bir düzelme olmaması, sadece test edilen kabinin çok yüksek bir rijitliğe sahip olmasının sonucudur (izole edilmemiş durumda frekans 10.3 Hz.). İzole edilmemiş kabin daha düşük bir frekansa sahip olsaydı (örneğin 5 Hz.), enerji sönümlenme yetersizliği nedeniyle ($\xi = 0.006$) ivme cevabı çok daha büyük olurdu.

Bütün bunlardan şu sonuca varılabilir ki, ekipmanın sismik davranışı esas olarak, ekipmanın rijit çelik halat izolatörler ile taşınmasıyla iyileştirilebilir. Çeşitli şartlar altında, izolatörler küçük deplasmanlara maruz kahrılar, yüksek sönüm kapasitesi sergilerler ve rezonans oluşmasını engellerler.

Çizelge 4.1 Deney programında kullanılan deprem titreşimlerine ait karakteristik özellikler
(1 in.=25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

Kayıt	TAFT	EL CENTRO	PACOIMA
	Kern Kırsalı, CA 21 Temmuz 1952 Taft Lincoln Okul Tüneli	Imperial Vadisi, CA 18 Mayıs 1940 El Centro	San Fernando, CA 9 Şubat 1971 Pacoima Barajı
Yer	Kaya	Sert Toprak	Kaya
Büyükük	7.6	6.6	6.6
Yerel MMI	VII	VIII	IX
Merkezden Uzaklık (Km)	56	8	3
Yatay Bileşen	N21E	S00E	S74W
Uç Yatay Deplasman (in.)	2.64	4.28	4.26
Uç Yatay Hız (in / s)	6.19	13.17	22.73
Uç Yatay İvme (g)	0.16	0.35	1.08
Uç Düşey Deplasman (in.)	1.98	2.19	7.60
Uç Düşey Hız (in / s)	2.63	4.27	22.95
Uç Düşey İvme (g)	0.11	0.21	0.71

Çizelge 4.2 İzole edilmiş ekipmanın, Taft Yer Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri.
Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir (1 in.=25.4 mm).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

TAFT N21E YER HAREKETİ				
	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 1	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 2	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 3	İZOLE EDİLMEMİŞ HÂL
İVME (g)				
Tabla Yatay	0.155 (0.155)	0.155 (0.153)	0.154 (0.154)	0.154 (0.152)
İzolatör Yatay	0.166 (0.165)	0.168 (0.158)	0.150 (0.154)	0.156 (0.157)
Seviye 1 Yatay	0.100 (0.110)	0.163 (0.179)	0.186 (0.171)	0.187 (0.193)
Üst Seviye Yatay	0.220 (0.215)	0.262 (0.297)	0.305 (0.292)	0.250 (0.255)
Tabla Düşey	0.002 (0.121)	0.005 (0.117)	0.006 (0.123)	- (0.112)
İzolatör S Düşey	0.055 (0.156)	0.031 (0.120)	0.045 (0.127)	- -
İzolatör N Düşey	0.059 (0.222)	0.030 (0.138)	0.055 (0.162)	- -
Üst Seviye Düşey	0.050 (0.216)	0.031 (0.135)	0.047 (0.157)	0.008 (0.118)
DEPLASMAN (in)				
Tabla Yatay	1.242 (1.224)	1.243 (1.223)	1.244 (1.222)	1.268 (1.354)
İzolatör Yatay	1.222 (1.103)	0.018 (0.022)	0.067 (0.070)	- -
Seviye 1 Yatay	0.665 (0.667)	0.254 (0.238)	0.366 (0.463)	0.039 (0.039)
Üst Seviye Yatay	1.211 (1.221)	0.431 (0.395)	0.676 (0.860)	0.063 (0.063)
Tabla Düşey	0.013 (0.479)	0.012 (0.480)	0.012 (0.479)	- (0.433)
İzolatör S Düşey	0.247 (0.258)	0.058 (0.052)	0.126 (0.173)	- -
İzolatör N Düşey	0.198 (0.221)	0.074 (0.068)	0.119 (0.153)	- -

Çizelge 4.3 İzole edilmiş ekipmanın, Taft 5 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir (1 in.=25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

TAFT N21E 5 NCI KAT HAREKETİ				
	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 1	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 2	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 3	İZOLE EDİLMEMİŞ HÂL
İVME (g)				
Tabla Yatay	0.266 (0.261)	0.262 (0.259)	0.262 (0.261)	0.272 (0.268)
İzolator Yatay	0.289 (0.338)	0.299 (0.304)	0.290 (0.288)	0.276 (0.273)
Seviye 1 Yatay	0.166 (0.173)	0.370 (0.322)	0.576 (0.552)	0.372 (0.378)
Üst Seviye Yatay	0.447 (0.449)	0.633 (0.540)	1.099 (1.065)	0.529 (0.378)
Tabla Düşey	0.002 (0.122)	0.005 (0.121)	0.007 (0.120)	- (0.119)
İzolator S Düşey	0.189 (0.325)	0.056 (0.127)	0.243 (0.256)	- -
İzolator N Düşey	0.131 (0.254)	0.111 (0.148)	0.281 (0.320)	- -
Üst Seviye Düşey	0.118 (0.264)	0.093 (0.142)	0.332 (0.363)	0.021 (0.113)
DEPLASMAN (in)				
Tabla Yatay	1.672 (1.664)	1.670 (1.646)	1.674 (1.664)	1.654 (1.673)
İzolator Yatay	0.256 (0.173)	0.327 (0.239)	0.444 (0.438)	- -
Seviye 1 Yatay	1.731 (1.698)	1.070 (0.715)	3.105 (2.943)	0.043 (0.063)
Üst Seviye Yatay	3.214 (3.183)	1.805 (1.209)	5.882 (5.570)	0.083 (0.094)
Tabla Düşey	0.021 (0.479)	0.021 (0.479)	0.021 (0.479)	- (0.457)
İzolator S Düşey	0.768 (0.798)	0.235 (0.155)	1.388 (1.306)	- -
İzolator N Düşey	0.616 (0.583)	0.345 (0.227)	1.373 (1.311)	- -

Çizelge 4.4 İzole edilmiş ekipmanın, Taft 7 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir (1 in.=25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

TAFT N21E 7 NCI KAT HAREKETİ				
	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 1	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 2	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 3	İZOLE EDİLMEMİŞ HÂL
İVME (g)				
Tabla Yatay	0.469 (0.474)	0.473 (0.471)	0.475 (0.470)	0.475 (0.479)
İzolator Yatay	0.673 (0.677)	0.537 (0.499)	0.484 (0.516)	0.482 (0.490)
Seviye 1 Yatay	0.260 (0.250)	0.608 (0.580)	0.679 (0.674)	0.700 (0.726)
Üst Seviye Yatay	0.625 (0.639)	1.130 (0.979)	1.304 (1.293)	1.167 (1.199)
Tabla Düşey	0.006 (0.124)	0.008 (0.126)	0.009 (0.125)	- (0.114)
İzolator S Düşey	0.262 (0.302)	0.248 (0.279)	0.609 (0.550)	- -
İzolator N Düşey	0.255 (0.297)	0.261 (0.272)	0.573 (0.529)	- -
Üst Seviye Düşey	0.230 (0.299)	0.230 (0.248)	0.769 (0.711)	0.044 (0.118)
DEPLASMAN (in)				
Tabla Yatay	2.105 (2.064)	2.105 (2.064)	2.105 (2.062)	2.075 (2.102)
İzolator Yatay	0.302 (0.214)	0.687 (0.581)	0.615 (0.584)	- -
Seviye 1 Yatay	2.234 (2.209)	2.404 (1.952)	4.535 (4.440)	0.094 (0.106)
Üst Seviye Yatay	4.163 (4.167)	4.099 (3.305)	8.998 (8.785)	0.185 (0.213)
Tabla Düşey	0.032 (0.478)	0.033 (0.478)	0.032 (0.478)	- (0.445)
İzolator S Düşey	1.031 (1.054)	0.702 (0.494)	2.069 (1.948)	- -
İzolator N Düşey	0.806 (0.753)	0.758 (0.667)	2.516 (2.443)	- -

Çizelge 4.5 İzole edilmiş ekipmanın, El Centro Yer Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir (1 in.=25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

EL CENTRO S00E YER HAREKETİ				
	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 1	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 2	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 3	İZOLE EDİLMEMİŞ HÂL
İVME (g)				
Tabla Yatay	0.373 (0.383)	0.377 (0.382)	0.367 (0.381)	0.361 (0.368)
İzolator Yatay	0.600 (0.609)	0.463 (0.412)	0.469 (0.519)	0.368 (0.374)
Seviye 1 Yatay	0.277 (0.300)	0.405 (0.360)	0.490 (0.466)	0.536 (0.556)
Üst Seviye Yatay	0.546 (0.586)	0.795 (0.673)	0.903 (0.991)	0.877 (0.898)
Tabla Düşey	0.004 (0.154)	0.008 (0.191)	0.008 (0.193)	- (0.204)
İzolator S Düşey	0.190 (0.233)	0.218 (0.228)	0.252 (0.431)	- -
İzolator N Düşey	0.196 (0.241)	0.101 (0.216)	0.149 (0.323)	- -
Üst Seviye Düşey	0.201 (0.241)	0.085 (0.219)	0.169 (0.315)	0.028 (0.209)
DEPLASMAN (in)				
Tabla Yatay	2.213 (2.252)	2.213 (2.252)	2.214 (2.247)	2.240 (2.240)
İzolator Yatay	0.401 (0.428)	0.392 (0.282)	0.248 (0.309)	- -
Seviye 1 Yatay	2.626 (2.879)	1.324 (0.974)	1.307 (2.023)	0.083 (0.079)
Üst Seviye Yatay	4.753 (5.256)	2.247 (1.626)	2.489 (3.864)	0.157 (0.185)
Tabla Düşey	0.035 (0.539)	0.036 (0.537)	0.038 (0.540)	- (0.504)
İzolator S Düşey	1.145 (1.295)	0.379 (0.252)	0.521 (0.867)	- -
İzolator N Düşey	0.844 (0.899)	0.363 (0.278)	0.492 (0.793)	- -

Çizelge 4.6 İzole edilmiş ekipmanın, El Centro 5 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir (1 in.=25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

EL CENTRO S00E 5 NCI KAT HAREKETİ				
	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 1	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 2	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 3	İZOLE EDİLMEMİŞ HÂL
İVME (g)				
Tabla Yatay	0.424 (0.424)	0.428 (0.427)	0.429 (0.428)	0.417 (0.422)
İzolatör Yatay	0.408 (0.448)	0.529 (0.584)	0.684 (0.860)	0.424 (0.429)
Seviye 1 Yatay	0.379 (0.377)	0.792 (0.703)	0.925 (1.603)	0.529 (0.762)
Üst Seviye Yatay	0.771 (0.765)	1.117 (1.020)	1.355 (2.048)*	0.729 (0.761)
Tabla Düşey	0.006 (0.196)	0.012 (0.192)	0.012 (0.194)	- (0.210)
İzolatör S Düşey	0.376 (0.446)	0.098 (0.228)	0.382 (1.452)	- -
İzolatör N Düşey	0.367 (0.352)	0.115 (0.309)	0.320 (1.069)	- -
Üst Seviye Düşey	0.463 (0.454)	0.101 (0.277)	0.386 (1.242)	0.038 (0.214)
DEPLASMAN (in)				
Tabla Yatay	4.241 (4.237)	4.243 (4.238)	4.250 (4.233)	4.213 (4.252)
İzolatör Yatay	0.698 (0.671)	0.920 (0.747)	0.533 (4.820)	- -
Seviye 1 Yatay	5.760 (5.497)	2.910 (2.290)	3.239 (10.240)*	0.094 (0.098)
Üst Seviye Yatay	10.652 (10.157)	4.859 (3.804)	6.225 (15.360)*	0.177 (0.173)
Tabla Düşey	0.132 (0.518)	0.131 (0.518)	0.132 (0.518)	- (0.472)
İzolatör S Düşey	2.921 (2.763)	0.725 (0.567)	1.196 (4.084)	- -
İzolatör N Düşey	2.618 (2.428)	0.967 (0.759)	1.622 (3.550)	- -

* : Değer, cihaz sınırını aşmıştır.

Çizelge 4.7 İzole edilmiş ekipmanın, El Centro 7 nci Kat Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir (1 in.=25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

EL CENTRO S00E 7 NCI KAT HAREKETİ				
	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 1	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 2	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 3	İZOLE EDİLMEMİŞ HÂL
İVME (g)				
Tabla Yatay	0.905 (0.736)	0.720 (0.747)	0.725 -	0.728 (0.693)
İzolator Yatay	1.361 (1.219)	1.050 (0.975)	1.856 -	0.745 (0.711)
Seviye 1 Yatay	0.594 (0.550)	1.408 (1.272)	1.773 -	0.985 (0.968)
Üst Seviye Yatay	1.057 (0.987)	2.048* (1.960)	2.048* -	1.780 (1.777)
Tabla Düşey	0.017 (0.192)	0.024 (0.190)	0.019 -	- (0.205)
İzolator S Düşey	0.434 (0.485)	0.474 (0.509)	1.458 -	- -
İzolator N Düşey	0.733 (0.764)	0.369 (0.484)	1.412 -	- -
Üst Seviye Düşey	0.825 (0.853)	0.473 (0.444)	1.526 -	0.073 (0.213)
DEPLASMAN (in)				
Tabla Yatay	5.190 (5.191)	5.192 (5.202)	5.200 -	5.157 (5.157)
İzolator Yatay	0.749 (0.656)	1.715 (1.558)	1.284 -	- -
Seviye 1 Yatay	6.444 (6.344)	5.860 (5.246)	10.240* -	0.177 (0.177)
Üst Seviye Yatay	11.860 (11.752)	9.903 (8.868)	15.360* -	0.350 (0.343)
Tabla Düşey	0.197 (0.514)	0.196 (0.514)	0.198 -	- (0.487)
İzolator S Düşey	3.279 (3.262)	1.588 (1.424)	4.186* -	- -
İzolator N Düşey	2.705 (2.553)	2.187 (1.939)	3.728 -	- -

* : Değer, cihaz sınırını aşmıştır.

Çizelge 4.8 İzole edilmiş ekipmanın, Pacoima Barajı Yer Hareketi için kaydedilen uç cevap değerleri. Parantez içindeki değerler yatay ve düşey hareketin bileşkesi içindir (1 in.=25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

PACOIMA BARAJI S74W YER HAREKETİ				
	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 1	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 2	İZOLE EDİLMİŞ SİSTEM 3	İZOLE EDİLMEMİŞ HÂL
İVME (g)				
Tabla Yatay	0.800 (0.829)	0.816 (0.826)	0.815 (0.830)	0.867 (0.867)
İzolator Yatay	1.545 (1.951)	1.074 (1.009)	1.012 (1.250)	0.876 (0.896)
Seviye 1 Yatay	0.572 (0.767)	0.775 (0.759)	0.783 (0.600)	1.136 (1.181)
Üst Seviye Yatay	0.985 (1.300)	1.716 (1.804)	1.548 (1.450)	2.610 (2.650)
Tabla Düşey	0.010 (0.801)	0.017 (0.788)	0.017 (0.791)	- (0.778)
İzolator S Düşey	0.529 (1.776)	0.490 (1.012)	0.751 (1.198)	- -
İzolator N Düşey	0.495 (2.048)*	0.419 (1.042)	0.571 (0.916)	- -
Üst Seviye Düşey	0.532 (2.026)*	0.370 (1.095)	0.612 (0.942)	0.093 (0.811)
DEPLASMAN (in)				
Tabla Yatay	4.053 (3.984)	4.054 (3.985)	4.058 (3.982)	4.055 (4.094)
İzolator Yatay	1.042 (1.187)	0.833 (0.774)	0.491 (0.513)	- -
Seviye 1 Yatay	7.038 (7.368)	2.976 (2.820)	3.305 (2.845)	0.157 (0.283)
Üst Seviye Yatay	12.857 (13.517)	5.077 (4.854)	6.284 (5.492)	0.343 (0.433)
Tabla Düşey	0.120 (2.778)	0.120 (2.778)	0.121 (2.776)	- (2.890)
İzolator S Düşey	3.519 (3.600)	0.883 (0.843)	1.500 (1.252)	- -
İzolator N Düşey	2.696 (3.169)	0.765 (0.759)	1.090 (1.024)	- -

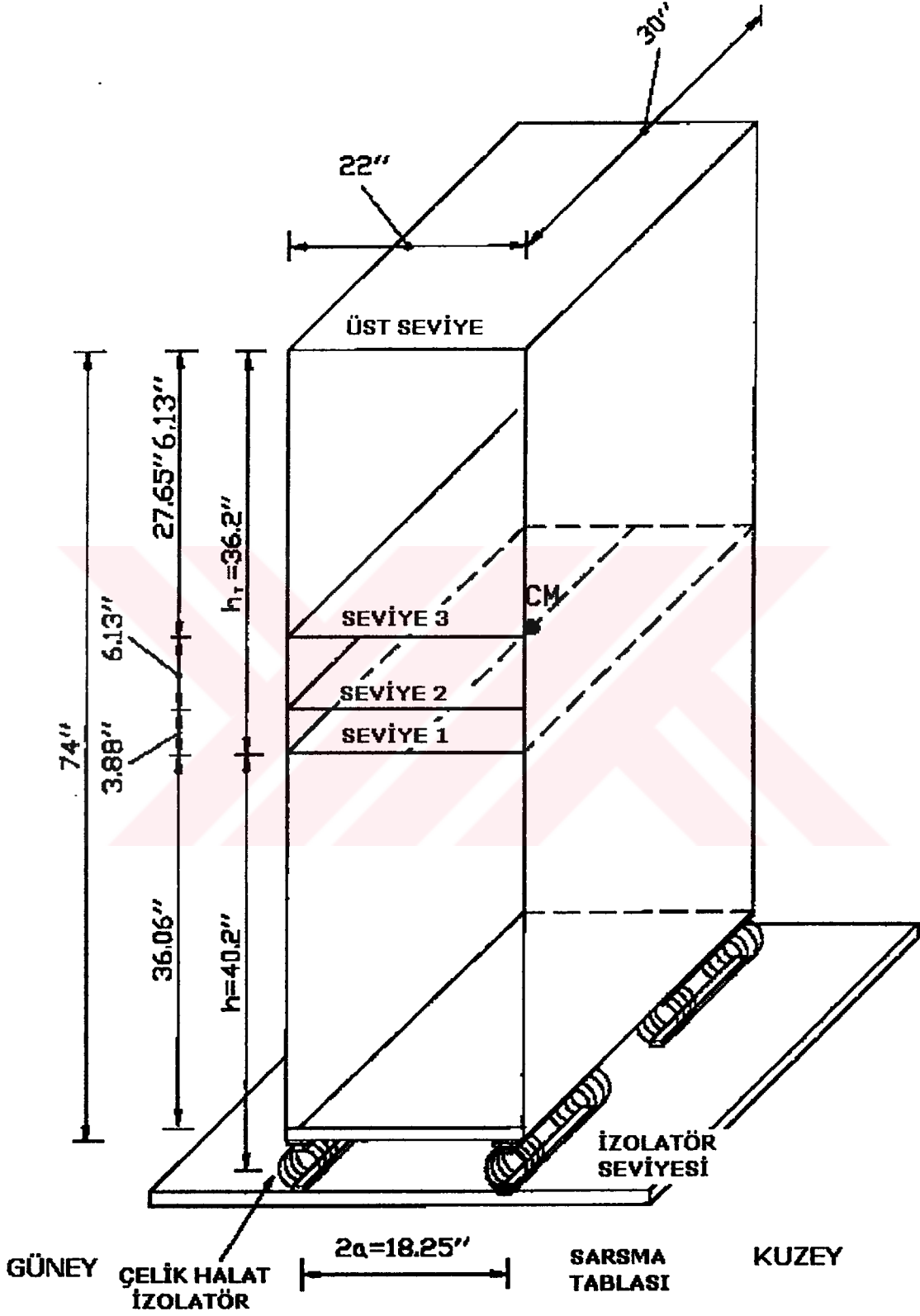
* : Değer, cihaz sınırını aşmıştır.

Çizelge 4.9 Deneylemlerden elde edilen, izole edilmiş kabine ait dinamik özellikler
(1 in.=25.4 mm) . (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

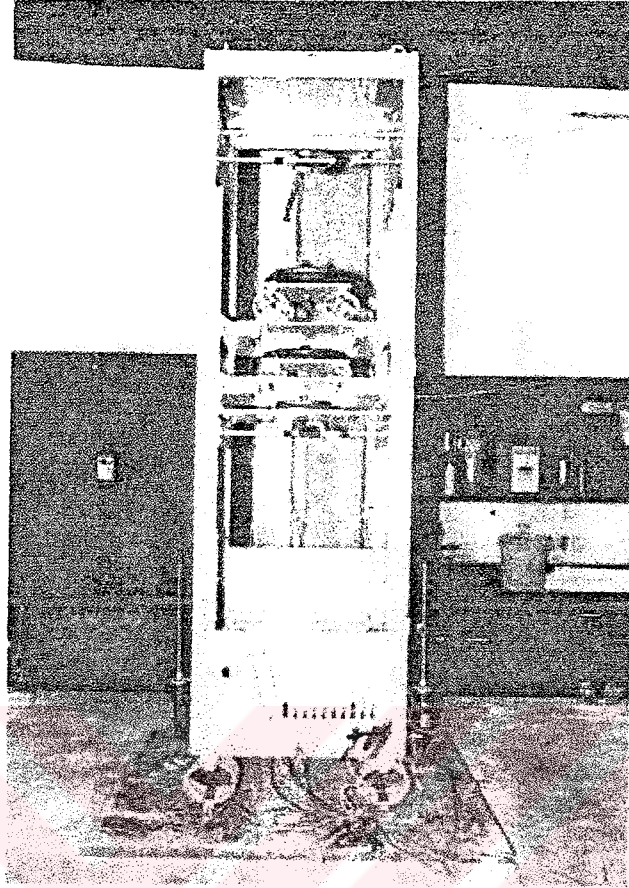
Sistem	Kütle Merkezi (CM)'nin Deplasman Genliği Aralığı (inch)	Serbest Titreşimin Periyodu (s)	Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı
1	2.8 – 2	1.15	0.11
2	3.6 – 3	0.82	0.06

Çizelge 4.10 Ekipmanın Sistem 4 için analitik uç mukabeleleri ve izole edilmemiş kabinin deneysel uç mukabeleleri (1 in.=25.4 mm) (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

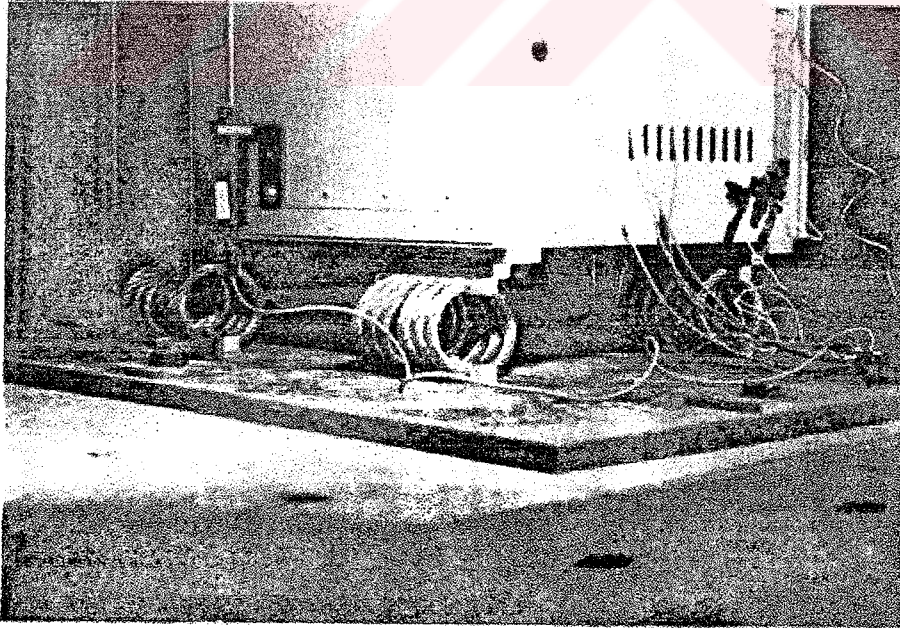
	Taft 5 nci Kat		Taft 7 nci Kat		El Centro 5 nci Kat		El Centro 7 nci Kat		Pacoima Yer	
	Sistem 4	İzole Edilmemiş Hal	Sistem 4	İzole Edilmemiş Hal	Sistem 4	İzole Edilmemiş Hal	Sistem 4	İzole Edilmemiş Hal	Sistem 4	İzole Edilmemiş Hal
En Yüksek Yatay İvme Değeri (g)	0.583	0.529	1.126	1.167	0.618	0.729	1.223	1.780	1.474	2.610
En Yüksek Yatay Deplasman Değeri (in)	0.107	0.083	0.305	0.185	0.143	0.177	0.358	0.350	0.613	0.343
İzolator Yatay Deplasmanı (in)	0.014	-	0.036	-	0.018	-	0.043	-	0.063	-
İzolator Düşey S Deplasmanı (in)	0.018	-	0.053	-	0.021	-	0.052	-	0.088	-
İzolator Düşey N Deplasmanı (in)	0.016	-	0.046	-	0.024	-	0.062	-	0.117	-



Şekil 4.1 Test edilen ekipman kabini (1in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

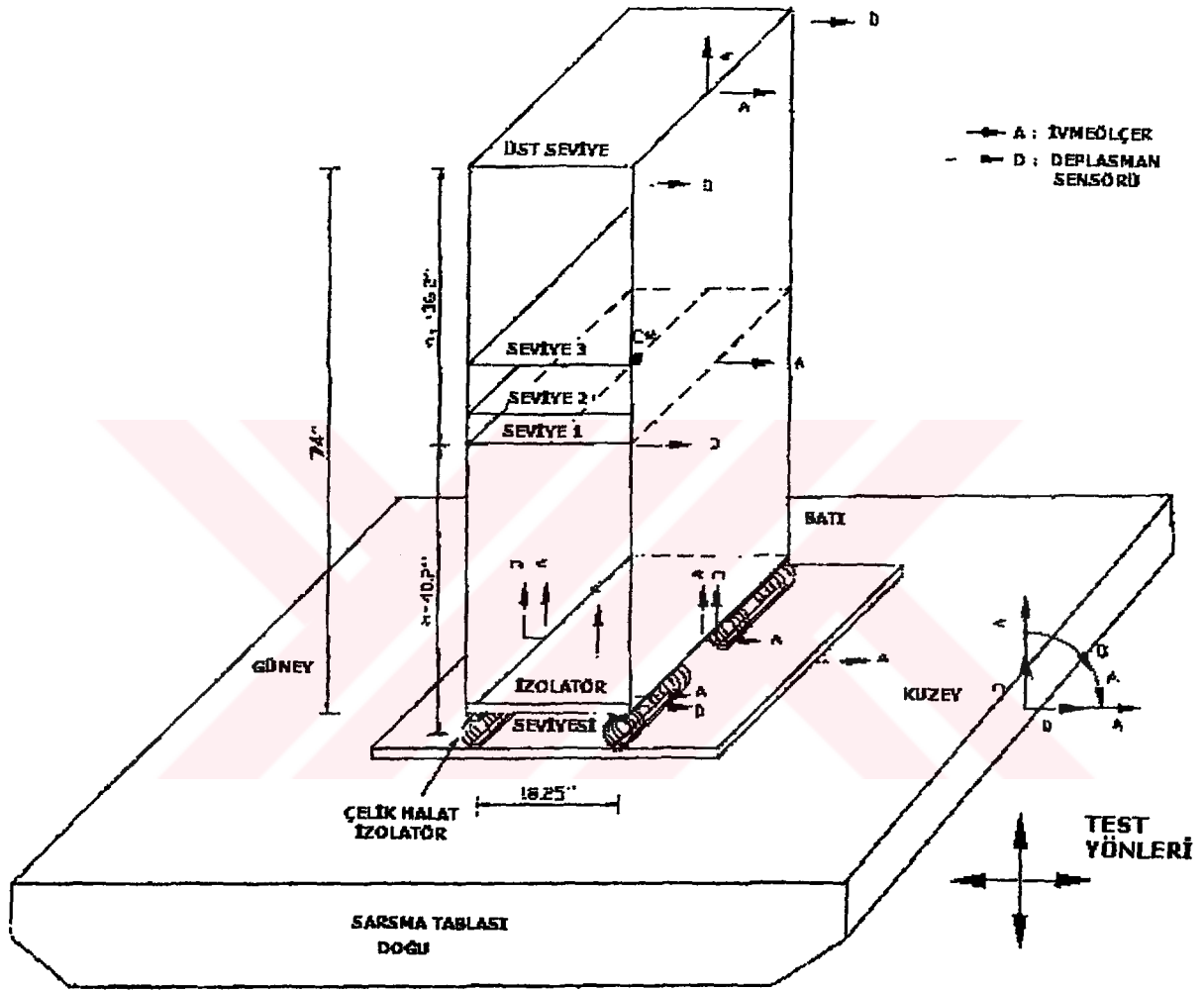


(a)

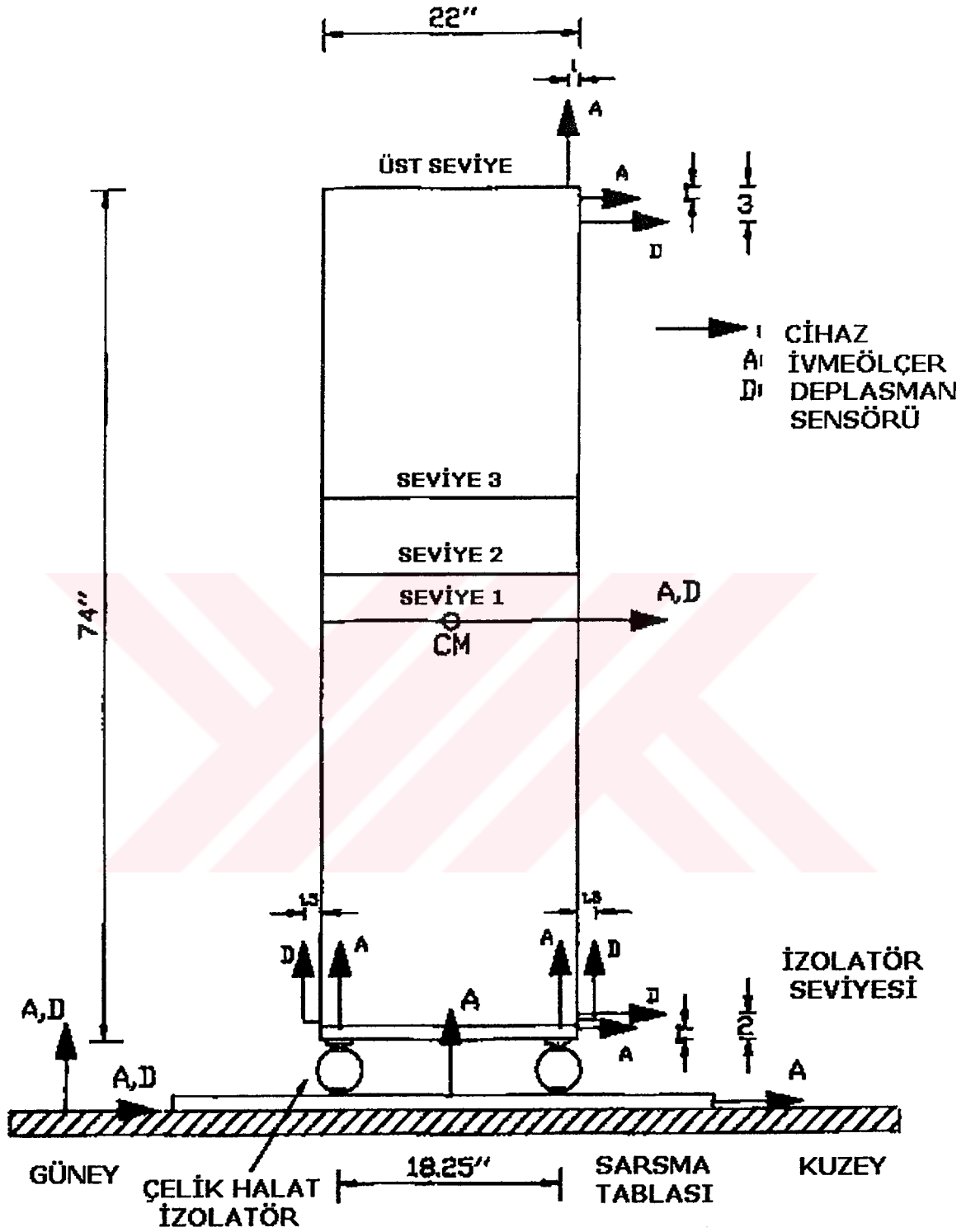


(b)

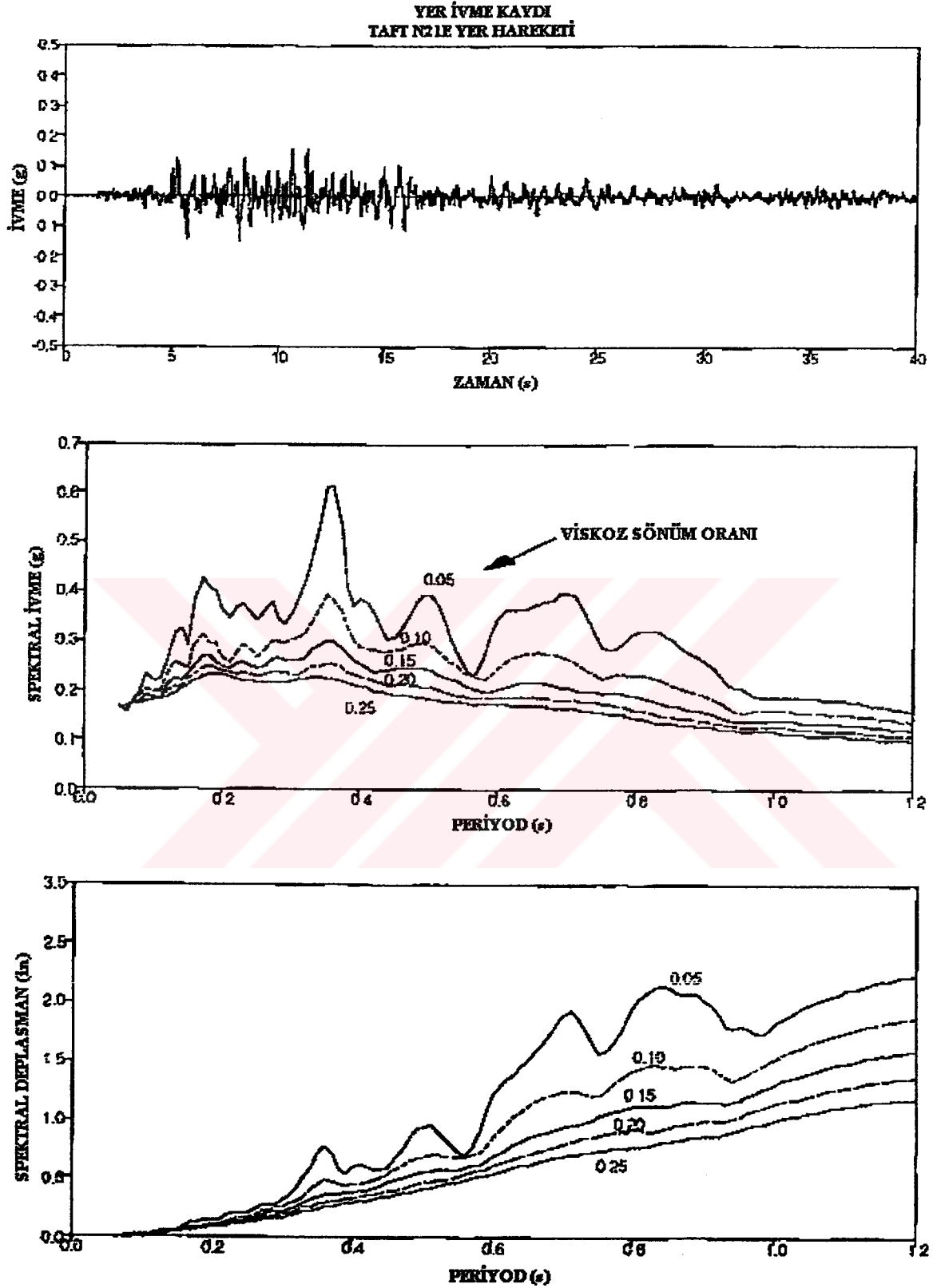
Şekil 4.2 Sarsma tablasındaki izole edilmiş kabine ait görünümler (a) Önden görünüm, (b) İzolasyon Sistemi (No.3). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 4.3 Alet düzeneği diyagramı (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

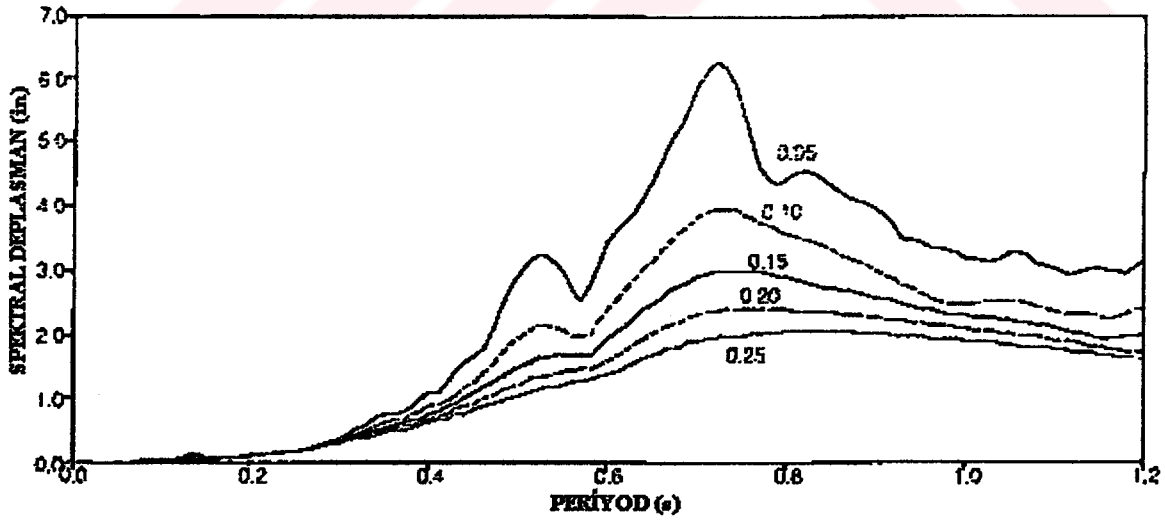
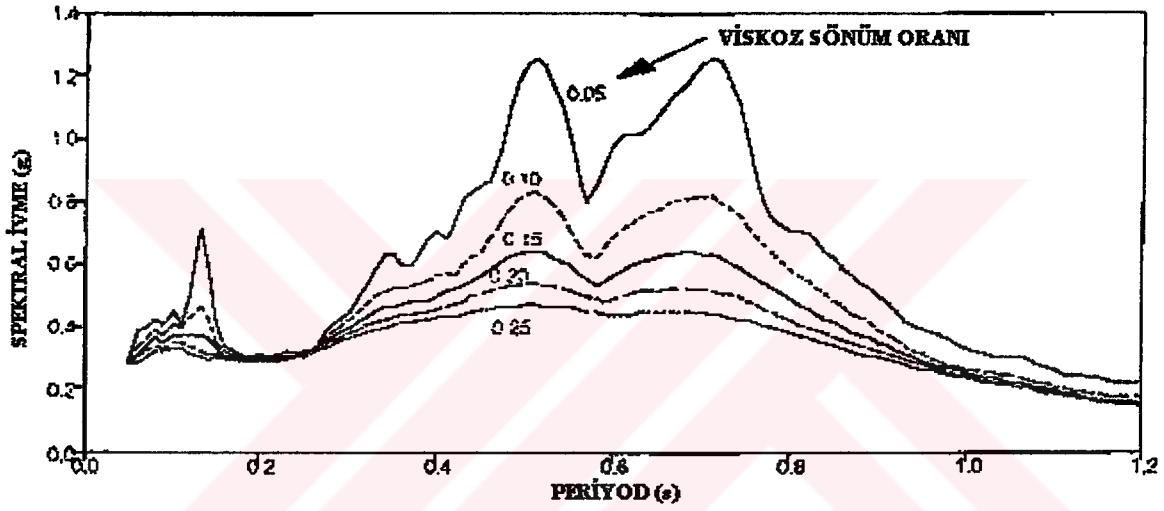
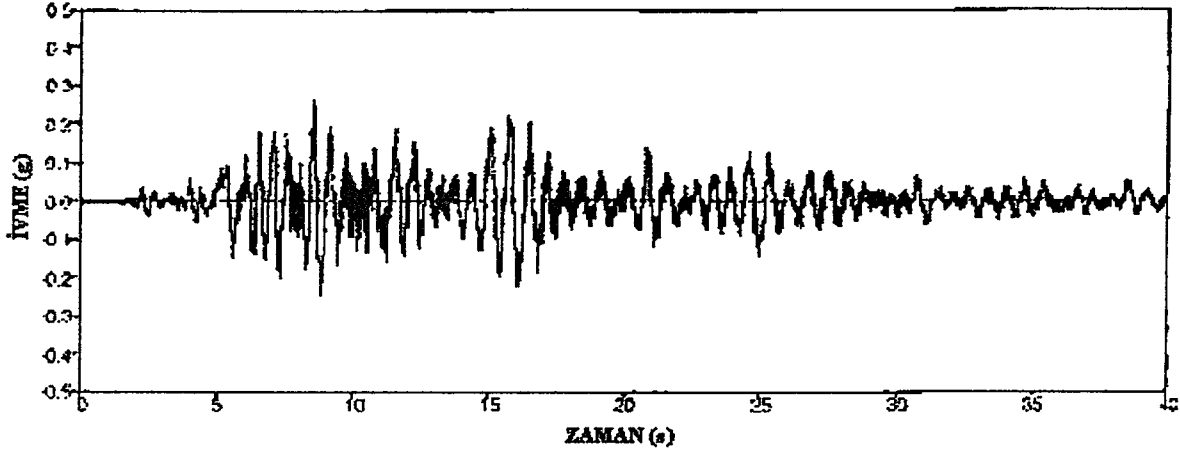


Şekil 4.4 Ölçü aletlerinin yerleşimi (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

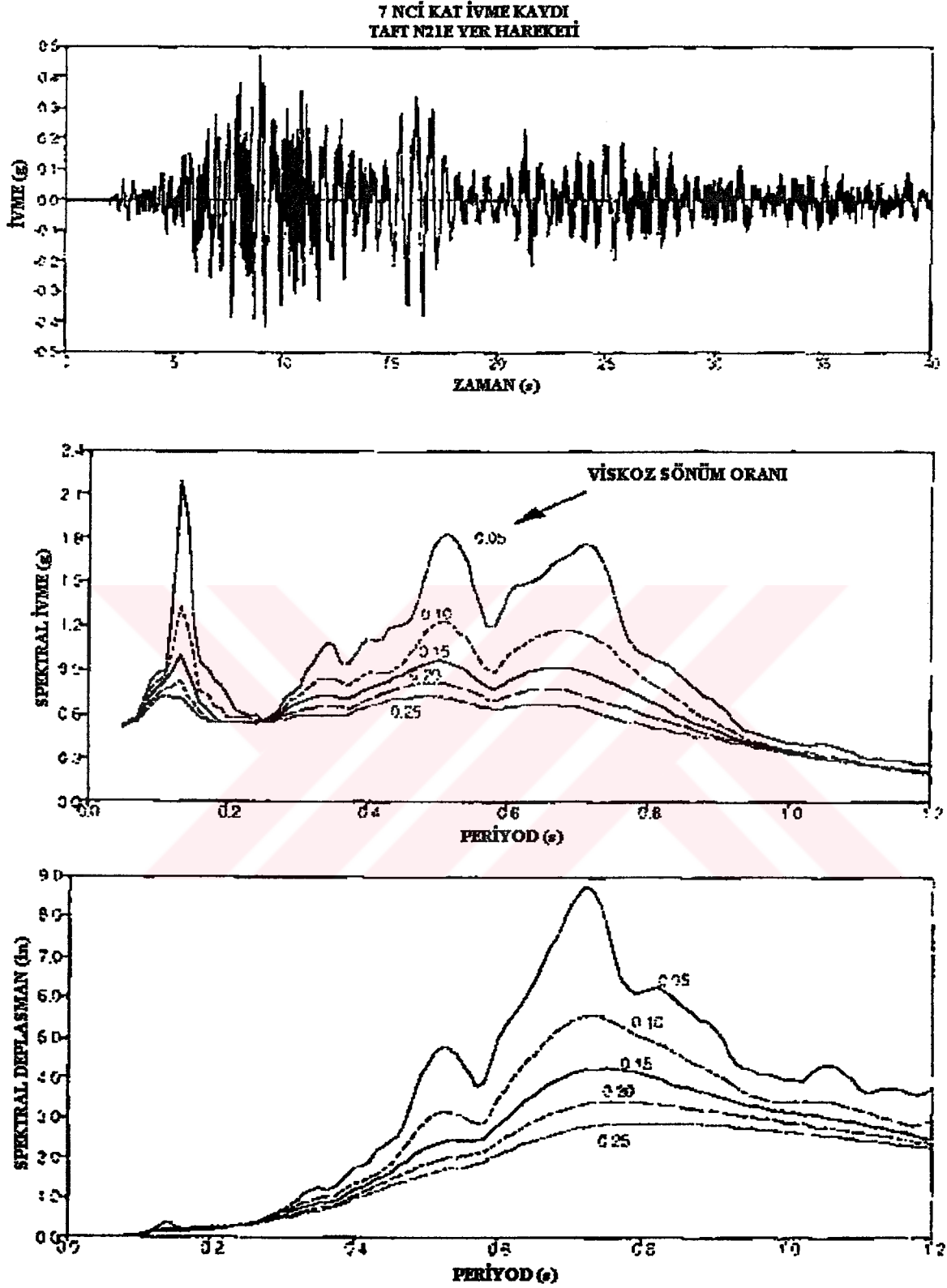


Şekil 4.5 Taft N21E hareketine ait yer ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman mukabele spektrası (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

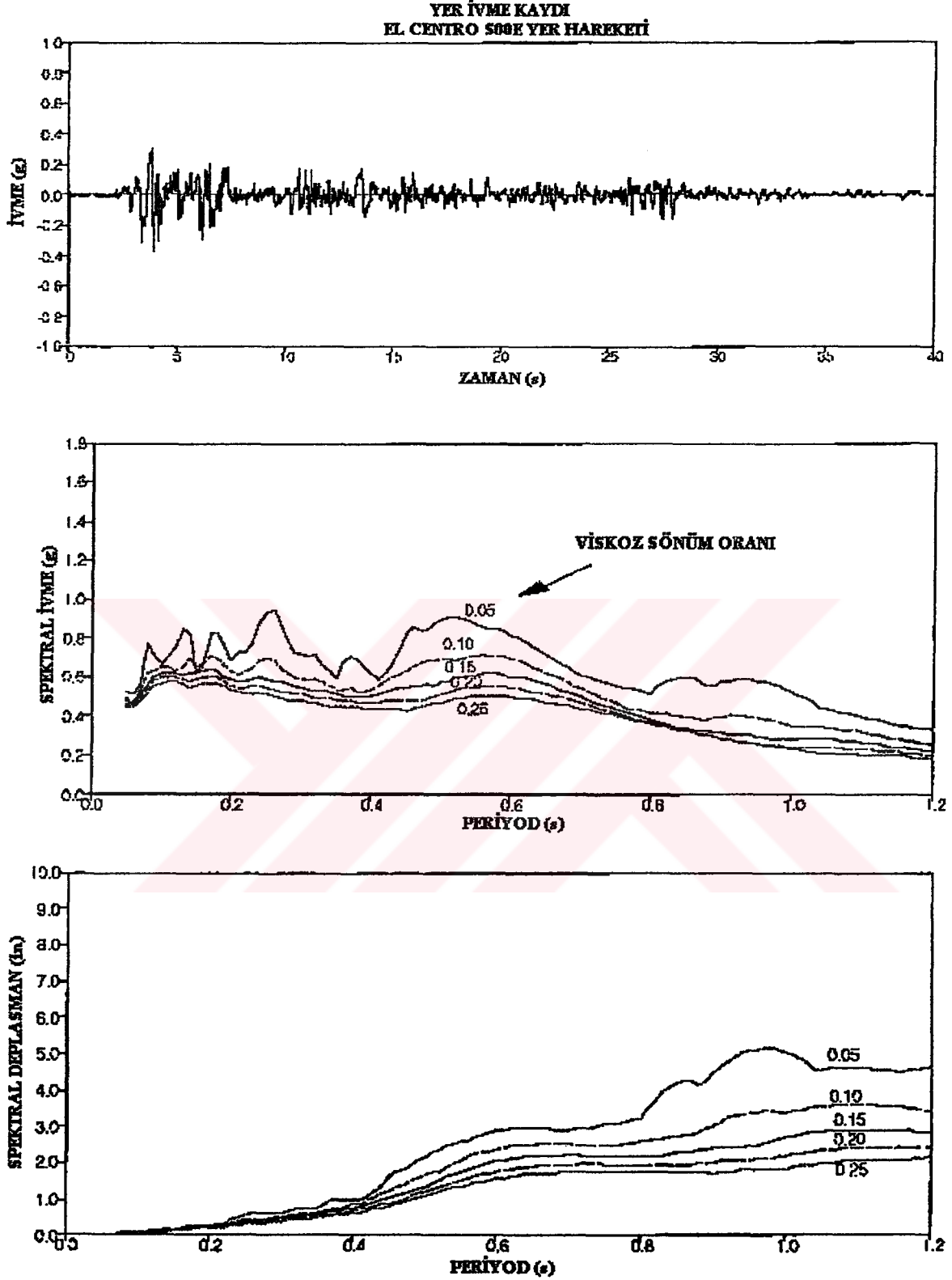
5 NCI KAT İVME KAYDI
TAFT N21E YER HAREKETİ



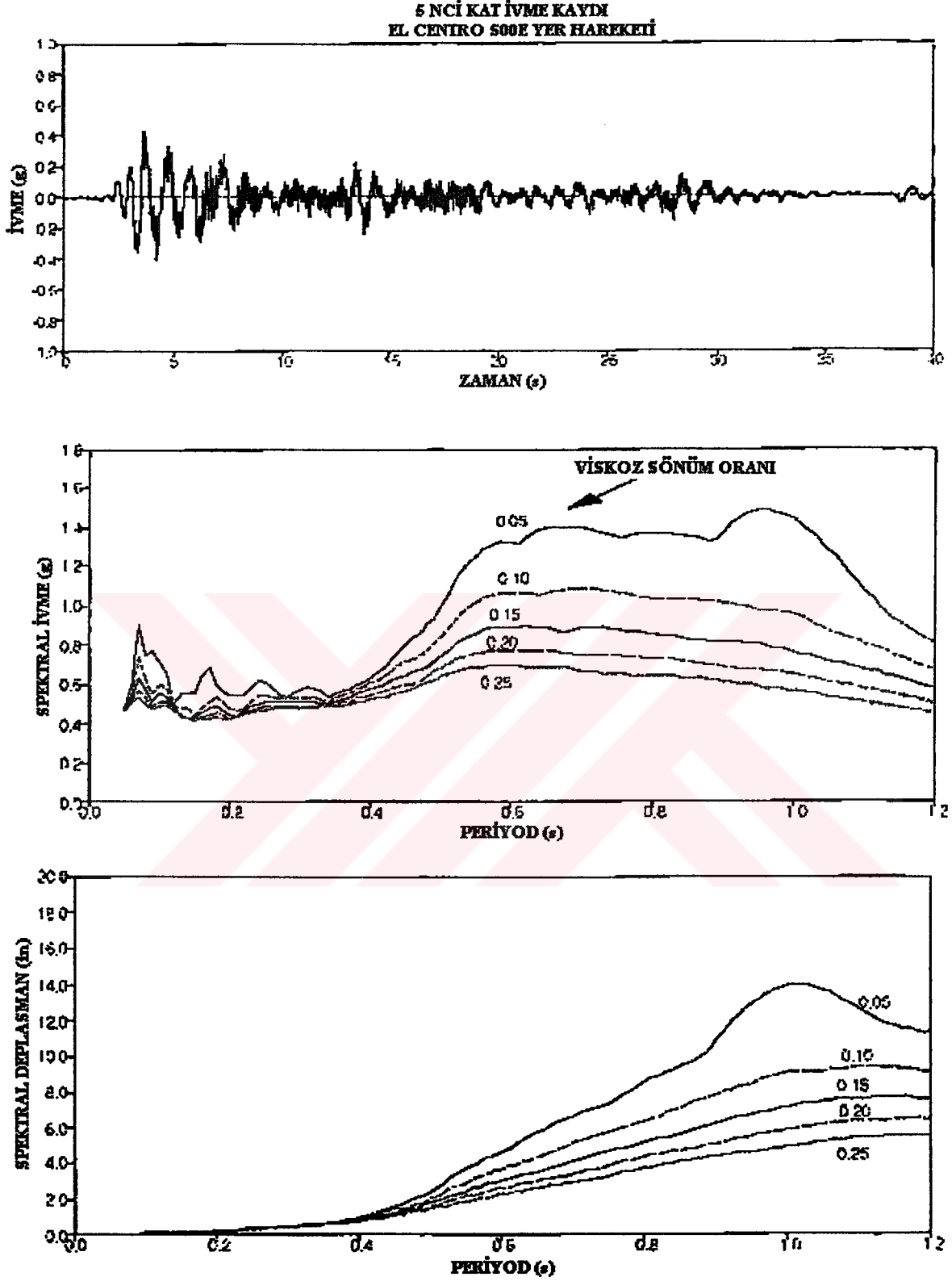
Şekil 4.6 Taft N21E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 5 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman mukabele spektrası (1 in. = 25.4 mm).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



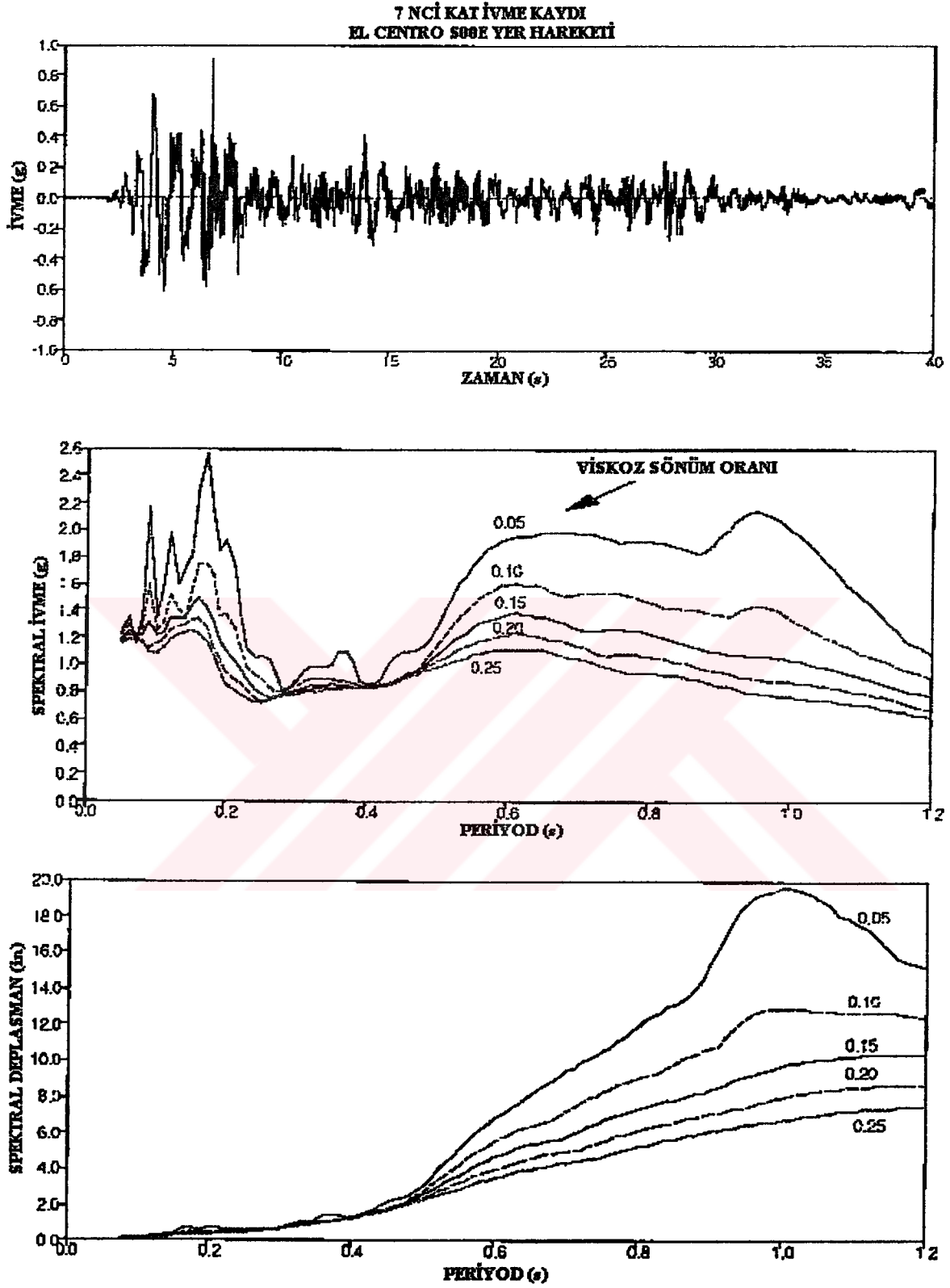
Şekil 4.7 Taft N21E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 7 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman mukabele spektrarı (1 in.= 25.4 mm).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



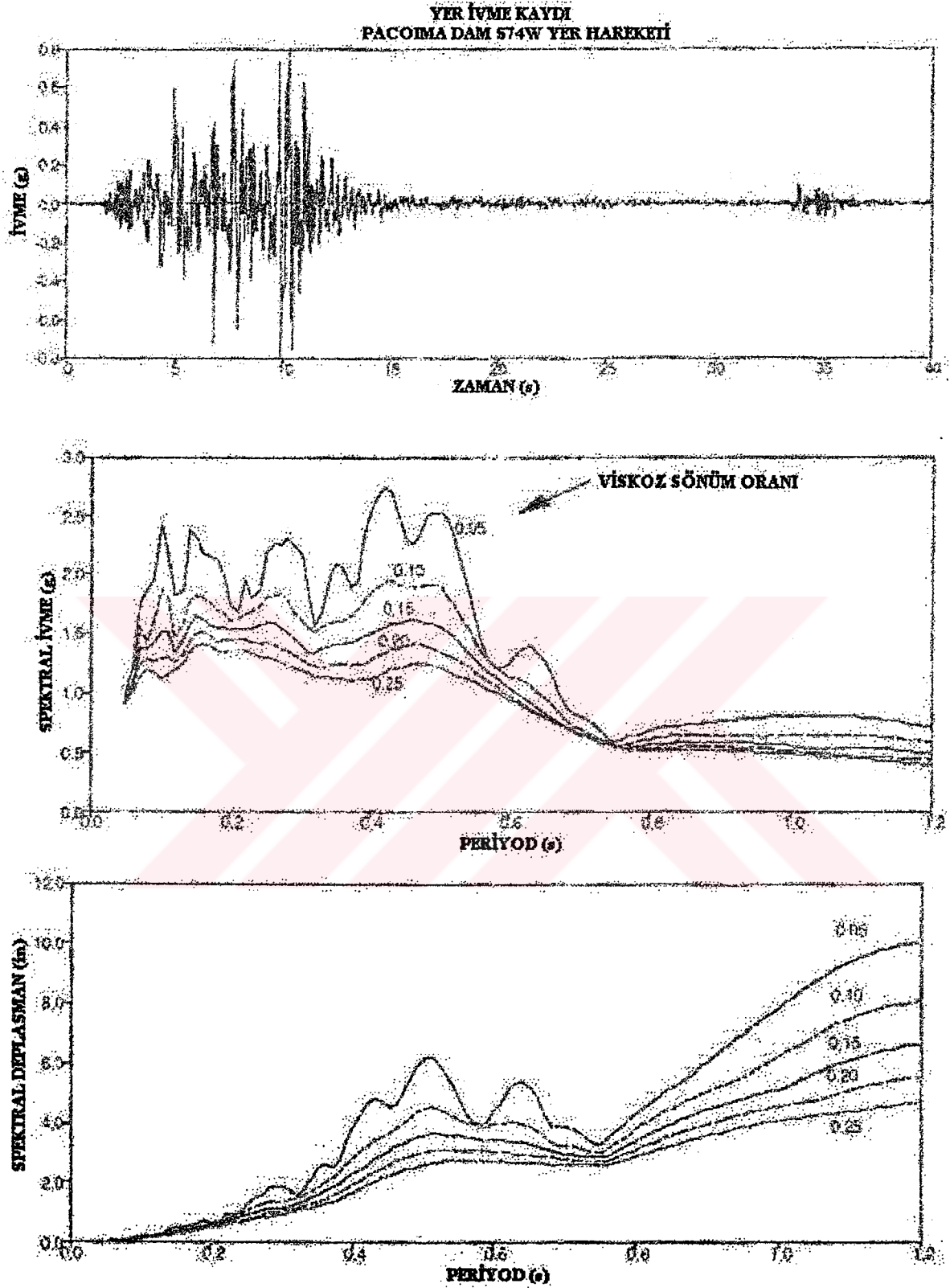
Şekil 4.8 El Centro S00E hareketine ait yer ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman mukabele spektrası (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



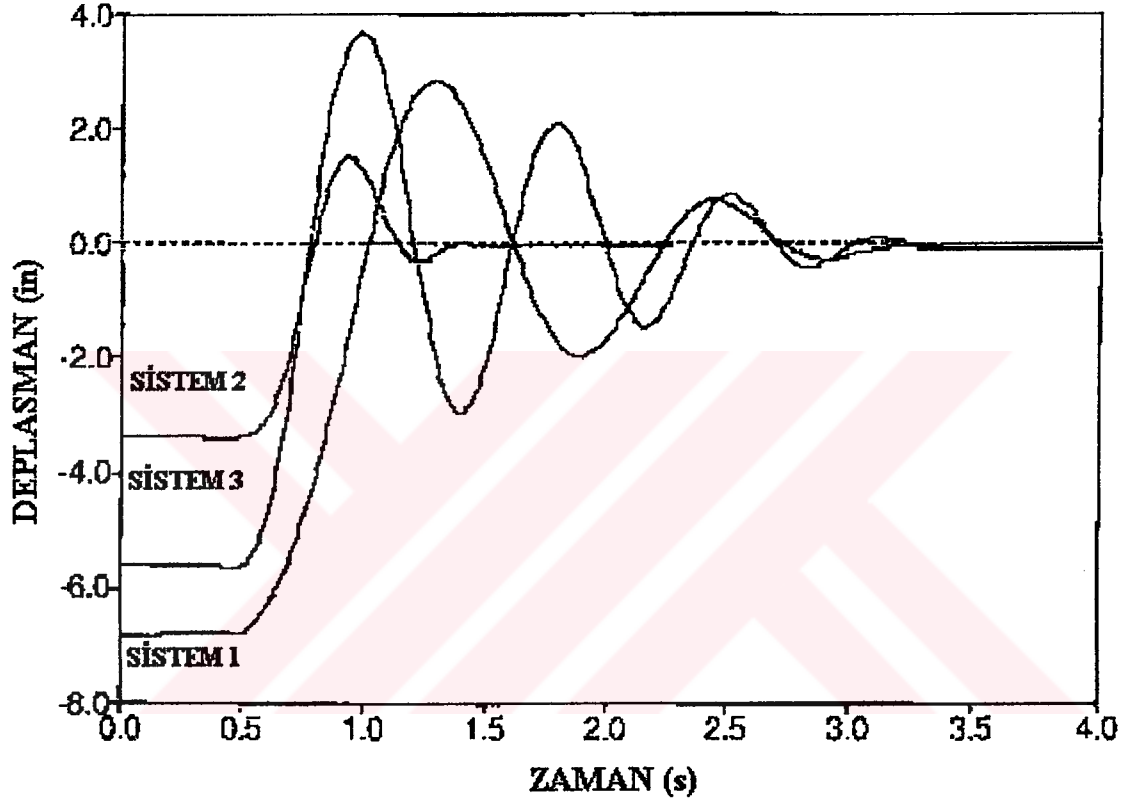
Şekil 4.9 El Centro S00E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 5 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman mukabele spektrası (1 in. = 25.4 mm).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



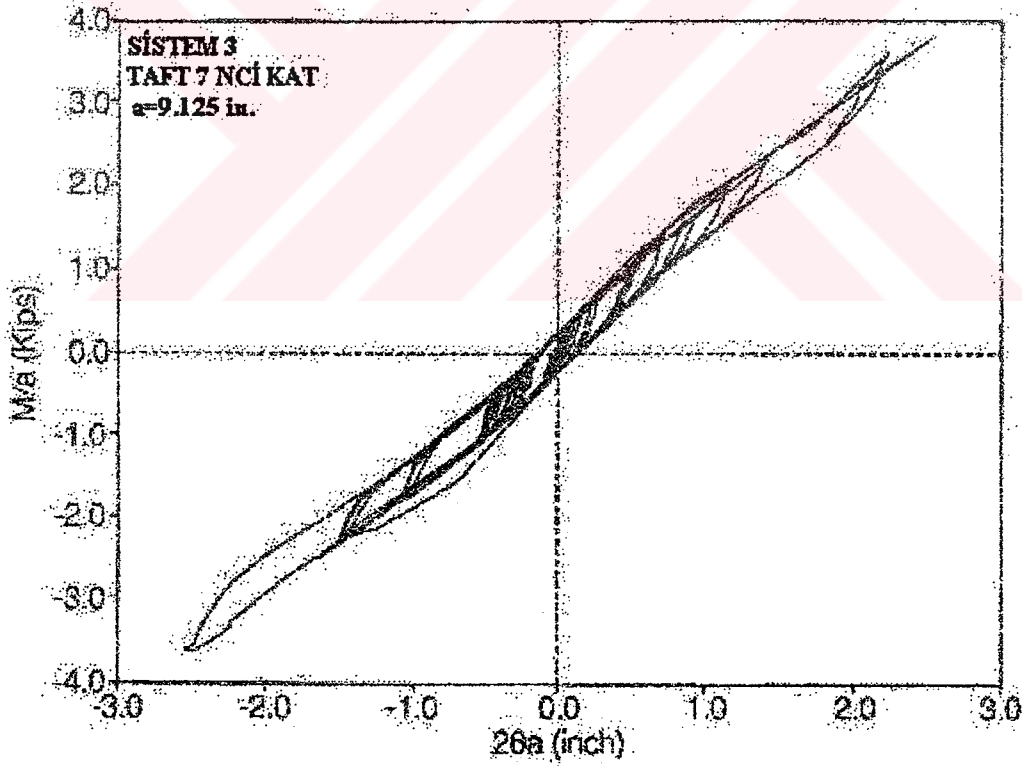
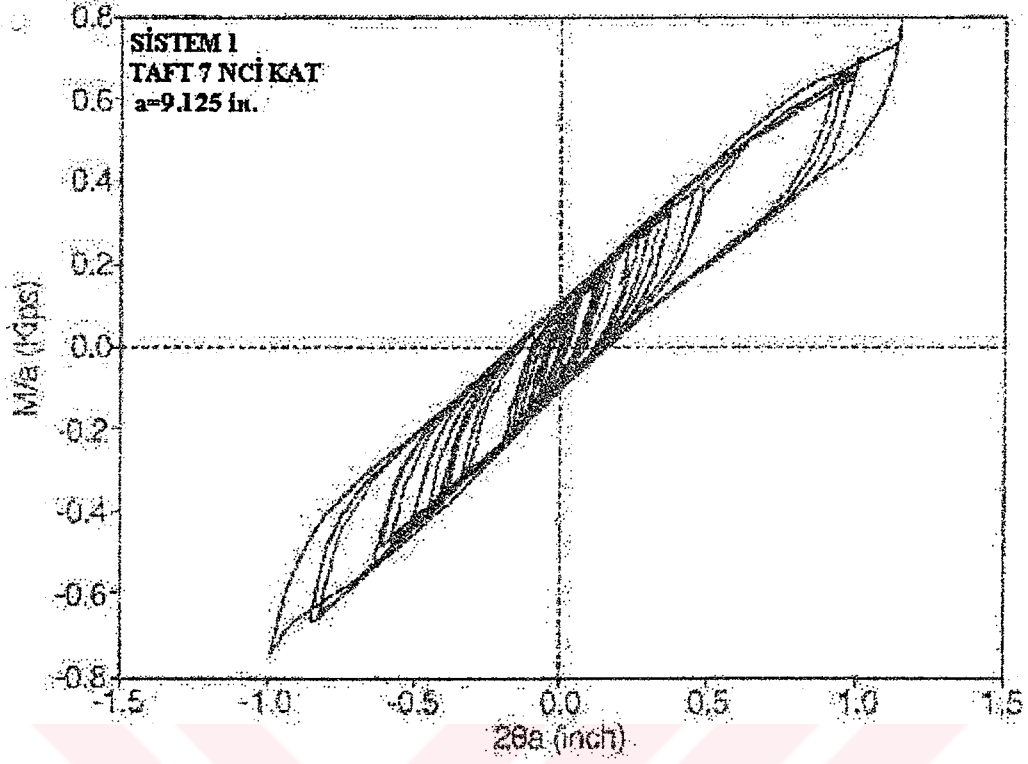
Şekil 4.10 El Centro S00E hareketine maruz bırakılmış 7 katlı yapıya ait 7 nci kat ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman mukabele spektrası (1 in.= 25.4 mm).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



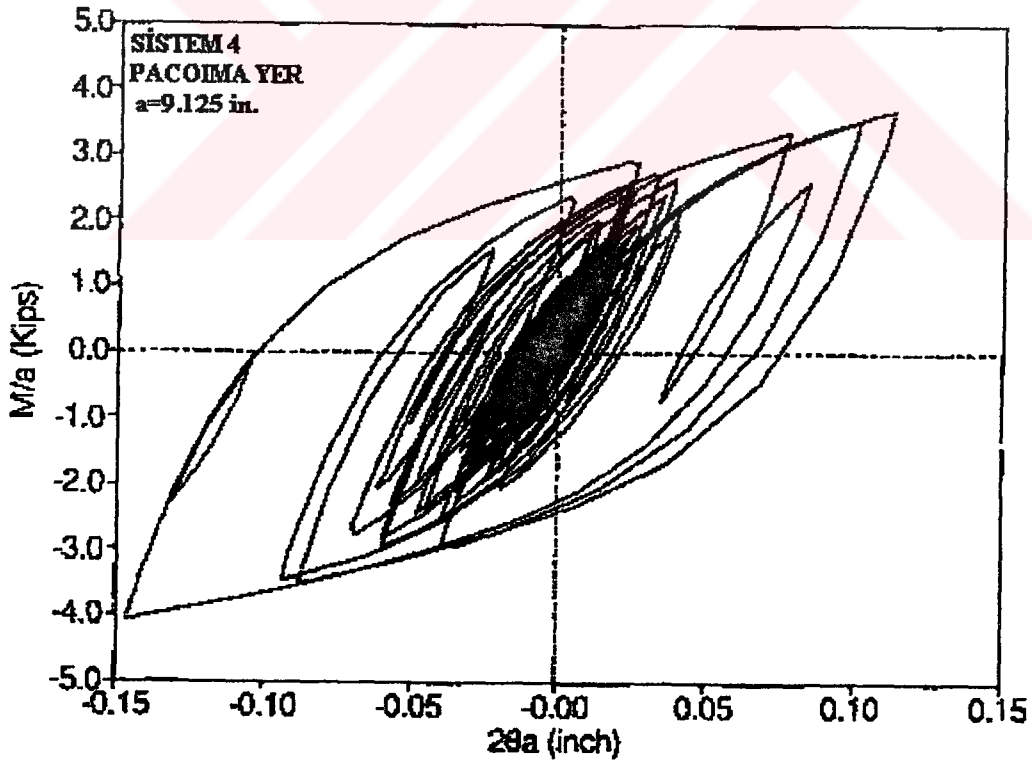
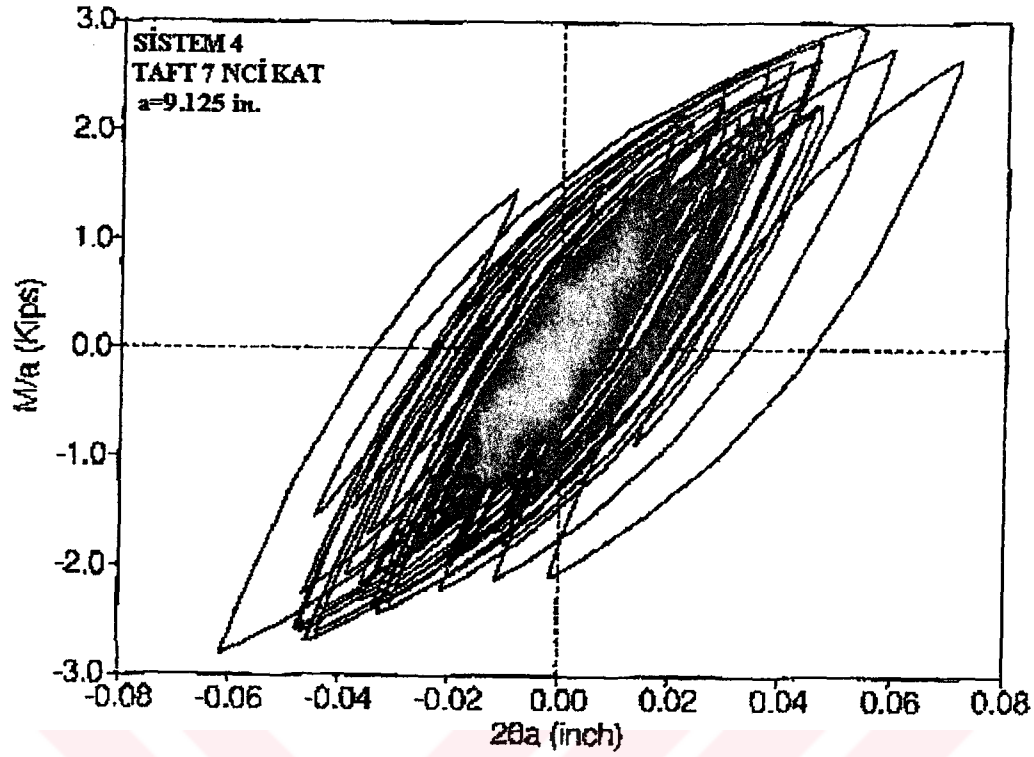
Şekil 4.11 Pacoima Barajı S74W hareketine ait yer ivmesinin zaman tanım alanı ve buna ait ivme ve deplasman cevap spektrası (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 4.12 Test edilen izole edilmiş ekipmanın ağırlık merkezine ait deplasman tanım alanı (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 4.13 Taft 7 nci kat hareketi ile test edilmiş kabine ait moment – dönme grafikleri (1 in. = 25.4 mm, 1 Kip = 4.46 kN). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 4.14 Sistem 4'e ait moment – dönme grafikleri (1 in. = 25.4 mm, 1 Kip = 4.46 kN).
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

5. CEVABIN ANALİTİK TAHMİNİ

Dinamik cevabın analitik tahmininin yapılabilmesi amacıyla, izolatörlerle taşınan ekipman için bir matematik model geliştirilmiştir (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992). Model sadece titreşimin yalnızca düşey düzlemde bileşenler içermesi ve sistemin dışmerkezlilik göstermemesi koşuluyla, düzlem içinde cevap gösterir. Buna ilave olarak üç varsayım yapılır:

1- Çelik halat izolatörlerde meydana gelecek kuvvetin düşey ve yatay bileşenleri arasındaki etkileşim ihmal edilebilir. Her izolatör, Bölüm 3'te tanımlanan özellikleri sergileyen iki histeretik eleman (yaylar) tarafından modellenir. Bu iki yay, çelik halat izolatörün her iki yanının yatay ve düşey doğrultularına yerleştirilir.

2- Çelik halat izolatörlerin dönme rijitliği ihmal edilebilir.

3- Ekipman rijittir.

Şekil 5.9, çelik halat izolatörler tarafından taşınan rijit bir ekipman modelini göstermektedir. Çelik halat izolatörleri simgeleyen yaylar, kütle merkezinden a uzaklığına ve yine kütle merkezinin h kadar aşağısına simetrik olarak yerleştirilmiştir. Serbestlik dereceleri yatayda u_x ve düşeyde u_z deplasmanları ile kütle merkezinde θ dönmesi olacak şekilde seçilmiştir.

5.1 BÜYÜK SALINIMLAR İÇİN HAREKET DENKLEMLERİ

Demetriades, Constantinou ve Reinhorn, hareket denklemlerini elde ederken, öncelikle büyük salınımlar olduğunu kabul etmişler, sonradan geometrik lineer formlarına indirgemişlerdir (küçük salınımlar).

İki adet ortogonal koordinat sistemi tanımlanmıştır. Birincisi XZ ' dir. Zaman ile birleştirilmiştir ve orijini, kütle merkezinin statik dengesi ($t = 0$ anında) başlangıç pozisyonunda olacak şekilde tanımlanmıştır. İkincisi ise $X'Z'$ 'dir ve Şekil 5.9'de görüldüğü gibi kütle merkezi ile birlikte hareket etmektedir. Serbestlik dereceleri, başlangıç pozisyonuna (Şekil 5.9'da CM) göre kütle merkezinin u_x ve u_z uzaklığı ve kütle merkezinin saat yönünde θ dönmesidir. Hareket eden sistemdeki (X'_i, Z'_i) koordinatlarına sahip bir i noktası, aşağıdaki transformasyonla, başlangıç sisteminde koordinat terimleri rijit hareket cinsinden tanımlanabilir:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Başlangıç pozisyonuna göre i noktasının deplasmanları rijit ötelenme özel durumunda

$$\begin{bmatrix} u_{x_i} \\ u_{z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$t = 0$ anında iki sistem özdeştir ve $X_i = X'_i$, $Z_i = Z'_i$ olur.

Gerekli olan bazı noktaların deplasmanları Denklem 5.1 ve 5.2'den bulunarak aşağıda verilmiştir. Bu noktalar, mesnet seviyesindeki $B1$ ve $B2$ noktaları ile, ekipman seviyesindeki $T2$ noktasıdır (Şekil 5.10). Bu noktalar hareket eden sisteme göre şu koordinatlara sahiptirler:

$$X'_{B1} = -a, X'_{B2} = a, Z'_{B1} = Z'_{B2} = -h, X'_{T2} = b, Z'_{T2} = h_T.$$

$$u_{xB1} = u_x - a(\cos \theta - 1) - h \cdot \sin \theta \quad (5.3)$$

$$u_{zB1} = u_z + h(1 - \cos \theta) + a \cdot \sin \theta \quad (5.4)$$

$$u_{xB2} = u_x + a(\cos \theta - 1) - h \cdot \sin \theta \quad (5.5)$$

$$u_{zB2} = u_z + h(1 - \cos \theta) - a \cdot \sin \theta \quad (5.6)$$

$$u_{xT2} = u_x + b(\cos \theta - 1) + h_T \cdot \sin \theta \quad (5.7)$$

$$u_{zT2} = u_z - h_T(1 - \cos \theta) - b \cdot \sin \theta \quad (5.8)$$

Ekipmanın hareket denklemleri, Şekil 5.10'daki serbest cisim diyagramı kullanılarak çıkarılmıştır:

$$m\ddot{u}_x + 2F_{x1} + 2F_{x2} = -m\ddot{u}_{gx} \quad (5.9)$$

$$m\ddot{u}_z + 2F_{z1} + 2F_{z2} + W = -m\ddot{u}_{gz} \quad (5.10)$$

$$I_0\ddot{\theta} - 2F_{x1}D_{z1} - 2F_{x2}D_{z2} + 2F_{z1}D_{x1} - 2F_{z2}D_{x2} = 0 \quad (5.11)$$

Burada r = atalet yarıçapı, $I_0 = mr^2$, kütle merkezinden geçen yatay eksene göre ekipmanın atalet momenti, m = kütle, W = ağırlık, \ddot{u}_{gx} ve \ddot{u}_{gz} , sırasıyla, verilen hareketin yatay ve düşey bileşenleridir. İlave olarak F_{x1} ve F_{x2} , sırasıyla, $U = u_{xB1}$ ve $U = u_{xB2}$ deplasmanları için

Denklem 5.1 ve 5.2 ile verilen $B1$ ve $B2$ noktalarındaki yatay yönde yay kuvvetleridir. D_{x1} , D_{x2} , D_{z1} ve D_{z2} mesafeleri ise, kütle merkezine göre izolator kuvvetlerinin yatay ve düşey kollarını temsil ederler ve aşağıdaki denklemlerle tanımlanırlar:

$$D_{x1} = a \cdot \cos \theta + h \cdot \sin \theta \quad (5.12)$$

$$D_{x2} = a \cdot \cos \theta - h \cdot \sin \theta \quad (5.13)$$

$$D_{z1} = -a \cdot \sin \theta + h \cdot \cos \theta \quad (5.14)$$

$$D_{z2} = a \cdot \sin \theta + h \cdot \cos \theta \quad (5.15)$$

Denklemler 3.1, 3.2, 3.5 – 3.7, 5.3 – 5.6 ve 5.9 – 5.15, on adet birinci merteye diferansiyel denklemden oluşmuş bir sistemi oluşturur. Başlangıç koşulları, ekipmanın ağırlığına bağlı olarak meydana gelen statik düşey deplasman u_z hariç sıfırdır (Gear, C.W. 1971).

5.2 KÜÇÜK SALINIMLARDA HAREKET DENKLEMLERİ

Demetriades, Constantinou ve Reinhorn, küçük salınımlarda, $\sin \theta$ ve $\cos \theta$ ifadelerinin binom serilerine açılabilirliğini kabul etmişlerdir. Bu yolla $\sin \theta$ ve $\cos \theta$ yerine, θ ve 1 yazılabilir. Bu yaklaşımdan doğabilecek hata oranı, θ 'nin 0.2 radyana kadar (11.4°) alacağı değerlerde % 2'yi geçmeyecektir. Bölüm 4'te sunulan bütün deneylerde dönme açısı, bu değeri aşmamıştır (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992). Buna bağlı olarak, lineer hareket denklemleri, pratik olarak önemli olmayan hataları içine alırlar.

5.3 – 5.15 denklemlerine ait geometrik lineer formlar

$$u_{xB1} = u_{xB2} = u_{xb} = u_x - h\theta \quad (5.16)$$

$$u_{zB1} = u_z + a\theta \quad (5.17)$$

$$u_{zB2} = u_z - a\theta \quad (5.18)$$

$$D_{x1} = a + h\theta \quad (5.19)$$

$$D_{x2} = a - h\theta \quad (5.20)$$

$$D_{z1} = -a\theta + h \quad (5.21)$$

$$D_{z2} = a\theta + h \quad (5.22)$$

Denklem 5.16'nın bir sonucu olarak

$$F_{x1} = F_{x2} = F_x \quad (5.23)$$

olur ve hareket denklemleri şu hale dönüşür:

$$m\ddot{u}_x + 4F_x = -m\ddot{u}_{gx} \quad (5.24)$$

$$m\ddot{u}_z + 2F_{z1} + 2F_{z2} + W = -m\ddot{u}_{gz} \quad (5.25)$$

$$I_0\ddot{\theta} - 4F_x h + 2F_{z1}(\alpha + h\theta) - 2F_{z2}(\alpha - h\theta) = 0 \quad (5.26)$$

Bu eşitliklerde, F_x , $U = u_{zb}$ ile Denklem 3.1 ve 3.2 ile, F_{z1} ve F_{z2} , sırasıyla, $U = u_{zB1}$ (Denklem 5.17) ve $U = u_{zB2}$ (Denklem 5.18) ile Denklem 3.1, 3.5 – 3.7 ile verilmiştir.

Geometrik lineer hareket denklemlerinin integrasyonu, geometrik nonlineer denklemlerden elde edilenlerle neredeyse özdeş cevapları sonuç vermiştir. Bu durum, bazıları 0.2 radyana kadar sınımlara maruz kalan, analiz edilen bütün sistemlerde gözlenmiştir.

Geometrik lineer hareket denklemleri, uç değerlerin tahmininden elde edilebilmesi için kat cevap spektrası ile birlikte kullanılarak basitleştirilmiş analiz yönteminin geliştirilmesinde rol oynamışlardır.

5.3 BASİTLEŞTİRİLMİŞ ANALİZ YÖNTEMİ

Basitleştirilmiş analiz yöntemi, her çelik halat izolatorün yatay yönde K_x ve düşey yönde K_z rijitliklerine sahip iki lineer yay olarak temsil edilebileceğinin kabulüne dayanarak geliştirilmiştir (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992). Buna ilave olarak, enerji sönümlenmesi, modal analizde eşdeğer viskoz sönüm oranları kullanılarak sağlanmıştır. F_x , F_{z1} ve F_{z2} kuvvetleri

$$F_x = K_x(u_x - h\theta) \quad (5.27)$$

$$F_{z1} = K_z(u_z + a\theta) \quad (5.28)$$

$$F_{z2} = K_z(u_z - a\theta) \quad (5.29)$$

denklemleriyle tanımlanmışlardır.

Denklem (5.27) – (5.29), (5.24) – (5.26)'da yerine konulduğu zaman, yüksek mertebe terimler

atılarak lineer hareket denklemleri elde edilir:

$$m\ddot{u}_x + 4K_x\ddot{u}_x - 4K_x h\theta = -m\ddot{u}_{gx} \quad (5.30)$$

$$m\ddot{u}_z + 4K_z u_z + W = -m\ddot{u}_{gz} \quad (5.31)$$

$$I_o\ddot{\theta} - 4K_x h u_x + (4K_z a^2 + 4K_z h^2)\theta = 0 \quad (5.32)$$

Bu eşitliklerde u_z , sistem dışmerkezliğe sahip olmadığı için diğer serbestlik derecelerinden ayrıştırılmıştır. Buna bağlı olarak, düşey hareket için analiz, yatay hareketten bağımsız olarak gerçekleştirilebilir.

Girişimli yatay salınım cevabı dikkate alındığında, Denklemler 5.30 ve 5.32, m kütlelerine bölünerek aşağıdaki matris form ile edilebilir:

$$[I]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = -\{R\}\ddot{u}_{gx} \quad (5.33)$$

Burada $[I]$ birim matris olup,

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_x \\ r\theta \end{Bmatrix}, \quad \{R\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.34)$$

Rijitlik matrisi $[K]$ ise

$$[K] = \begin{bmatrix} \omega_x^2 & -\omega_x^2 \left(\frac{h}{r}\right) \\ -\omega_x^2 \left(\frac{h}{r}\right) & \omega_x^2 \left(\frac{h}{r}\right)^2 + \omega_z^2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Yukarıdaki eşitlikte

$$\omega_x = \left(\frac{4K_x}{m}\right)^{1/2}, \quad \omega_z = \left(\frac{4K_z}{m}\right)^{1/2} \quad (5.36)$$

izole edilmiş ekipmanın dönme frekansı ve düşey frekansıdır.

Denklemler 5.33, yatay titreşimde, sistemin uç değerlerini elde etmek için sönüm oranları ile birlikte kullanılabilen lineer sistemin modal değerleri için çözülebilir. Serbest titreşimde, $u_{gx} = 0$ ve

$$\{U\} = \{\phi_n\} e^{i\omega_n t} \quad (5.37)$$

Bu denklemde ω_n serbest titreşimin frekansı, ϕ_{xn} ve $\phi_{\theta n}$ ise, u_x ve $r\theta$ 'ya bağlı olarak elemanların mod şekilleridir $\{\phi_n\}$. Denklem 4.33 şu şekli alır:

$$\begin{bmatrix} \omega_x^2 - \omega_n^2 & -\omega_x^2 \left(\frac{h}{r}\right) \\ -\omega_x^2 \left(\frac{h}{r}\right) & \omega_x^2 \left(\frac{h}{r}\right)^2 + \omega_z^2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 - \omega_n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{xn} \\ \phi_{\theta n} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.38)$$

Aşık olmaya çözümler, girişimli sistemin ω_1 ve ω_2 frekanslarının hesaplanabileceği karakteristik denklemi verir:

$$\omega_n^4 - \left[\omega_x^2 \left(1 + \left(\frac{h}{r}\right)^2\right) + \omega_z^2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right] \omega_n^2 + \omega_x^2 \omega_z^2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 = 0, \quad n = 1, 2 \quad (5.39)$$

Uç değerlerin hesaplanması, modal analiz yöntemiyle gerçekleştirilebilir (Clough, R.W ve Penzien, J. 1975).

$$\{U\} = [\Phi] \{y\} \quad (5.40)$$

transformasyonunun 5.33 denkleminde uygulanması, ortogonalite şartlarının kullanılması ve modal sönümlerin de katılmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\ddot{y}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{y}_n + \omega_n^2 y_n = -\frac{[\Phi]^T \{R\} \ddot{u}_i}{[\Phi]^T [\Phi]}, \quad n = 1, 2 \quad (5.41)$$

Bu eşitlikte yer alan $[\Phi]$, sütunlarında iki mod şeklini içeren bir matris ve ξ_n ise n'inci moda ait sönüm oranıdır. Uç modal cevaplar, yer hareketinin cevap spektrasından hesaplanır:

$$\max y_n = \frac{[\Phi]^T \{R\}}{[\Phi]^T [\Phi]} S_d(\omega_n, \xi_n) \quad (5.42)$$

$$\max \ddot{y}_{nTOPLAM} = \frac{[\Phi]^T \{R\}}{[\Phi]^T [\Phi]} S_a(\omega_n, \xi_n) \quad (5.43)$$

S_d ve S_a , sırasıyla, ω_n frekansı ve ξ_n sönüm oranı için yer hareketinin spektral deplasmanı ve spektral ivmesidir. Her mod için uç değerler, Denklem 5.40 ile hesaplanır ve karelerinin toplamının karekökü (SRSS) birleştirme yöntemiyle birleştirilir.

Basitleştirilmiş yöntem, uç değerlerin çabuk tahminlerini elde etmede oldukça kullanışlıdır. Bununla birlikte, çelik halat izolatörlerin etkin rijitliğinin ve sistemin etkin sönüm oranının

bilinmesi gereklidir. Etkin rijitlik, izolatörlerin deneysel kuvvet – deplasman grafiklerinden elde edilebilir. Bu ise, önce deplasmanların hesaplandığı, sonra rijitlik tahmini yapılarak hesapların yenilendiği bir tekrarlı yöntemin uygulanmasını gerektirir. Etkin sönüm oranı, ilk olarak seçilemez. Harmonik titreşim için bir nonlineer dinamik analiz gerçekleştirilmeli ve hesaplanan moment – dönme grafikleri, etkin sönüm oranı değerlerinin elde edilmesinde kullanılmalıdır (Bkz.Bölüm 4.3). Aksi takdirde, sönüm tecrübelerine dayanılarak seçilmelidir (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992).

5.4 DENEYSEL VE ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Sistem 1'e ait cevabın, deneysel ve analitik zaman tanım aralıkları Şekil 5.11 – 5.29'da sunulmuştur. Bütün analizler, Bölüm 5.1'de yer alan geometrik lineer formülasyona dayanmaktadır. Bölüm 5.2'deki geometrik nonlineer denklemler ile yapılan analizler de hemen hemen özdeş sonuçlar vermiştir. Analitik modeldeki parametreler $W = 1784$ N (400 lbs.), $r = 580$ mm.(22.83 in.), $a = 231.8$ mm.(9.125 in.), $h = 1021$ mm.(40.2 in.) ve $h_T = 919.5$ mm.(36.2 in.) şeklinde alınmıştır (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992).

Demetriades, Constantinou ve Reinhorn'un elde ettikleri analitik zaman tanım aralıkları, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Frekans iyi bir aralıkta kalmış, bununla birlikte, birçok durumda deplasmanlar en iyi şekilde tahmin edilmiştir. Bu durumda, bir kısım faktörler etkili olmuştur; bunlardan öne çıkan iki tanesi etkileşimin ihmal edilmesi ve izolatörlerin matematik modelinde daha az enerji sönümlenmesi olmasıdır.

Zaman tanım aralığında hesap ve basitleştirilmiş yöntem ile sistem 1'e ait hesaplanan uç cevap değerleri, Çizelge 5.11'de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Basitleştirilmiş yöntem, izolatör rijitliği ve sönüm oranının tahmin edilmesini gerektirmektedir. Sistem, harmonik titreşim için nümerik olarak analiz edilmiş ve moment – dönme grafikleri elde edilmiştir (Bkz.Bölüm 4.3, Denklem 4.1 ve 4.2). Şekil 5.30'da verilen grafikten, etkin periyod ve eşdeğer viskoz sönüm oranı değerleri (Denklem 4.3 ve 4.4) hesaplanmıştır. İlave olarak, izolatörlerin düşey rijitliği olan K_z 'e ait değerler, aşağıdaki bağıntıdan tespit edilmiştir:

$$K_r = \frac{M}{\theta} = 4K_z a^2 \quad (5.44)$$

Bu değerler, dönmenin genlik fonksiyonu ($2\theta\alpha$) cinsinden, Çizelge 5.12'de listelenmiştir ve izolatörlerin deneysel yatay kuvvet – deplasman grafiklerinden elde edilmiştir (Bkz.Bölüm 3, Şekil 3.12).

Analiz, önce temsili bir θ dönme değeri kabul edilip, sonra da K_z düşey rijitlik ve ξ sönüm oranı seçimi yapıldıktan sonra cevap spektrum analizi yapılması ile gerçekleştirilmiştir (Bölüm 5.3). Daha sonra, hesaplanan dönme değeri, Çizelge 5.12'deki bilgiler kullanılarak K_z ve ξ tahminlerinin doğrulanmasında kullanılmış ve analiz bu şekilde tekrarlanmıştır. Bu tekrarlı işlem, Şekil 4.13 – 4.18'daki spektralar kullanılarak, dört titreşim için de uygulanmıştır (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992). Cevap, Çizelge 5.11'de verilirken, hesaplanan sistem özellikleri de Çizelge 5.13'te sunulmuştur. İkinci moda ait sönüm faktörünün bilinmediği ve birinci moda ait değere eşit kabul edildiği bilinmelidir.

Çizelge 5.11'deki sonuçlar, analitik ve deneysel uç cevap değerleri arasında iyi bir uyum bulunduğunu sergilemektedir. Bu da göstermektedir ki, basitleştirilmiş yöntem, kullanışlı bir tasarım aracı olarak yeterince doğru sonuçlar veren bir yöntemdir (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992).

5.5 BASİTLEŞTİRİLMİŞ ANALİZ YÖNTEMİNE NÜMERİK BİR YAKLAŞIM: NEWMARK'IN NONLİNEER CEVAP ANALİZİ

Bu bölümde, Demetriades, Constantinou ve Reinhorn'un Basitleştirilmiş Analiz Yöntemi için modal analiz uygulanarak, sayısal çözüm yapılmıştır. Elde edilen modal denklemler, Newmark'ın Nonlinear Cevap Analizi temelli bir bilgisayar programı yazılarak çözülmüş, Basitleştirilmiş Analiz Yöntemine nümerik bir yaklaşım yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından elde edilen deneysel ve analitik sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Newmark'ın metodu, çok yüksek bir doğruluk sağlaması nedeniyle, nonlinear sistemler için geliştirilen nümerik yöntemler arasında en popüler olanıdır (Chopra, A.K. 1995).

5.5.1 MODAL ANALİZ İLE ÇÖZÜMLERİN ELDE EDİLMESİ

Demetriades, Constantinou ve Reinhorn'un, Basitleştirilmiş Analiz Yöntemi için elde ettikleri, sistem 1'e ait özellikler Çizelge 5.13'te sunulmuştur. Bu bölümde, bu çizelgede verilen değerler kullanılarak, El Centro ve Taft Yer Hareketleri için modal analiz yöntemi kullanılarak modal denklemler elde edilecektir.

5.5.1.1 El Centro yer hareketi için modal analiz

El Centro Yer Hareketi için Çizelge 5.13'ten alınan karakteristik değerler şöyledir:

$$K_x = 0.179 \text{ Kip/in} , \quad K_z = 0.300 \text{ Kip/in} , \quad \omega_x = 26.29 \text{ r/s} , \quad \omega_z = 34.04 \text{ r/s} , \quad T_1 = 0.96 \text{ s} , \\ T_2 = 0.12 \text{ s} , \quad \xi_1 = \xi_2 = 0.10$$

Test edilen ekipmana ait geometrik değerler ise şöyledir (Şekil 4.1):

$$h = 40.2 \text{ in} , \quad r = 22.83 \text{ in} , \quad a = 9.125 \text{ in}$$

Bu değerler, Denklem 5.39'da yerine konursa;

$$\omega_n^4 - 3019.25\omega_n^2 + 127941.38 = 0 \quad \text{elde edilir.}$$

Bu eşitliğin köklerinden;

$$\omega_1^2 = 42.99 \Rightarrow \omega_1 = 6.56 \text{ r/s} \qquad \omega_2^2 = 2976.26 \Rightarrow \omega_2 = 54.56 \text{ r/s}$$

her iki moda ait frekanslar elde edilir.

$/K/$ rijitlik matrisi;

$$[K] = \begin{bmatrix} 691.16 & -1217.02 \\ -1217.02 & 2328.09 \end{bmatrix}$$

Denklem 5.35'den elde edilir.

Elde edilen bu değerlerle Denklem 5.38 yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} 691.16 - 42.99 & -1217.02 \\ -1217.02 & 2328.09 - 42.99 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{x1} \\ \phi_{\theta1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \phi_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.53 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 691.16 - 2976.26 & -1217.02 \\ -1217.02 & 2328.09 - 2976.26 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{x2} \\ \phi_{\theta2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \phi_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.88 \end{Bmatrix}$$

birinci ve ikinci modlara ait mod şekilleri elde edilir.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.53 & -1.88 \end{bmatrix} \text{ olur.}$$

Bu değerler Denklem 5.41'de yerine konursa;

$$\ddot{y}_1 + 1.31\dot{y}_1 + 43.03y_1 = -0.7801\ddot{u}_{gx}$$

$$\ddot{y}_2 + 10.91\dot{y}_2 + 2976.79y_2 = -0.2199\ddot{u}_{gx}$$

her iki moda ait modal denklemler elde edilir.

5.5.1.2 Taft yer hareketi için modal analiz

Taft Yer Hareketi için Çizelge 5.13'ten alınan karakteristik değerler şöyledir:

$$K_x = 0.179 \text{ Kip/in} , \quad K_z = 0.360 \text{ Kip/in} , \quad \omega_x = 26.29 \text{ r/s} , \quad \omega_z = 37.29 \text{ r/s} , \quad T_1 = 0.88 \text{ s} , \\ T_2 = 0.12 \text{ s} , \quad \xi_1 = \xi_2 = 0.15$$

Test edilen ekipmana ait geometrik değerler ise şöyledir (Şekil 4.1):

$$h = 40.2 \text{ in} , \quad r = 22.83 \text{ in} , \quad a = 9.125 \text{ in}$$

Bu değerler, Denklem 5.39'da yerine konursa;

$$\omega_n^4 - 3056.31\omega_n^2 + 153539.41 = 0 \quad \text{elde edilir.}$$

Bu eşitliğin köklerinden;

$$\omega_1^2 = 51.09 \Rightarrow \omega_1 = 7.15 \text{ r/s}$$

$$\omega_2^2 = 3005.22 \Rightarrow \omega_2 = 54.82 \text{ r/s}$$

her iki moda ait frekanslar elde edilir.

$[K]$ rijitlik matrisi;

$$[K] = \begin{bmatrix} 691.16 & -1217.02 \\ -1217.02 & 2365.14 \end{bmatrix}$$

Denklem 5.35'den elde edilir.

Elde edilen bu değerlerle Denklem 5.38 yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} 691.16 - 51.09 & -1217.02 \\ -1217.02 & 2365.14 - 51.09 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{x1} \\ \phi_{\theta1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow \phi_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.53 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 691.16 - 3005.22 & -1217.02 \\ -1217.02 & 2365.14 - 3005.22 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{x2} \\ \phi_{\theta2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow \phi_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.90 \end{Bmatrix}$$

birinci ve ikinci modlara ait mod şekilleri elde edilir.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.53 & -1.90 \end{bmatrix} \text{ olur.}$$

Bu değerler Denklem 5.41'de yerine konursa;

$$\ddot{y}_1 + 2.15\dot{y}_1 + 51.12y_1 = -0.7819\ddot{u}_{gx}$$

$$\ddot{y}_2 + 16.45\dot{y}_2 + 3005.23y_2 = -0.2181\ddot{u}_{gx}$$

her iki moda ait modal denklemler elde edilir.

5.5.2 AKIŞ DİYAGRAMI

Newmark'ın Nonlinear Cevap Analizine dayanan bilgisayar programının akış diyagramı şu şekildedir:

Çizelge 5.1 Nonlinear sistemler için Newmark Metodu (Chopra, A.K. 1995).

Özel yöntemler

(1) Ortalama ivme yöntemi ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$)

(2) Doğrusal ivme yöntemi ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$)

1.0 Başlangıç koşulları

1.1 $\ddot{u}_0 = \frac{P_0 - c\dot{u}_0 - (f_s)_0}{m}$

1.2 Δt seçilir.

1.3 $a = \frac{1}{\beta\Delta t}m + \frac{\gamma}{\beta}c$ ve $b = \frac{1}{2\beta}m - \Delta t(\frac{\gamma}{2\beta} - 1)c$

2.0 Her i zaman basamağı için hesaplar:

2.1 $\Delta\hat{p}_i = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i$

2.2 k_i rijitliği tanımlanır.

2.3 $\hat{k}_i = k_i + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}m$

2.4 \hat{k}_i ve \hat{u}_i , Çizelge 5.2'deki tekrarlı yöntem kullanılarak Δu_i çözülür.

2.5 $\Delta\dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{u}_i + \Delta t(1 - \frac{\gamma}{2\beta})\ddot{u}_i$

2.6 $\Delta\ddot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2}\Delta u_i - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \frac{1}{2\beta}\ddot{u}_i$

2.7 $u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$, $\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta\dot{u}_i$, $\ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta\ddot{u}_i$

3.0 Sonraki zaman basamağı için tekrar edilir. i , $i+1$ ile yer değiştirilerek 2.1 - 2.7, sonraki zaman basamağı için elde edilir.

Çizelge 5.2 Değiştirilmiş Newton – Raphson iterasyonu (Chopra, A.K. 1995).

1.0 Başlangıç bilgileri

$$u_{i+1}^{(0)} = u_i \quad f_s^{(0)} = (f_s)_i \quad \Delta R^{(1)} = \Delta \hat{p}_i \quad \hat{k}_T = \hat{k}_i$$

2.0 Her iterasyon için hesap, $j=1, 2, 3, \dots$

$$2.1 \quad \hat{k}_T \Delta u^{(j)} = \Delta R^{(j)} \Rightarrow \Delta u^{(j)}$$

$$2.2 \quad u_{i+1}^{(j)} = u_{i+1}^{(j-1)} + \Delta u^{(j)}$$

$$2.3 \quad \Delta f^{(j)} = f_s^{(j)} - f_s^{(j-1)} + (\hat{k}_T - k_T) \Delta u^{(j)}$$

$$2.4 \quad \Delta R^{(j+1)} = \Delta R^{(j)} - \Delta f^{(j)}$$

3.0 Sonraki zaman basamağı için tekrar edilir. i , $i+1$ ile yer değiştirilerek 2.1 – 2.4 için tekrar edilir.

5.5.3 Bilgisayar programının yazılması ve sonuçların elde edilmesi

Yaklaşımın yapıldığı nümerik analiz yöntemi, Bölüm 5.5.2'de verilen akış diyagramı doğrultusunda, MATLAB bilgisayar yazılımı kullanılarak, El Centro Yer Hareketi ve Taft Yer Hareketi için Bölüm 5.5.1.1 ve 5.5.1.2'de elde edilen modal denklemlere uygulanmıştır.

5.5.3.1 El Centro yer hareketi için analiz

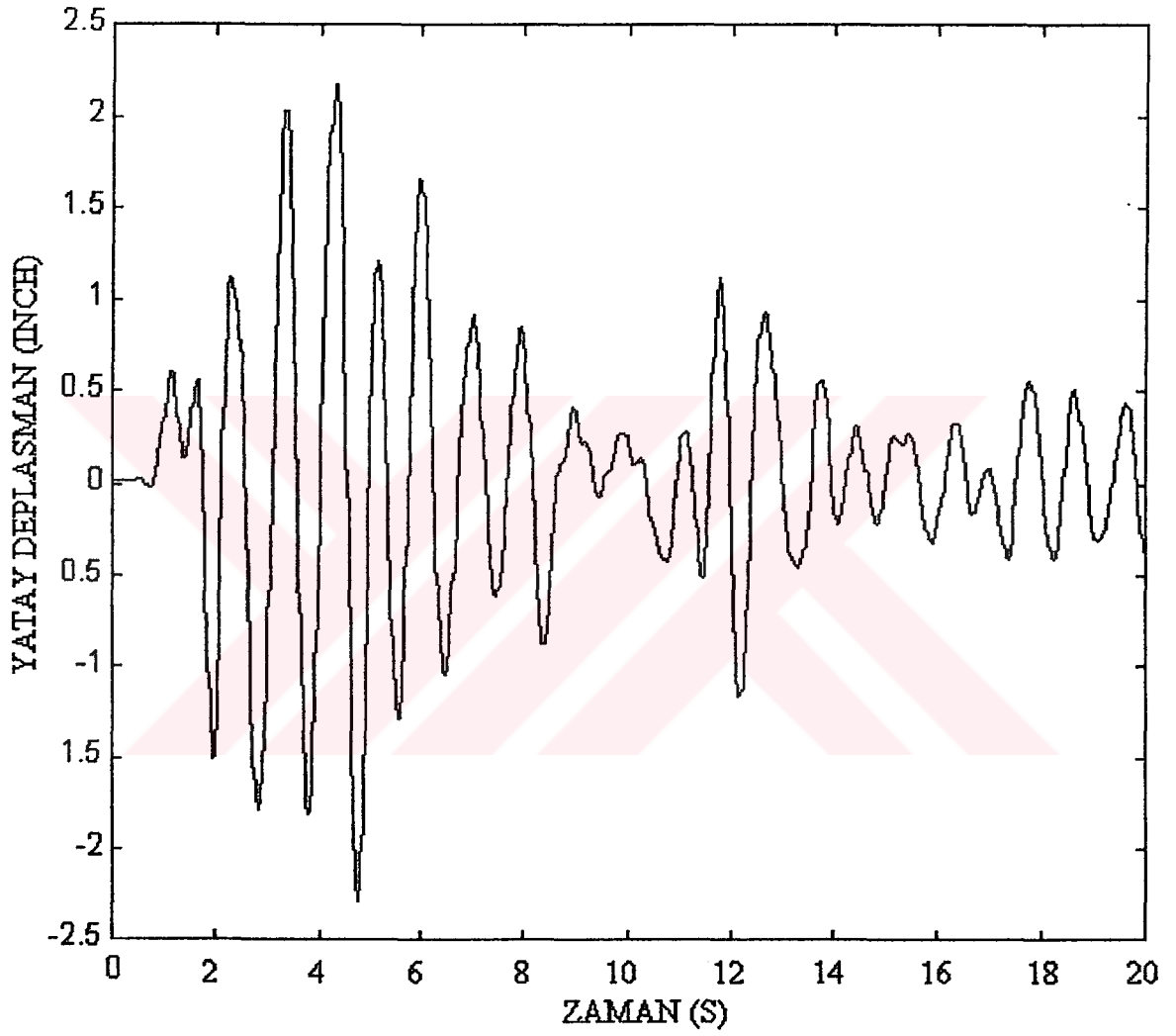
MATLAB programı kullanılarak El Centro Yer Hareketi için yazılan programların metinleri ve bu programların sonuç grafikleri Çizelge 5.3 – 5.6 ve Şekil 5.1 – 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 El Centro Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 1).

```

%EL CENTRO YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE
%ANALİZİ YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%ORTALAMA İVME YÖNTEMİ
%MOD1
clear
close all
K=[43.03];
M=[1];
C=[1.31];
vvv=[1;0]
load elcentro;
dt=0.02;
    gam=1/2;bet=1/4;
    u=0*vvv;
    du=0*vvv;
    ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
    aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
    bb=1/2/bet*M+dt*(gam/2/bet-1)*C;
    for I=1:999
        pkr1=-0.7801*386.4*[elcentro(I);0];
        pkr2=-0.7801*386.4*[elcentro(I+1);0];
        lp=pkr2-pkr1;
        lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
        ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
        lu=inv(ky)*lpy;
        ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
        lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
        u=u+lu;
        du=du+ldu;
        ddu=ddu+lddu;
        mu(I)=u(1);
    end
plot(mu)

```



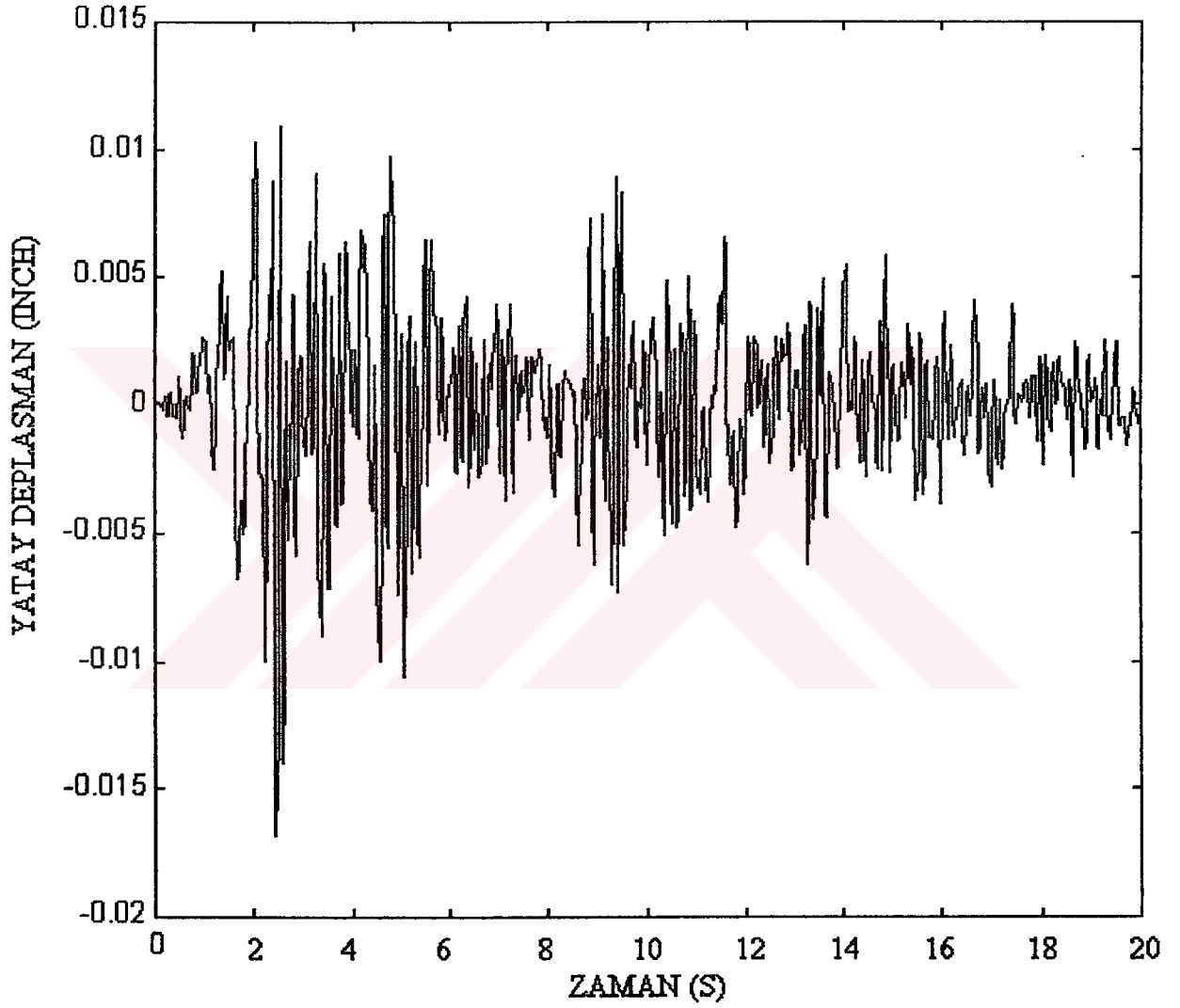
Şekil 5.1 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği (Ortalama ivme yöntemi, Mod 1).

Çizelge 5.4 El Centro Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 2).

```

%EL CENTRO YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE
%ANALİZİ YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%ORTALAMA İVME YÖNTEMİ
%MOD2
clear
close all
K=[2976.79];
M=[1];
C=[10.91];
vvv=[1;0]
load elcentro;
dt=0.02;
gam=1/2;bet=1/4;
u=0*vvv;
du=0*vvv;
ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
bb=1/2/bet*M+dt*(gam/2/bet-1)*C;
for I=1:999
pkr1=-0.2199*386.4*[elcentro(I);0];
pkr2=-0.2199*386.4*[elcentro(I+1);0];
lp=pkr2-pkr1;
lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
lu=inv(ky)*lpy;
ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
u=u+lu;
du=du+ldu;
ddu=ddu+lddu;
mu(I)=u(1);
end
plot(mu)

```



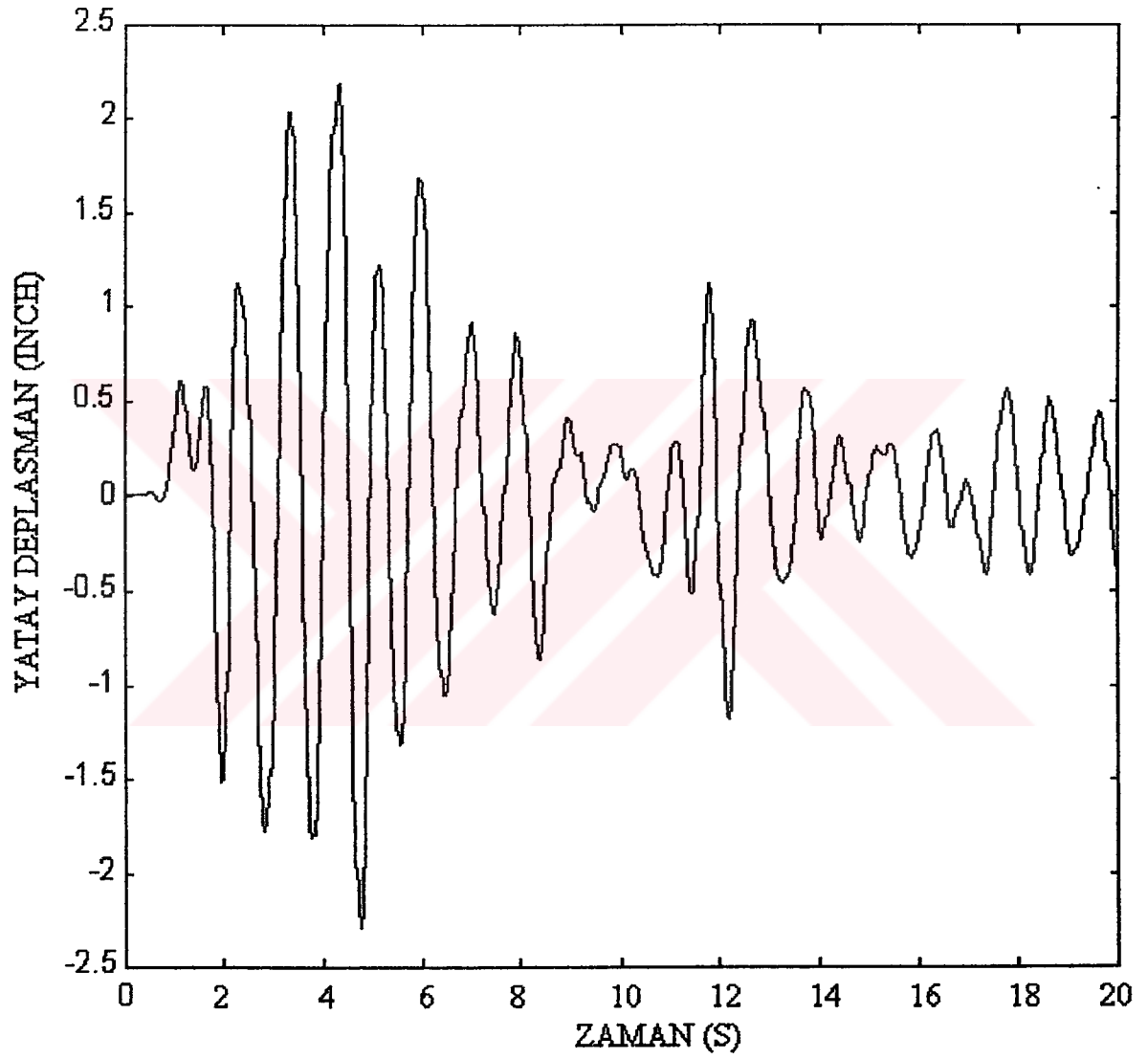
Şekil 5.2 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği (Ortalama ivme yöntemi, Mod 2).

Çizelge 5.5 El Centro Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1).

```

%EL CENTRO YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE
%ANALİZİ YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%DOĞRUSAL İVME YÖNTEMİ
%MOD1
clear
close all
K=[43.03];
M=[1];
C=[1.31];
vvv=[1;0]
load elcentro;
dt=0.02;
    gam=1/2;bet=1/6;
    u=0*vvv;
    du=0*vvv;
    ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
    aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
    bb=1/2/bet*M+dt*(gam/2/bet-1)*C;
    for I=1:999
        pkr1=-0.7801*386.4*[elcentro(I);0];
        pkr2=-0.7801*386.4*[elcentro(I+1);0];
        lp=pkr2-pkr1;
        lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
        ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
        lu=inv(ky)*lpy;
        ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
        lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
        u=u+lu;
        du=du+ldu;
        ddu=ddu+lddu;
        mu(I)=u(1);
    end
plot(mu)

```



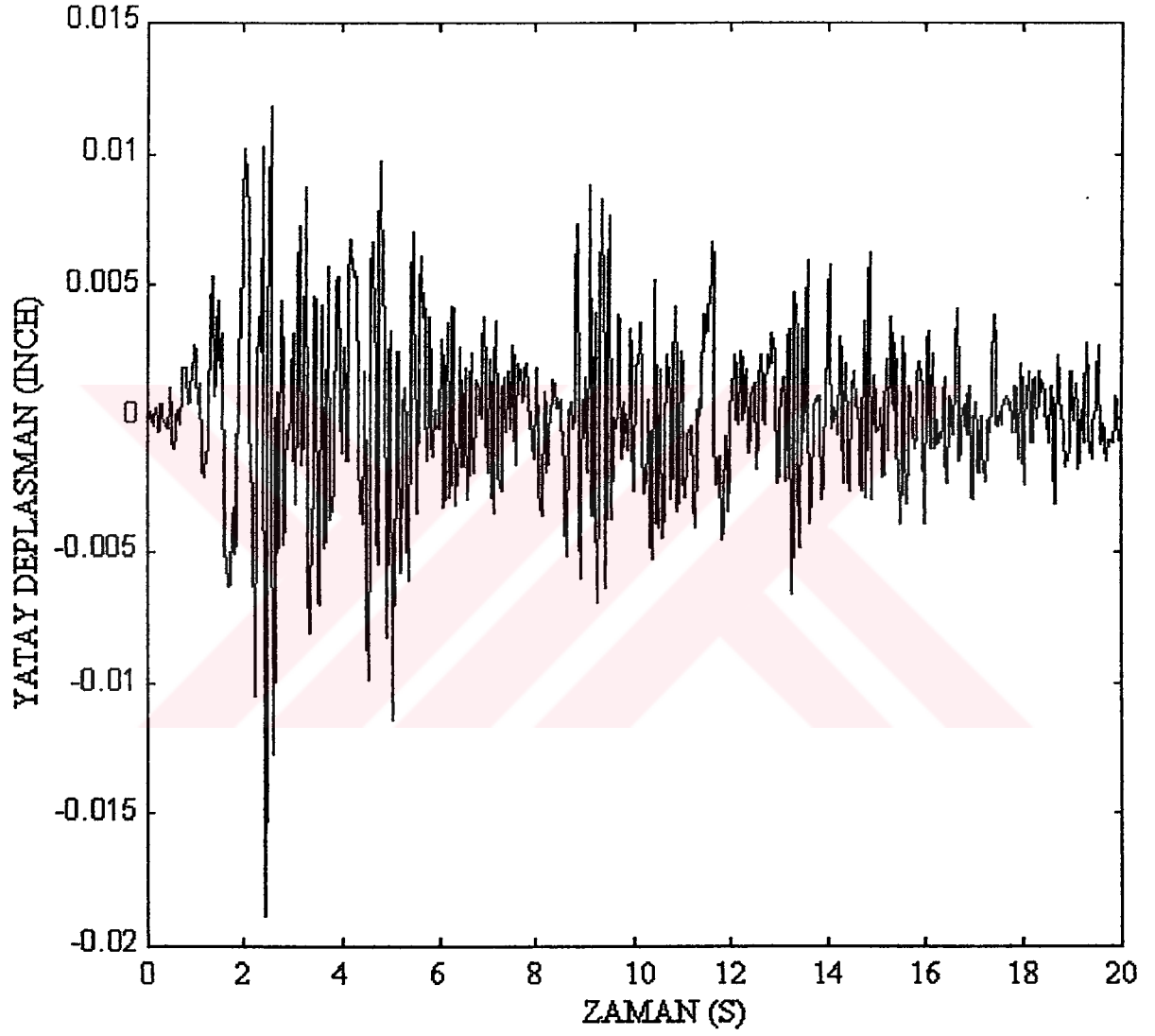
Şekil 5.3 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1).

Çizelge 5.6 El Centro Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 2).

```

%EL CENTRO YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE
%ANALİZİ YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%DOĞRUSAL İVME YÖNTEMİ
%MOD2
clear
close all
K=[2976.79];
M=[1];
C=[10.91];
vvv=[1;0]
load elcentro;
dt=0.02;
    gam=1/2;bet=1/6;
    u=0*vvv;
    du=0*vvv;
    ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
    aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
    bb=1/2/bet*M+dt*(gam/2/bet-1)*C;
    for I=1:999
        pkr1=-0.2199*386.4*[elcentro(I);0];
        pkr2=-0.2199*386.4*[elcentro(I+1);0];
        lp=pkr2-pkr1;
        lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
        ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
        lu=inv(ky)*lpy;
        ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
        lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
        u=u+lu;
        du=du+ldu;
        ddu=ddu+lddu;
        mu(I)=u(1);
    end
plot(mu)

```



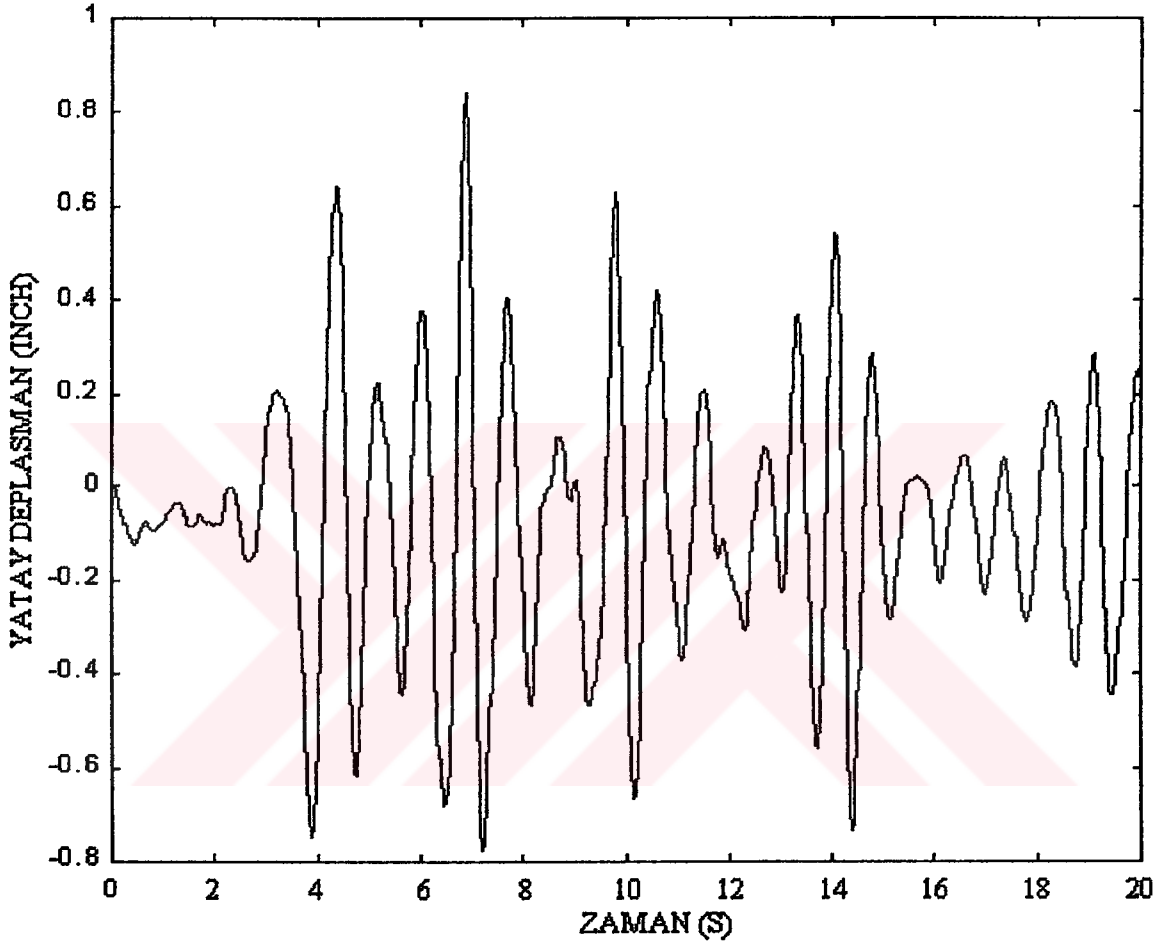
Şekil 5.4 El Centro Yer Hareketi için sonuç grafiği (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 2).

5.5.3.2 Taft yer hareketi için analiz

MATLAB programı kullanılarak Taft Yer Hareketi için yazılan programların metinleri ve bu programların sonuç grafikleri Çizelge 5.7 – 5.10 ve Şekil 5.5 – 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 Taft Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 1).

```
%TAFT YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE ANALİZİ
%YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%ORTALAMA İVME YÖNTEMİ
%MOD1
clear
close all
K=[51.12];
M=[1];
C=[2.145];
vvv=[1;0]
x=0.03937;
load taft;
dt=0.02;
    gam=1/2;bet=1/4;
    u=0*vvv;
    du=0*vvv;
    ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
    aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
    bb=1/2/bet*M-dt*(gam/2/bet-1)*C;
    for I=1:999
    pkr1=-0.7819*x*[taft(I);0];
    pkr2=-0.7819*x*[taft(I+1);0];
    lp=pkr2-pkr1;
    lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
    ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
    lu=inv(ky)*lpy;
    ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
    lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
    u=u+lu;
    du=du+ldu;
    ddu=ddu+lddu;
    mu(I)=u(1);
    end
plot(mu)
```



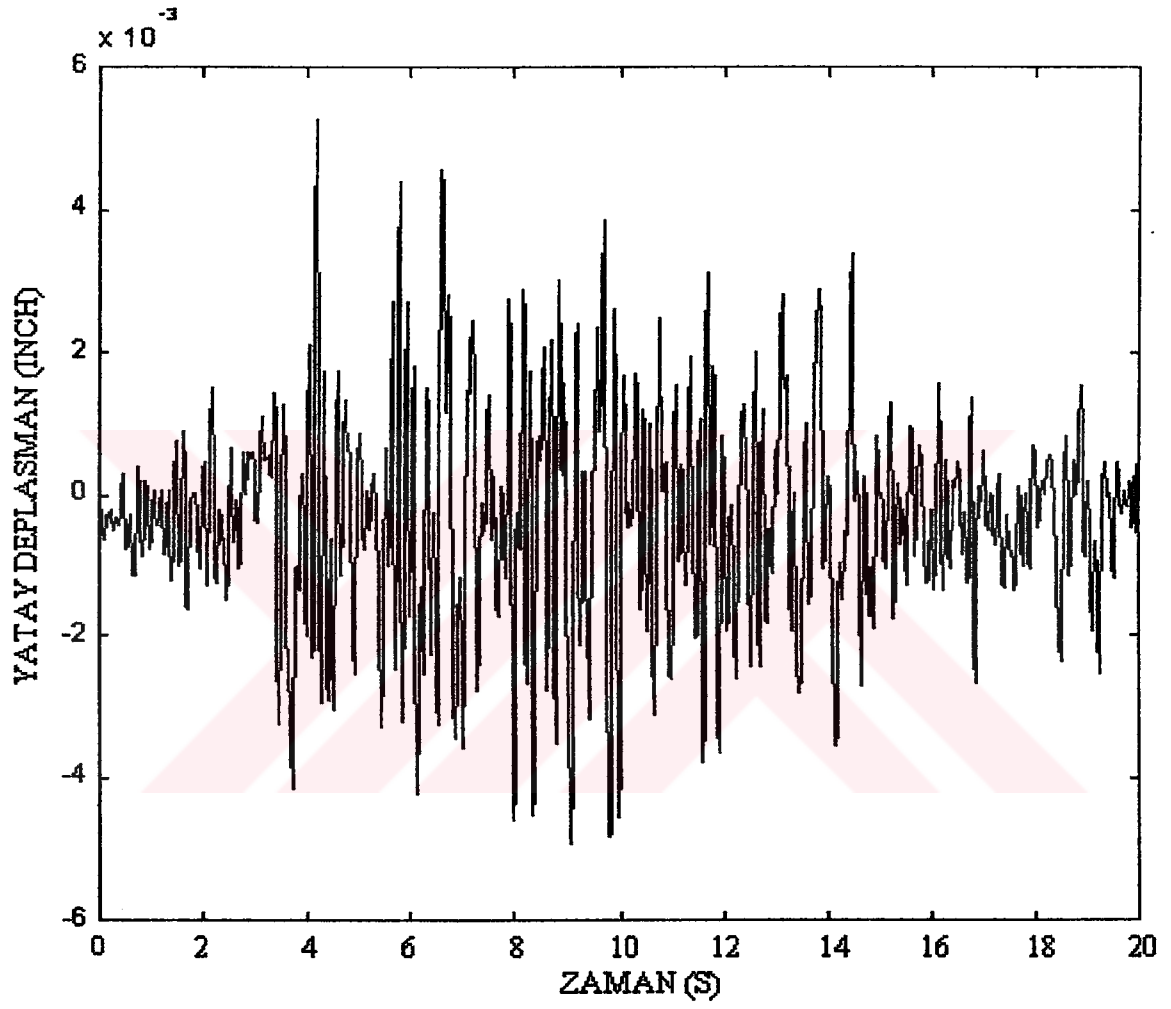
Şekil 5.5 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği (Ortalama ivme yöntemi, Mod 1).

Çizelge 5.8 Taft Yer Hareketi için program metni (Ortalama ivme yöntemi, Mod 2).

```

%TAFT YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE ANALİZİ
%YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%ORTALAMA İVME YÖNTEMİ
%MOD2
clear
close all
K=[3005.23];
M=[1];
C=[16.45];
vzv=[1;0]
x=0.03937;
load taft;
dt=0.02;
    gam=1/2;bet=1/4;
    u=0*vzv;
    du=0*vzv;
    ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
    aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
    bb=1/2/bet*M-dt*(gam/2/bet-1)*C;
    for I=1:999
        pkr1=-0.2181*x*[taft(I);0];
        pkr2=-0.2181*x*[taft(I+1);0];
        lp=pkr2-pkr1;
        lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
        ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
        lu=inv(ky)*lpy;
        ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
        lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
        u=u+lu;
        du=du+ldu;
        ddu=ddu+lddu;
        mu(I)=u(1);
    end
plot(mu)

```



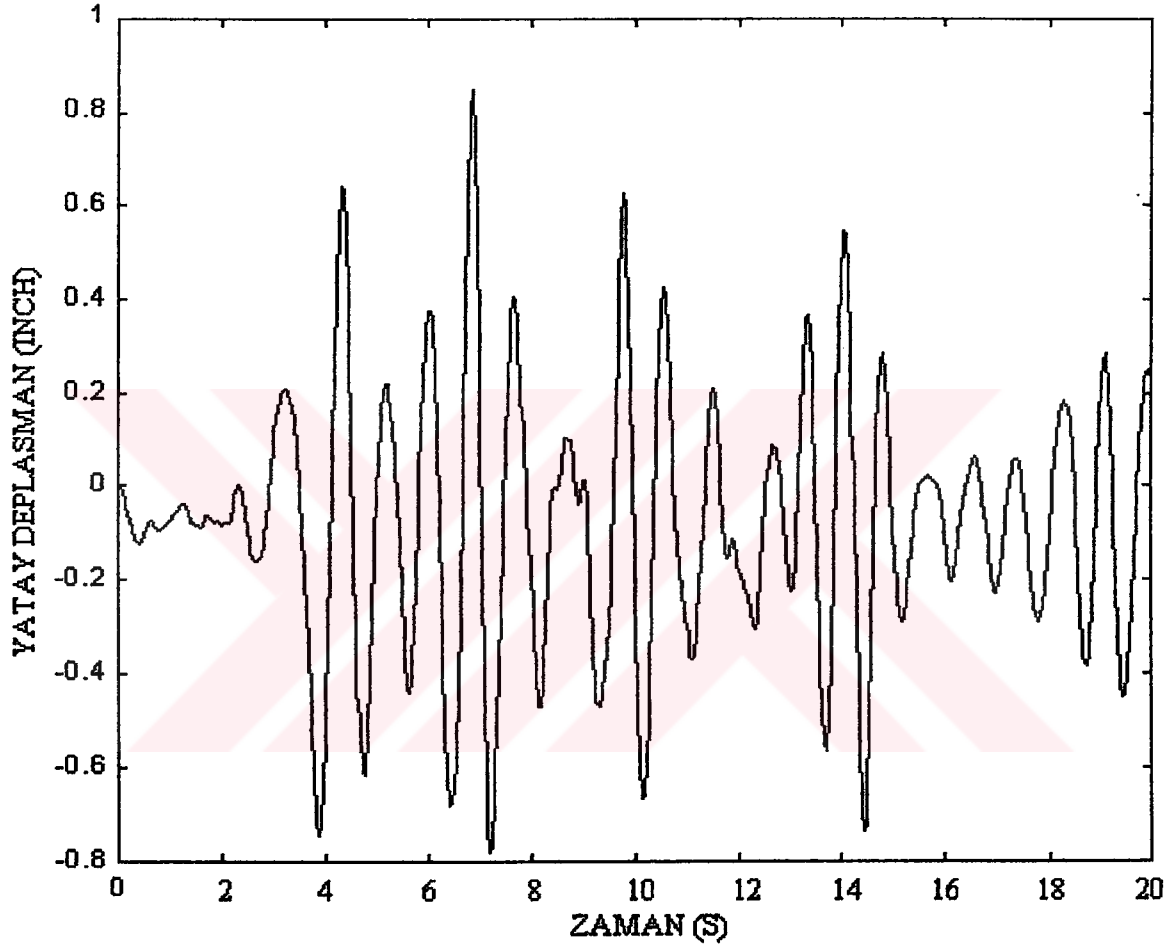
Şekil 5.6 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği (Ortalama ivme yöntemi, Mod 2).

Çizelge 5.9 Taft Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1).

```

%TAFT YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE ANALİZİ
%YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%DOĞRUSAL İVME YÖNTEMİ
%MOD1
clear
close all
K=[51.12];
M=[1];
C=[2.145];
vvv=[1;0]
x=0.03937;
load taft;
dt=0.02;
    gam=1/2;bet=1/6;
    u=0*vvv;
    du=0*vvv;
    ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
    aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
    bb=1/2/bet*M+dt*(gam/2/bet-1)*C;
    for I=1:999
        pkr1=-0.7819*x*[taft(I);0];
        pkr2=-0.7819*x*[taft(I+1);0];
        lp=pkr2-pkr1;
        lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
        ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
        lu=inv(ky)*lpy;
        ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
        lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
        u=u+lu;
        du=du+ldu;
        ddu=ddu+lddu;
        mu(I)=u(1);
    end
plot(mu)

```



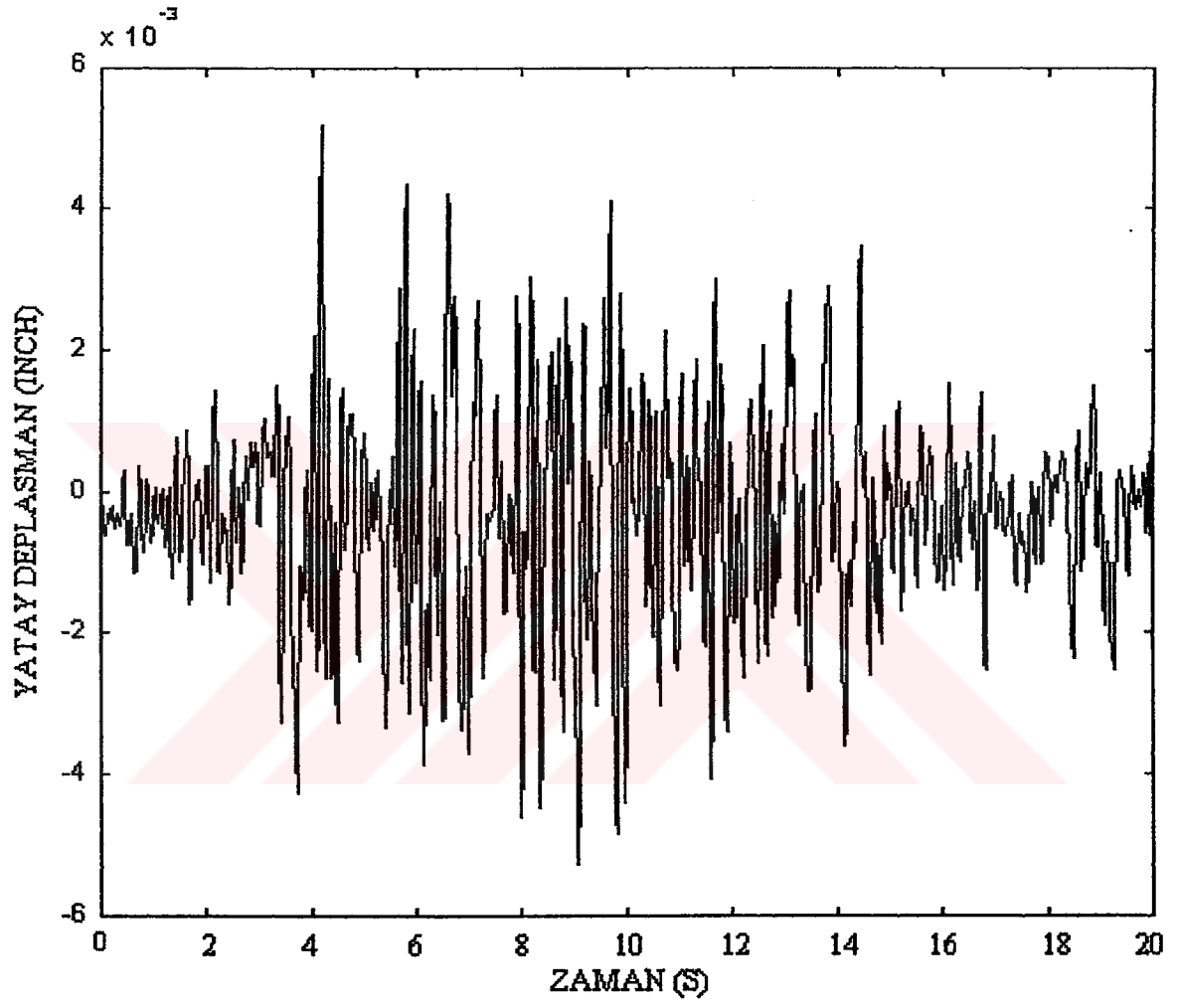
Şekil 5.7 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1).

Çizelge 5.10 Taft Yer Hareketi için program metni (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 1).

```

%TAFT YER HAREKETİ İÇİN NEWMARK'IN NONLİNEER MUKABELE ANALİZİ
%YÖNTEMİ UYGULAMASI
%SEVİYE 1 (AĞIRLIK MERKEZİ) DEPLASMANININ ELDE EDİLMESİ
%DOĞRUSAL İVME YÖNTEMİ
%MOD2
clear
close all
K=[3005.23];
M=[1];
C=[16.45];
vvv=[1;0]
x=0.03937;
load taft;
dt=0.02;
    gam=1/2;bet=1/6;
    u=0*vvv;
    du=0*vvv;
    ddu=inv(M)*(0-C*du-K*u);
    aa=1/bet/dt*M+gam/bet*C;
    bb=1/2/bet*M+dt*(gam/2/bet-1)*C;
    for I=1:999
    pkr1=-0.2181*x*[taft(I);0];
    pkr2=-0.2181*x*[taft(I+1);0];
    lp=pkr2-pkr1;
    lpy=lp+aa*du+bb*ddu;
    ky=K+gam/bet/dt*C+1/bet/dt^2*M;
    lu=inv(ky)*lpy;
    ldu=gam/bet/dt*lu-gam/bet*du+dt*(1-gam/2/bet)*ddu;
    lddu=1/bet/dt^2*lu-1/bet/dt*du-1/2/bet*ddu;
    u=u+lu;
    du=du+ldu;
    ddu=ddu+lddu;
    mu(I)=u(1);
    end
plot(mu)

```



Şekil 5.8 Taft Yer Hareketi için sonuç grafiği (Doğrusal ivme yöntemi, Mod 2).

5.5.3.3 UÇ DEĞERLERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

Bölüm 5.3'te, her mod için uç değerlerin hesaplanıp, sonra da karelerinin toplamının karekökü (SRSS) birleştirme yöntemiyle birleştirilerek sonuçların elde edilebileceği anlatılmıştı. Fakat, aynı zamana ait değerler birleştirildiği için, birleştirme şu şekilde gerçekleştirilir:

- El Centro Yer Hareketi için modların birleştirilmesi:

- Ortalama İvme Yöntemi:

$$t = 4.32 \text{ s için } y_1 = 2.1920 \text{ in. (MOD 1)}$$

$$y_2 = 0.0017 \text{ in. (MOD 2)}$$

$$Y = 2.1920 + 0.0017 = 2.1937 \text{ in.}$$

- Doğrusal İvme Yöntemi:

$$t = 4.32 \text{ s için } y_1 = 2.1924 \text{ in. (MOD 1)}$$

$$y_2 = 0.0018 \text{ in. (MOD 2)}$$

$$Y = 2.1924 + 0.0018 = 2.1942 \text{ in.}$$

- Taft Yer Hareketi için modların birleştirilmesi:

- Ortalama İvme Yöntemi:

$$t = 6.88 \text{ s için } y_1 = 0.8426 \text{ in. (MOD 1)}$$

$$y_2 = - 0.0034 \text{ in. (MOD 2)}$$

$$Y = 0.8426 - 0.0034 = 0.8392 \text{ in.}$$

- Doğrusal İvme Yöntemi:

$$t = 6.88 \text{ s için } y_1 = 0.8461 \text{ in. (MOD 1)}$$

$$y_2 = - 0.0034 \text{ in. (MOD 2)}$$

$$Y = 0.8461 - 0.0034 = 0.8427 \text{ in.}$$

5.5.3.4 ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DENEYSEL VE ANALİTİK SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Yukarıdaki hesaplarda da görüldüğü üzere, yatay deplasman modu olan Mod 1, dönme modu olan Mod 2'ye baskındır. Dolayısıyla 2 nci moda ait elde edilen grafikler bir yana bırakılırsa, 1 nci moda ait elde edilen Şekil 5.1 ve 5.3'te yer alan deplasmanlar, Şekil 5.14 ile, Şekil 5.5 ve 5.7'de yer alan deplasmanlar ise Şekil 5.11 ile kıyaslandığında, nümerik yaklaşımdan elde edilen sonuçların, Demetriades, Constantinou ve Reinhorn'un elde ettikleri deneysel ve analitik sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu görülebilir.



Çizelge 5.11 Deneysel ve analitik uç mukabele değerlerinin karşılaştırılması
(1 in.=25.4 mm) (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

	TAFT N21E YER HAREKETİ			TAFT N21E 7 NCI KAT HAREKETİ		
	Deneysel	Zaman Tanım Alanı	Basitleştirilmiş Metod	Deneysel	Zaman Tanım Alanı	Basitleştirilmiş Metod
Üst Seviyede Yatay İvme (g)	0.220	0.233	0.248	0.625	0.648	0.706
Üst Seviyede Yatay Deplasman (g)	1.211	1.214	1.620	4.163	4.449	4.906
İzolatör Seviyesinde Yatay Deplasman (in)	0.122	0.100	0.182	0.302	0.412	0.529
Güney Yöndeki İzolatorde Düşey Deplasman (in)	0.247	0.247	0.262	1.031	1.001	0.799
Kuzey Yöndeki İzolatorde Düşey Deplasman (in)	0.198	0.186	0.262	0.806	0.977	0.799

Çizelge 5.11 Devamı. (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

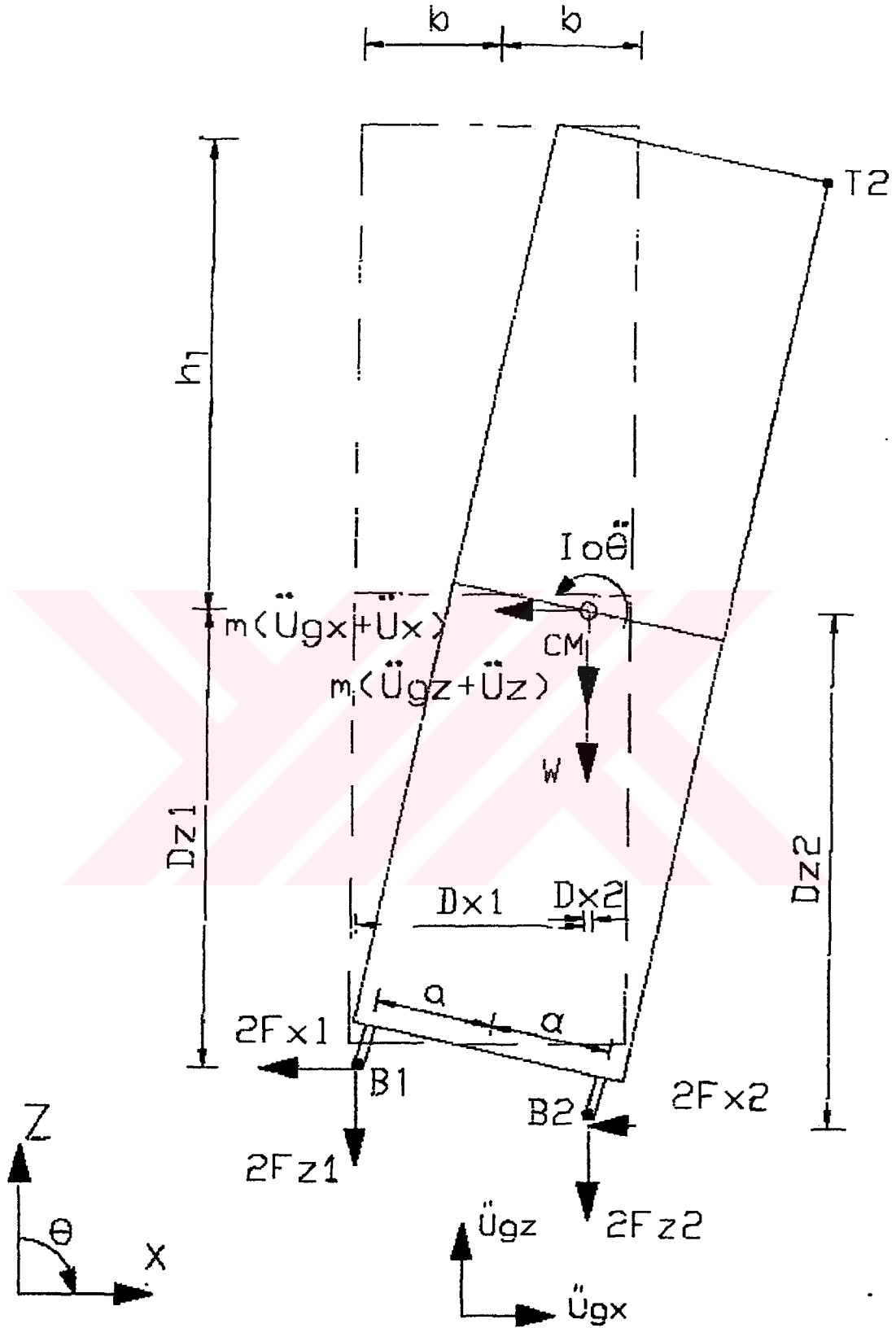
	EL CENTRO S00E YER HAREKETİ				EL CENTRO S00E 7 NCI KAT HAREKETİ				
	Deneysel	Zaman Tanım Alanı	Basitleştirilmiş Metod	Deneysel	Zaman Tanım Alanı	Basitleştirilmiş Metod	Deneysel	Zaman Tanım Alanı	Basitleştirilmiş Metod
Üst Seviyede Yatay İyeme (g)	0.546	0.516	0.616	1.057	0.872	0.984			
Üst Seviyede Yatay Deplasman (g)	4.753	4.868	4.736	11.860	11.762	15.220			
İzolatör Seviyesinde Yatay Deplasman (in)	0.401	0.467	0.505	0.749	1.182	1.300			
Güney Yöndeki İzolatörde Düşey Deplasman (in)	1.145	1.137	0.770	3.279	3.070	2.534			
Kuzey Yöndeki İzolatörde Düşey Deplasman (in)	0.844	0.914	0.770	2.705	3.133	2.534			

Çizelge 5.12 Sistem 1'e ait Şekil 5.30'deki Moment – Dönme grafiklerinden elde edilmiş özellikler. (1 in.=25.4 mm, 1 Kip = 4.46 kN) (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

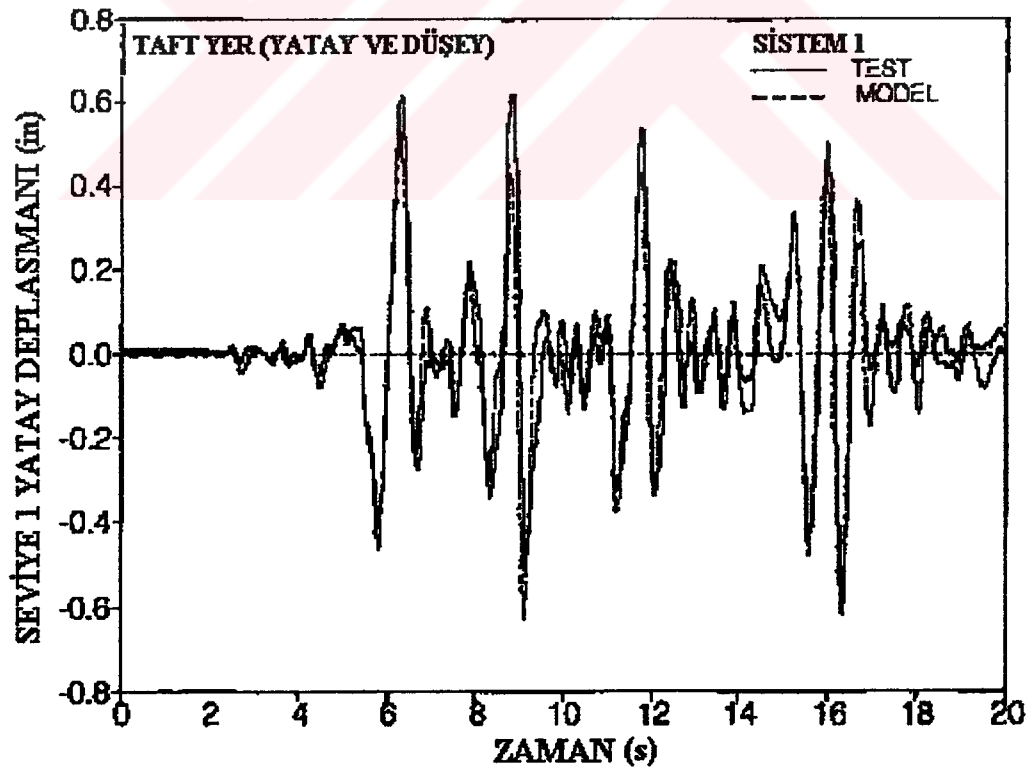
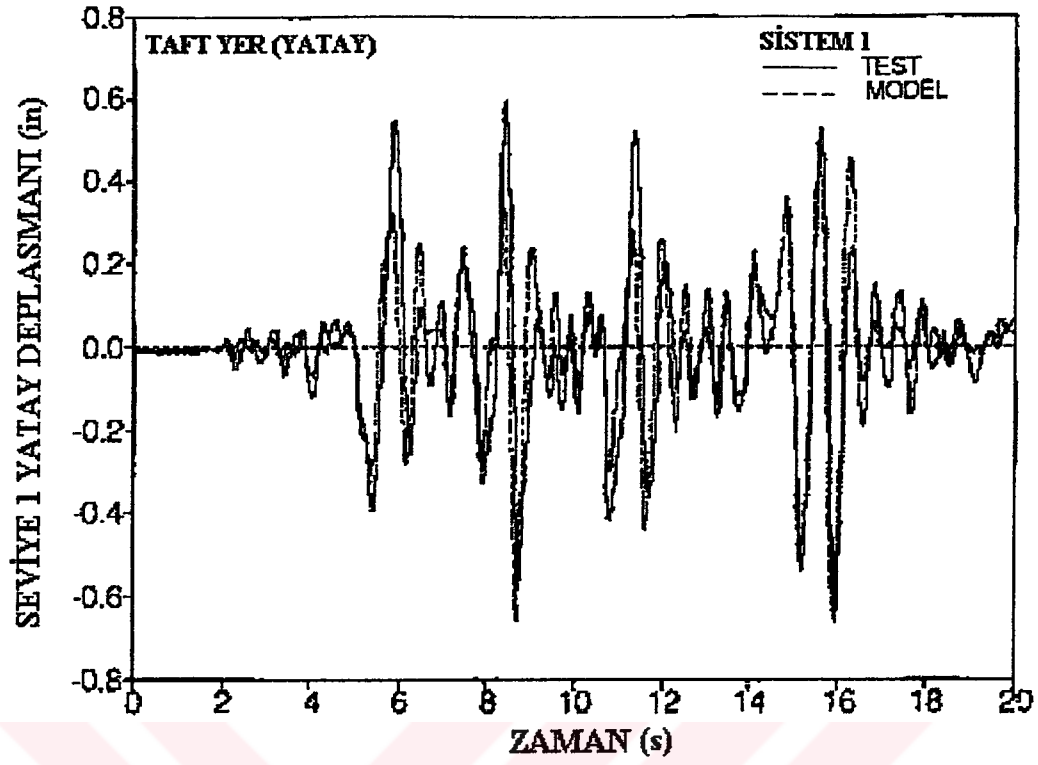
M / a (Kips)	2θa (in.)	K _z (Kip / in)	Etkin Periyod (sec)	Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı
0.423	0.590	0.360	0.86	0.132
0.600	1.000	0.300	0.94	0.098
0.730	1.513	0.241	1.04	0.074

Çizelge 5.13 Basitleştirilmiş Yöntemde kullanılan Sistem 1'e ait karakteristik değerler (1 in. = 25.4 mm, 1 Kip = 4.46 kN) (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

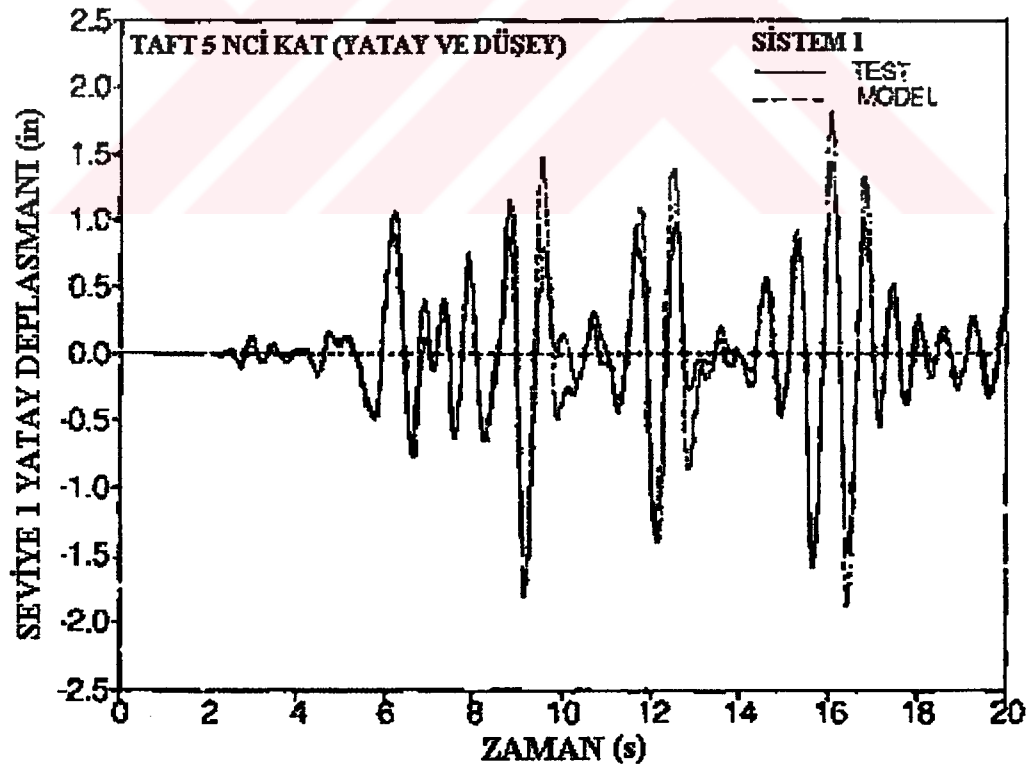
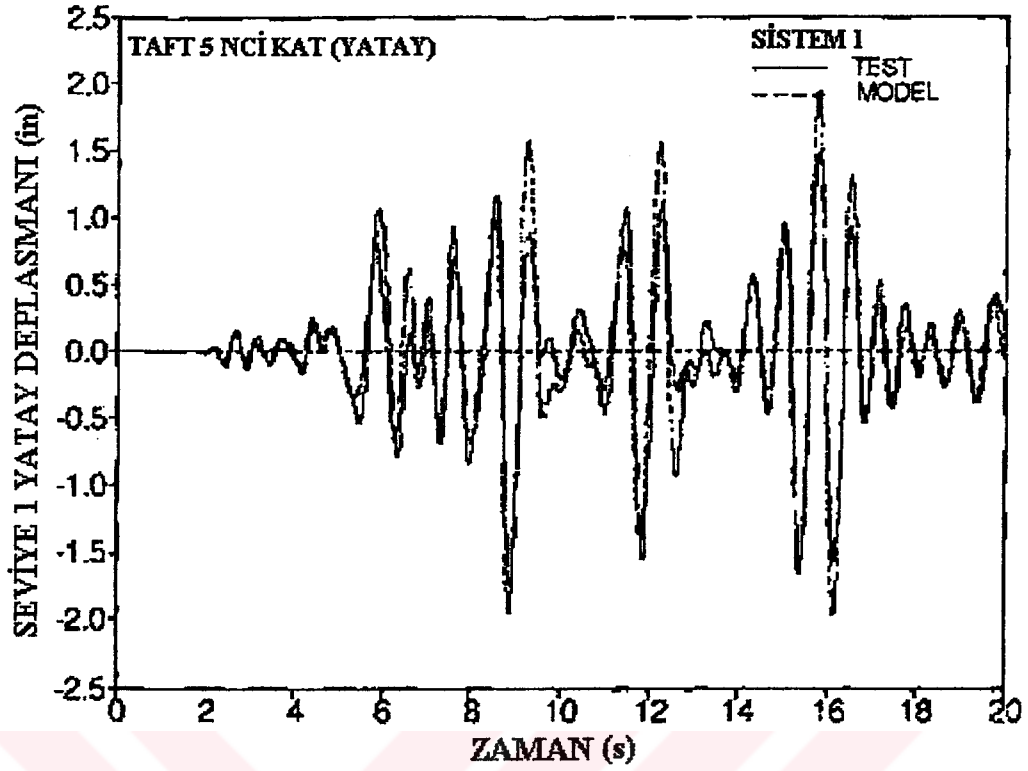
TITREŞİM	K_x (Kip / in)	K_z (Kip / in)	ω_1 (r / s)	ω_2 (r / s)	T_1 (s)	T_2 (s)	ξ_1	ξ_2
Taft Yer Hareketi	0.179	0.360	26.29	37.29	0.88	0.12	0.15	0.15
Taft 7 nci Kat Hareketi	0.179	0.300	26.29	34.04	0.96	0.12	0.10	0.10
El Centro Yer Hareketi	0.179	0.300	26.29	34.04	0.96	0.12	0.10	0.10
El Centro 7 nci Kat Hareketi	0.179	0.100	26.29	19.65	0.64	0.12	0.05	0.05



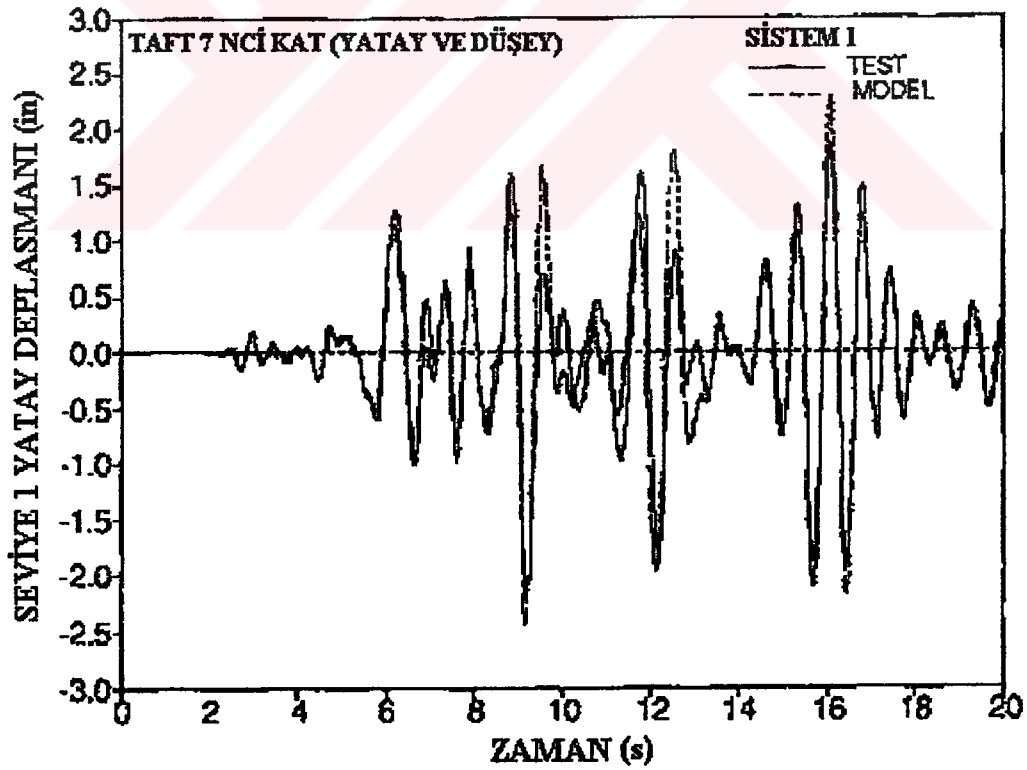
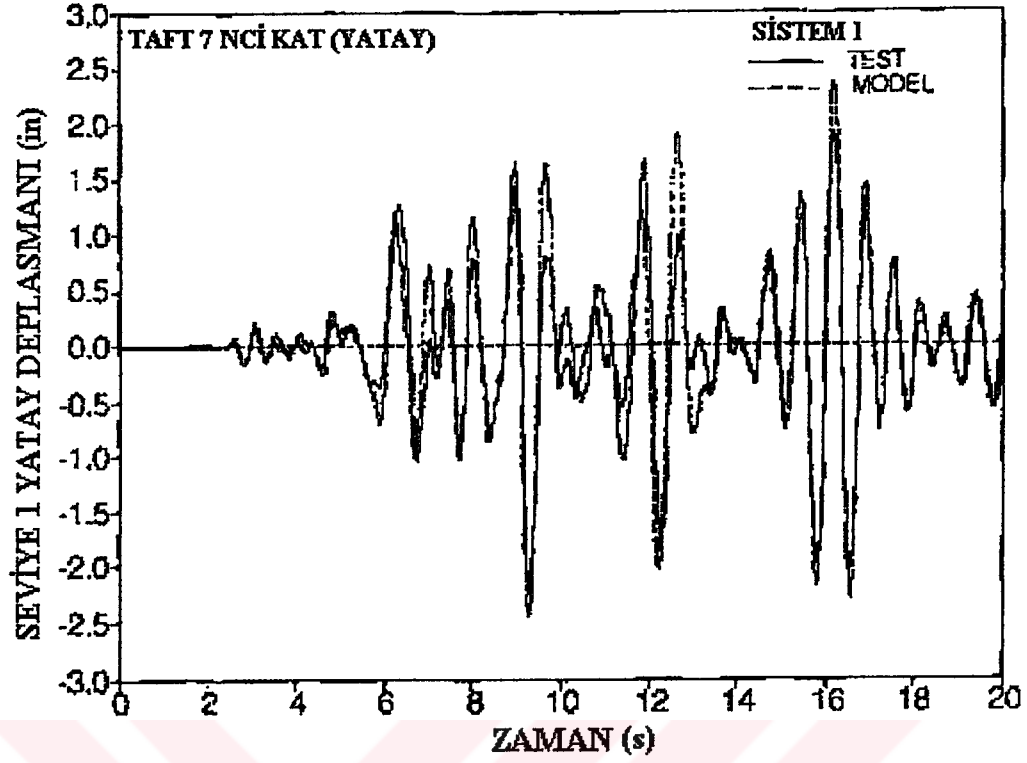
Şekil 5.10 Ekipmana ait serbest cisim diyagramı.
(Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



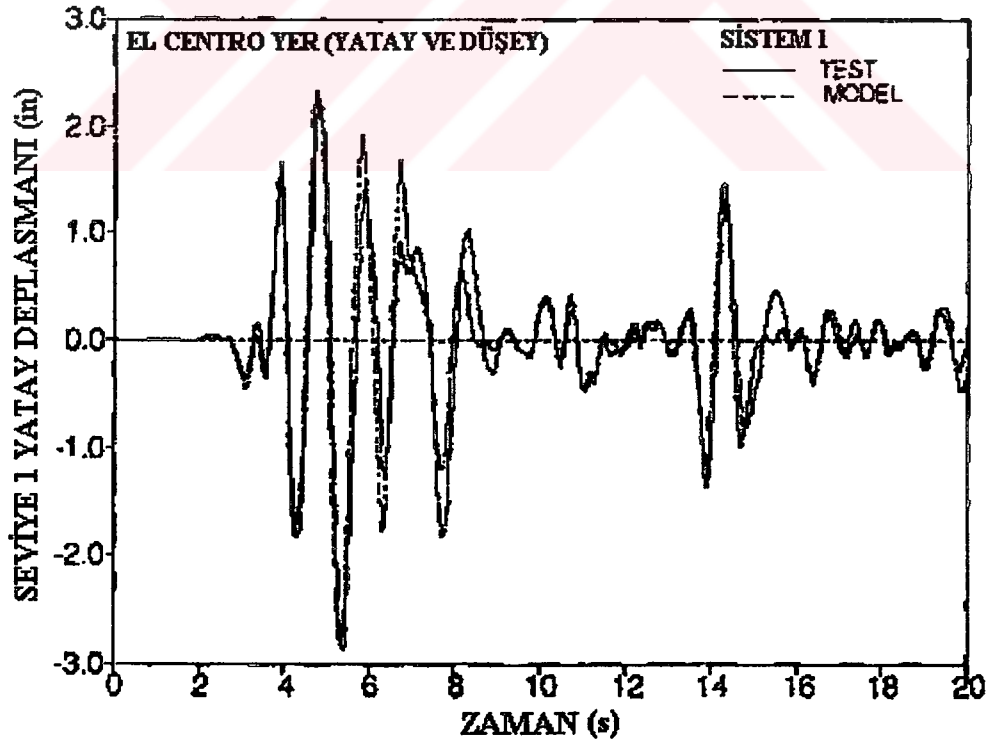
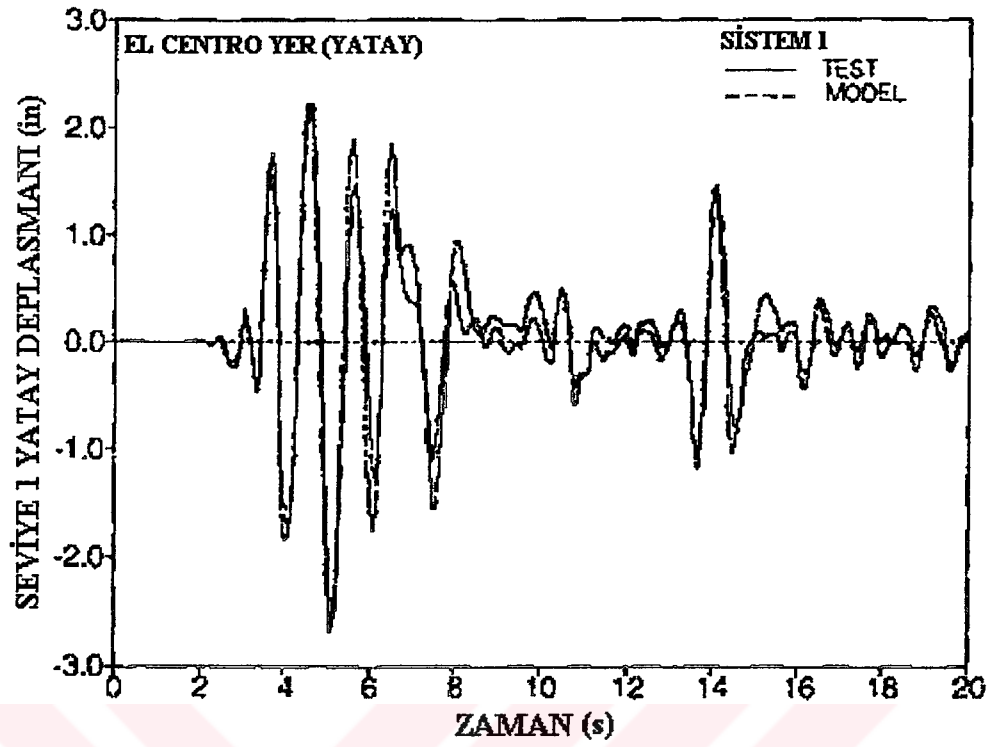
Şekil 5.11 Taft Yer Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



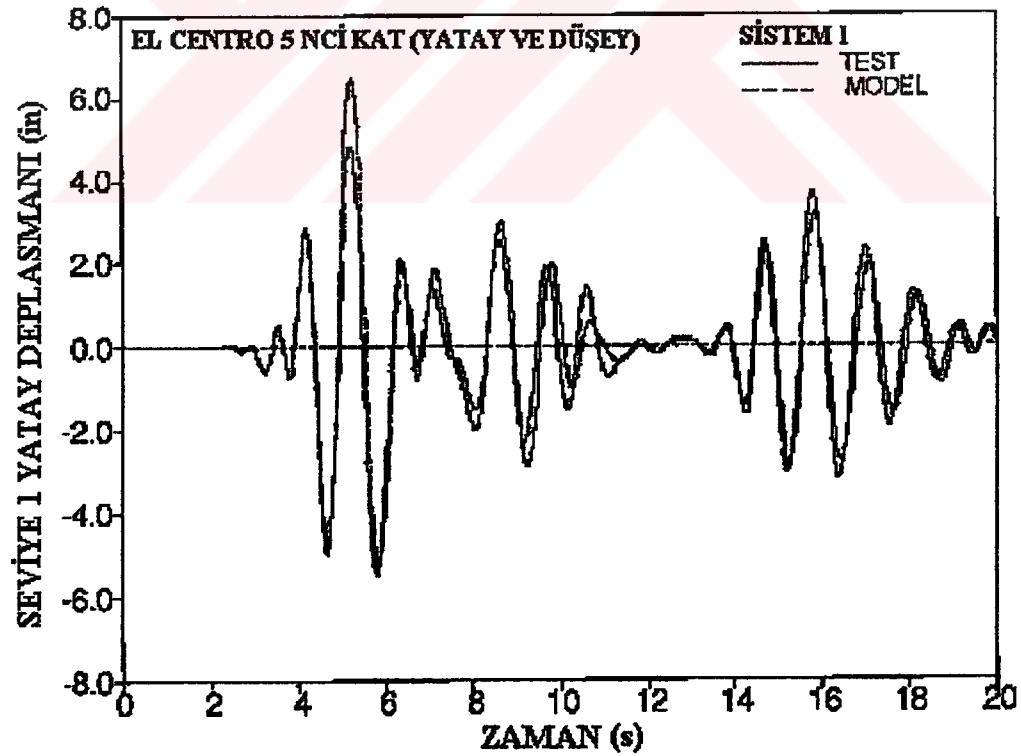
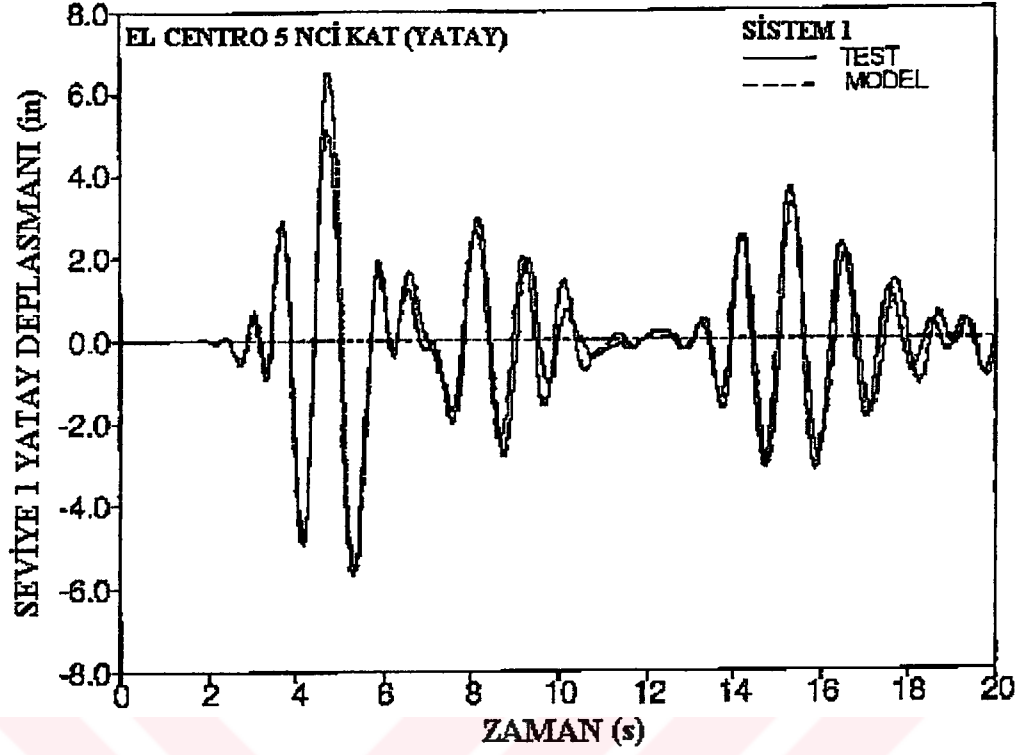
Şekil 5.12 Taft 5 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



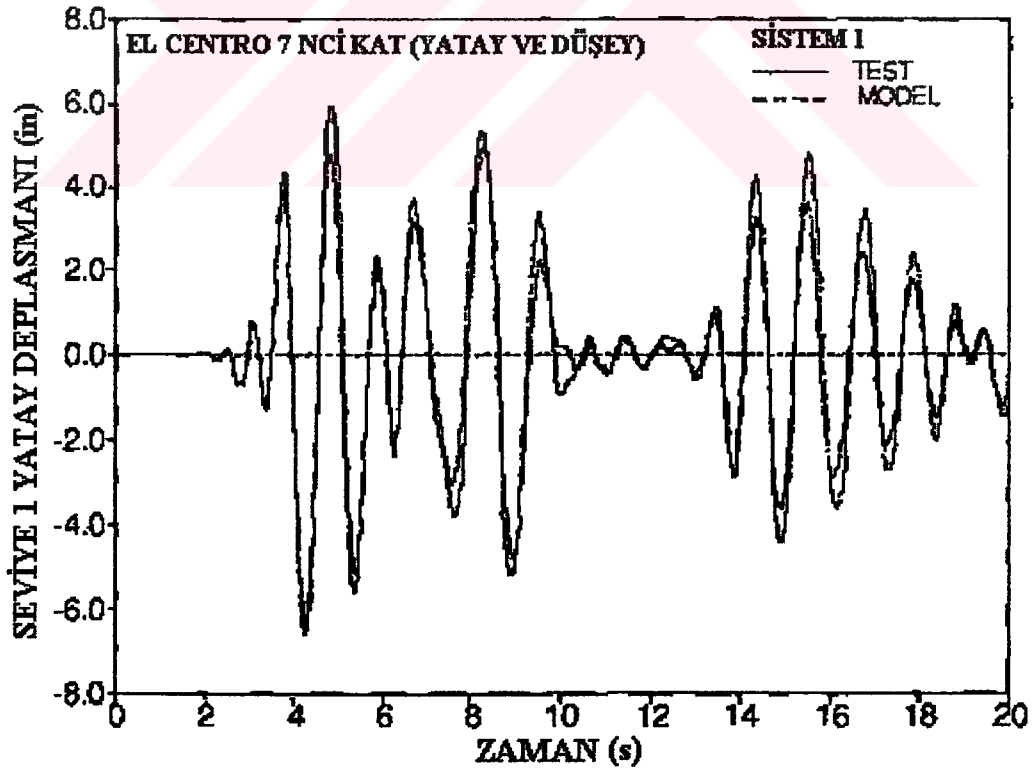
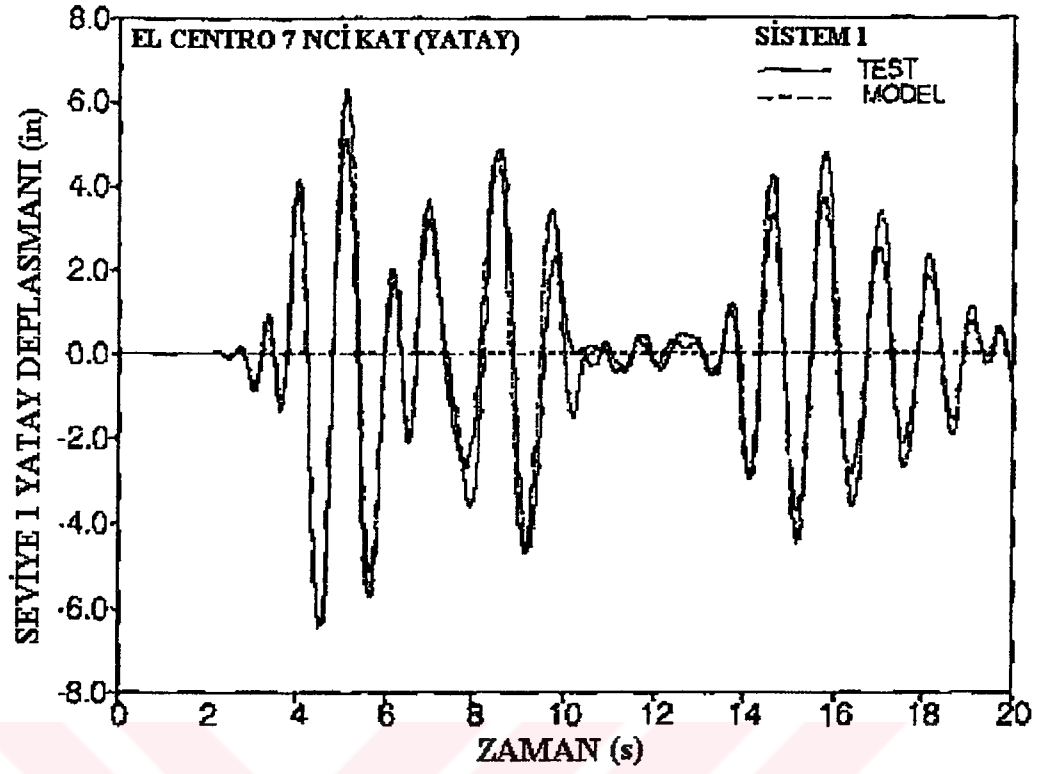
Şekil 5.13 Taft 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



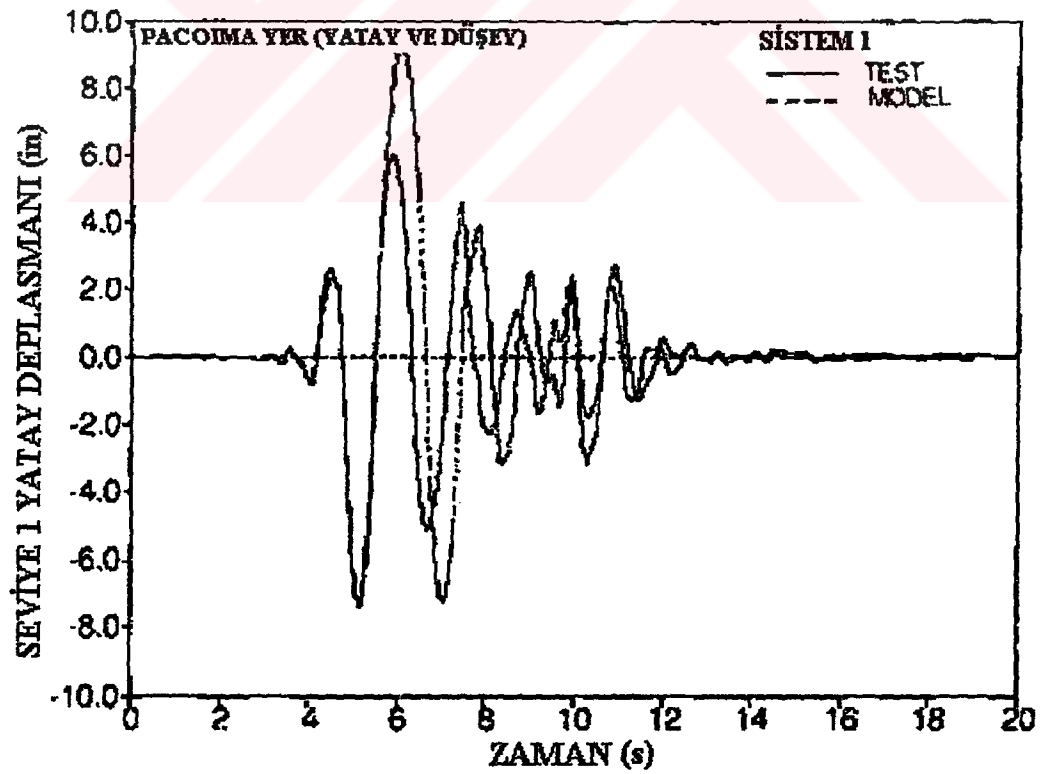
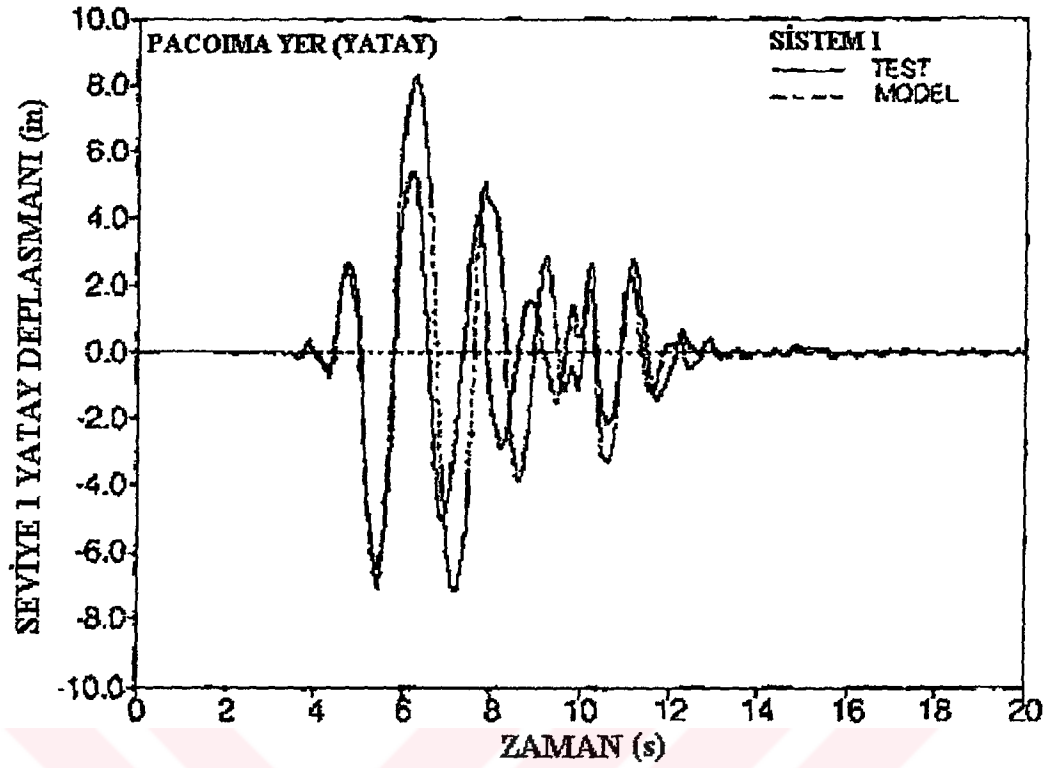
Şekil 5.14 El Centro Yer Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



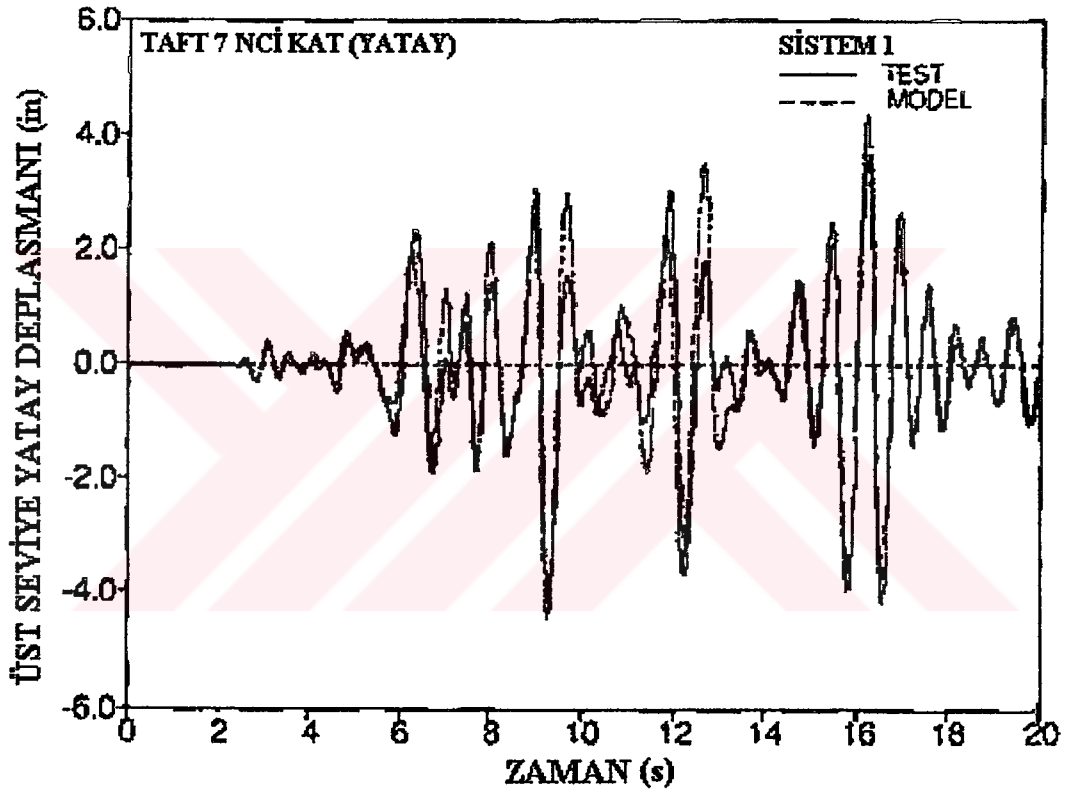
Şekil 5.15 El Centro 5 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



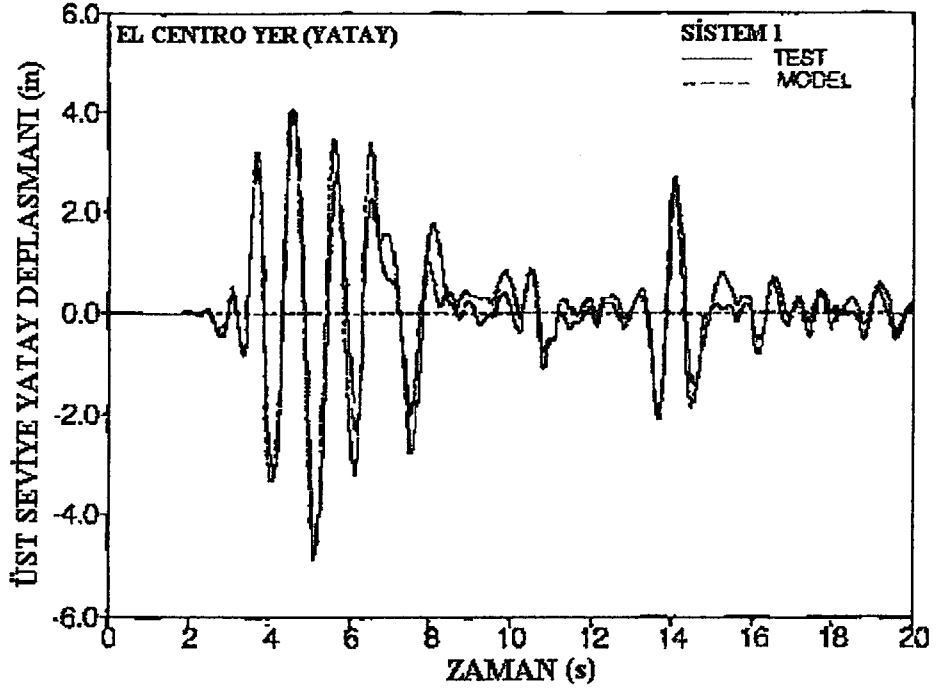
Şekil 5.16 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



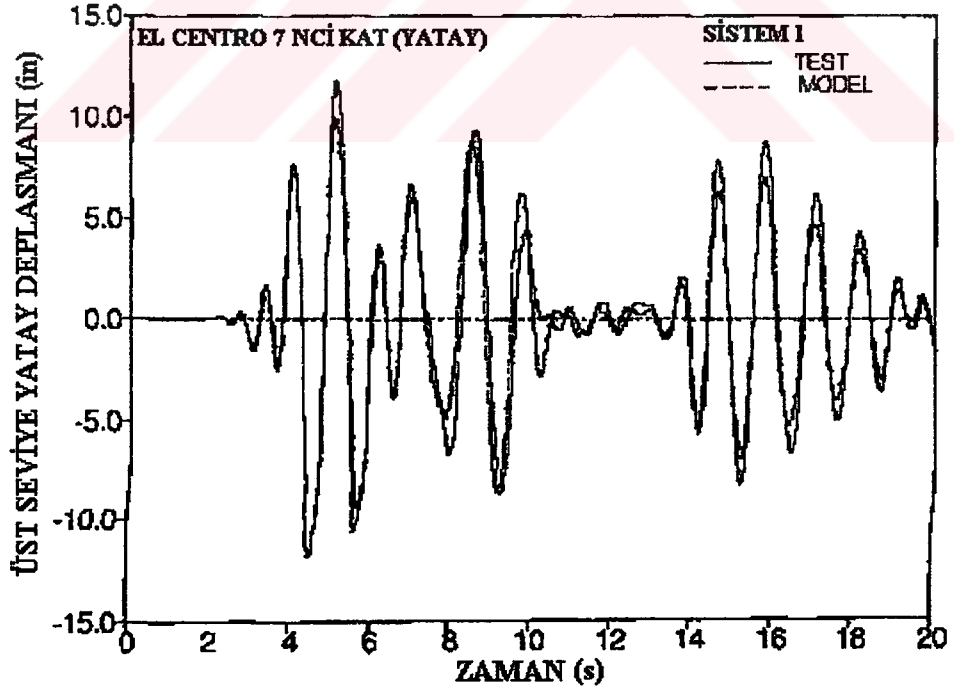
Şekil 5.17 Pacoima Yer Hareketi için, seviye 1 yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



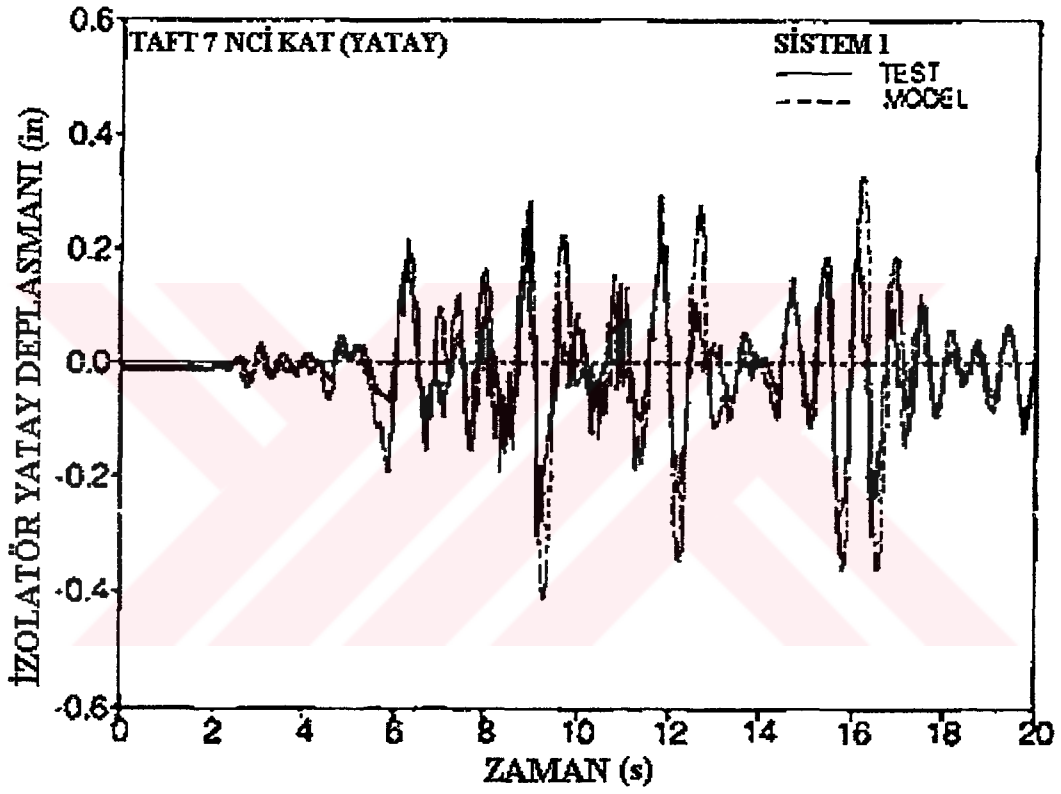
Şekil 5.18 Taft 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



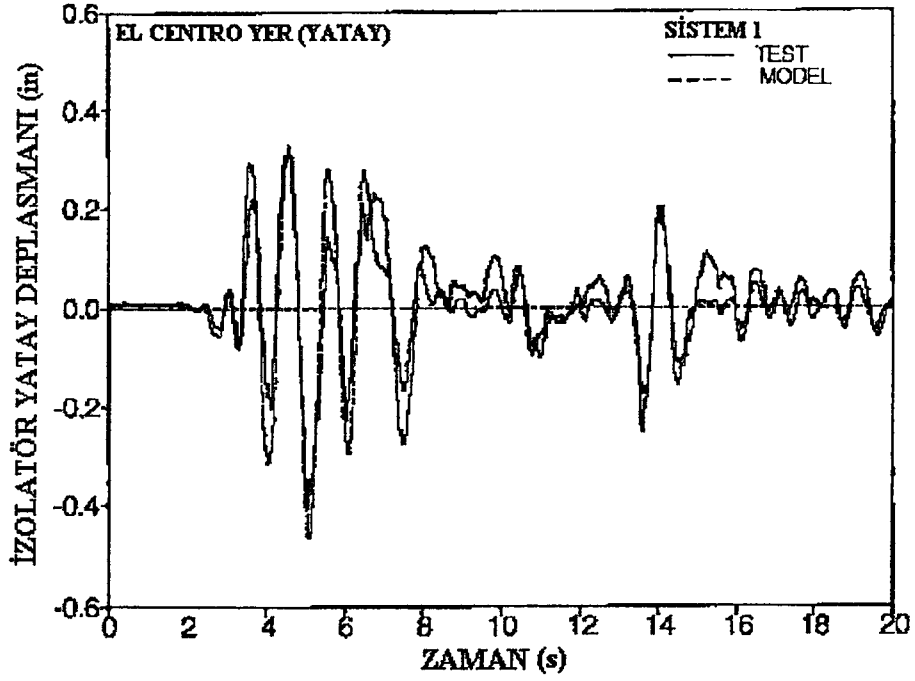
Şekil 5.19 El Centro Yer Hareketi için, üst seviye yatay deplasmanın deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



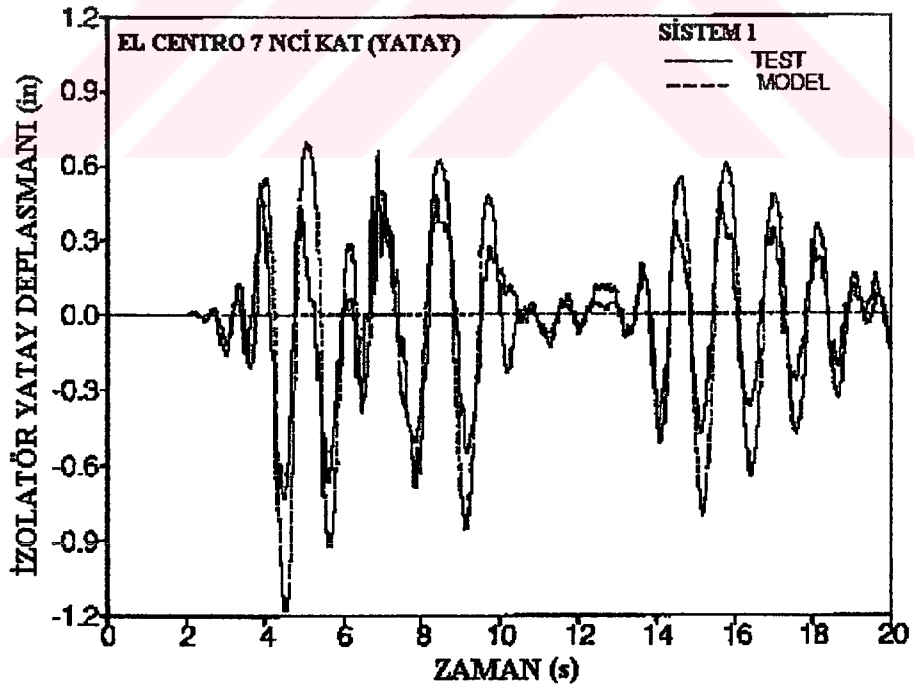
Şekil 5.20 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay deplasmanın deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



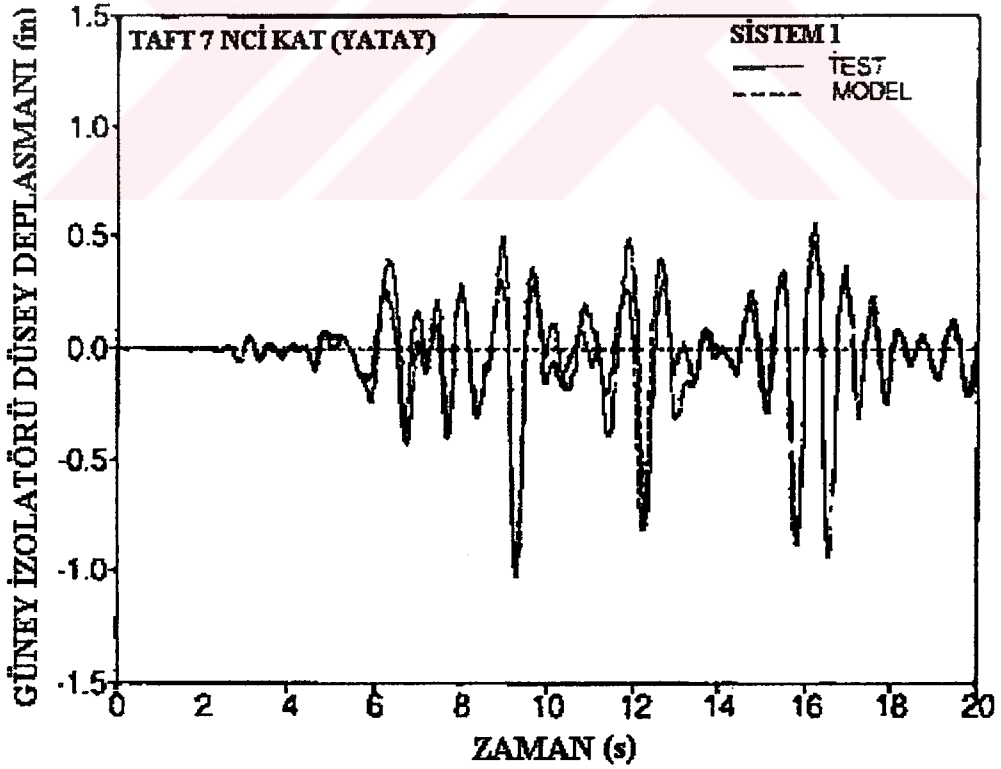
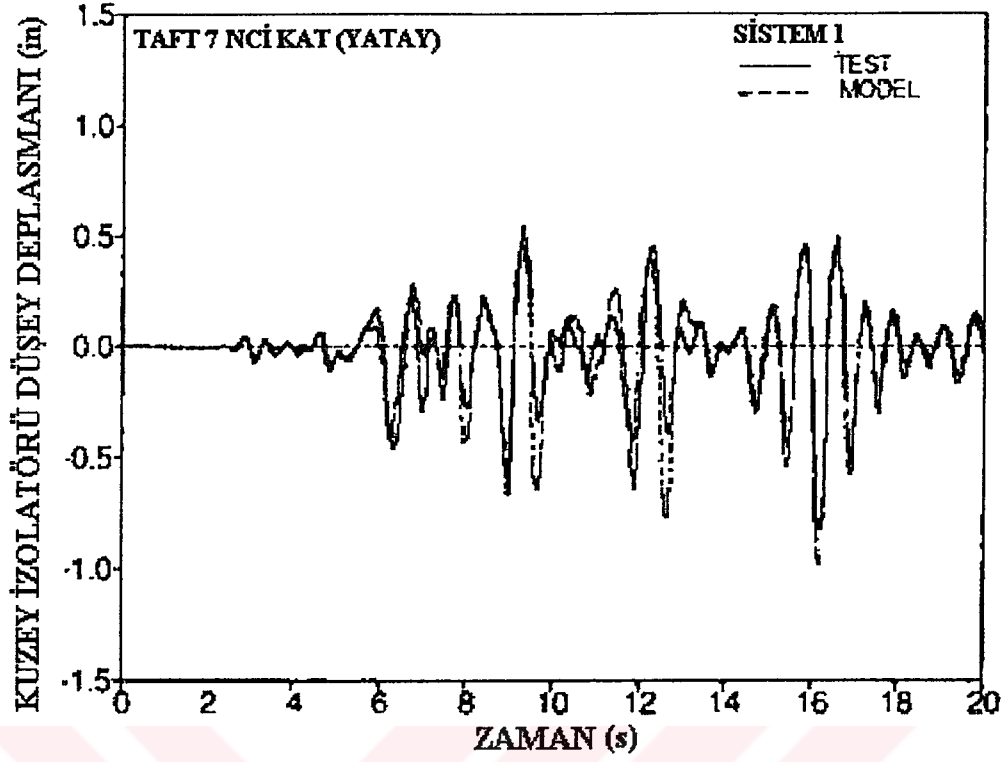
Şekil 5.21 Taft 7 nci Kat Hareketi için, izolatör yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



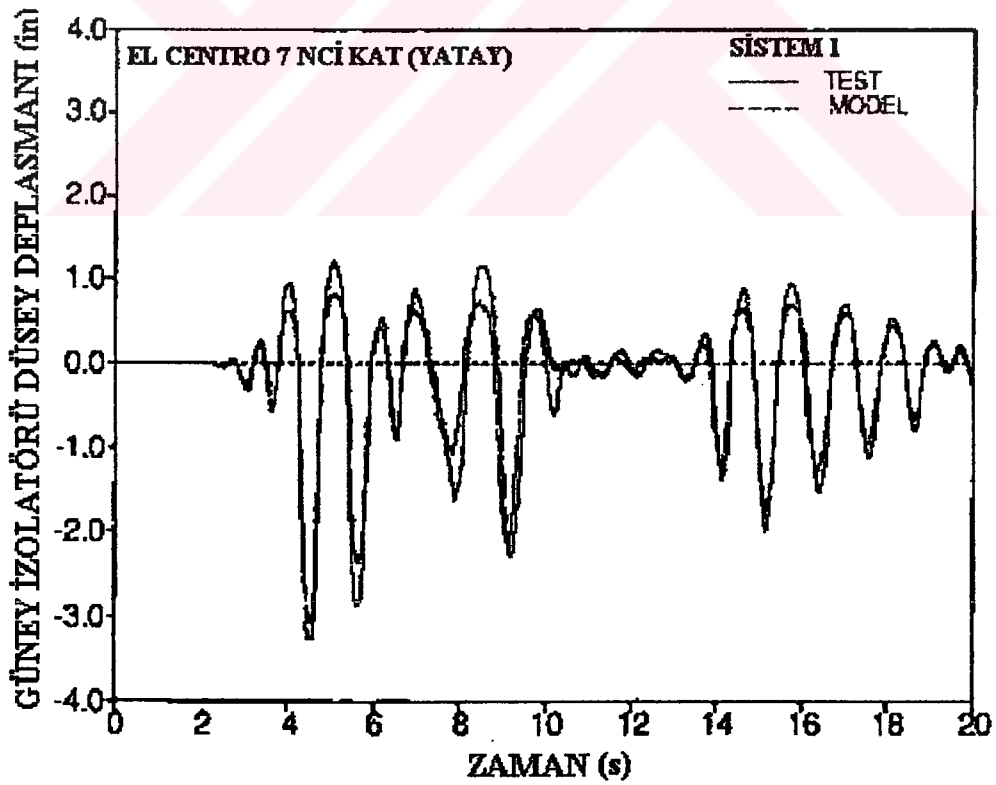
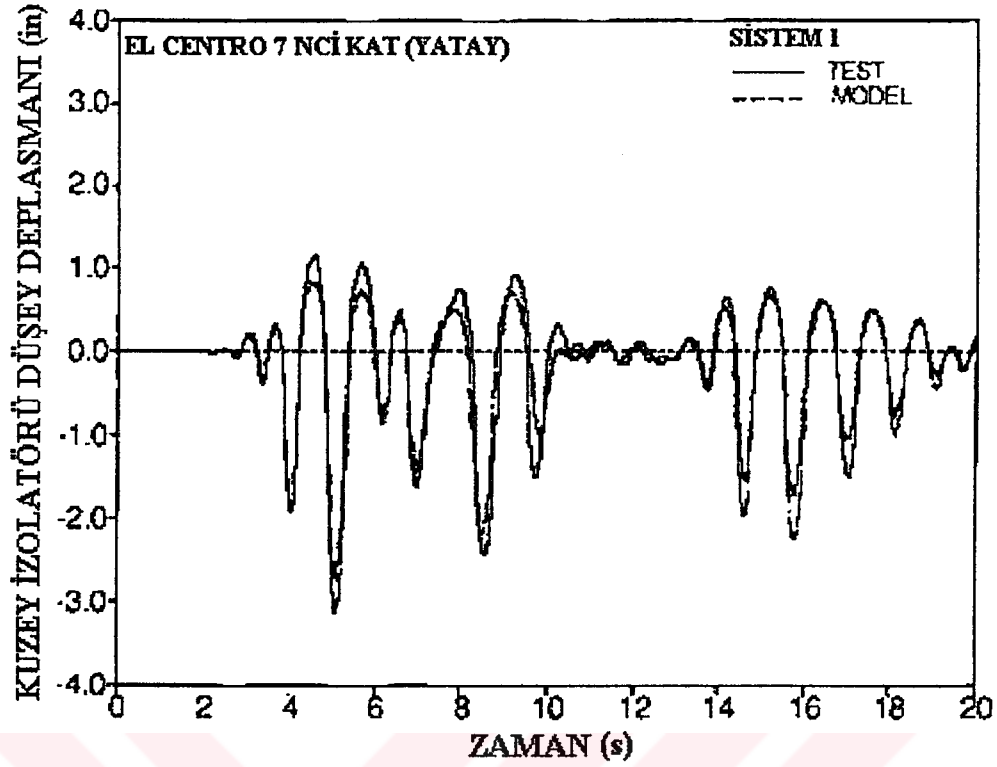
Şekil 5.22 El Centro Yer Hareketi için, izolatör yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



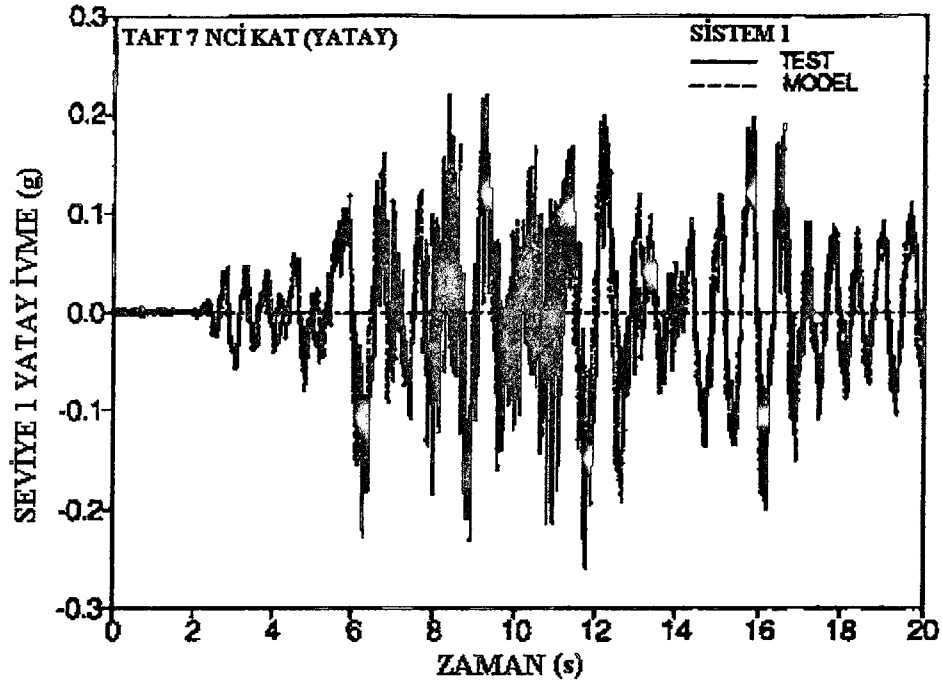
Şekil 5.23 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, izolatör yatay deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



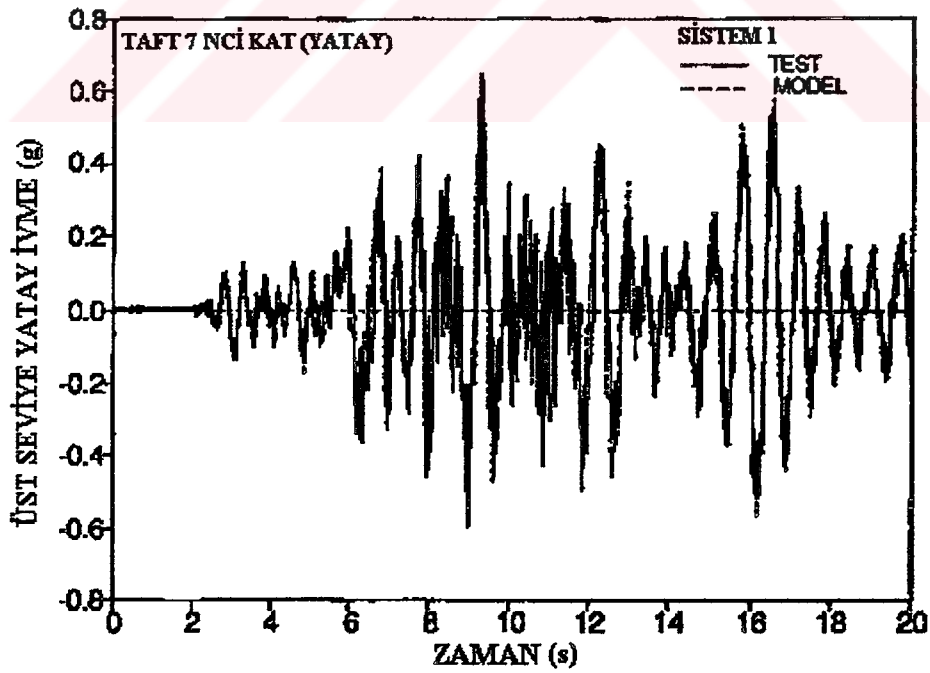
Şekil 5.24 Taft 7 nci Kat Hareketi için, izolatör düşey deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



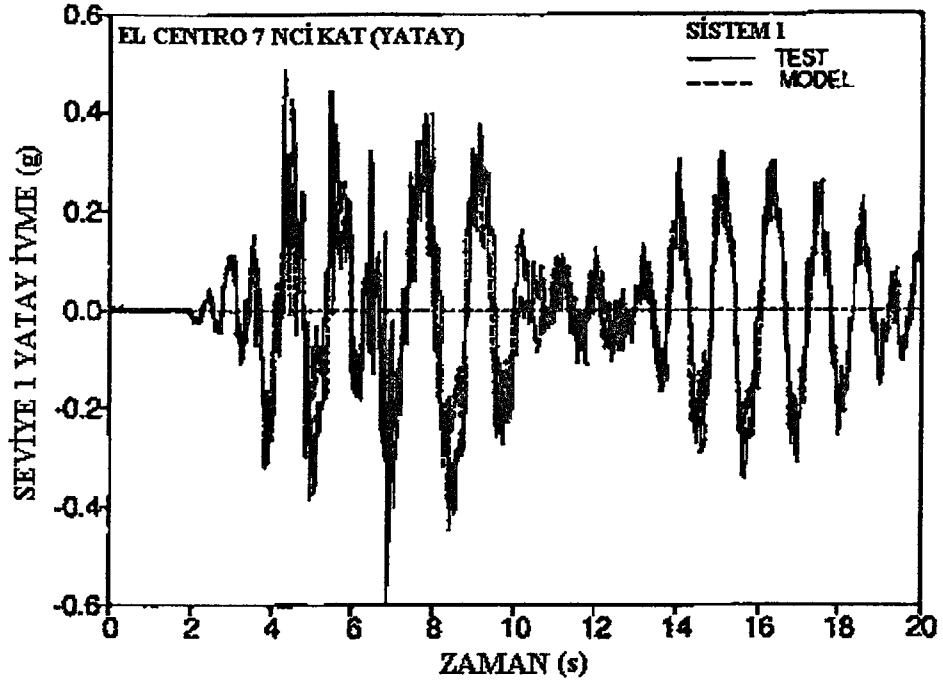
Şekil 5.25 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, izolatör düşey deplasmanının deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



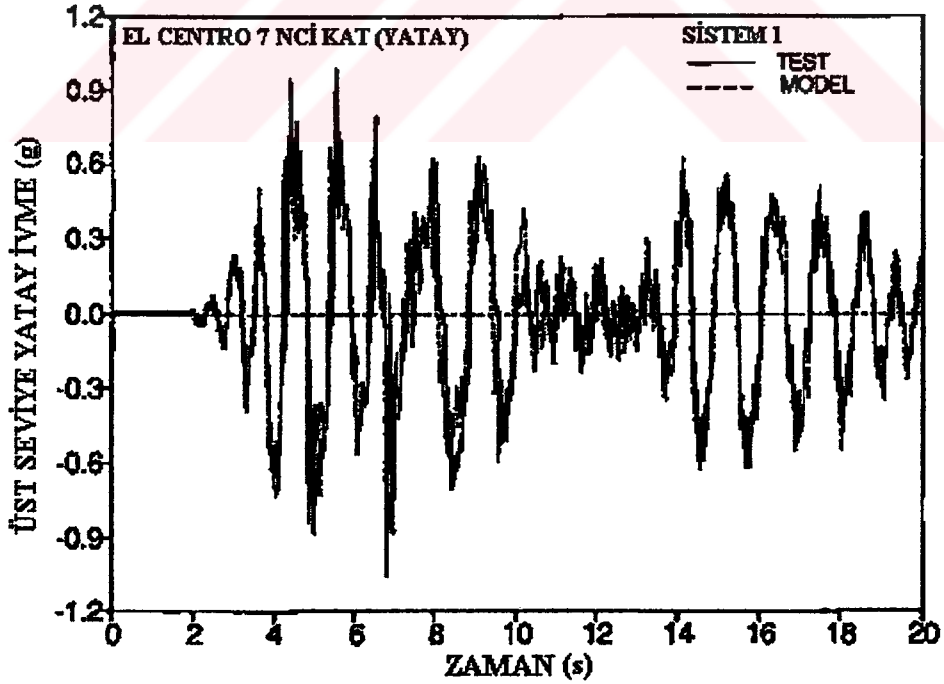
Şekil 5.26 Taft 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



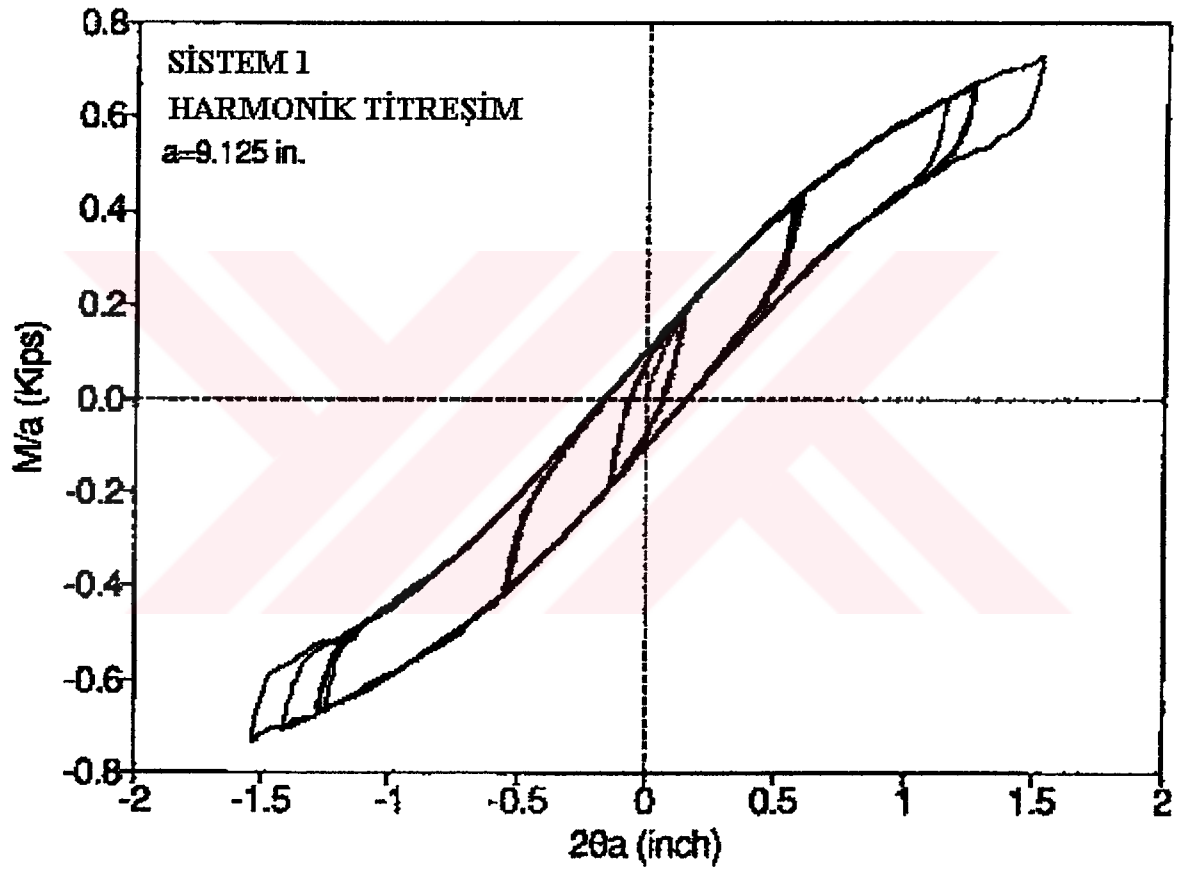
Şekil 5.27 Taft 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in. = 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 5.28 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, seviye 1 yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 5.29 El Centro 7 nci Kat Hareketi için, üst seviye yatay ivmesinin deneysel ve analitik zaman tanım alanlarının karşılaştırılması (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)



Şekil 5.30 Harmonik titreşim için sistem 1'e ait analitik moment – dönme ilişkisi (1 in.= 25.4 mm). (Demetriades G.F., Constantinou M.C. ve Reinhorn A.M., 1992)

6. SONUÇ

G.F.Demetriades, M.C.Constantinou ve A.M.Reinhorn'un, binalardaki ekipmanların sismik etkilere karşı korunması amacıyla çelik halat izolatörler için gerçekleştirdikleri deneysel ve analitik çalışmalar anlatılmıştır. Ekipmanın, çelik halat izolatör ile taşınması durumunda, çeşitli tasarım depremleri için sergilediği davranışlar incelenmiştir. Daha sonra, bu deneysel ve analitik çalışmalara ilave olarak, Demetriades, Constantinou ve Reinhorn'un, sistemin cevabı için geliştirdikleri analitik çözümlerden biri olan Basitleştirilmiş Yöntem için, Newmark'ın Nonlineer Cevap Analizi Yöntemi, Newton – Raphson İterasyonu ile birleştirilerek, yeni bir nümerik yaklaşım yapılarak elde edilen sonuçlar, deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

G.F.Demetriades, M.C.Constantinou ve A.M.Reinhorn'un çalışmaları göstermiştir ki; çelik halat izolatörler, hareketin genliğini büyütme yoluyla azalan bir histeretik sönüm davranışı sergilemektedir. Eşdeğer sönüm oranlarının tipik değerleri büyük deformasyonlar için 0.1 civarında, küçük deformasyonlar içinse 0.2 – 0.3 değer aralığında kalmıştır. Bu değerler, test edilen ekipmanın ivme cevabının düşürüldüğü sistemlerde ölçülmüştür.

Bu sonuçlara dayanılarak, daha rijit çelik halat izolatörlerin, çok küçük deplasmanlara izin vererek, bina içindeki ekipmana bir dereceye kadar sismik korunma sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Buna zıt olarak, sisteme ait periyodun girdi hareketinin baskın periyodunun üzerine çıkarmayı hedef alan klasik izolasyon yönteminin; a) uzun periyotlarda, zemin sismik hareketlerinin zengin olması ve b) deplasmanların ekipman için kabul edilemeyecek ölçülerde büyük olması nedenleriyle pratik olmadığı tespit edilmiştir.

Çelik halat izolatörlerin histeretik davranışını açıklayan analitik modeller Demetriades, Constantinou ve Reinhorn tarafından geliştirilmiş ve deneysel olarak da doğrulukları gösterilmiş ve ispatlanmıştır. Çelik halat izolatörler tarafından taşınan ekipmana ait cevabın analitik tahminleri, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sergilemiştir. Buna ilave olarak, Basitleştirilmiş Analiz Yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntemin, taşınan ekipmana ait uç değerlere yönelik güvenilir tahminler yapmaya muktedir olduğu gösterilmiştir. Metod, ekipman için alışılmış tasarım parametresi olan zemin cevap spektrasını kullanmaktadır.

Deneysel ve analitik sonuçlara yeni bir yaklaşım yapmak amacıyla, Newmark'ın Nonlineer Cevap Analizi Yöntemi, Newton – Raphson İterasyonu ile birlikte kullanılarak, Basitleştirilmiş Analiz Yöntemi için çözümler elde edilmiştir. Bu çözümler, MATLAB yazılım programı kullanılarak bulunmuştur. Elde edilen sonuç grafikleri, deneysel ve analitik

çalışmalardan elde edilen grafiklerle iyi bir uyum göstermiştir. Çok yüksek doğruluk sağlaması nedeniyle, nonlinear sistemler için geliştirilen nümerik yöntemlerin en popülerlerinden olan Newmark'ın metodunun, gerçekten iyi sonuçlar verdiği bir kez daha ispatlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Beer, F.P. ve Johnston, E.R. (1962). "Vector mechanics for engineers: dynamics." McGraw – Hill, Inc.
- Bouc, R. (1971). "Modele mathematique d'hysteresis." *Acustica*, 24 (1), 16 – 25.
- Buckle, I.G. ve Mayes, R.L. (1990). "Seismic isolation history, application and performance – a world view." *Earthquake Spectra*, 6 (2), 161 – 201.
- Celep, Z. Ve Kumbasar, N. (2000). "Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı", Beta Dağıtım, İstanbul.
- Chalhoub, M. ve Kelly, J.M. (1988). "Theoretical and experimental studies of cylindrical water tanks in base-isolated structures." Report No. UCB/EERC-88/07, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Chalhoub, M.S. ve Kelly, J.M. (1990). "Sliders and tension controlled reinforced elastomeric bearings combined for earthquake isolation." *Earthq.Engng.Struct.Dyn.*, 19, 333-334.
- Chen, Y.Q. ve Soong, T.T. (1988). "State-of-the-art review: Seismic response of secondary systems." *Engng.Struct.*, 10, 218-228.
- Chopra, A.K. (1995). "Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Clough, R.W. ve Penzien, J. (1975). "Dynamics of Structures", McGraw-Hill Co., New York, NY.
- Constantinou, M.C. ve Adnane, M.A. (1987). "Dynamics of soil-based-isolated-structure systems: Evaluation of two models for yielding systems." Report to the National Science Foundation, Dept. of Civil Engng., Drexel Univ., Philadelphia, PA.
- Constantinou, M.C. , Caccese, J. ve Harris, G.H. (1987). "Frictional characteristics of teflon-steel interfaces under dynamic conditions." *Earthquake and Structural Dynamics*, Cilt 15, 151-759.
- Constantinou, M.C., Mokha, A.S. ve Reinhorn, A.M. (1990a). "Teflon bearings in base isolation. II: Modeling." *J. Struct.Engng.*, ASCE, 116 (2), 455-474.
- Constantinou, M.C., Mokha, A.S. ve Reinhorn, A.M. (1990b). "Experimental and analytical study of combined sliding disc bearing and helical steel spring isolation system." Report No. NCEER-90-0019, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY.
- Constantinou, M.C., Mokha, A.S. ve Reinhorn, A.M. (1991). "Study of sliding bearing and helical-steel-spring isolation system." *J.Struct.Engng.*, ASCE, 147 (4), 1257-1275.
- Demetriades, G.F., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M. (1992). "Study of wire rope systems for seismic protection of equipment in buildings." Report No. NCEER-92-0012, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY.
- Erdik, M. ve Yüzügülü, Ö. (1980). "Deprem Mühendisliği Açısından Yapı Dinamiğine Giriş", T.C.İmar ve İskân Bakanlığı, Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara.

Fujita, T. (1991). "Seismic isolation and response control for nuclear and non-nuclear structures." Special Issue for the Exhibition of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 11), August 18-23, Tokyo, Japan.

Gear, C.W. (1971). "Numerical initial-value problems in ordinary differential equations" Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

IMSL Mathematical Library (1987). "Fortran library for mathematical applications." Subroutine IVPAG.

Juhn, G., Manolis, G.D., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M. (1992). "Experimental study of secondary systems in a base-isolated structure." J. Struct. Engng., ASCE.

Kamke, E. (1959). "Differentialgleichungen lösungsmethoden und lösungen." Chelsea Publishing Co., New York, NY.

Kelly, J.M. (1982). "The influence of base isolation on the seismic response of light secondary equipment." Report No. UCB/EERC – 81/17, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Kelly, J.M. ve Tsai, H.C. (1985). "Seismic response of light internal equipment in base-isolated structures." Earthquake Engng. Struct. Dyn., 13, 711-732.

Kelly, J.M. (1988). "Base isolation in Japan, 1988" Report No. EERC 88-20, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

Kelly, J.M. (1991). "Base isolation: origins and development." News-Earthquake Engng. Res. Ctr., University of California, Berkeley, California, 12 (1), 1-3.

Lin, J. ve Mahin, S.A. (1985). "Seismic response of light subsystems on inelastic structure." J. Struct. Engng., ASCE, 111 (2), 400-417.

Makris, N. (1992a). "Theoretical and experimental investigation of viscous dampers in applications of seismic and vibration isolation." Ph.D. Dissertation, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.

Makris, N. ve Constantinou, M.C. (1992b). "Spring-viscous damper systems for combined seismic and vibration isolation." Earthquake Engng. And Struct. Dynamics, Vol.21.

Manolis, G.D., Juhn, G., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M. (1990). "Secondary systems in base isolated structures: Experimental investigation, stochastic response and stochastic sensitivity." Report No. NCEER-90-0013, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY.

Mokha, A., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M. (1990). "Experimental study and analytical prediction of earthquake response of a sliding isolation system with a spherical surface." Report No. NCEER-90-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY.

Mokha, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M. ve Zayas, V. (1991). "Experimental study of friction pendulum isolation system." J. Struct. Engng., ASCE, 117 (4), 1201-1217.

Naeim, F. ve Kelly, J.M. (1999). "Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice" John Wiley & Sons, Inc. New York, NJ.

Okamoto, S., Nakata, S., Kitagawa, Y., Yoshimura, M. ve Kaminosono, T. (1985). "Progress report on the full-scale seismic experiment of a seven-story reinforced concrete building-part of U.S. - Japan cooperative program." Research paper No.94, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan.

Özdemir, H. (1976). "Nonlinear transient dynamic analysis of yielding structures." Thesis presented to the University of California, at Berkeley, California, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Park, Y.J., Reinhorn, M. ve Kunnath, S.K. (1987). "IDARC: inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures." Report No. NCEER-87-0008, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.

Singh, M.P. (1988). "Seismic design of secondary systems" *Prob. Engng. Mech.*, 3 (3), 151-158.

Tsai, H.C. ve Kelly, J.M. (1989). "Seismic response of the superstructure and attached equipment in a base-isolated building." *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 18, 551-564.

Wen, Y.K. (1976). "Method of random vibration of hysteretic systems." *J. Engng. Mech. Div., ASCE*, 102 (2), 249-263.

Zayas, V., Low, S.S. ve Mahin, S.A. (1987). "The FPS earthquake resisting system, experimental system, experimental report." Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, CA.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	18.10.1976	
Doğum yeri	Beyşehir	
Lise	1991-1994	Kayseri Fen Lisesi
Lisans	1994-1998	İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1999-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1998-1998	Uzay Sitem Prefabrik Çelik Konstrüksiyon Ltd Şti.
1999-1999	Deniz Kuvvetleri Komutanlığı
1999-2001	Millî Savunma Bakanlığı, İzmit İnşaat Emlak Başkanlığı
2001-2002	Millî Savunma Bakanlığı, İnşaat Emlak ve NATO Enfrastrüktür Dairesi Başkanlığı