

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPILARDA DEĞİŞKEN FREKANSLI
SÜRTÜNMELİ ELEMANLAR İLE SİSMİK
KONTROL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Cüneyt AYHAN**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2005

**YAPILARDA DEĞİŞKEN FREKANSLI SÜRTÜNMELİ
ELEMANLAR İLE SİSMİK KONTROL**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Cüneyt AYHAN
501021158

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2005

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Abdullah GEDİKLİ
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ertaç ERGÜVEN (İ.T.Ü)
Y.Doç.Dr. Zafer KÜTÜĞ (Y.T.Ü)

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Günümüzde depreme dayanıklı yapılar için yeni tasarım yöntemleri geliştirilmekte, aktif ya da pasif sismik kontrol sistemleri üzerinde çalışılmaktadır. Pasif kontrol sistemleri hem daha ucuz, hem de uygulaması daha kolay sistemlerdir. Elastomerler, sürtünmeli sarkaç, kütle-sönümleyici-yay sistemleri pasif sistemlere birkaç örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmada, birbirinden bağımsız izolatörler içeren yapıların sayısal analizi için geliştirilmiş çözüm algoritması yardımıyla; sürtünmeli izolatörlerin, deprem etkisiyle yapıda oluşan olumsuz etkileri ne ölçüde değiştirdiği ve VFPI tipindeki izolatörlerin, FPI tipindeki izolatörler karşısında olumlu veya olumsuz yanlarının olup olmadığı araştırılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde zamanını ve bilgilerini benimle paylaşan hocam Y.Doç.Dr. Abdullah Gedikli'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2005

Cüneyt AYHAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Sismik İzolasyon Teknikleri	2
1.1.1. Elastik davranışlı ilk kat	2
1.1.2. Plastik davranışlı ilk kat	2
1.1.3. Temel izolasyonu	3
1.1.4. Elastomerler	4
1.1.4.1. Düşük sönümlü elastomerler	5
1.1.4.2. Kurşun gövdeli elastomerler	6
1.1.4.3. Yüksek sönümlü elastomerler	6
1.1.5. Sürtünmeli izolatörler	7
1.1.5.1. Sürtünmeli sarkaç	7
1.1.5.2. Sürtünme dayanımlı izolatör	8
1.2. Hareketli Mesnetlenmiş Sürtünmeli Sistemler	9
2. TEMEL DENKLEMLER	12
2.1. Problemin Çözümü İçin Yapılan Kabuller	12
2.2. Hareket Denklemi	13
2.2.1. Hareket denkleminin çözümü	13
2.2.2. Kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz	18
2.3. Sayısal Çözüm Yöntemi	19
2.4. Sürtünmeli Sarkaç ve Eşdeğer Yay Modeli	22
2.5. Değişken Frekanslı Sürtünmeli Sarkaç Tipli İzolatörler ve Eşdeğer Yay Modeli (VFPI)	24
3. SAYISAL UYGULAMALAR	27
3.1. Hareketli Mesnetlenmiş 4 Katlı Düzlem Çerçeve Modeli	28
3.1.1. Harmonik yer hareketi ile analiz	31

3.1.2. El-Centro deprem ivme kaydı ile analiz	34
3.1.3. Kocaeli deprem ivme kaydı ile analiz	36
3.1.4. Düzce deprem ivme kaydı ile analiz	39
3.2. Üç Açıklıklı Köprü Modeli	41
3.2.1. Elcentro deprem ivmeleri ile analiz	44
3.2.1.1. VFPI’li sistem için analiz	44
3.2.1.2. FPS’li sistem için analiz	47
3.2.2. Kocaeli depremi ile analiz	50
3.2.2.1. VFPI’li sistem için analiz	50
3.2.2.2. FPS’li sistem için analiz	53
3.2.3. Düzce depremi ile analiz	56
3.2.3.1. VFPI’li sistem için analiz	56
3.2.3.2. FPS’li sistem için analiz	59
4. SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

FPS : Frictional Pendulum System
VFPI : Variable Frequency Pendulum Isolator

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Model için yapılan tüm çözümler.....	27
Tablo 3.2. Sistem için yapılan çözümler.....	28
Tablo 3.3. Köprü elamanlarının özellikleri.....	42
Tablo 3.4. Analizler sonunda tabliyede oluşan maksimum mutlak deplasmanlar.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Şematik ivme spektrum eğrisi.....	4
Şekil 1.2 : Elastomer tipindeki izolatör.....	5
Şekil 1.3 : Elastomer tipindeki izolatör.....	5
Şekil 1.4 : Düşük sönümlü elastomer.....	6
Şekil 1.5 : Kurşun gövdeli elastomer.....	7
Şekil 1.6 : Sürtünmeli sarkaç sistemi.....	8
Şekil 1.7 : Sürtünme dayanımlı izolatör.....	9
Şekil 2.1 : Sürtünme kuvvetinin $[t_{k-1}, t_k]$ zaman aralığındaki değişimi.....	16
Şekil 2.2 : Çözüm yöntemi ile ilgili akış şeması.....	22
Şekil 2.3 : Sürtünmeli sarkaç sisteminin parametreleri.....	23
Şekil 2.4 : Hareketli mesnetlenmiş eğrisel yüzeyli tek serbestlik dereceli yapının analitik modeli.....	26
Şekil 3.1 : Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve ve matematiksel model.....	29
Şekil 3.2 : İzolatörde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrisi, Harmonik.....	31
Şekil 3.3 : İzolatörde hız - kesme kuvveti diyagramı, Harmonik.....	32
Şekil 3.4 : Temel bloğunun yere göre deplasmanı, Harmonik.....	32
Şekil 3.5 : İzole edilmiş ve edilmemiş sistemin ilk kat kolonları kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması, Harmonik.....	33
Şekil 3.6 : Şekil değiştirme enerjisinin karşılaştırılması, Harmonik.....	33
Şekil 3.7 : İzolatörde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrisi, Elcentro.....	34
Şekil 3.8 : İzolatörde hız - kesme kuvveti diyagramı, Elcentro.....	34
Şekil 3.9 : Üst katın zemine göre deplasmanı, Elcentro.....	35
Şekil 3.10 : Temel bloğunun zemine göre deplasmanı, Elcentro.....	35
Şekil 3.11 : İzole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasmanı, Elcentro.....	36
Şekil 3.12 : İzolatörde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrisi, Kocaeli.....	36
Şekil 3.13 : İzolatörde hız - kesme kuvveti diyagramı, Kocaeli.....	37

Şekil 3.14 : Üst katın zemine göre deplasmanı, Kocaeli.....	37
Şekil 3.15 : Temel bloğunun zemine göre deplasmanı, Kocaeli.....	38
Şekil 3.16 : İzole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasmanı, Kocaeli.....	38
Şekil 3.17 : İzolatörde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrisi, Düzce.....	39
Şekil 3.18 : İzolatörde hız - kesme kuvveti diyagramı, Düzce.....	39
Şekil 3.19 : Üst katın zemine göre deplasmanı, Düzce.....	40
Şekil 3.20 : Temel bloğunun zemine göre deplasmanı, Düzce.....	40
Şekil 3.21 : İzole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasmanı, Düzce.....	41
Şekil 3.22 : Üç açıklıklı simetrik olmayan köprü ve boyutları.....	41
Şekil 3.23 : Üç açıklıklı köprü için kurulan matematiksel model.....	42
Şekil 3.24 : İzolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri, Elcentro, VFPI.....	44
Şekil 3.25 : İzolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları, Elcentro, VFPI.....	45
Şekil 3.26 : İzolatörlerde rölatif deplasmanlar, Elcentro, VFPI.....	46
Şekil 3.27 : İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları, Elcentro, VFPI.....	46
Şekil 3.28 : İzolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri, Elcentro, FPS.....	47
Şekil 3.29 : İzolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları, Elcentro, FPS.....	48
Şekil 3.30 : İzolatörlerde rölatif deplasmanlar, Elcentro, FPS.....	49
Şekil 3.31 : İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları, Elcentro, FPS.....	49
Şekil 3.32 : İzolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri, Kocaeli, VFPI.....	50
Şekil 3.33 : İzolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları, Kocaeli, VFPI.....	51
Şekil 3.34 : İzolatörlerde rölatif deplasmanlar, Kocaeli, VFPI.....	52
Şekil 3.35 : İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları, Kocaeli, VFPI.....	52
Şekil 3.36 : İzolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri, Kocaeli, FPS.....	53
Şekil 3.37 : İzolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları, Kocaeli, FPS.....	54
Şekil 3.38 : İzolatörlerde rölatif deplasmanlar, Kocaeli, FPS.....	55
Şekil 3.39 : İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları, Kocaeli, FPS.....	55
Şekil 3.40 : İzolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri, Düzce, VFPI.....	56
Şekil 3.41 : İzolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları, Düzce, VFPI.....	57
Şekil 3.42 : İzolatörlerde rölatif deplasmanlar, Düzce, VFPI.....	58
Şekil 3.43 : İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları, Düzce, VFPI.....	58

Şekil 3.44 : İzolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri, Düzce, FPS.....	59
Şekil 3.45 : İzolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları, Düzce, FPS.....	60
Şekil 3.46 : İzolatörlerde rölatif deplasmanlar, Düzce, FPS.....	61
Şekil 3.47 : İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları, Düzce, FPS.....	61
Şekil 3.48 : İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı, El-Centro.....	62
Şekil 3.49 : İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı, Kocaeli.....	62
Şekil 3.50 : İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı, Düzce.....	63

SEMBOL LİSTESİ

A	: Sistem davranış matrisi
B	: Sürtünme kuvveti matrisi
C	: Sönüm matrisi
E	: Dış yük yer gösterme matrisi
F	: İzolatörde kesme kuvveti matrisi
K	: Sistem rijitlik matrisi
M	: Sistem kütle matrisi
μ	: Sürtünme katsayısı
R	: İzolatör eğrilik yarıçapı
T	: Dönüşüm matrisi
T	: Period
u	: Rölatif deplasman
u	: Öngörülen durum vektörü
v	: Öngörülen rölatif hız
y	: Rölatif hız
w	: Deprem ivmesi
w	: Deplasman türünden dış yük vektörü
W	: Ağırlık
z	: Durum-uzayı vektörü

YAPILARDA DEĞİŞKEN FREKANSLI SÜRTÜNMELİ ELEMANLAR İLE SİSMİK KONTROL

ÖZET

Bir yapının bütünlüğü şiddetli deprem hareketlerinin tehlikeli etkilerinden, yapıya yeterince dayanıklılık kazandırarak ya da yapıyı yerden izole ederek korunabilir. İlk yaklaşıma göre, deprem kuvvetlerinin yapıya doğrudan iletildiği varsayılır ve yapının her elemanı depremle oluşacak olası maximum kuvvetlere karşı çeşitli süneklilik kriterleri göz önüne alınarak yapı tasarımı yapılır. İkinci yaklaşıma göre, belli izolasyon elemanları kullanılarak yapıda oluşacak maximum etkilerin azaltılması sağlanır. Bu yaklaşımda, üst yapıya iletilen kuvvetler önemli ölçüde azaltıldığından, izole edilmiş yapıların şiddetli depremlerde bile lineer elastik davrandığı varsayılabilir.

İzolasyon sistemleri, elastomerlerin kullanıldığı sistemler ve hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli sistemler olmak üzere iki ana grup altında toplanabilirler. Elastomer kullanılan sistemde, izole edilmiş yapının periyodu, rijitliği düşük elemanların kullanılmasıyla büyütülerek yer hareketinin baskın periyodundan uzaklaştırılması sağlanır. Bu sistemde, elastomerler yeterli sönümü oluşturamadıkları için sistemde aşırı deformasyonlar oluşur. Bu nedenle elastomer tipli izolatörler sönüm özeliği olan malzemeler ile beraber kullanılır. Sürtünmeli izolatörlerin kullanıldığı sistemlerde ise, üst yapıya iletilen kesme kuvveti sürtünmeli yüzeyler arasındaki maximum sürtünme kuvveti ile sınırlı tutulur. Sürtünmeli izolatörler genellikle yapıyı başlangıç konumuna geri getiren bir kuvvete sahip değildirler. Ancak sürtünmeli sarkaç izolatörleri, sürtünmeli yüzeyleri geometrisi ve yerçekimi ile bu kuvveti sisteme sağlarlar. Geçmişte elastomer tipli izolatörler yaygın olarak kullanılmalarına rağmen son yıllarda sürtünmeli izolatörlerin kullanımı ekonomik nedenlerden dolayı günden güne artmaktadır.

Bu çalışmada, hareketli mesnetlenmiş sistemlerin dinamik probleminin çözümü için basit ve sayısal analize uygun bir prosedür sunulmuştur. Burada kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için kullanılan iki farklı hareket denklemi birleştirilerek ayırık durum-zaman uzayında ifade edilen tek bir denkleme dönüştürülmüştür. Yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti cebirsel matris işlemleri ile bulunduktan sonra sistemin davranışı, zaman artımı faz değiştirme anlarını içeren anlarda bile sabit alınarak, fark denkleminin ardışık olarak belirlenmiştir.

Hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli sistemlerin deprem etkilerinin azaltılmasında etkinliği iki örnek üzerinde gösterilmiştir. VFPI ve FPB tipindeki izolatörlere sahip olan ve yer hareketine maruz kalan yapıların davranışları karşılaştırılmıştır.

SEISMIC CONTROL OF STRUCTURES ISOLATED WITH VARIABLE FREQUENCY PENDULUM ISOLATOR

SUMMARY

The integrity of a structure can be protected from the attack of severe earthquakes either through the concept of ‘resistance or isolation’. In designing a structure by resistance, it is assumed that the earthquake forces can be transmitted directly to the structure, and that each member of the structure is required to resist the maximum possible forces that may be induced by earthquakes, based on various ductility criteria. In the category of earthquake isolation, however one is interested in reducing the peak response of the structure through implementation of certain isolation devices. Since the forces transmitted to the superstructure have been largely reduced, the superstructure can usually be expected to be linearly elastic, even under the excitation of severe earthquakes.

Isolation systems are basically typified into rubber bearings and sliding bearings. Rubber bearings with high lateral flexibility are meant to shift vibrational periods of the structure so as to avoid resonance with the excitations; they are usually combined with high damping material to prevent the isolated structures from over-displacing. Sliding bearings are introduced to filter out the imparting earthquake forces through the frictional interfaces. This type of systems rarely possess re-centering capability, except the friction pendulum bearings which, with curved sliding surfaces, can provide the isolated structures with restoring forces by gravity. Although rubber bearings have been extensively used in base isolation systems, sliding bearings have found more and more applications in recent years for economical reasons.

In this study, a logically simple and numerically efficient procedure is presented to solve the dynamic problem of sliding systems with unsynchronized support motions. The motion equations for the sliding and non-sliding modes of the isolated structure are unified into a single equation that is represented as a difference equation in a discrete-time state-space form and the base shear forces between the sliding interfaces can be determined through simple matrix algebraic analysis. The responses of the sliding structure can be obtained recursively from the discrete-time version of the motion equation with constant integration time step even during the transitions between the non-sliding and sliding phases.

Effectiveness of sliding systems for earthquake protection has been verified by a tree-span continuous bridge and a four-story shear building subjected to the harmonic motion, 1940 El Centro earthquake, 1999 Kocaeli Earthquake and 1999 Düzce earthquake. Behaviour of structures isolated using VFPI and FPB subjected to ground motions has been compared.

1.GİRİŞ

Yapıların, depremlerle oluşan yer hareketlerinin zararlı etkilerinden ayrılması fikri mühendislerin ve akademisyenlerin bir yüzyıldan fazla bir süredir üzerinde çalıştıkları bir problemidir. 1908 yılında İtalya’da meydana gelen büyük Messina-Reggio depreminde 160.000 kişi hayatını kaybetmiş ve bölgedeki yapı tipi olan yığma binaların tamamına yakını yıkılmıştır. Depremden sonra akademisyenlerden ve mühendislerden oluşan bir komisyon toplanmış ve çalışmalarından sonra bölgede yapılacak yeni yapıların tasarımı için iki öneri sunmuştur. Bu önerilerin ilki yapıyı, temel ile zemin arasına bir kum tabakası yerleştirerek ya da kolonların altına roller koyarak yatay doğrultuda hareket etmesine izin vermek. Böylelikle yapıyı yer hareketinin yatay bileşeninden ayrılmasını sağlamak. İkinci öneride ise, yapının yere ankastre mesnetlenmesini kabul ederek, yapının yatay yük taşıma kapasitesi için birtakım yeni kısıtlayıcı koşullar getirilmiştir. Yeni yapılacak yapıların, en az ağırlıklarının % 8’i kadar yatay yük taşıması koşulu bunlardan birisidir. Nihai karar olarak ikinci öneri kabul edilmiş ve sismik izolasyon kavramında ilk ve en basit sistem olan ilk öneri terkedilmiştir. 1909 yılında, İngilterede bir tıp doktoru olan Johannes Avetican Calantarients yapıları, temelleri ile zemin arasına yerleştireceği bir kum, mika ya da talk tabakasıyla ayırmayı önermiş ve bu sistemin patentini almıştır [1].

Hindistanda meydana gelen 1930 Dhubai ve 1934 Bihar depremlerinden sonra yapılan gözlemlerde, temelleri üzerinde yatay doğrultuda kayan küçük yığma binaların, benzerleri tamamen yıkılırken, ayakta kaldığı görülmüştür. Benzer bir gözlemi 1976 da Çinde meydana gelen Tangshan depreminden sonra Çinli mühendisler yapmışlardır. Bu gözlemde, depremden sonra ayakta kalan binaların temelden yaklaşık 6cm kaydığı görülmüştür. Bu gözlemlerden sonra, yatayda hareketli mesnetlenmiş sistemlerin deprem etkilerini önemli ölçüde azalttığını gösteren birçok teorik çalışma ve test yapılmıştır [1].

Bu çalışmada, sürtünmeli yüzeylere hareketli mesnetlenmiş çok serbestlik dereceli sistemlerin davranışı araştırılmıştır. Hareketli mesnetlenmiş sistemlerin dinamik probleminin çözümü için basit ve sayısal analize uygun bir prosedür sunulmuştur. Burada kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için kullanılan iki farklı hareket denklemi birleştirilerek ayırık durum-zaman uzayında ifade edilen tek bir denkleme dönüştürülmüştür. Yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti cebirsel matris işlemleri ile bulunduktan sonra sistemin davranışı, zaman artımı faz değiştirme anlarını içeren anlarda bile sabit alınarak, fark denkleminde ardışık olarak belirlenmiştir. Hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli sistemlerin deprem etkilerinin azaltılmasındaki etkinliği iki örnek üzerinde gösterilmiştir. VFPI ve FPB tipindeki izolatörlere sahip olan ve yer hareketine maruz kalan yapıların davranışları karşılaştırılmıştır.

1.1 Sismik İzolasyon Teknikleri

1.1.1 Elastik davranışlı ilk kat

1929 da Martel, 1935 de Green ve Bednarski ve 1938 de Jacobsen gibi yapı mühendisleri depreme dayanıklı yapı tasarımı için ‘elastik davranışlı ilk kat’ (flexible first story) kavramını sunmuşlardır. Bu yaklaşımda, birinci kat kolonlarının yatay rijitlikleri üst katlardaki kolonların yatay rijitliklerinden daha düşüktür. Bunu yapmakla, deprem yükleri altında büyük deformasyonların ilk kattaki kolonlarda oluşması sağlanır. Ancak üst katlardaki kat ivmelerinin azaltılmasında etkili olmak için birinci kat kolonlarının deformasyonlarının büyük olması gerekir. Şiddetli depremlerde, düşey yüklerin birinci kat kolonlarının yatay hareketine etkileri bu kolonların ağır hasar görmesine ya da tamamen göçmesine neden olmaktadır. Bu yaklaşımda birinci kat kolonlarının elastik deformasyon yaptıkları varsayımı nedeniyle sönüm düşüktür.

1.1.2 Plastik davranışlı ilk kat

1969 da Fintel ve Khan ‘elastik davranışlı ilk kat’ kavramını modifiye ederek ‘plastik davranışlı ilk kat’ (soft first story) kavramını sunmuşlardır. Bu yaklaşımda birinci kat kolonlarının plastik deformasyon yaparak enerjiyi absorbe etmesi önerilmiştir. Böylece yeterli sönüm oluşturularak deplasmanlar kontrol edilebilir. Ancak bu yolla yeterli sönümün oluşturulması deplasmanların büyük olmasıyla

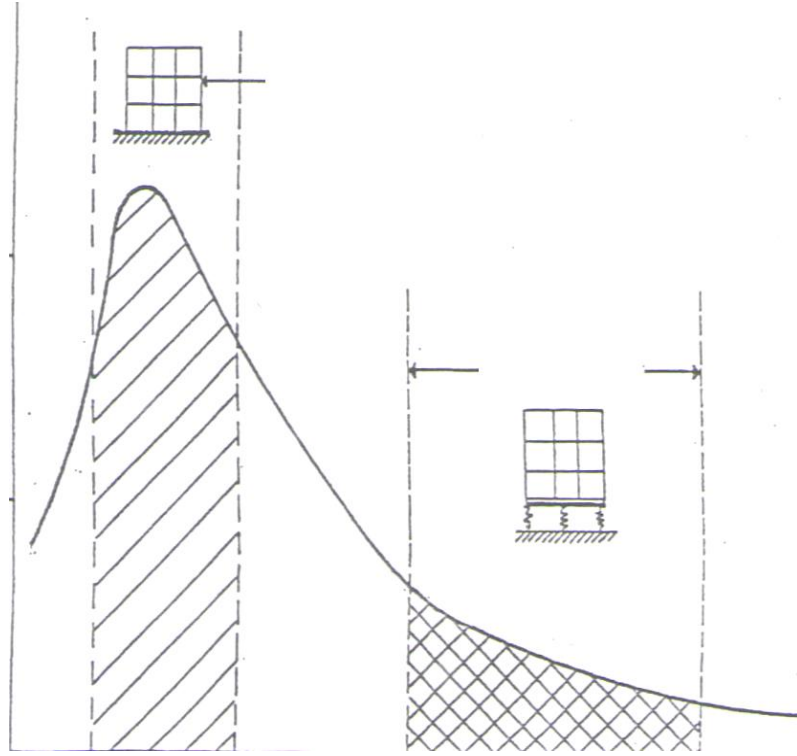
mümkündür. Kolonlardaki büyük deplasmanlar ise kolon kesitlerinin akmasına ve sonuç olarak kolonların burkulma yüklerinin azalmasına yani stabilite problemine sebep olmaktadır. Bu yaklaşımda da şiddetli depremlerde birinci kat kolonlarının büyük deformasyon yapmaları ve tamamen göçmeleri kaçınılmazdır. Günümüzde bu iki yaklaşımın da terk edilmelerine rağmen, bunlar üzerindeki tartışmalar halen sürmektedir.

1.1.3 Temel izolasyonu

Temel izolasyonu kavramı, son 25 yıl içinde çok tabakalı elastomerlerin geliştirilmesi ve üretilmesiyle depreme dayanıklı yapı tasarımındaki yerini, uygulamaları ile almıştır. Bugün ‘base isolation’ sistemleri deprem riski altındaki bir çok ülkede, bunların başında Japonya, Yeni Zelanda, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri gelmektedir, başarıyla uygulanmakta ve yönetmeliklerdeki yerini almaktadır [2]. Depreme dayanıklı yapı tasarımında, tasarım mühendisleri kat ivmelerini ve deplasmanlarını minimize etmeyi amaçlarlar. Kat deplasmanları yapının rijitliğinin arttırılması ile azaltılabilir, ancak bu yol hem ekonomik olmaz hem de kat ivmelerinin büyümesine neden olarak, deprem etkilerinin artmasını sağlar. Kat ivmeleri ise yapıların daha flexible tasarlanmasıyla azaltılabilir, ancak bu yol ise kat deplasmanlarının artmasına sebep olur. Kat deplasmanlarını ve kat ivmelerini aynı anda azaltmanın pratik yolu base isolation sistemini kullanmaktır. Bu sistem gerekli elastikiyeti (flexibilitiyi) izolasyon sistemine odaklı deplasmanlar ile sağlar.

Temel izolasyon sistemi, yapıları yer hareketinin yatay bileşenlerinden, yapıların temelleri ile zemin arasına yatay rijitliği yapıların kolonlarına göre düşük elemanlar yerleştirerek ayırır. Bu düşük rijitlikli elemanların yerleştirilmesi yapılara, yere ankastre mesnetlenmiş durumdaki frekanslarından ve yer hareketinin baskın frekansından daha düşük bir frekansa sahip olmalarını sağlar. İzole edilmiş yapıların ilk dinamik modu yalnızca izolasyon sistemindeki deformasyonları içerir. Yapılarda deformasyon oluşturan yüksek modlar ilk moda ve yer hareketine ortogonaldirler. Dolayısıyla yüksek modların izole edilmiş yapıların hareketine katkıları yok denecek kadar azdır. Yani, izole edilmiş yapıların hareketi tek serbestlik dereceli sistemin hareketine eşdeğer olduğu kabul edilebilir. Böylelikle, yer hareketinin bu yüksek modlardaki yüksek enerjisi yapılara iletilmemiş olur. Bu sistem enerjiyi absorbe

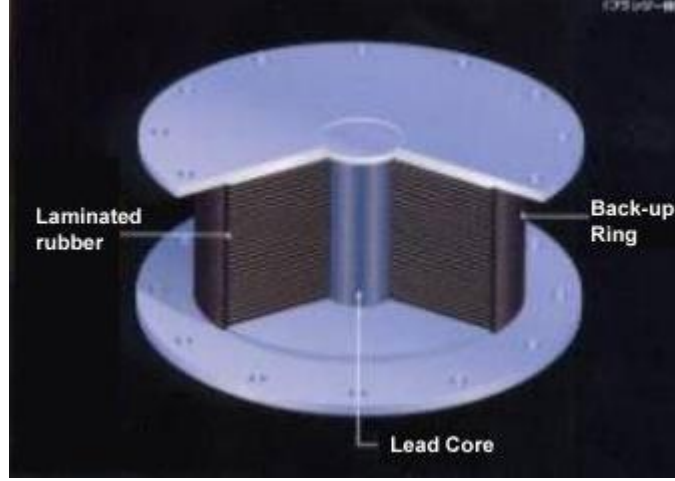
etmez, bilakis yapılara yer hareketi ile iletilen enerji miktarını kontrol ederek sınırlar. İzolasyon sisteminin bu özeliği sönüme bağılı değildir, ancak belli bir sönüm oranı izolasyon sisteminin rezonans frekansından uzaklaşmak için faydalıdır. Bugün uygulanan izolasyon sistemleri kullandıkları izolatörlere göre iki ana grupta toplanabilirler.



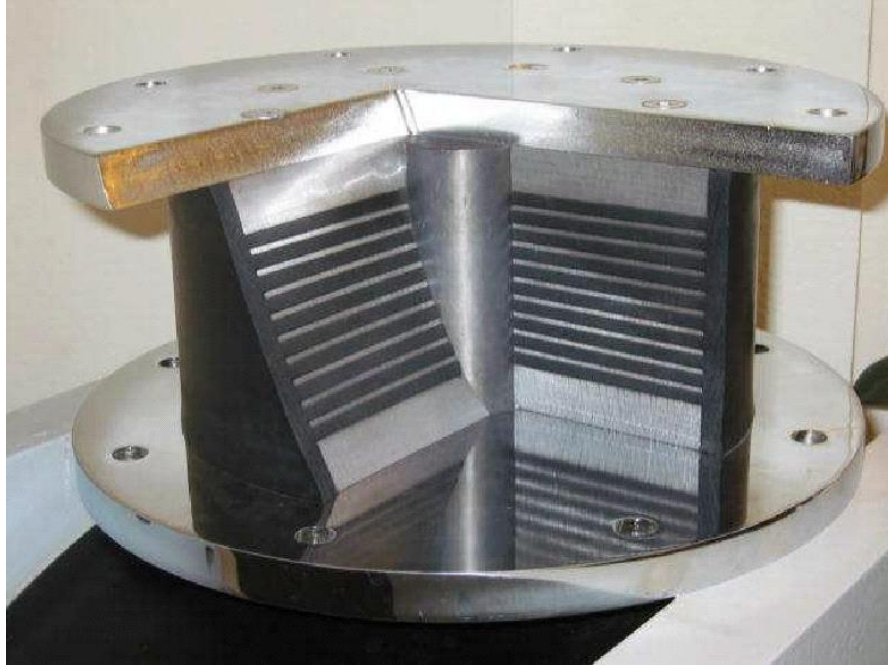
Şekil 1.1 Şematik ivme spektrum eğrisi

1.1.4 Elastomerler

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, ilk elastomerler 1969 yılında Makedonya’da bir okulun inşaatında İsviçreli mühendisler tarafından kullanılmıştır. Bu elastomerlerde çelik plakalar kullanılmadan, yapının ağırlığının yaklaşık olarak %25’i kadar bir kuvvetle doğal kauçuğun sıkıştırılmasıyla üretilmişlerdir. Bu elastomerlerin düşey rijitlikleri, yatay rijitliklerinin sadece bir kaç katı kadardır [2]. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3’de elastomerlere ait resimler sunulmuştur.



Şekil 1.2 Elastomer tipindeki izolatör



Şekil 1.3 Elastomer tipindeki izolatör

1.1.4.1 Düşük sönümlü elastomerler

Doğal ve sentetik kauçuktan üretilen düşük sönümlü elastomerler viskos sönümleyici, çelik ya da kurşun çubuklar ve bir takım sürtünmeli sönüm elemanları ile birlikte Japonya’da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu izolatörler, altta ve üstte iki kalın çelik plaka arasına bir çok ince çelik plakanın ve kauçuğun bir kalıp içinde yüksek sıcaklıkta sıkıştırılması ile elde edilir. Bu ince çelik plakalar izolatöre yüksek düşey rijitlik sağlar ve kauçuğun basınç altında şişmesini önler, ancak yatay rijitliğe katkısı yoktur. İzolatörün yatay rijitliği elastomerin kayma modülü G ’ye bağlıdır. Bu

elastomerlerin sönümü düşüktür ve kayma şekil deformasyonunun %100 değerine kadar gerilme deformasyon bağıntısı lineerdir.



Şekil 1.4 Düşük sönümlü elastomer

Düşük sönümlü izolatörlerin bir çok avantajları vardır. Bunların üretimi ve modellenmesi kolaydır. Ayrıca bu tip izolatörler sıcaklık ve zamanla mekanik özelliklerini çabucak kaybetmezler. Bu tip izolatörlerin tek dezavantajı, sönümün düşük olması nedeniyle, ek sönüm sistemlerine ihtiyaç duyulmasıdır.

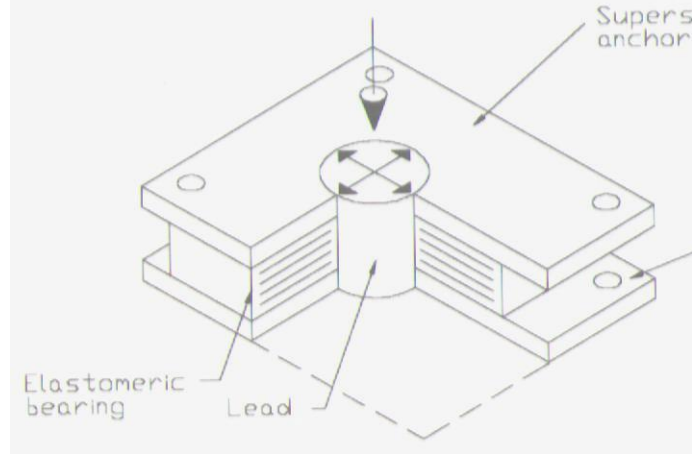
1.1.4.2 Kurşun gövdeli elastomerler

Kurşun gövdeli izolatörler, Yeni Zelanda’da üretilmiş ve başta bu ülkede olmak üzere, Japonya ve Amerika Birleşik Devletlerin’de yaygın olarak kullanılmaktadırlar [2]. Bu tip izolatörler düşük sönümlü izolatörlere benzer fakat ek olarak bir veya daha fazla kurşun gövdelere sahiptirler. Burada ince çelik plakalar, bu kurşun gövdelerin kayma deformasyonu yapmalarını sağlar. Malzeme olarak kurşun seçilmesinin nedeni, 10MPa gibi düşük kayma gerilmesi civarında kurşunun akarak elasto-plastik malzeme gibi davranması ve iyi yorulma özelliklerine sahip olmasıdır. Kurşun gövde, izolatörde açılan bir delik içine sıkıca yerleştirilir. Kurşun gövdenin izolatörle beraber çalışmasını sağlamak amacıyla delik biraz dar açılır ve gövde bu deliğin içine sıkıca yerleştirilir. Bu tip izolatörlerin kullanıldığı binalar 1994 Nortridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi performans göstermişlerdir [2].

1.1.4.3 Yüksek Sönümlü Elastomerler

Yapı ile temeli arasına yerleştirilen elastomer tipli izolatörler, yapının temel frekansının yer hareketinin baskın frekansından düşük olmasını sağlarlar. Bu konuda yapılan çalışmalar, izolasyon sisteminin düşük rijitliğinin küçük frekanslı yer

hareketlerinde, yapıların ilk katlarında büyük deplasmanlara neden olduğunu göstermiştir. Yüksek sönümlü elastomerlerin kullanımı sağladıkları yüksek enerji dağıtma özellikleri nedeniyle önerilir.



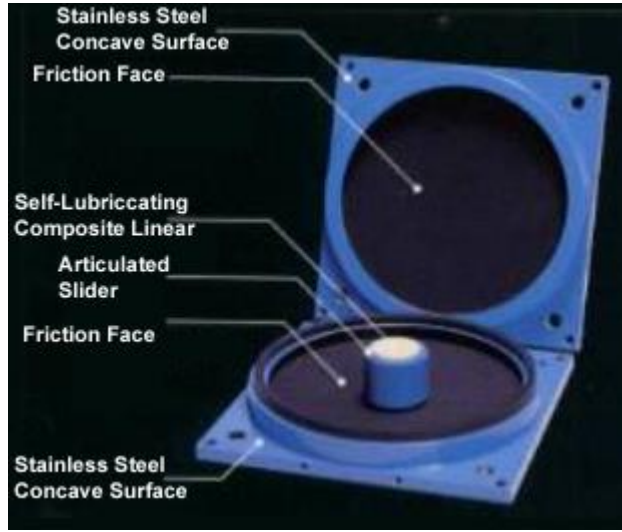
Şekil 1.5 Kurşun gövdeli elastomer

Bu tip elastomerlerin kullanıldığı sistemlerde ek sönüm elemanlarına ihtiyaç duyulmaz. İzolatörün sönümü ‘exrafine karbon bokları’ ve yağ gibi özel maddelerin kullanılmasıyla artırılır. İzolatörün sönümü ne histerik ne de viskoz sönüm modellerine uymaktadır. Lineer modelde sönümlenen enerji miktarı deplasmanın karesi ile orantılıyken histerik modelde sönümlenen enerji miktarı deplasmanın lineer bir fonksiyonudur. Yüksek sönümlü elastomer izolatörler üzerinde yapılan testlerde bir çevrimde sönümlenen enerji miktarının deplasmanın yaklaşık 1.5 katı ile orantılı olduğu görülmüştür [2]. Dolayısı ile bu tip izolatörlerin modellenmesinde histerik model ve viskoz sönüm modelinin beraber kullanılması daha doğru sonuçlar vermektedir.

1.1.5 Sürtünmeli izolatörler

1.1.5.1 Sürtünmeli sarkaç

Sürtünmeli sarkaç sistemi iki paslanmaz çelik levha arasına yerleştirilen sürtünme katsayısı düşük kompozit malzeme ile kaplı bir kayıcının hareketinden oluşur. Bu kayıcı temas ettiği levhanın küresel yüzeyi boyunca hareket eder. Sistem, geometrisi nedeni ile üst yapıyı denge konumuna zorlayan bir özelliğe sahiptir. Bu sistemlerde yapıların burulma etkileri en aza indirgenmiştir. Çünkü rijitlik merkezi ile kütle merkezi üst üste düşmektedir.

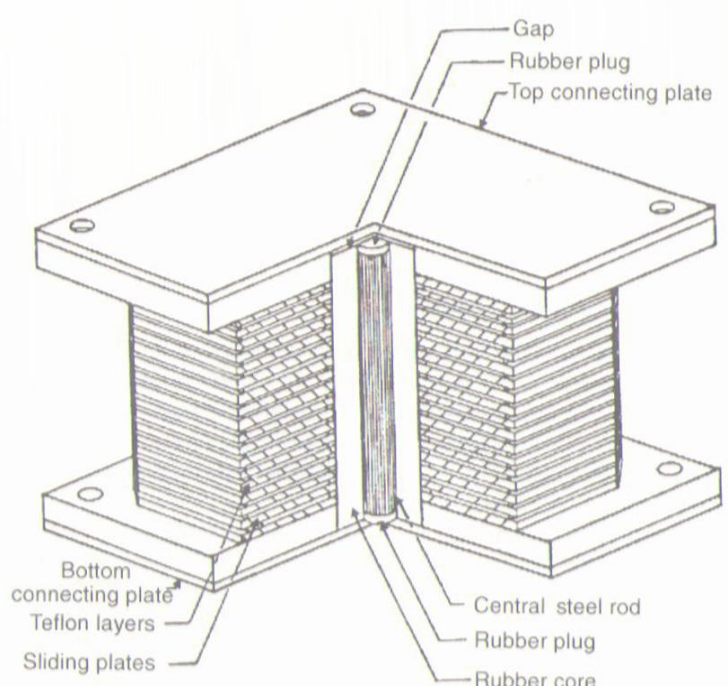


Şekil 1.6 Sürtünmeli sarkaç sistemi

Bu tip izolatörlerin hareket periyotları, basit sarkacın hareket periyoduna benzer olarak $T = 2\pi\sqrt{R/g}$ dir. Burada R küresel yüzeyli levhanın eğrilik yarıçapını ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Bu izolatörlerin periyotlarının taşıdıkları kütleden bağımsızdır. Hareket periyodu ve eşdeğer yatay rijitlik tek parametre olan R ile kontrol edilebilir. Yüzeyler arasındaki sürtünme sönümü oluşturur.

1.1.5.2 Sürtünme dayanımlı izolatör

Bu tip izolasyon sistemleri, yüksek hızlarda teflon ile paslanmaz çelik arasında oluşan yüksek sürtünme katsayısı problemini birden çok sürtünme yüzeyini tek bir izolatörde kullanarak gidermeyi amaçlar. Böylelikle, izolatörün alt ve üst kısımlarındaki hız birçok sürtünmeli tabaka ile bölünür. Sürtünme elemanlarına ek olarak deforme olmuş izolatörü denge konumuna zorlayan bir kuvvet için izolatörün ortasına düşey yük taşımayan kauçuk bir çekirdek yerleştirilir. Yapılan testler, yalnız kauçuk çekirdeğin kullanıldığı izolatörlerde kayma hareketinin bir tabakada oluştuğu ve izolatörün tümüne yayılmadığı görülmüştür. Kayma hareketini ve dolayısı ile deplasmanları tüm izolatöre yaymak için çoğu zaman kauçuk çekirdeğin içine çubuk yerleştirilir.



Şekil 1.7 Sürtünme Dayanımlı İzolatör

1.2 Hareketli Mesnetlenmiş Sürtünmeli Sistemler

Sürtünmeli yüzeyler üzerinde hareket eden bir sistemin dinamik analizi tabandaki sürtünme kuvvetinin rölatif hıza bağlı olarak yön değiştirmesi nedeni süreksizlik içeren bir problemdir. Bu tip sistemlerde olası iki durum söz konusudur. Birincisi, tabandaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvvetinden küçüktür ve tabandaki blok yer ile beraber hareket eder, yani yere göre rölatif hızı sıfırdır. Bu fazı rölatif hareketsiz faz olarak isimlendireceğiz. İkinci olası durum ise, tabandaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvvetine ulaşmıştır ve taban bloğunun yere göre rölatif hareketi söz konusudur. Bu fazı da kayma fazı olarak isimlendireceğiz. Hareket denklemleri olarak kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için farklı denklemlerin kullanılması durumunda sistemin davranışı her bir durum için lineer olmasına rağmen bir bütün olarak nonlineerdir. Bu sistemlerde tabandaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvveti ile sınırlıdır ve sürtünme katsayısı μ ne kadar küçük seçilirse üst yapıya yer hareketi ile iletilen enerji miktarı o kadar az olur. Teorik olarak sürtünme katsayısı $\mu = 0$ olması durumunda yer ile üst yapının yatay doğrultudaki hareketi birbirinden tamamen ayrılır ve tabandaki kesme kuvvetinin değeri de sıfır olur.

Böylelikle yer hareketinin yatay doğrultudaki etkileri üst yapıya geçmemiş olur. Ancak, sistemin küçük yer hareketlerinde ve rüzgar yükleri etkisinde kaymaması için sürtünme katsayısı μ belli bir değerden büyük olmalıdır.

Bu tip sistemler üzerinde birçok teorik çalışma ve testler yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda sistem bir takım kabuller yapılarak basitleştirilmiştir. İlk olarak Den Hartog [3] Coulomb sürtünmesini kullanarak yatay sürtünmeli bir yüzey üzerinde harmonik dış yük altında tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik çözümünü yapmış ve bu çözümü tabandaki sürtünme ile kaybolan enerjiyi eşdeğer viskoz sönüme çevirerek yaptığı yaklaşık çözüm ile karşılaştırmıştır.

Westermo ve Udvardia [4] iki serbestlik dereceli sistemlerin harmonik yer hareketi altında analitik çözümünü yapmışlar ve tek bloğun periyodik hareketi, kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için kriterler belirlemişlerdir. Bu çalışmadan çıkan önemli sonuçlardan bir tanesi, belli bir süreden sonra sistemin periyodik hareket yapmasıdır. İkincisi, umulanın tersine sürtünmenin rölatif deplasmanları her zaman azaltmadığının görülmesidir. Burada ω yer hareketinin frekansını ve ω_n de sistemin doğal frekansını göstermek üzere ω/ω_n oranının birden küçük değerleri için alt rezonans frekansların oluştuğu görülmüştür.

Mostaghel, Hejazi ve Tanbakuchi [5] iki serbestlik dereceli bir sistemin yarı analitik çözümünü kayma fazında ve rijit ankastre fazda iki farklı hareket denklemi kullanarak yapmışlar ve bu sistemlerin yer hareketinin üst yapıya etkilerinin azaltılmasında etkili olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada sistemdeki rölatif deplasmanların yalnızca tabandaki sürtünme katsayısına bağlı olduğu gösterilmiştir.

Mostaghel ve Davis [6] tabandaki sürtünme kuvvetini bir takım yaklaşıklık parametreleri içeren sürekli fonksiyonlar ile ifade ederek yaptıkları çözümleri Den Hartog [3]' un yaptığı çözümler ile karşılaştırmışlardır.

Yang [7] ilk defa tabandaki sürtünme kuvvetini fiktif bir yay ile temsil ederek 5 serbestlik dereceli bir modelin harmonik yer hareketini El Centro deprem ivme kaydını kullanarak davranışını incelemişlerdir. Yang bu modelinde sürtünme kuvveti-deformasyon bağıntısını elasto-plastik cisminin kuvvet-deformasyon bağıntısı olarak modellemiştir. Hareket denklemlerinin çözümü için sayısal integrasyon metodlarından Newmark'ın ortalama sabit ivme şeması kullanılmış ve geçiş süreleri için iterasyon yapılmıştır.

Fan, Ahmadi ve Tadjbakhsh [8], harmonik yer hareketi etkisindeki 3 serbestlik dereceli bir sistemin analizini sabit zaman artımı ($\Delta t = 0.00025\text{sn}$) ile dördüncü mertebeden Runge-Kutta şemasını kullanarak yapmışlardır.

Fan, Ahmadi, Mostaghel ve Tadjbakhsh [9] 4 serbestlik dereceli bir sistemin dinamik analizini hareket denklemlerinin çözümü içi yine dördüncü mertebeden Runge-Kutta şemasını ve 1940 El Centro, 1971 San Fernandez ve 1985 Mexico city deprem ivme kayıtlarını kullanarak yapmışlardır.

Dimavo ve Georgiev [10,11] faz-geçiş anlarının yeterli yaklaşıklıkla belirlenmemesi halinde rölatif hızın sıklıkla işaret değiştirerek sayısal analizde önemli hatalara neden olduğunu göstermişler ve bu hataların giderilmesi için sayısal bir yöntem sunmuşlardır.

Wang [12] sürtünmeli sistemlerin hareket denklemlerini durum uzayında birinci mertebeden bir diferansiyel denklem ile ifade etmiştir. Birden çok sürtünmeli izolatör içeren sistemler için iterasyon gerektiren bir yöntem sunmuştur.

Vafai, Hamidi ve Ahmadi [13], Yang [7]'in kullandığı elasto-plastik fiktif yay modelini rijit plastik model ile değiştirerek ve Newmark'ın ortalama sabit ivme metodunu kullanarak 5 serbestlik dereceli bir sistemin harmonik yer hareketi için davranışını incelemişlerdir. Faz-geçiş anlarını belirlemek için iterasyon yapmak yerine zaman adımını $\Delta t = 0.0002\text{sn}$ olarak tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir ve Yang [7]'in elde ettikleri ile karşılaştırmışlardır.

Konuyla ilgili teorik ve deneysel bir çok çalışma kaynaklar kısmında sunulmuştur. [14-59]

1.GİRİŞ

Yapıların, depremlerle oluşan yer hareketlerinin zararlı etkilerinden ayrılması fikri mühendislerin ve akademisyenlerin bir yüzyıldan fazla bir süredir üzerinde çalıştıkları bir problemdir. 1908 yılında İtalya’da meydana gelen büyük Messina-Reggio depreminde 160.000 kişi hayatını kaybetmiş ve bölgedeki yapı tipi olan yığma binaların tamamına yakını yıkılmıştır. Depremden sonra akademisyenlerden ve mühendislerden oluşan bir komisyon toplanmış ve çalışmalarından sonra bölgede yapılacak yeni yapıların tasarımı için iki öneri sunmuştur. Bu önerilerin ilki yapıyı, temel ile zemin arasına bir kum tabakası yerleştirerek ya da kolonların altına roller koyarak yatay doğrultuda hareket etmesine izin vermek. Böylelikle yapıyı yer hareketinin yatay bileşeninden ayrılmasını sağlamak. İkinci öneride ise, yapının yere ankastre mesnetlenmesini kabul ederek, yapının yatay yük taşıma kapasitesi için birtakım yeni kısıtlayıcı koşullar getirilmiştir. Yeni yapılacak yapıların, en az ağırlıklarının % 8’i kadar yatay yük taşıması koşulu bunlardan birisidir. Nihai karar olarak ikinci öneri kabul edilmiş ve sismik izolasyon kavramında ilk ve en basit sistem olan ilk öneri terkedilmiştir. 1909 yılında, İngilterede bir tıp doktoru olan Johannes Avetican Calantarients yapıları, temelleri ile zemin arasına yerleştireceği bir kum, mika ya da talk tabakasıyla ayırmayı önermiş ve bu sistemin patentini almıştır [1].

Hindistanda meydana gelen 1930 Dhubai ve 1934 Bihar depremlerinden sonra yapılan gözlemlerde, temelleri üzerinde yatay doğrultuda kayan küçük yığma binaların, benzerleri tamamen yıkılırken, ayakta kaldığı görülmüştür. Benzer bir gözlemi 1976 da Çinde meydana gelen Tangshan depreminden sonra Çinli mühendisler yapmışlardır. Bu gözlemde, depremden sonra ayakta kalan binaların temelden yaklaşık 6cm kaydığı görülmüştür. Bu gözlemlerden sonra, yatayda hareketli mesnetlenmiş sistemlerin deprem etkilerini önemli ölçüde azalttığını gösteren birçok teorik çalışma ve test yapılmıştır [1].

Bu çalışmada, sürtünmeli yüzeylere hareketli mesnetlenmiş çok serbestlik dereceli sistemlerin davranışı araştırılmıştır. Hareketli mesnetlenmiş sistemlerin dinamik probleminin çözümü için basit ve sayısal analize uygun bir prosedür sunulmuştur. Burada kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için kullanılan iki farklı hareket denklemi birleştirilerek ayırık durum-zaman uzayında ifade edilen tek bir denkleme dönüştürülmüştür. Yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti cebirsel matris işlemleri ile bulunduktan sonra sistemin davranışı, zaman artımı faz değiştirme anlarını içeren anlarda bile sabit alınarak, fark denkleminde ardışık olarak belirlenmiştir. Hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli sistemlerin deprem etkilerinin azaltılmasındaki etkinliği iki örnek üzerinde gösterilmiştir. VFPI ve FPB tipindeki izolatörlere sahip olan ve yer hareketine maruz kalan yapıların davranışları karşılaştırılmıştır.

1.1 Sismik İzolasyon Teknikleri

1.1.1 Elastik davranışlı ilk kat

1929 da Martel, 1935 de Green ve Bednarski ve 1938 de Jacobsen gibi yapı mühendisleri depreme dayanıklı yapı tasarımı için ‘elastik davranışlı ilk kat’ (flexible first story) kavramını sunmuşlardır. Bu yaklaşımda, birinci kat kolonlarının yatay rijitlikleri üst katlardaki kolonların yatay rijitliklerinden daha düşüktür. Bunu yapmakla, deprem yükleri altında büyük deformasyonların ilk kattaki kolonlarda oluşması sağlanır. Ancak üst katlardaki kat ivmelerinin azaltılmasında etkili olmak için birinci kat kolonlarının deformasyonlarının büyük olması gerekir. Şiddetli depremlerde, düşey yüklerin birinci kat kolonlarının yatay hareketine etkileri bu kolonların ağır hasar görmesine ya da tamamen göçmesine neden olmaktadır. Bu yaklaşımda birinci kat kolonlarının elastik deformasyon yaptıkları varsayımı nedeniyle sönüm düşüktür.

1.1.2 Plastik davranışlı ilk kat

1969 da Fintel ve Khan ‘elastik davranışlı ilk kat’ kavramını modifiye ederek ‘plastik davranışlı ilk kat’ (soft first story) kavramını sunmuşlardır. Bu yaklaşımda birinci kat kolonlarının plastik deformasyon yaparak enerjiyi absorbe etmesi önerilmiştir. Böylece yeterli sönüm oluşturularak deplasmanlar kontrol edilebilir. Ancak bu yolla yeterli sönümün oluşturulması deplasmanların büyük olmasıyla

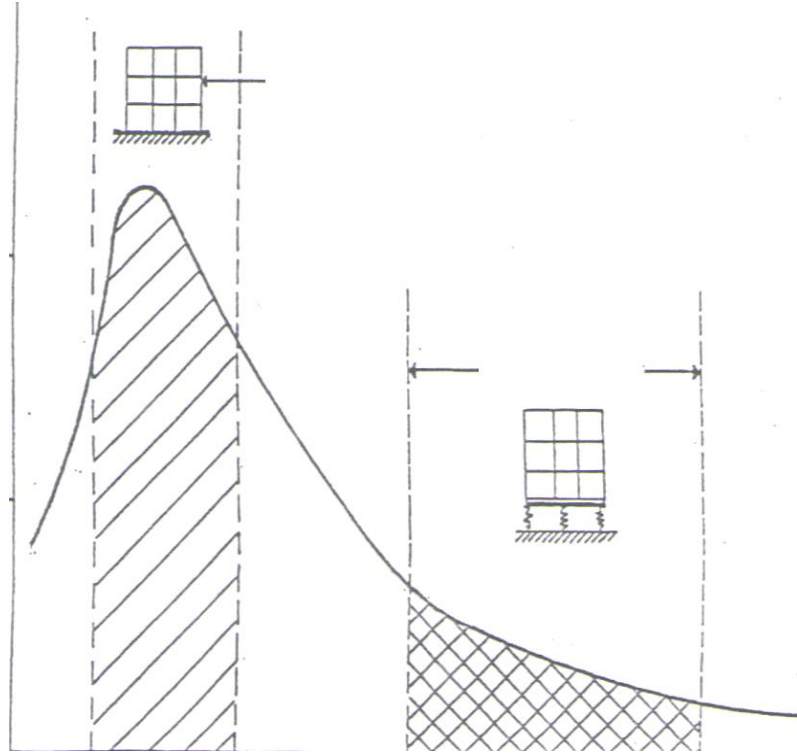
mümkündür. Kolonlardaki büyük deplasmanlar ise kolon kesitlerinin akmasına ve sonuç olarak kolonların burkulma yüklerinin azalmasına yani stabilite problemine sebep olmaktadır. Bu yaklaşımda da şiddetli depremlerde birinci kat kolonlarının büyük deformasyon yapmaları ve tamamen göçmeleri kaçınılmazdır. Günümüzde bu iki yaklaşımın da terk edilmelerine rağmen, bunlar üzerindeki tartışmalar halen sürmektedir.

1.1.3 Temel izolasyonu

Temel izolasyonu kavramı, son 25 yıl içinde çok tabakalı elastomerlerin geliştirilmesi ve üretilmesiyle depreme dayanıklı yapı tasarımındaki yerini, uygulamaları ile almıştır. Bugün ‘base isolation’ sistemleri deprem riski altındaki bir çok ülkede, bunların başında Japonya, Yeni Zelanda, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri gelmektedir, başarıyla uygulanmakta ve yönetmeliklerdeki yerini almaktadır [2]. Depreme dayanıklı yapı tasarımında, tasarım mühendisleri kat ivmelerini ve deplasmanlarını minimize etmeyi amaçlarlar. Kat deplasmanları yapının rijitliğinin arttırılması ile azaltılabilir, ancak bu yol hem ekonomik olmaz hem de kat ivmelerinin büyümesine neden olarak, deprem etkilerinin artmasını sağlar. Kat ivmeleri ise yapıların daha flexible tasarlanmasıyla azaltılabilir, ancak bu yol ise kat deplasmanlarının artmasına sebep olur. Kat deplasmanlarını ve kat ivmelerini aynı anda azaltmanın pratik yolu base isolation sistemini kullanmaktır. Bu sistem gerekli elastikiyeti (flexibilitiyi) izolasyon sistemine odaklı deplasmanlar ile sağlar.

Temel izolasyon sistemi, yapıları yer hareketinin yatay bileşenlerinden, yapıların temelleri ile zemin arasına yatay rijitliği yapıların kolonlarına göre düşük elemanlar yerleştirerek ayırır. Bu düşük rijitlikli elemanların yerleştirilmesi yapılara, yere ankastre mesnetlenmiş durumdaki frekanslarından ve yer hareketinin baskın frekansından daha düşük bir frekansa sahip olmalarını sağlar. İzole edilmiş yapıların ilk dinamik modu yalnızca izolasyon sistemindeki deformasyonları içerir. Yapılarda deformasyon oluşturan yüksek modlar ilk moda ve yer hareketine ortogonaldirler. Dolayısıyla yüksek modların izole edilmiş yapıların hareketine katkıları yok denecek kadar azdır. Yani, izole edilmiş yapıların hareketi tek serbestlik dereceli sistemin hareketine eşdeğer olduğu kabul edilebilir. Böylelikle, yer hareketinin bu yüksek modlardaki yüksek enerjisi yapılara iletilmemiş olur. Bu sistem enerjiyi absorbe

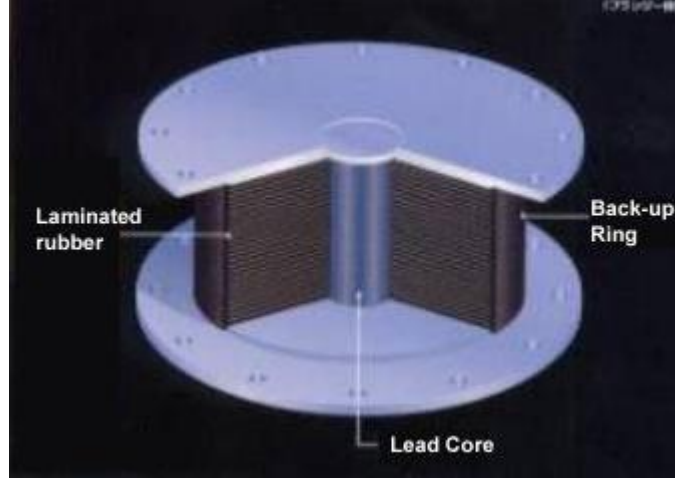
etmez, bilakis yapılara yer hareketi ile iletilen enerji miktarını kontrol ederek sınırlar. İzolasyon sisteminin bu özeliği sönüme bağılı değildir, ancak belli bir sönüm oranı izolasyon sisteminin rezonans frekansından uzaklaşmak için faydalıdır. Bugün uygulanan izolasyon sistemleri kullandıkları izolatörlere göre iki ana grupta toplanabilirler.



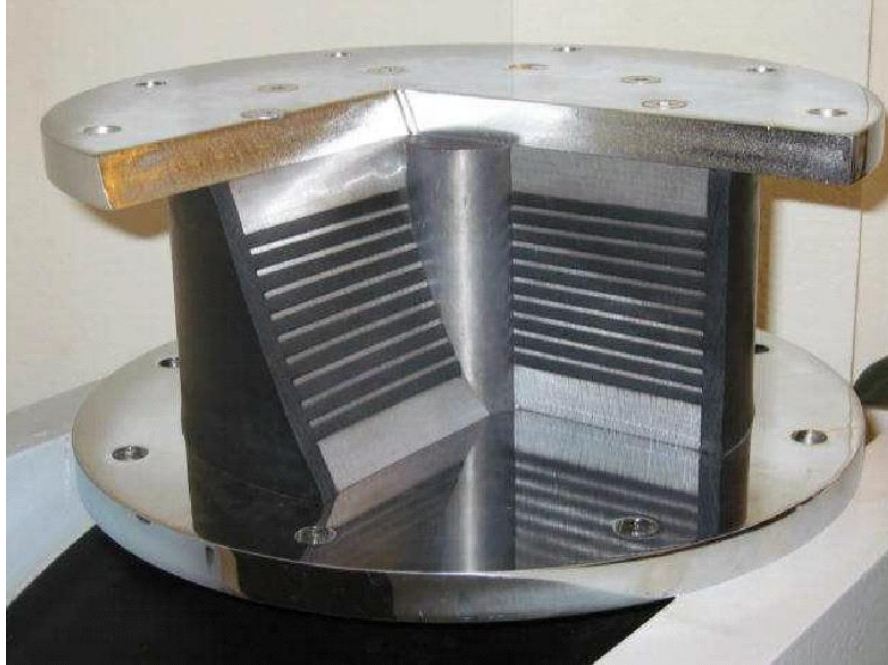
Şekil 1.1 Şematik ivme spektrum eğrisi

1.1.4 Elastomerler

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, ilk elastomerler 1969 yılında Makedonya’da bir okulun inşaatında İsviçreli mühendisler tarafından kullanılmıştır. Bu elastomerlerde çelik plakalar kullanılmadan, yapının ağırlığının yaklaşık olarak %25’i kadar bir kuvvetle doğal kauçuğun sıkıştırılmasıyla üretilmişlerdir. Bu elastomerlerin düşey rijitlikleri, yatay rijitliklerinin sadece bir kaç katı kadardır [2]. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3’de elastomerlere ait resimler sunulmuştur.



Şekil 1.2 Elastomer tipindeki izolatör



Şekil 1.3 Elastomer tipindeki izolatör

1.1.4.1 Düşük sönümlü elastomerler

Doğal ve sentetik kauçuktan üretilen düşük sönümlü elastomerler viskos sönümleyici, çelik ya da kurşun çubuklar ve bir takım sürtünmeli sönüm elemanları ile birlikte Japonya’da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu izolatörler, altta ve üstte iki kalın çelik plaka arasına bir çok ince çelik plakanın ve kauçuğun bir kalıp içinde yüksek sıcaklıkta sıkıştırılması ile elde edilir. Bu ince çelik plakalar izolatöre yüksek düşey rijitlik sağlar ve kauçuğun basınç altında şişmesini önler, ancak yatay rijitliğe katkısı yoktur. İzolatörün yatay rijitliği elastomerin kayma modülü G ’ye bağlıdır. Bu

elastomerlerin sönümü düşüktür ve kayma şekil deformasyonunun %100 değerine kadar gerilme deformasyon bağıntısı lineerdir.



Şekil 1.4 Düşük sönümlü elastomer

Düşük sönümlü izolatörlerin bir çok avantajları vardır. Bunların üretimi ve modellenmesi kolaydır. Ayrıca bu tip izolatörler sıcaklık ve zamanla mekanik özelliklerini çabucak kaybetmezler. Bu tip izolatörlerin tek dezavantajı, sönümün düşük olması nedeniyle, ek sönüm sistemlerine ihtiyaç duyulmasıdır.

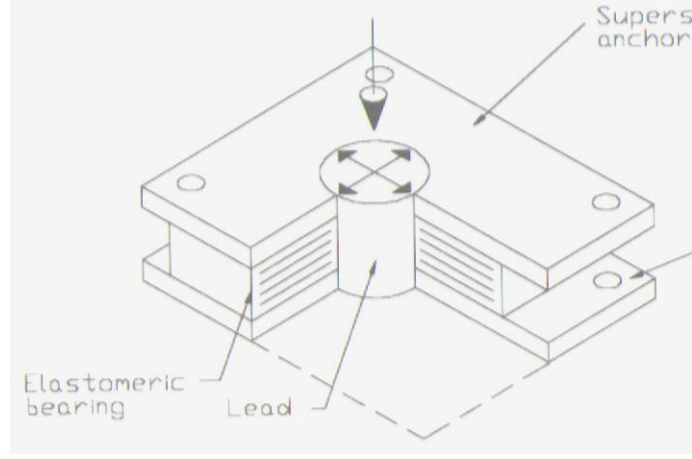
1.1.4.2 Kurşun gövdeli elastomerler

Kurşun gövdeli izolatörler, Yeni Zelanda’da üretilmiş ve başta bu ülkede olmak üzere, Japonya ve Amerika Birleşik Devletlerin’de yaygın olarak kullanılmaktadırlar [2]. Bu tip izolatörler düşük sönümlü izolatörlere benzer fakat ek olarak bir veya daha fazla kurşun gövdelere sahiptirler. Burada ince çelik plakalar, bu kurşun gövdelerin kayma deformasyonu yapmalarını sağlar. Malzeme olarak kurşun seçilmesinin nedeni, 10MPa gibi düşük kayma gerilmesi civarında kurşunun akarak elasto-plastik malzeme gibi davranması ve iyi yorulma özelliklerine sahip olmasıdır. Kurşun gövde, izolatörde açılan bir delik içine sıkıca yerleştirilir. Kurşun gövdenin izolatörle beraber çalışmasını sağlamak amacıyla delik biraz dar açılır ve gövde bu deliğin içine sıkıca yerleştirilir. Bu tip izolatörlerin kullanıldığı binalar 1994 Nortridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi performans göstermişlerdir [2].

1.1.4.3 Yüksek Sönümlü Elastomerler

Yapı ile temeli arasına yerleştirilen elastomer tipli izolatörler, yapının temel frekansının yer hareketinin baskın frekansından düşük olmasını sağlarlar. Bu konuda yapılan çalışmalar, izolasyon sisteminin düşük rijitliğinin küçük frekanslı yer

hareketlerinde, yapıların ilk katlarında büyük deplasmanlara neden olduğunu göstermiştir. Yüksek sönümlü elastomerlerin kullanımı sağladıkları yüksek enerji dağıtma özellikleri nedeniyle önerilir.



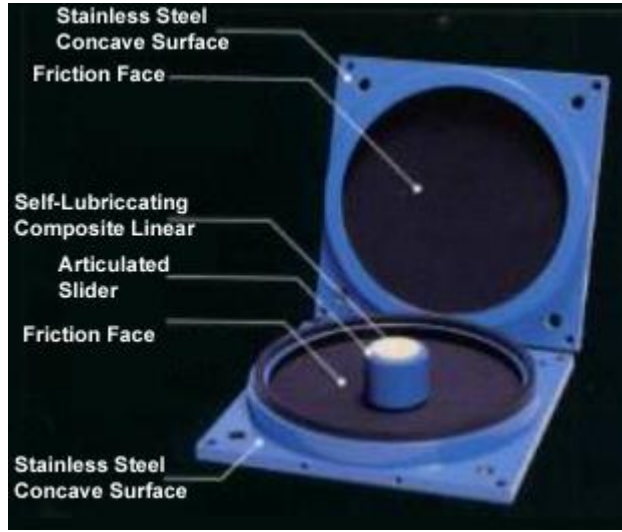
Şekil 1.5 Kurşun gövdeli elastomer

Bu tip elastomerlerin kullanıldığı sistemlerde ek sönüm elemanlarına ihtiyaç duyulmaz. İzolatörün sönümü ‘exrafine karbon bokları’ ve yağ gibi özel maddelerin kullanılmasıyla arttırılır. İzolatörün sönümü ne histerik ne de viskoz sönüm modellerine uymaktadır. Lineer modelde sönümlenen enerji miktarı deplasmanın karesi ile orantılıyken histerik modelde sönümlenen enerji miktarı deplasmanın lineer bir fonksiyonudur. Yüksek sönümlü elastomer izolatörler üzerinde yapılan testlerde bir çevrimde sönümlenen enerji miktarının deplasmanın yaklaşık 1.5 katı ile orantılı olduğu görülmüştür [2]. Dolayısı ile bu tip izolatörlerin modellenmesinde histerik model ve viskoz sönüm modelinin beraber kullanılması daha doğru sonuçlar vermektedir.

1.1.5 Sürtünmeli izolatörler

1.1.5.1 Sürtünmeli sarkaç

Sürtünmeli sarkaç sistemi iki paslanmaz çelik levha arasına yerleştirilen sürtünme katsayısı düşük kompozit malzeme ile kaplı bir kayıcının hareketinden oluşur. Bu kayıcı temas ettiği levhanın küresel yüzeyi boyunca hareket eder. Sistem, geometrisi nedeni ile üst yapıyı denge konumuna zorlayan bir özelliğe sahiptir. Bu sistemlerde yapıların burulma etkileri en aza indirgenmiştir. Çünkü rijitlik merkezi ile kütle merkezi üst üste düşmektedir.

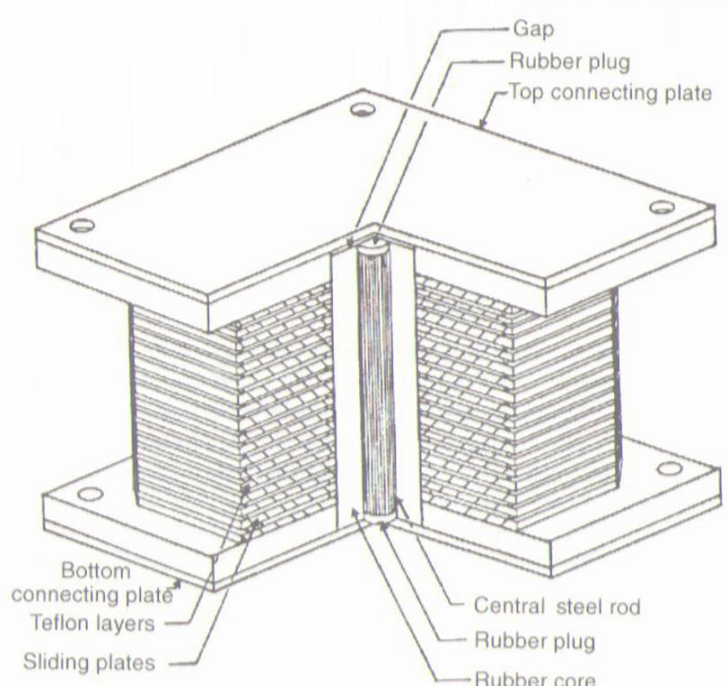


Şekil 1.6 Sürtünmeli sarkaç sistemi

Bu tip izolatörlerin hareket periyotları, basit sarkacın hareket periyoduna benzer olarak $T = 2\pi\sqrt{R/g}$ dir. Burada R küresel yüzeyli levhanın eğrilik yarıçapını ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Bu izolatörlerin periyotlarının taşıdıkları kütleden bağımsızdır. Hareket periyodu ve eşdeğer yatay rijitlik tek parametre olan R ile kontrol edilebilir. Yüzeyler arasındaki sürtünme sönümü oluşturur.

1.1.5.2 Sürtünme dayanımlı izolatör

Bu tip izolasyon sistemleri, yüksek hızlarda teflon ile paslanmaz çelik arasında oluşan yüksek sürtünme katsayısı problemini birden çok sürtünme yüzeyini tek bir izolatörde kullanarak gidermeyi amaçlar. Böylelikle, izolatörün alt ve üst kısımlarındaki hız birçok sürtünmeli tabaka ile bölünür. Sürtünme elemanlarına ek olarak deforme olmuş izolatörü denge konumuna zorlayan bir kuvvet için izolatörün ortasına düşey yük taşımayan kauçuk bir çekirdek yerleştirilir. Yapılan testler, yalnız kauçuk çekirdeğin kullanıldığı izolatörlerde kayma hareketinin bir tabakada oluştuğu ve izolatörün tümüne yayılmadığı görülmüştür. Kayma hareketini ve dolayısı ile deplasmanları tüm izolatöre yaymak için çoğu zaman kauçuk çekirdeğin içine çubuk yerleştirilir.



Şekil 1.7 Sürtünme Dayanımlı İzolatör

1.2 Hareketli Mesnetlenmiş Sürtünmeli Sistemler

Sürtünmeli yüzeyler üzerinde hareket eden bir sistemin dinamik analizi tabandaki sürtünme kuvvetinin rölatif hıza bağlı olarak yön değiştirmesi nedeni süreksizlik içeren bir problemdir. Bu tip sistemlerde olası iki durum söz konusudur. Birincisi, tabandaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvvetinden küçüktür ve tabandaki blok yer ile beraber hareket eder, yani yere göre rölatif hızı sıfırdır. Bu fazı rölatif hareketsiz faz olarak isimlendireceğiz. İkinci olası durum ise, tabandaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvvetine ulaşmıştır ve taban bloğunun yere göre rölatif hareketi söz konusudur. Bu fazı da kayma fazı olarak isimlendireceğiz. Hareket denklemleri olarak kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için farklı denklemlerin kullanılması durumunda sistemin davranışı her bir durum için lineer olmasına rağmen bir bütün olarak nonlineerdir. Bu sistemlerde tabandaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvveti ile sınırlıdır ve sürtünme katsayısı μ ne kadar küçük seçilirse üst yapıya yer hareketi ile iletilen enerji miktarı o kadar az olur. Teorik olarak sürtünme katsayısı $\mu = 0$ olması durumunda yer ile üst yapının yatay doğrultudaki hareketi birbirinden tamamen ayrılır ve tabandaki kesme kuvvetinin değeri de sıfır olur.

Böylelikle yer hareketinin yatay doğrultudaki etkileri üst yapıya geçmemiş olur. Ancak, sistemin küçük yer hareketlerinde ve rüzgar yükleri etkisinde kaymaması için sürtünme katsayısı μ belli bir değerden büyük olmalıdır.

Bu tip sistemler üzerinde birçok teorik çalışma ve testler yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda sistem bir takım kabuller yapılarak basitleştirilmiştir. İlk olarak Den Hartog [3] Coulomb sürtünmesini kullanarak yatay sürtünmeli bir yüzey üzerinde harmonik dış yük altında tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik çözümünü yapmış ve bu çözümü tabandaki sürtünme ile kaybolan enerjiyi eşdeğer viskoz sönüme çevirerek yaptığı yaklaşık çözüm ile karşılaştırmıştır.

Westermo ve Udvardia [4] iki serbestlik dereceli sistemlerin harmonik yer hareketi altında analitik çözümünü yapmışlar ve tek bloğun periyodik hareketi, kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için kriterler belirlemişlerdir. Bu çalışmadan çıkan önemli sonuçlardan bir tanesi, belli bir süreden sonra sistemin periyodik hareket yapmasıdır. İkincisi, umulanın tersine sürtünmenin rölatif deplasmanları her zaman azaltmadığının görülmesidir. Burada ω yer hareketinin frekansını ve ω_n de sistemin doğal frekansını göstermek üzere ω/ω_n oranının birden küçük değerleri için alt rezonans frekansların oluştuğu görülmüştür.

Mostaghel, Hejazi ve Tanbakuchi [5] iki serbestlik dereceli bir sistemin yarı analitik çözümünü kayma fazında ve rijit ankastre fazda iki farklı hareket denklemi kullanarak yapmışlar ve bu sistemlerin yer hareketinin üst yapıya etkilerinin azaltılmasında etkili olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada sistemdeki rölatif deplasmanların yalnızca tabandaki sürtünme katsayısına bağlı olduğu gösterilmiştir.

Mostaghel ve Davis [6] tabandaki sürtünme kuvvetini bir takım yaklaşıklık parametreleri içeren sürekli fonksiyonlar ile ifade ederek yaptıkları çözümleri Den Hartog [3]' un yaptığı çözümler ile karşılaştırmışlardır.

Yang [7] ilk defa tabandaki sürtünme kuvvetini fiktif bir yay ile temsil ederek 5 serbestlik dereceli bir modelin harmonik yer hareketini El Centro deprem ivme kaydını kullanarak davranışını incelemişlerdir. Yang bu modelinde sürtünme kuvveti-deformasyon bağıntısını elasto-plastik cisminin kuvvet-deformasyon bağıntısı olarak modellemiştir. Hareket denklemlerinin çözümü için sayısal integrasyon metodlarından Newmark'ın ortalama sabit ivme şeması kullanılmış ve geçiş süreleri için iterasyon yapılmıştır.

Fan, Ahmadi ve Tadjbakhsh [8], harmonik yer hareketi etkisindeki 3 serbestlik dereceli bir sistemin analizini sabit zaman artımı ($\Delta t = 0.00025\text{sn}$) ile dördüncü mertebeden Runge-Kutta şemasını kullanarak yapmışlardır.

Fan, Ahmadi, Mostaghel ve Tadjbakhsh [9] 4 serbestlik dereceli bir sistemin dinamik analizini hareket denklemlerinin çözümü içi yine dördüncü mertebeden Runge-Kutta şemasını ve 1940 El Centro, 1971 San Fernandez ve 1985 Mexico city deprem ivme kayıtlarını kullanarak yapmışlardır.

Dimavo ve Georgiev [10,11] faz-geçiş anlarının yeterli yaklaşıklıkla belirlenmemesi halinde rölatif hızın sıklıkla işaret değiştirerek sayısal analizde önemli hatalara neden olduğunu göstermişler ve bu hataların giderilmesi için sayısal bir yöntem sunmuşlardır.

Wang [12] sürtünmeli sistemlerin hareket denklemlerini durum uzayında birinci mertebeden bir diferansiyel denklem ile ifade etmiştir. Birden çok sürtünmeli izolatör içeren sistemler için iterasyon gerektiren bir yöntem sunmuştur.

Vafai, Hamidi ve Ahmadi [13], Yang [7]'in kullandığı elasto-plastik fiktif yay modelini rijit plastik model ile değiştirerek ve Newmark'ın ortalama sabit ivme metodunu kullanarak 5 serbestlik dereceli bir sistemin harmonik yer hareketi için davranışını incelemişlerdir. Faz-geçiş anlarını belirlemek için iterasyon yapmak yerine zaman adımını $\Delta t = 0.0002\text{sn}$ olarak tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir ve Yang [7]'in elde ettikleri ile karşılaştırmışlardır.

Konuyla ilgili teorik ve deneysel bir çok çalışma kaynaklar kısmında sunulmuştur. [14-59]

2. TEMEL DENKLEMLER

Sürtünmeli bir yüzeye kayıcı mesnetlenmiş bir sistemin hareketi tabandaki sürtünme kuvvetinin sürekli yön değiştirmesi nedeniyle süreksizlik içeren bir problemdir ve sistemin davranışı nonlineerdir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda problemin analitik çözümü, çoğu zaman bir takım kabuller ile harmonik dış yük altında en fazla 2 serbestlik dereceli sistemler için verilmiştir. Ayrıca, gerçek yer hareketinin analitik fonksiyonlar ile ifade edilememesi, problemin sayısal yöntemlerle çözülmesini gerektirmektedir. Bu çalışmada; Wang [12]'ın sunduğu çözüm algoritması, yüzeyler arasındaki statik ve kinetik sürtünme katsayılarının eşit olmaması durumunu da dikkate alınarak geliştirilmiştir. Yüzeyler arasındaki statik ve kinetik sürtünme katsayılarının eşit olmaması durumunda, Mokha [14,15]'nın teflon kaplı yüzeylerde önerdiği formülден yararlanılmıştır. Sistemde birden fazla sürtünme elemanı olması bu algoritmanın önemli bir avantajıdır.

2.1 Problemin Çözümü İçin Yapılan Kabuller

1) Yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti için iki modelin uygun olduğu varsayılmıştır. Coulomb Sürtünme Modeli: Statik ve kinetik sürtünme katsayılarının eşit ve sabit olması durumudur.

Mokha Sürtünme Modeli: Statik ve kinetik sürtünme katsayılarının eşit olmaması ve sürtünme katsayısının izolatördeki rölatif hız ile basınca bağlı olarak değişken olması durumu. Constantinou ve Mokha [14,15] 'nın teflon kaplı yüzeyler için önermiş olduğu (2.1) formülü ile sürtünme katsayısının belirlenebildiği varsayılmıştır.

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min})e^{-a|v|} \quad (2.1)$$

Burada a basınca bağlı olarak değişen bir katsayı ve v izolatörün rölatif hızıdır.

2) Sürtünme kuvveti $f = \mu N$ dir. İzolatöre etkiyen normal kuvvetin, N , zamanla değişmediği varsayılmıştır.

3) Üst yapının malzeme ve geometri bakımından lineer olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım gerçeğe yakın bir kabuldür, çünkü şiddetli depremlerde dahi izolasyon sistemi ile üst yapıya iletilen enerji miktarı azaltılır ve üst yapıda oluşan deformasyonların küçük olması sağlanır.

4) Yer hareketinin yalnızca yatay bileşeni göz önüne alınmıştır, düşey bileşeninin etkileri ihmal edilmiştir.

5) Sistemde devrilme momentlerinin oluşmadığı kabul edilmiştir.

2.2 Hareket Denklemi

$w(t)$ dış yükü altında, hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli bir sistemin hareket denklemi matris formda,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{B}\mathbf{F}(t) + \mathbf{E}\mathbf{w}(t) \quad (2.2)$$

denklemi ile ifade edilir. Burada, n sistemin serbestlik derecesi ve r sürtünmeli izolatör sayısı olmak üzere, $\mathbf{u}(t)_{n \times 1}$ rölatif deplasman vektörünü, $\mathbf{M}_{n \times n}$, $\mathbf{C}_{n \times n}$ ve $\mathbf{K}_{n \times n}$ sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\mathbf{B}_{n \times r}$ sürtünme kuvveti yerleşim matrisini, $\mathbf{F}(t)_{r \times 1}$ sisteme etkiyen sürtünme kuvveti vektörünü, $\mathbf{E}$, $n \times q$ boyutunda dış yük yerleşim matrisini, $\mathbf{w}(t)_{q \times 1}$ sisteme etkiyen dış yük vektörünü göstermektedir. (2.2) denklemi soldan kütle matrisinin tersi ile çarpılıp, $\mathbf{v}(t) = d\mathbf{u}(t)/dt$ dönüşümü yapılırsa,

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{v}(t) \quad (2.2.a)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{v}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{F}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{w}(t) \quad (2.2.b)$$

denklemleri elde edilir. (2.2.a) ve (2.2.b) denklemleri birleştirilip matris formda

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{F}(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{w}(t) \quad (2.2.c)$$

denklemi ile yazılabilir. Burada

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1}$$

durum vektörü kullanılırsa, (2.2) denkleminin bir mertebe indirgenmesiyle

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(t) \quad (2.3)$$

denklemini elde edilir. Burada,

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \quad 2n \times 2n \text{ boyutunda sistem matrisini}$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}, \quad 2n \times r \text{ boyutunda sürtünme kuvveti yük matrisini}$$

$$\mathbf{E}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix}, \quad 2n \times q \text{ boyutunda dış yük matrisini göstermektedir.}$$

2.2.1 Hareket denkleminin çözümü

(2.3) denkleminin $\mathbf{z}(0)$ başlangıç koşulu altındaki homojen çözümü

$$\mathbf{z}(t) = \Phi(t)\mathbf{z}(0) \quad (2.4)$$

olur. Burada $\Phi(t)$, geçiş matrisidir ve açık ifadesi

$$\Phi(t) = e^{\mathbf{A}_c t} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \mathbf{A}_c^n = \mathbf{I} + t\mathbf{A}_c + \frac{t^2}{2!} \mathbf{A}_c^2 + \frac{t^3}{3!} \mathbf{A}_c^3 + \dots + \frac{t^n}{n!} \mathbf{A}_c^n + \dots \quad (2.5)$$

şeklindedir. (2.2) denkleminin özel çözümünün

$$\mathbf{z}(t) = \Phi(t)\bar{\mathbf{z}}(t) \quad (2.6)$$

formunda olduğunu varsayalım. Bu ifadenin her iki tarafının zamana göre türevi alınır,

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \dot{\Phi}(t)\bar{\mathbf{z}}(t) + \Phi(t)\dot{\bar{\mathbf{z}}}(t) \quad (2.7)$$

olur ve bu özel çözüm (2.3) denkleminde yerine yazılırsa

$$\dot{\Phi}(t)\bar{\mathbf{z}}(t) + \Phi(t)\dot{\bar{\mathbf{z}}}(t) = \mathbf{A}_c \Phi(t)\bar{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(t) \quad (2.8)$$

elde edilir. Diğer yandan geçiş matrisi $\Phi(t)$ için,

$$\dot{\Phi}(t) = \mathbf{A}_c \Phi(t) \quad (2.9)$$

bağıntısı (2.8) denkleminde yerine yazılırsa

$$\Phi(t)\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{B}_c \mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(t) \quad (2.10)$$

denklemini elde edilir. (2.10) denklemini soldan geçiş matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \Phi^{-1}(t)[\mathbf{B}_c \mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(t)] \quad (2.11)$$

elde edilir. Geçiş matrisinin

$$\Phi^{-1}(t) = \Phi(-t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(-t)} \quad (2.12a)$$

ve

$$\Phi(t_1)\Phi(t_2) = \Phi(t_1 + t_2) \quad (2.12b)$$

özellikleri kullanılırsa

$$\bar{\mathbf{z}}(t) = \int_0^t \Phi(-\tau)[\mathbf{B}_c \mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (2.13)$$

elde edilir. O halde özel çözüm

$$\mathbf{z}(t) = \int_0^t \Phi(t - \tau)[\mathbf{B}_c \mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (2.14)$$

denklemini ile elde edilir. (2.3) denkleminin analitik çözümü homojen ve özel çözümlerin toplanmasıyla

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t)} \mathbf{z}(0) + \int_0^t \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t-\tau)} [\mathbf{B}_c \mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (2.15)$$

olarak elde edilir. Ardışık iki zaman adımı t_1 ve t_2 olsun. O halde,

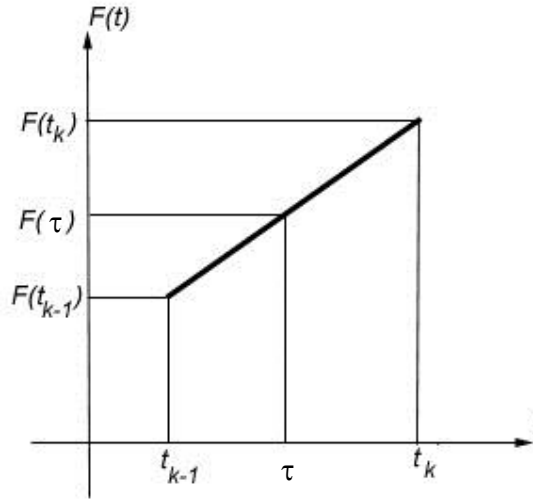
$$\mathbf{z}(t_2) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t_2-t_1)} \mathbf{z}(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t_2-\tau)} [\mathbf{B}_c \mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (2.16)$$

olarak elde edilir. Burada $F(\tau)$ sürtünme kuvveti fonksiyonu parçalı sürekli ve $w(\tau)$ fonksiyonu da deprem ivme kaydı olduğundan, nümerik çözüm için bu fonksiyonların yeterince küçük zaman aralığında $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ doğrusal değişimini kabul etmek iyi bir yaklaşıklık sağlar. Sürtünme kuvveti ve ivme değerleri sırasıyla,

$$F(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} F[k-1] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} F[k], \quad t_1 \leq \tau \leq t_2 \quad (2.17a)$$

$$w(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} w[k-1] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} w[k], \quad t_1 \leq \tau \leq t_2 \quad (2.17b)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 2.1 Sürtünme kuvvetinin $[t_{k-1}, t_k]$ zaman aralığındaki değişimi

Burada, $t_1 = (k-1)\Delta t$, $t_2 = k\Delta t$, $w[k] = w(k\Delta t)$ ve $F[k] = F(k\Delta t)$ dır. $z[k] = z(k\Delta t)$ olmak üzere, (2.17) denklemleri (2.16) analitik çözümünde yerine yazılırsa, integral işleminden sonra

$$z[k] = Z[k] + B_1 F[k] \quad (2.18a)$$

şeklinde rekürsiv bir fark denklemi elde edilir. Burada

$$Z[k] = A z[k-1] + B_0 F[k-1] + E_0 w[k-1] + E_1 w[k] \quad (2.18b)$$

Burada A , B_0 , B_1 , E_0 ve E_1 matrisleri sistemin özelliklerine, yükleme durumuna bağlı ve elemanları sabit olan matrislerdir. Bu matrisler,

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_C \Delta t} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^k}{k!} \mathbf{A}_C^k, \quad \mathbf{A}_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^{k+1}}{(k+2)k!} \mathbf{A}_C^k, \quad \mathbf{A}_1 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^{k+1}}{(k+2)!} \mathbf{A}_C^k \quad (2.19a)$$

olmak üzere

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{B}_C, \quad \mathbf{B}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_C, \quad \mathbf{E}_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{E}_C, \quad \mathbf{E}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{E}_C \quad (2.19b)$$

şeklindeki matris serileri yardımı ile ifade edilebilir. Bu seriler Δt ve $\mathbf{A}_C$ nin her değeri için yakınsaktır. Ancak buradaki soru iyi bir yaklaşıklık için bu serilerin ilk kaç teriminin alınacağıdır. Bu çalışmada $\Delta t = 0.01$ alındığından serilerin terimlerinin hızla sıfıra yaklaştığı ve ilk 8 terimlerinin, bu serileri yeterli yaklaşıklıkla temsil ettiği görülmüştür.

Meirovitch [16] dönüşüm matrisinin yaklaşık değerinin bulunması için programlamaya uygun bir algoritma vermiştir. Buna göre $\Phi(t)$ serisinin ilk m tane teriminin alınmasıyla elde edilen yaklaşık değeri,

$$\Phi(t) \cong \Phi_m(t) = \sum_{n=0}^m \frac{t^n}{n!} \mathbf{A}_C^n = \mathbf{I} + t\mathbf{A}_C + \frac{t^2}{2!} \mathbf{A}_C^2 + \frac{t^3}{3!} \mathbf{A}_C^3 + \dots + \frac{t^m}{m!} \mathbf{A}_C^m \quad (2.20)$$

ya da

$$\Phi(t) \cong \Phi_m(t) = \mathbf{I} + t\mathbf{A}_C \left(\mathbf{I} + \frac{t}{2} \mathbf{A}_C \left(\mathbf{I} + \frac{t}{3} \mathbf{A}_C \left(\mathbf{I} + \dots + \frac{t}{m-1} \mathbf{A}_C \left(\mathbf{I} + \frac{t}{m} \mathbf{A}_C \right) \dots \right) \right) \right)$$

formunda yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \mathbf{I} + \frac{t}{m} \mathbf{A}_C \\ \Psi_2 &= \mathbf{I} + \frac{t}{m-1} \mathbf{A}_C \Psi_1 \\ \Psi_3 &= \mathbf{I} + \frac{t}{m-2} \mathbf{A}_C \Psi_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \Phi_m(t) &= \mathbf{I} + t\mathbf{A}_C \Psi_{m-1} \end{aligned} \quad (2.21)$$

(2.21) ardışık bağıntılarının kullanılması ile $\Phi(t)$ geçiş matrisi hesaplanabilir. Geçiş matrisinin hesaplanması için bir başka yol bu matrisin grup özeliğinin kullanılmasıdır. Buna göre (t, τ) aralığı (t, t_1) , $(t_1, t_2), \dots, (t_{k-1}, t_k)$, (t_k, τ) gibi $k+1$ tane alt aralığa bölünerek aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$\Phi(t, \tau) = \Phi(t, t_1) \Phi(t_1, t_2) \dots \Phi(t_{k-1}, t_k) \Phi(t_k, \tau) \quad (2.22)$$

2.2.2 Kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz

İzolatörlerin hareketi için, kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz olmak üzere, olası iki temel faz (durum) söz konusudur. Kayma fazında, izolatördeki sürtünmeli yüzeylerin birbirlerine göre rölatif hareketi vardır ve yüzeyler arasındaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvvetine ulaşmıştır. Yani,

$$F_i[k] = \mu_i W_i \text{sgn}(\dot{x}_i[k]) \quad (2.23a)$$

$$\dot{x}_i[k] \neq 0 \quad (2.23b)$$

Burada, i , izolatör numarası, $F_i[k]$ ve W_i , izolatöre etkiyen kesme kuvveti ve normal kuvvet, μ_i yüzeyler arası sürtünme katsayısı, $\dot{x}_i$ yüzeyleri arası rölatif hız olup sgn işaret fonksiyonudur. Rölatif hareketsiz fazda izolatörlerdeki sürtünmeli yüzeylerin birbirlerine göre rölatif hareketi yoktur ve yüzeyler arasındaki kesme kuvveti şiddeti maximum sürtünme kuvvetinden küçüktür. Yani,

$$|F_i[k]| < \mu_i W_i \quad (2.24a)$$

$$\dot{x}_i[k] = 0 \quad (2.24b)$$

olur. (2.18a) fark denkleminde k inci zaman adımındaki $\mathbf{z}[k]$ durum vektörü $(k-1)$ inci zaman adımıdaki verilerin bilinmesiyle hemen elde edilemez. Çünkü denklemin sağ tarafında k inci zaman adımına ait $\mathbf{F}[k]$ sürtünme kuvveti vektörü henüz bilinmemektedir. Bu vektörün bileşenleri k inci zaman adımındaki rölatif hızların belirlenmesi ile hesaplanabilir. Bu rölatif hızlar ise $\mathbf{z}[k]$ durum vektörünün bazı bileşenleridir. Ancak (2.23) ve (2.24) denklemlerinden de görüldüğü gibi, yüzeyler arasındaki kesme kuvvetleri ve yüzeylerin birbirlerine göre rölatif hızları hareket fazlarının bulunmasında belirleyicidirler. Kayma fazı süresince sürtünme kuvveti

(2.23a) denkleminde belirlenir. Ancak rölatif hız bilinmeyen olarak kalır. Rölatif hareketsiz fazda ise yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti veya başka bir deyişle kesme kuvveti bilinmeyen olarak kalır. Yüzeyler arasındaki rölatif hız (2.24b) denkleminde belirtildiği gibi sıfırdır. Dolayısıyla, bilinmeyen olarak sürtünme kuvveti ya da rölatif hız, fazlara bağlı olarak belirlenebilir. k inci zaman adımındaki sürtünme kuvveti vektörü $\mathbf{F}[k]$ belirlendikten sonra, (2.18a) fark denkleminde $\mathbf{z}[k]$ durum vektörü kolaylıkla hesaplanabilir.

2.3 Sayısal Çözüm Yöntemi

Sunulan algoritmanın anahtar adımı şudur; her zaman adımında, analiz rölatif hareketsiz fazda kabul edilerek başlar. Buna göre;

$$\mathbf{y}[k] = \mathbf{D}\mathbf{z}[k] \quad (2.25)$$

denklemini yazılabilir. Burada $\mathbf{y}[k]$, $r \times 1$ boyutunda izolatör hız vektörü, $\mathbf{D} = [\mathbf{0} \ , \ \mathbf{B}^T]$ $r \times 2n$ boyutunda izolatör hızı yerleşim matrisidir.

Denklem (2.18), denklem (2.25)' de yerine konursa, izolatör kesme kuvveti $\mathbf{F}[k]$, denklem (2.26) ile tahmin edilir.

$$\bar{\mathbf{F}}[k] = -(\mathbf{D}\mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1\mathbf{w}[k] + \mathbf{B}_0\mathbf{F}[k-1]) \quad (2.26)$$

Sürtünme yasasına göre, rölatif hareketsiz faz boyunca her izolatör elemanı için sonuç kesme kuvveti daima maksimum kesme kuvvetinden küçük olmalıdır.

$\bar{F}_i[k]$, i. izolatörün kesme kuvvetini göstermek üzere, olası hareket koşulları aşağıda belirtildiği gibidir.

A) Tüm izolatörler için ; kesme kuvvetleri, maksimum sürtünme kuvvetlerinden küçüktür.

$$|\bar{F}_i[k]| < \mu_i W_i \quad \forall \ i=1,\dots,r \quad (2.27)$$

Bu durum, başlangıçta kabul edilen rölatif hareketsiz faz kabuluna uygundur. Sürtünme kuvveti vektörü $\mathbf{F}[k] = \bar{\mathbf{F}}[k]$ olur, dinamik sistemin davranışı $\mathbf{z}[k]$, denklem (2.18) ile belirlenebilir.

B) Tüm izolatörler için, izolatör kesme kuvvetleri, maksimum sürtünme kuvvetlerinden büyük veya eşittir.

$$|\bar{F}_i[k]| \geq \mu_i W_i \quad \forall \quad i=1,\dots,r \quad (2.28)$$

Bu durumda, rölatif hareketsiz faz kabulü uygun değildir ve tüm izolatörler için kesme kuvvetleri,

$$F_i[k] = \mu_i W_i \operatorname{sgn}(\bar{F}_i[k]) \quad \forall \quad i=1,\dots,r \quad (2.29)$$

denklemleri ile belirlenir.

$F[k]$ belirlendikten sonra, dinamik sistemin davranışı $z[k]$, denklem (2.18) ile belirlenebilir.

C) Tahmin edilen $\bar{F}[k]$ kesme kuvveti vektöründe p tane izolatör kesme kuvveti, ilgili izolatörler için maksimum kesme kuvvetlerini aşmıştır. Bu durum, tüm izolatörlerin rölatif hareketsiz faz kabulüne uygun değildir. Tahmin edilen kesme kuvveti vektörü tekrar düzenlenirse;

$$\bar{F}^*[k] = \begin{bmatrix} \bar{F}_1^*[k] \\ \bar{F}_2^*[k] \end{bmatrix} = \mathbf{T} \bar{F}[k] \quad (2.30)$$

elde edilir.

$\bar{F}_1^*[k]$: $(r-1) \times 1$ boyutunda rölatif hareketsiz faz izolatörlerin kesme kuvveti vektörü,
 $|\bar{F}_{1j}^*| < \mu_j W_j \quad \forall \quad j=1,\dots,r-p$ koşulunu sağlamalıdır.

$\bar{F}_2^*[k]$: $p \times 1$ boyutunda kaymakta olan izolatörlerin kesme kuvveti vektörü

$|\bar{F}_{2j}^*| \geq \mu_j W_j, \quad j = 1,\dots,p$ koşulu sağlanmalıdır.

$\mathbf{T}$: $r \times r$ boyutunda dönüşüm matrisi

$\mathbf{T}$, dönüşüm matrisi $\bar{F}[k]$ ve $\bar{F}^*[k]$ dönüşümünü sağlar.

$y[k]$: izolatörlerin hız vektörü olmak üzere,

$$y^*[k] = \mathbf{P} F^*[k] + \mathbf{Q}^*[k] \quad (2.31)$$

$$y^*[k] = \mathbf{T} y[k] = \begin{pmatrix} y_1^*[k] \\ y_2^*[k] \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{F}^*[k] = \mathbf{T}\mathbf{F}[k] = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1^*[k] \\ \mathbf{F}_2^*[k] \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{Q}^*[k] = \mathbf{T}(\mathbf{D}\mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{D}\mathbf{B}_0\mathbf{F}[k-1] + \mathbf{D}\mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1] + \mathbf{D}\mathbf{E}_1\mathbf{w}[k]) = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_1^*[k] \\ \mathbf{Q}_2^*[k] \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{T}\mathbf{D}\mathbf{B}_1\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

elde edilebilir.

Yukarıdaki denklemlerde, 1 indisi, rölatif hareketsiz faz izolatörleri; 2 indisi, kayma fazındaki izolatörleri göstermektedir.

Rölatif hareketsiz fazda bulunan izolatörler için hız vektörü;

$$\mathbf{y}_1^*[k] = 0 \quad (2.36)$$

Kayma fazında bulunan izolatörler için, dönüştürülmüş sürtünme kuvveti vektörü $\mathbf{F}_2^*[k]$ denklem (2.37) ile belirlenir.

$$\mathbf{F}_{2j}^*[k] = \mu_j \mathbf{W}_j \operatorname{sgn}(\mathbf{F}_{2j}^*[k]) \quad j = 1, \dots, p \quad (2.37)$$

Denklem (2.31), (2.36) ve (2.37)'den, rölatif hareketsiz faz izolatörlerin kesme kuvvetleri (2.38) ile belirlenir.

$$\mathbf{F}_1^*[k] = -\mathbf{P}_{11}^{-1}(\mathbf{P}_{12}\mathbf{F}_2^*[k] + \mathbf{Q}_1^*[k]) \quad (2.38)$$

Rölatif hareketsiz faz durumunda, $\mathbf{F}_{1j}^*$ ler, maksimum sürtünme kuvvetlerinden büyük olamazlar. Buna göre;

$$|\overline{\mathbf{F}}_{1j}^*[k]| \leq \mu_j \mathbf{W}_j \quad \forall j=1, \dots, r-p \quad (2.39)$$

Ancak, eğer $|\overline{\mathbf{F}}_{1j}^*| \geq \mu_j \mathbf{W}_j$ ise, her j için, iterasyon yapmak gereklidir.

$\overline{\mathbf{F}}[k] = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{F}^*[k]$ ve denklem (2.39) sağlanana kadar daha önce yapılan işlemler tekrar yapılmalıdır.

Orjinal koordinatlarda, sürtünme kuvveti vektörü;

$$\mathbf{F}[k] = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{F}^*[k] \quad (2.40)$$

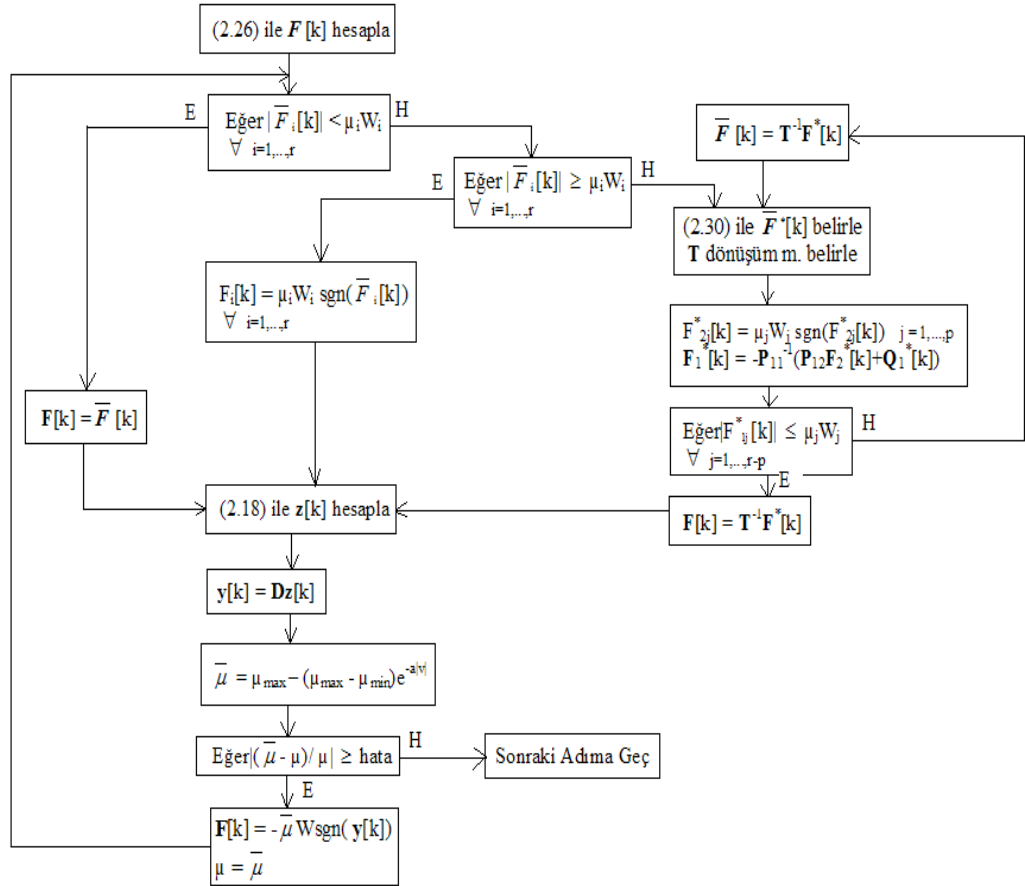
şeklinde belirlenir.

Sürtünme kuvvet vektörü belirlendikten sonra, denklem (2.18) ile $\mathbf{z}[k]$ belirlenebilir.

k. zaman aralığındaki $\mathbf{z}[k]$ belirlendikten sonra, $\mathbf{y}[k]$, izolatörlerin hız vektörü $\mathbf{y}[k]=\mathbf{D}*\mathbf{z}[k]$ denklemi ile belirlenir.

(2.1) denklemi ile izolatörlerin rölatif hızlarına bağlı olarak, her bir izolatör için sürtünme katsayısı iterasyon yapılarak belirlenir.

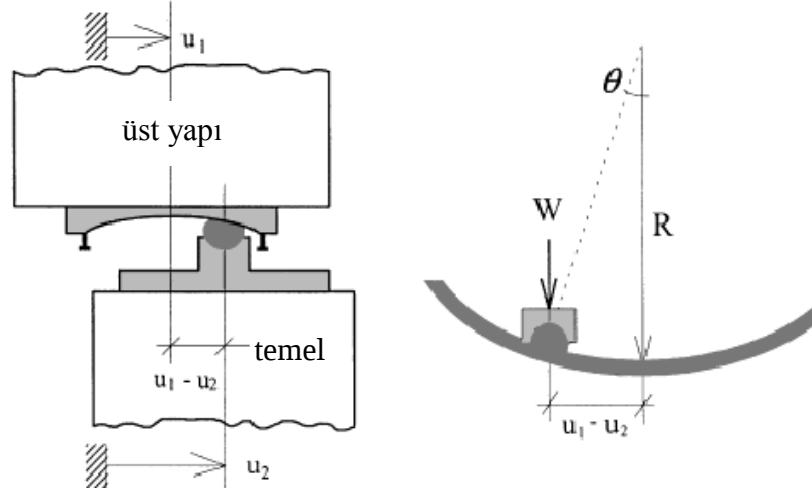
Yukarıda anlatılan çözüm yöntemi ile ilgili akış şeması Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2 Çözüm yöntemi ile ilgili akış şeması

2.4 Sürtünmeli Sarkaç ve Eşdeğer Yay Modeli

Sayısal uygulamalarda sürtünmeli sarkaç sistemi kullanılmıştır. Bu sistemlerin periyotları ve eşdeğer yatay rijitlikleri sürtünme yüzeylerinin eğrilik yarıçapı R ye bağlıdır. Şekil 2.3’de birbirinden izole edilmiş iki yapı elemanının deplasmanları u_1 ve u_2 olsun, bu durumda izolatörün rölatif deplasmanı u_1-u_2 olur.



Şekil 2.3 Sürtülmeli Sarkaç sisteminin parametreleri

Sarkacın denge konumundan θ kadar ayrılması durumunda sistemin yere göre potansiyel enerjisi,

$$V = WR(1 - \cos \theta) \quad (2.41)$$

olur. Burada W , izolatörün taşıdığı normal kuvvetini R , sürtünme yüzeyinin eğrilik yarıçapını göstermektedir. Küçük salınımlar için yaklaşık olarak

$$\theta \cong \sin \theta = \frac{u_1 - u_2}{R} \quad \text{ve} \quad \cos \theta \cong 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (2.42)$$

değerleri kullanılırsa potansiyel enerji,

$$V = WR \frac{\theta^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{W}{R} (u_1 - u_2)^2 \quad (2.43)$$

olarak elde edilir. Potansiyel enerjinin deplasmana göre değişimi kuvveti verir. O halde eşdeğer rijitlik katsayısı,

$$\bar{k}(u_1 - u_2) = \frac{W}{R} (u_1 - u_2) \quad (2.44)$$

(2.44) denkleminde;

$$\bar{k} = \frac{W}{R} \quad (2.45)$$

olarak elde edilir.

2.5 Değişken Frekanslı Sürtünmeli Sarkaç Tipli İzolatörler ve Eşdeğer Yay Modeli (VFPI)

Sayısal uygulamalarda, VFPI 'lı yapılar ile ilgili sayısal analiz yapılacağından, VFPI hakkında bilgi verilmiş ve eşdeğer yay modeli sunulmuştur.

Sürtünmeli sarkaç tipli kayıcı izolatörler; enerji yutma ve merkezleme mekanizmasına sahip olma gibi çok önemli özelliklere sahiptirler. Ancak, böyle sistemler pratik sınırlamalara maruz kalmaktadırlar ve tasarlanan deprem seviyesi ile karşılaşılan deprem seviyesi, kayda değer farklılıklar gösterdiğinde, etkili değildirler. Bu gibi sınırlamaların üstesinden gelmek için VFPI geliştirilmiştir. VFPI'nın doğal periyodu, eğrisel yüzeyde kayma miktarına bağlı olarak değişir. [29]

Bu izolator tipinde (VFPI), kayma yüzeyi küresel değildir. m kütleli rijit bloğun; $y=f(x)$ denklemleri eğrisel yüzeyde kaydığını gözönüne alalım. Herhangi bir anda merkezleme kuvveti (restoring force),

$$f_R = mg \frac{dy}{dx} \quad (2.46)$$

denklemleri ile belirlenebilir.

Merkezleme kuvveti mekanizmasının, lineer olmayan yay ile modellendiğini farzedelim; yay kuvveti, eşdeğer yay rijitliği ve deformasyonun çarpımı olarak belirlenebilir.

$$f_R = k(x).x \quad (2.47)$$

Burada, $k(x)$, lineer olmayan yay rijitliği, x , kütleli yatay deplasmanı göstermektedir.

Eğer, izolatör, tek serbestlik dereceli salım yapan yay olarak modellenirse merkezleme kuvveti,

$$f_R = m.w_b^2(x).x \quad (2.48)$$

formülü yardımıyla belirlenebilir.

Burada, w_b , ani izolatör frekansı olup sadece kayma yüzeyinin geometrisine bağlı olarak değişmektedir.

Standart ikinci derece eğrilerin (küre, elips, hiperbol, parabol) izolatör frekansı ve merkezleme kuvveti için ihtiyaç duyulan değişimi sağlayamadığı tespit edilmiştir.[29] Ancak, VFPI için geliştirilecek yüzey geometrisi için elips yüzey denkleminde yararlanılabilir. a ve b sırasıyla elipsin major ve minor eksenleri olmak üzere;

$$y = b (1 - \sqrt{1 - x^2 / a^2}) \quad (2.49)$$

x'e göre türev alındığında, eğrinin herhangi bir noktasında eğim,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b}{a^2 \sqrt{1 - x^2 / a^2}} x \quad (2.50)$$

formülü ile elde edilebilir.

Kayma yüzeyinin denklemi (2.49)'da ifade edildiği gibi kabul edilirse; (2.49) ve (2.50) denklemleri (2.46) ve (2.48) denklemlerinde yerine konulursa, izolatörün frekansı;

$$w_b^2(x) = w_I^2 / \sqrt{1 - x^2 / a^2} \quad (2.51)$$

formülü yardımıyla ifade edilir.

$w_I^2 = gb/a^2$:izolatörün başlangıç frekansının karesi ($x=0$)

Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi, küçük deplasmanlar için ($x \ll a$), eliptik kayma yüzeyinin frekansı neredeyse sabittir ve sadece b/a^2 oranına bağlıdır.

VFPI için geliştirilen geometri için; elipsin major eksen a, kayma deplasmanı x'in doğrusal fonksiyonu olarak alınır. Buna göre;

$$a = x + d \quad (2.52)$$

d, sabit olmak üzere; major eksen (2.52) formülü yardımıyla belirlenebilir.

(2.52) denklemi, (2.49) de yerine konulup sadeleştirildiğinde, (2.53) denklemi elde edilir.

$$y = b \left[1 - \frac{\sqrt{d^2 + 2dx \operatorname{sgn}(x)}}{d + x \operatorname{sgn}(x)} \right] \quad (2.53)$$

Kayma yüzeyinin herhangi noktasında eğimi bulmak için türev alındığında;

$$\frac{dy}{dx} = \frac{bd}{(d + x \operatorname{sgn}(x))^2 \sqrt{d^2 + 2dx \operatorname{sgn}(x)}} x \quad (2.54)$$

denklemi elde edilir.

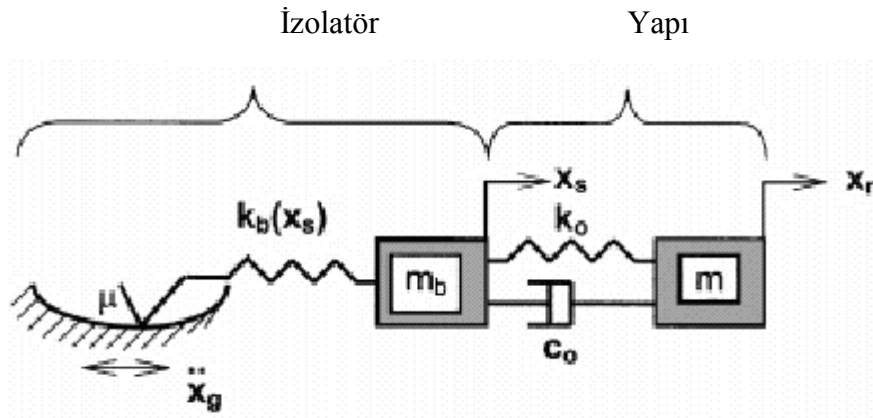
$r = x \operatorname{sgn}(x)/d$ r : birimsiz parametre

r ve başlangıç frekansı (2.54) da yerine konularak, (2.46) ve (2.48) denklemi ile birleştirildiğinde, herhangi bir deplasman için izolator frekansı;

$$w_b^2(x) = \frac{w_I^2}{(1+r)^2 \sqrt{1+2r}} \quad (2.55)$$

formülü ile belirlenebilir. Yukarıdaki denklemdende görüleceği gibi izolatör karakteristikliği tamamen b ve d ile tanımlanır.

Hareketli mesnetlenmiş eğrisel yüzeyli tek serbestlik dereceli yapının analitik modeli Şekil 2.4’de sunulmuştur.



Şekil 2.4 Hareketli mesnetlenmiş eğrisel yüzeyli tek serbestlik dereceli yapının analitik modeli

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde iki tane sayısal uygulama üzerinde durulmuştur. Birinci uygulamada; hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve modeli ele alınmıştır ve bu modelin, harmonik zorlama ve üç farklı depreme karşı davranışı aşağıda sunulan varsayımlara dayanarak belirlenmiştir.

Yapılan varsayımlar aşağıda sıralanmıştır.

- Kat döşemelerinin rijit diyafram olarak çalıştığı varsayılmıştır.
- Düğüm noktalarının dönmeleri ve düşey yöndeki deplasmanları gözönüne alınmamıştır.
- Taban bloğu ile zemin arasındaki sürtünme kuvveti belirlenirken, bölüm2’de açıklanmış olan; Coulomb Sürtünme Modeli ve Mokha Sürtünme Modeli’nin geçerli olduğu varsayımı yapılmıştır.

Sistem için elde edilen çözümler, toplam 12 adet olup , Tablo 3.1’de sunulmaktadır.

Tablo 3.1 Model için yapılan tüm çözümler

Zorlamanın Adı	Coulomb Sürtünme Modeli ile Çözüm	Mokha Sürtünme Modeli ile Çözüm	Konvansyonel (Ankastre) Çözüm
Elcentro Depremi	Çözüm1_1	Çözüm1_2	Çözüm1_3
Kocaeli Depremi	Çözüm2_1	Çözüm2_2	Çözüm2_3
Düzce Depremi	Çözüm3_1	Çözüm3_2	Çözüm3_3
Harmonik	Çözüm4_1	Çözüm4_2	Çözüm4_3

Model için yapılan analizler sonucunda belirlenmek istenenler aşağıda sunulmaktadır.

- 1) Coulomb ve Mokha Sürtünme Modelleri ile yapılan çözümlerin karşılaştırılması.
- 2) Hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli izolatörlerin, yer hareketleri ile yapıda meydana gelen olumsuzluklara karşı etkili olup olmadığının belirlenmesi. Bu

belirlemeyi yaparken, hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli izolatör içeren modelin yer hareketlerine karşı davranışı ve konvansyonel (yere ankastre mesnetlenmiş) modelin yer hareketlerine karşı davranışı karşılaştırılmıştır.

İkinci uygulamada; üç açıklıklı köprü modeli ele alınmış ve bu modelin, üç farklı depreme karşı davranışı incelenmiştir. Bu modelde birden çok ve bağımsız çalışan sürtünme elemanı vardır. Tabliye rijit varsayılarak sistem 5 serbestlik dereceli ayrık sisteme indirgenmiştir. Coulomb sürtünme modelinin geçerli olduğu varsayılmıştır.

Sistem için elde edilen çözümler, toplam 9 adet olup , Tablo 3.2’de sunulmaktadır.

Tablo 3.2 Sistem için yapılan çözümler

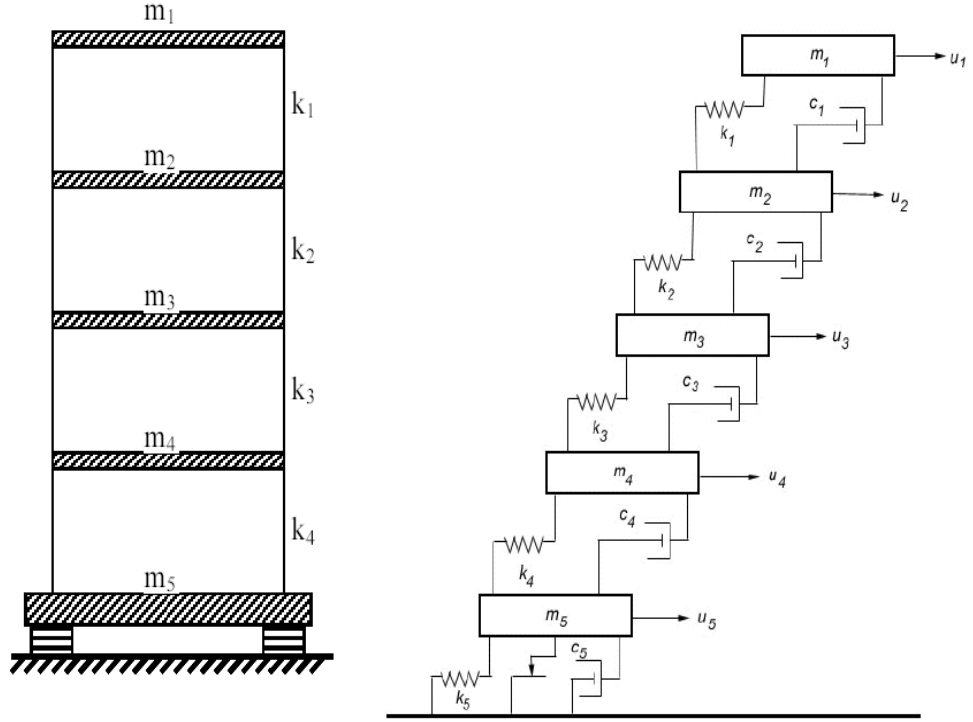
Zorlamanın Adı	VFPI	FPS	Konvansyonel (Ankastre)
Elcentro Depremi	Çözüm1_1	Çözüm1_2	Çözüm1_3
Kocaeli Depremi	Çözüm2_1	Çözüm2_2	Çözüm2_3
Düzce Depremi	Çözüm3_1	Çözüm3_2	Çözüm3_3

Model için yapılan analizler sonucunda belirlenmek istenenler aşağıda sunulmaktadır.

- 1) Hareketli Mesnetlenmiş sarkaç izolatörler (FPS) ve Değişken frekanslı sarkaç izolatörlerin (VFPI), yer hareketinin yapılarda meydana getirdiği olumsuzlukları azaltmadaki etkinliklerinin karşılaştırılması.
- 2) Hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli izolatörlerin, yer hareketleri ile yapıda meydana gelen olumsuzluklara karşı etkili olup olmadığının belirlenmesi.

3.1 Hareketli Mesnetlenmiş 4 Katlı Düzlem Çerçeve Modeli

Hareketli mesnetlenmiş, temel bloğu ve 4 kattan oluşan düzlem çerçeve ve matematiksel modeli Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1 Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve ve matematiksel model

Problemin çözümü için ihtiyaç duyulan veriler aşağıda yer almaktadır.

Kat kütleleri : $m_1=m_2=m_3=m_4= 350.2 \text{ kg}$

Taban bloğunun kütlesi: $m_5= 466.9 \text{ kg}$

Kat yanal rijitlikleri: $k_1=k_2=k_3=k_4= 573600 \text{ N/m}$

Taban bloğu ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı: (Coulomb sürtünme modeli)
 $\mu= 0.1$

Taban bloğu ile zemin arasındaki minimum sürtünme katsayısı: (Mokha sürtünme modeli) $\mu_{\min}= 0.072$

Taban bloğu ile zemin arasındaki maksimum sürtünme katsayısı: (Mokha sürtünme modeli) $\mu_{\max}= 0.1$

Basıca bağlı olan katsayı: (Mokha sürtünme modeli) $a=78.7 \text{ s/m}$

Yerçekimi ivmesi: $g=9.81 \text{ m/s}^2$

Sistem; yanal kuvvetlerin etkisi ile tabanda oluşan kesme kuvveti, taban bloğu ile zemin arasında oluşan maksimum sürtünme kuvvetine eşit olana kadar, hareket

etmez. Taban kesme kuvveti, maksimum sürtünme kuvvetine eşit olduğu andan itibaren sistem kaymaya başlar.

Sürtünme yüzeyine etkiyen normal kuvvet: $N = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \cdot g$

Taban bloğu ile zemin arasındaki maksimum sürtünme kuvveti $= N \cdot \mu$

Sistem kütle matrisi aşağıda sunulmuştur.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 350.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 350.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 350.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 350.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 466.9 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Sistem rijitlik matrisi aşağıda sunulmuştur.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 573600 & -573600 & 0 & 0 & 0 \\ -573600 & 1147200 & -573600 & 0 & 0 \\ 0 & -573600 & 1147200 & -573600 & 0 \\ 0 & 0 & -573600 & 1147200 & -573600 \\ 0 & 0 & 0 & -573600 & 573600 \end{bmatrix} \text{ N/m}$$

Sistem sönüm matrisinin aşağıda belirlenmiştir.

Sistem sönüm matrisi, Rayleigh Sönüm Modeli kullanılarak elde edilebilir.

Sistemin 1. ve 2. mod için serbest titreşim frekansları,

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \Rightarrow \omega_1 = 23.4 \text{ s}^{-1} \quad \omega_2 = 45.9 \text{ s}^{-1} \text{ olarak belirlenir.}$$

Sistemin 1. Mod ve 2. Modu için sönüm oranları: $\xi_1 = \xi_2 = \xi = 0.05$ olarak kabul edilirse; sistem sönüm matrisinin belirlenmesinde kullanılacak olan a_0 ve a_1 katsayıları aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenebilir.

$$a_0 = \xi^*(2*w_i*w_j)/(w_i+w_j)$$

$$a_1 = \xi^*2/(w_i+w_j)$$

$$a_0 = 0.05*(2*23.4*45.9)/(23.4+45.9) = 1.54987$$

$$a_1 = 0.05*2/(23.4+45.9) = 0.00144$$

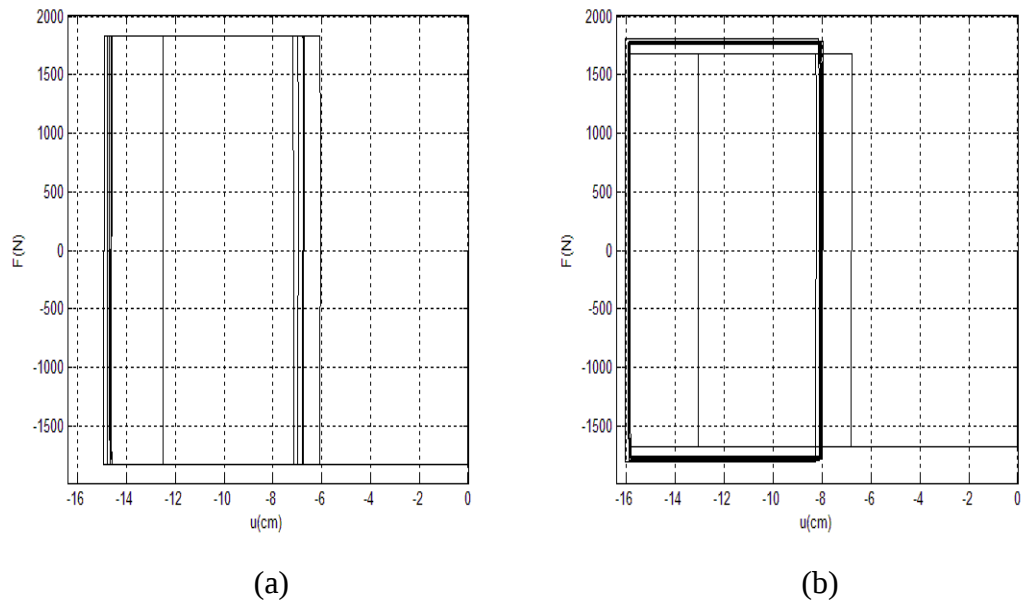
$C=a_0*M+a_1*K$ denklemi yardımıyla sistem sönüm matrisi belirlenmiştir.

$$C = \begin{bmatrix} 1368.7 & -825.98 & 0 & 0 & 0 \\ -825.98 & 2194.7 & -825.98 & 0 & 0 \\ 0 & -825.98 & 2194.7 & -825.98 & 0 \\ 0 & 0 & -825.98 & 2194.7 & -825.98 \\ 0 & 0 & 0 & -825.98 & 1549.6 \end{bmatrix}$$

3.1.1 Harmonik yer hareketi ile analiz

Bu modelin davranışı, $\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$ [13] harmonik yer hareketi için incelenmiştir. Burada $\ddot{u}_g(t)$ skaler bir fonksiyondur ve yer hareketinin zamana bağlı ivmesini ifade eder.

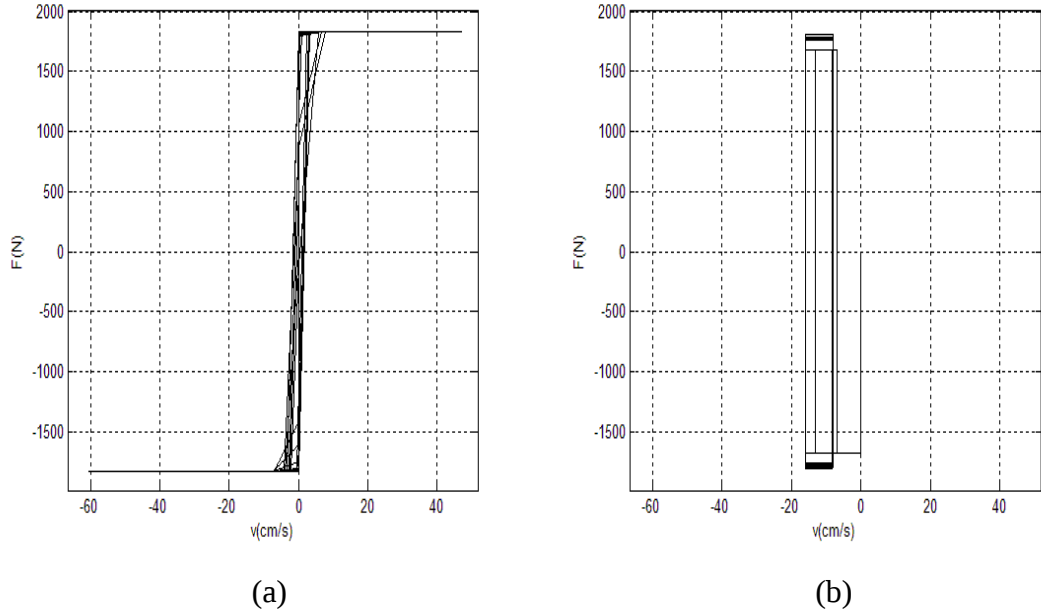
Şekil 3.2’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için harmonik zorlama altında izolatörde meydana gelen rölatif deplasman – kesme kuvveti histerisis eğrileri sunulmuştur.



Şekil 3.2 İzolatörde rölatif deplasman (cm) - kesme kuvveti (N) histerisis eğrisi

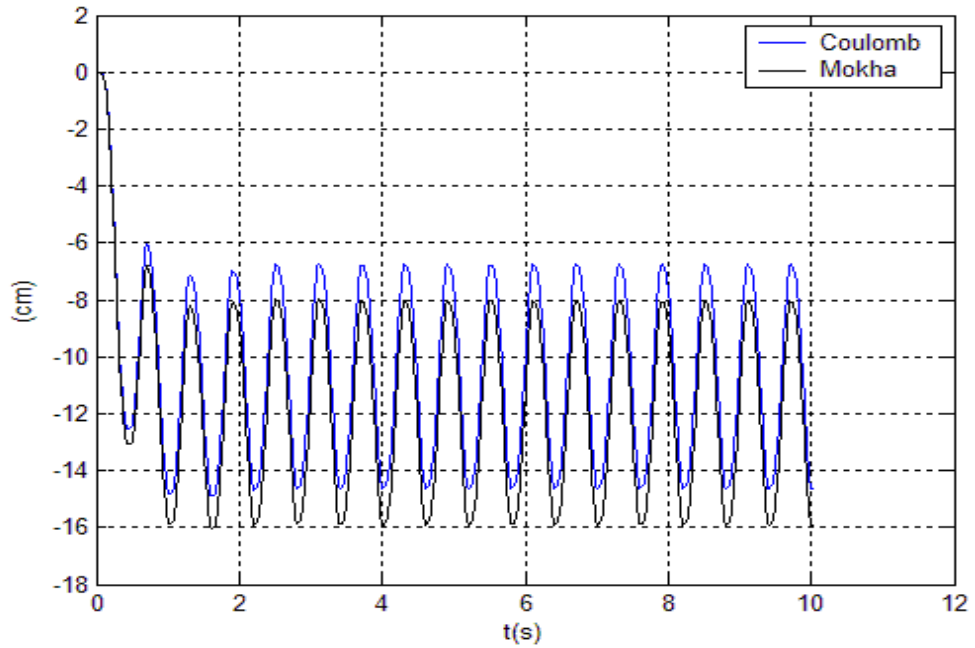
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Harmonik

Şekil 3.3’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için harmonik zorlama altında izolatörde meydana gelen hız – kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.4’de, harmonik zorlama altında, temel bloğunun yere göre deplasmanının zamana göre değişim grafiği sunulmuştur.



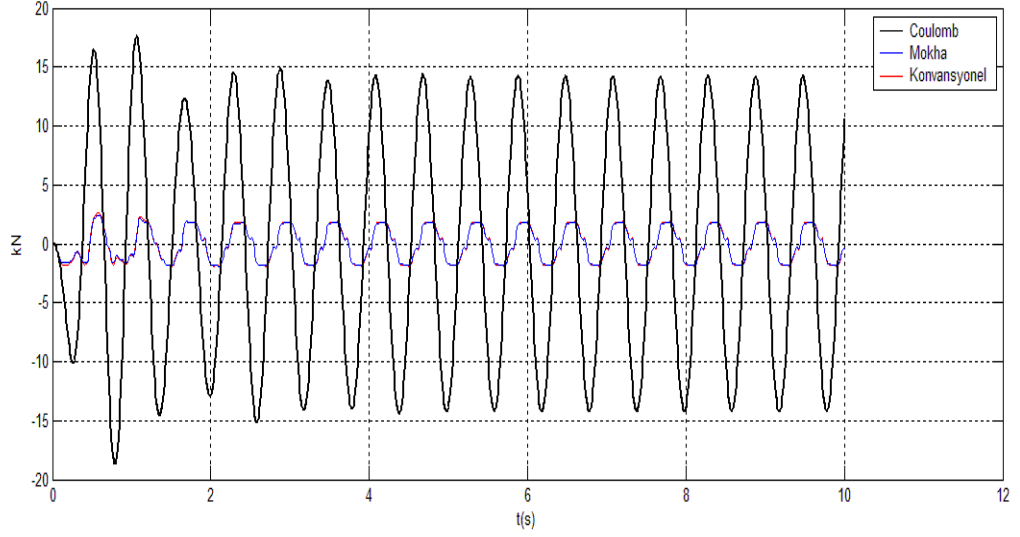
Şekil 3.3 İzolatörde hız (cm/sn) - kesme kuvveti (N) diyagramı

(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Harmonik

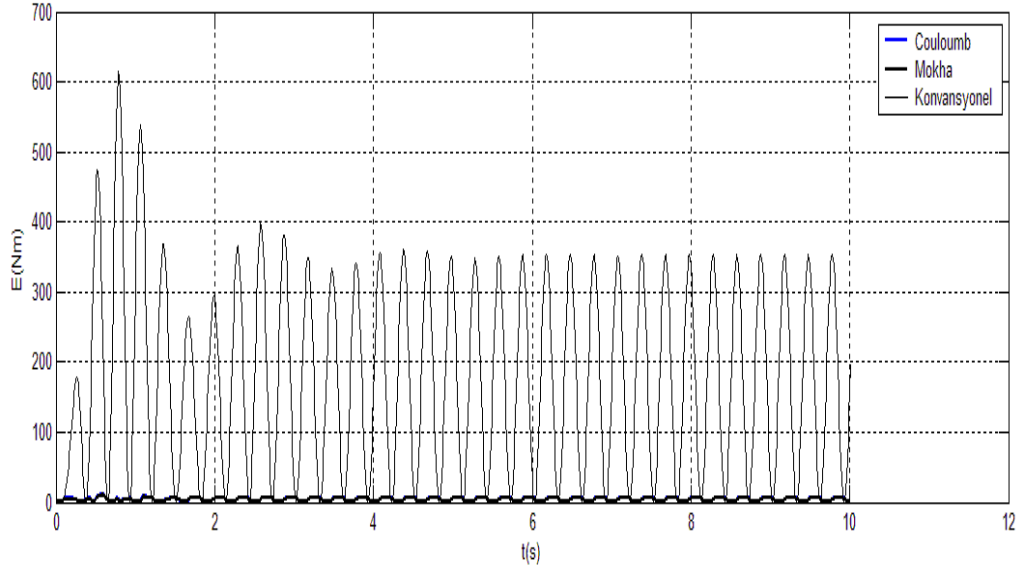


Şekil 3.4 Temel bloğunun yere göre deplasmanı(cm), Harmonik

Şekil 3.5’de, harmonik zorlama altında, izole edilmiş ve edilmemiş sistemlerin ilk kat kolonları kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Şekil 3.6’da, harmonik zorlama altında, izole edilmiş ve edilmemiş sistemlerin şekil değiştirme enerjisinin karşılaştırılması sunulmuştur.



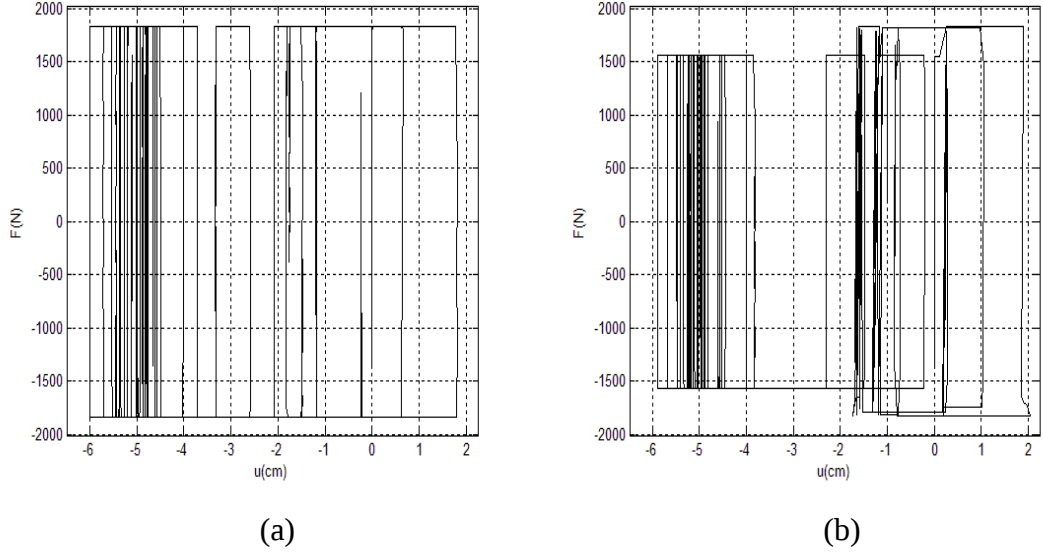
Şekil 3.5 İzole edilmiş ve edilmemiş sistemin ilk kat kolonları kesme kuvvetlerinin (kN) karşılaştırılması, Harmonik



Şekil 3.6 Şekil değiştirme enerjisinin karşılaştırılması (Nm), Harmonik

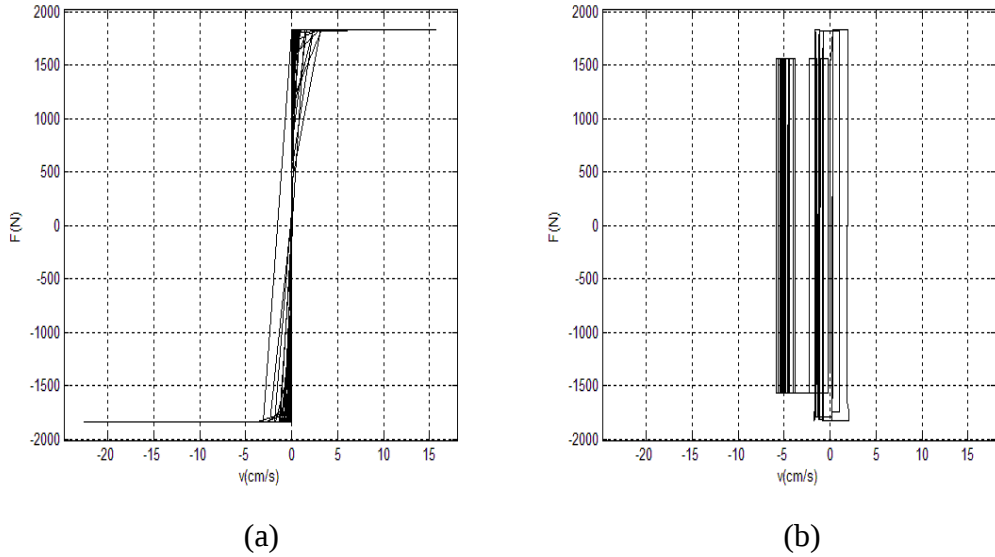
3.1.2 El-Centro deprem ivme kaydı ile analiz

Şekil 3.7’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için El-Centro deprem ivmelerine maruz kalan izolatörde meydana gelen rölatif deplasman – kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.8’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için El-Centro deprem ivmelerine maruz kalan izolatörde meydana gelen hız – kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.7 İzolatörde rölatif deplasman (cm) - kesme kuvveti (N) histerisis egrisi

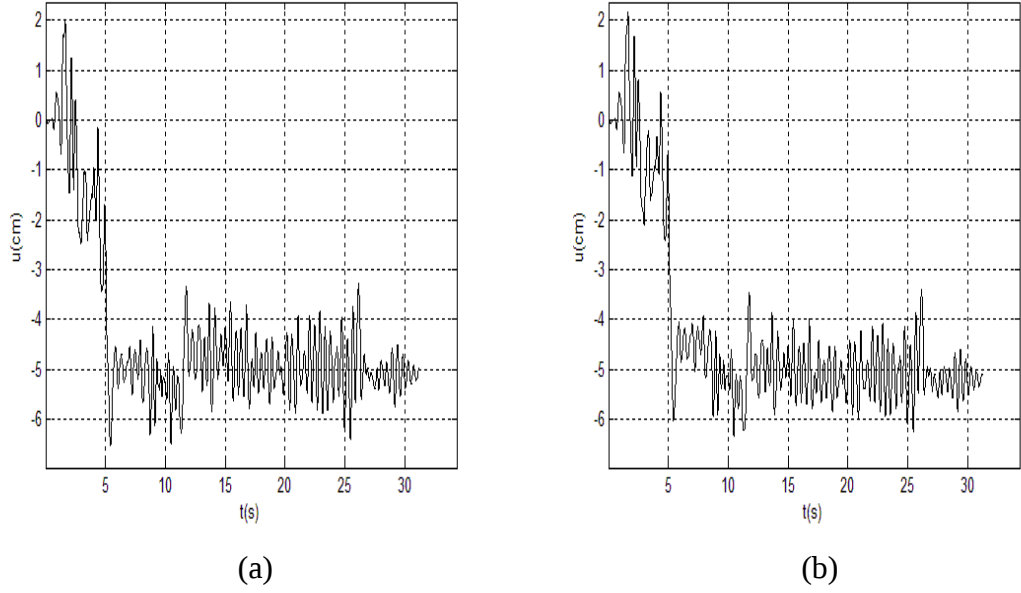
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Elcentro



Şekil 3.8 İzolatörde hız (cm/sn) - kesme kuvveti (N) diyagramı

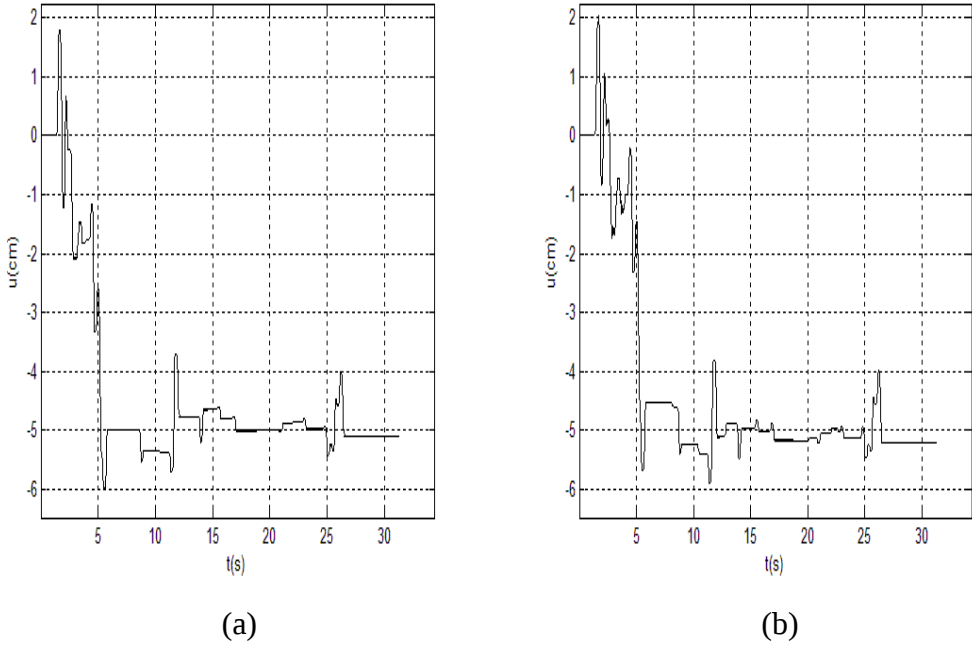
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Elcentro

Şekil 3.9’da, El-Centro depremi ile Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için, üst katın zemine göre deplasmanının zamanla değişim grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.10’da, El-Centro depremi ile Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için, temel bloğunun zemine göre deplasmanının zamanla değişim grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.9 Üst katın zemine göre deplasmanı (cm)

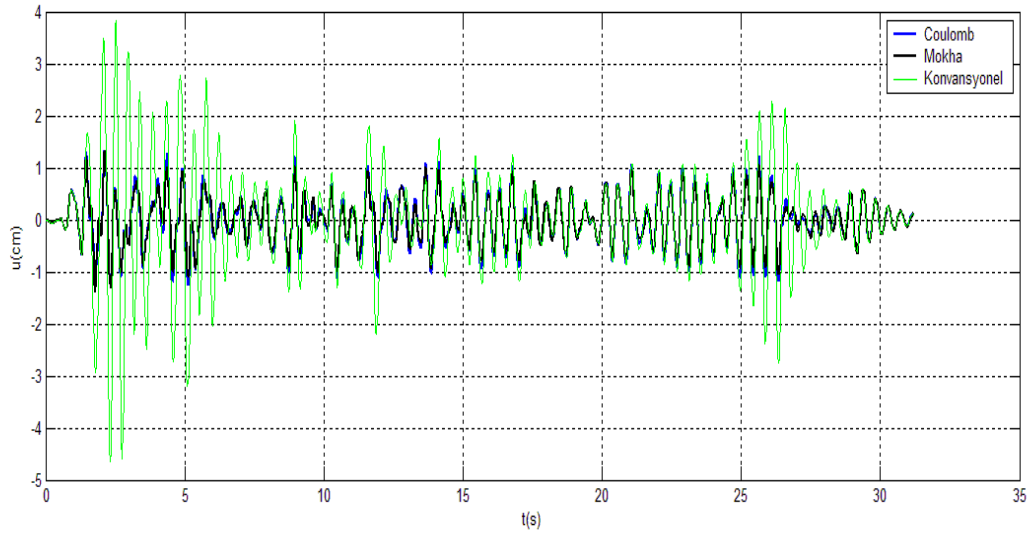
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Elcentro



Şekil 3.10 Temel bloğunun zemine göre deplasmanı, (cm)

(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Elcentro

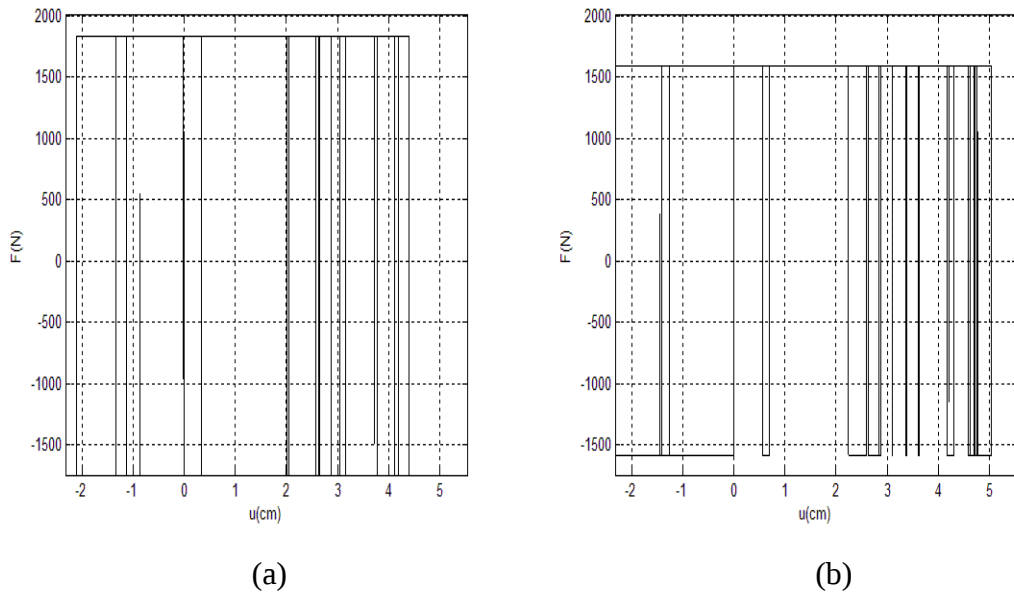
Şekil 3.11’de, El-Centro depremi ile Coulomb, Mokha ve konvansyonel modeller için şekil değiştirme enerjilerinin karşılaştırılmasına ait grafikler sunulmuştur.



Şekil 3.11 Şekil değıştirme enerjisinin karşılaştırılması, Elcentro

3.1.3 Kocaeli deprem ivme kaydı ile analiz

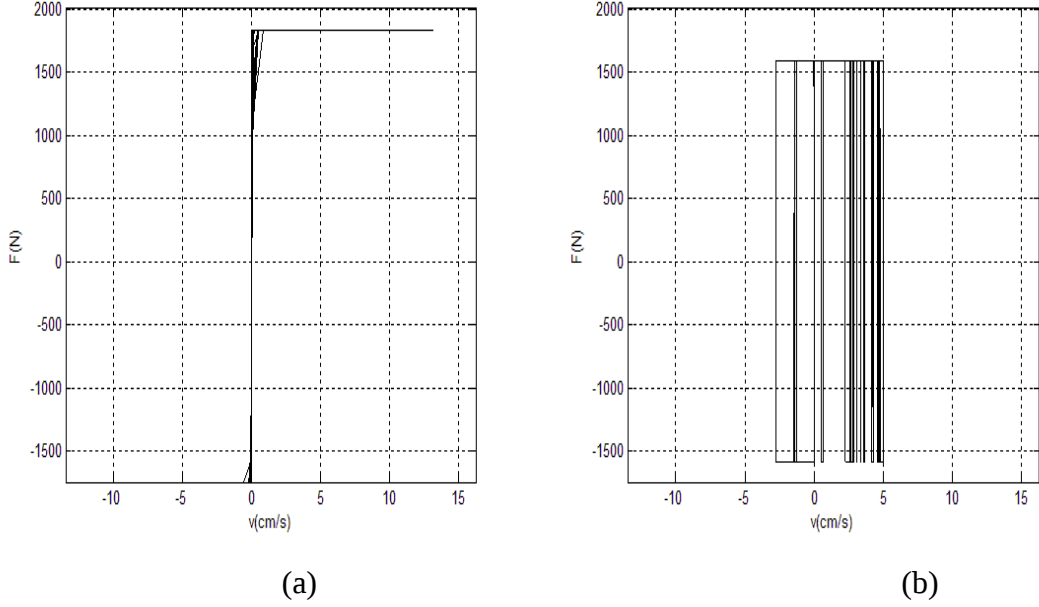
Şekil 3.12’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için Kocaeli deprem ivmelerine maruz kalan izolatörde meydana gelen rölatif deplasman – kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.12 İzolatörde rölatif deplasman (cm) - kesme kuvveti (N) histerisis eğrisi

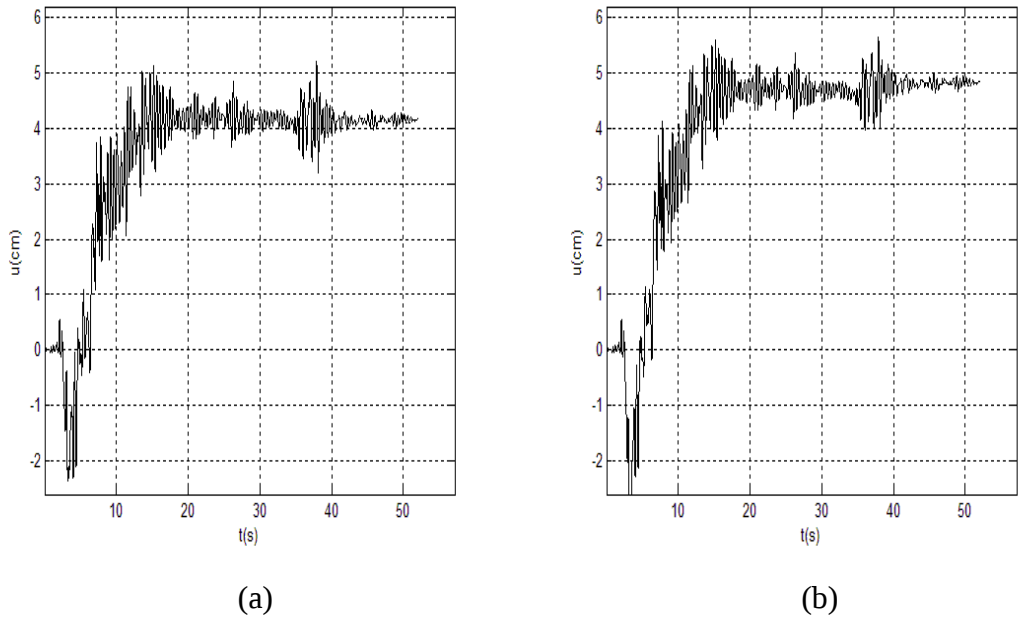
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Kocaeli

Şekil 3.13’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için Kocaeli deprem ivmelerine maruz kalan izolatörde meydana gelen hız – kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.14’de, Kocaeli depremi ile Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için, üst katın zemine göre deplasmanının zamanla değişim grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.13 İzolatörde hız (cm/sn) - kesme kuvveti (N) diyagramı

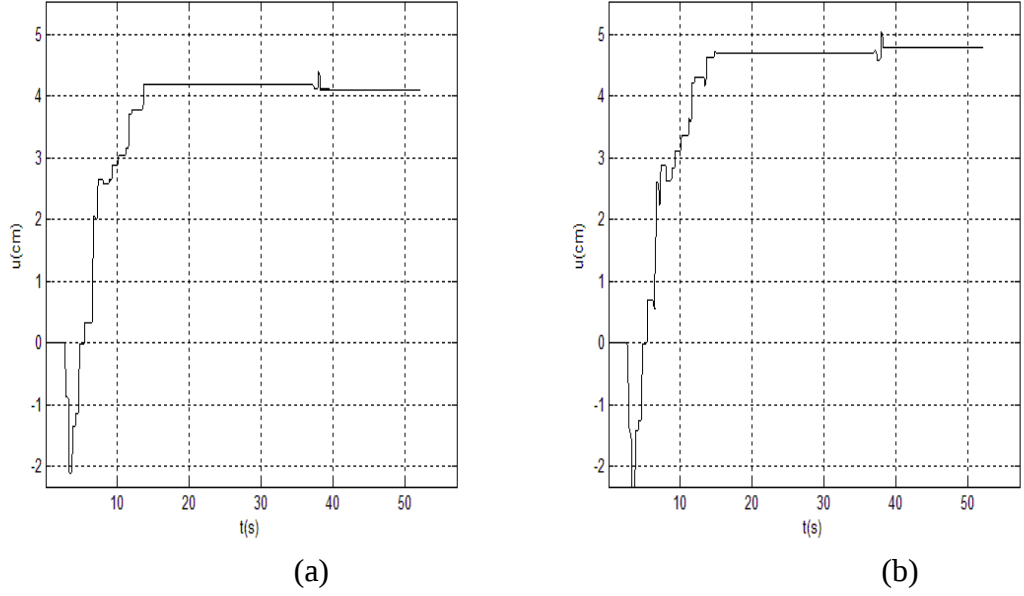
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Kocaeli



Şekil 3.14 Üst katın zemine göre deplasmanı (cm)

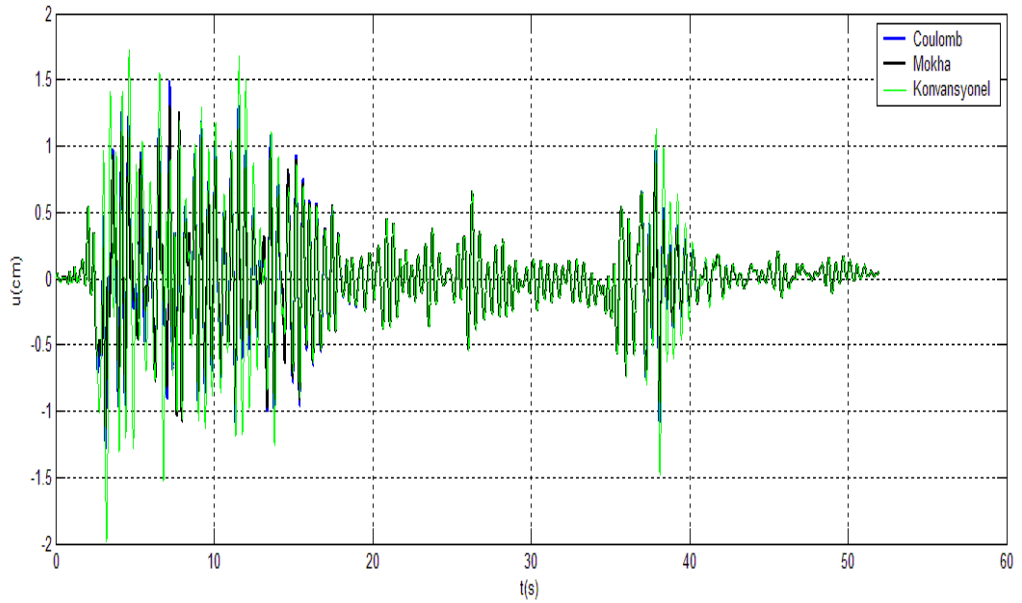
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Kocaeli

Şekil 3.15’de, Kocaeli depremi ile Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için, temel bloğunun zemine göre deplasmanının zamanla değişim grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.16’da, Kocaeli depremi ile Coulomb, Mokha ve konvansiyonel modeller için izole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasman grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.15 Temel bloğunun zemine göre deplasmanı, (cm)

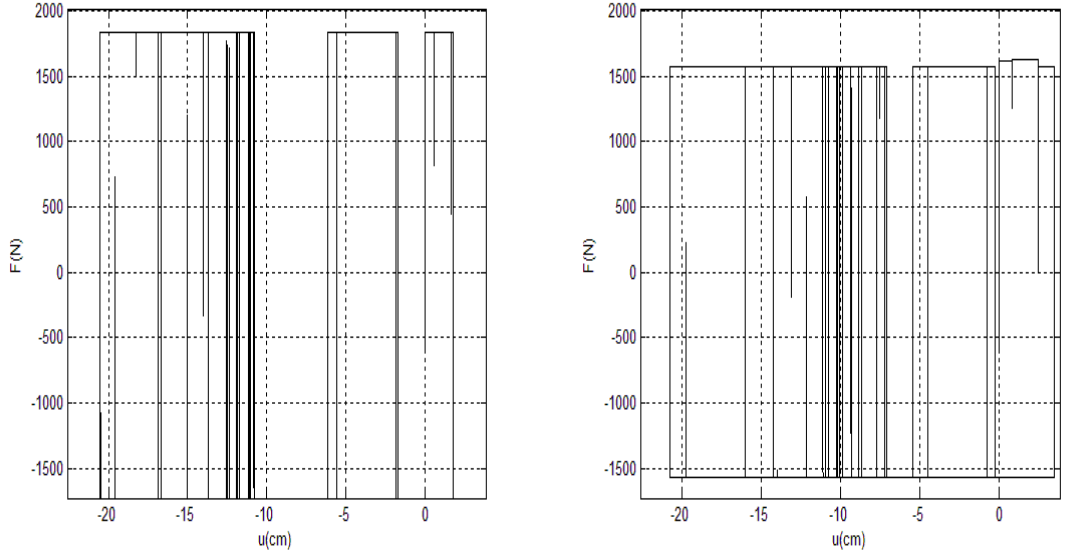
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Kocaeli



Şekil 3.16 İzole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasmanı (cm), Kocaeli

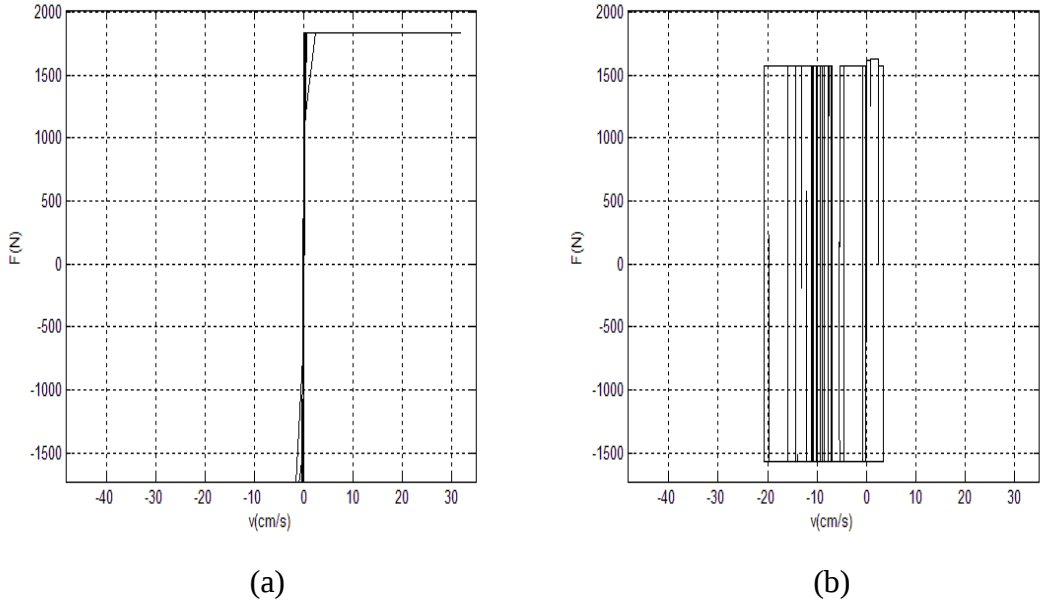
3.1.4 Düzce deprem ivme kaydı ile analiz

Şekil 3.17’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için Düzce deprem ivmelerine maruz kalan izolâtörde meydana gelen rölâtif deplasman – kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.18’de, Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için Düzce deprem ivmelerine maruz kalan izolâtörde meydana gelen hız – kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.17 İzolatörde rölâtif deplasman (cm) - kesme kuvveti (N) histerisis egrisi

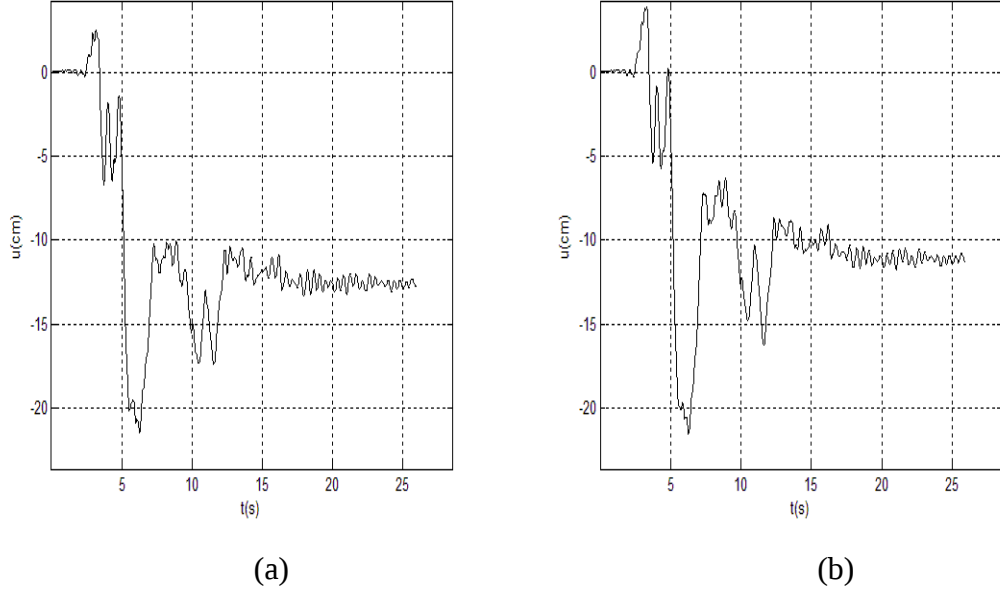
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Düzce



Şekil 3.18 İzolatörde hız (cm/sn) - kesme kuvveti (N) diyagramı

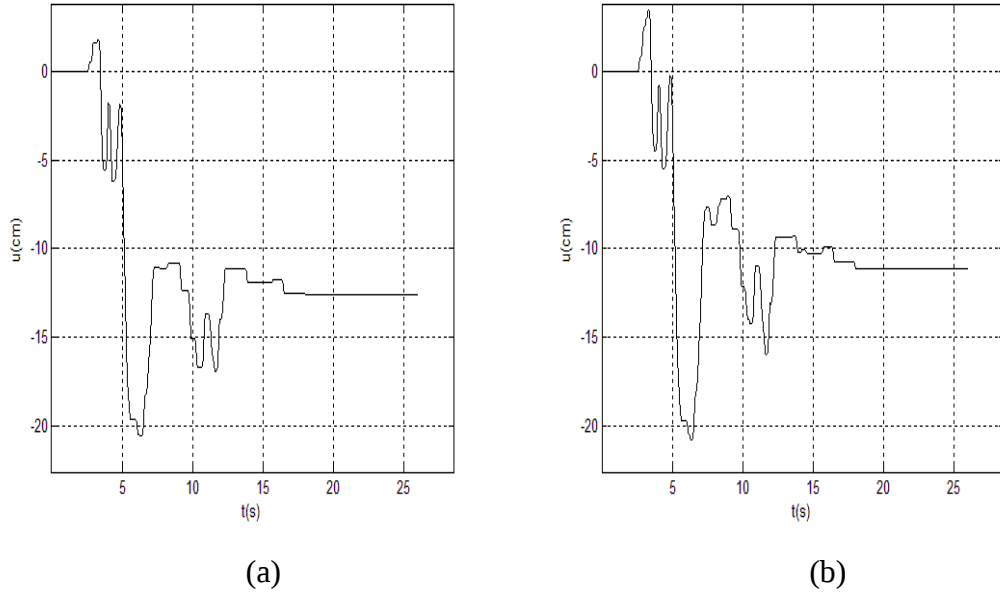
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Düzce

Şekil 3.19’da, Düzce depremi ile Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için, üst katın zemine göre deplasmanının zamanla değişim grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.20’de, Düzce depremi ile Coulomb ve Mokha sürtünme modelleri için, temel bloğunun zemine göre deplasmanının zamanla değişim grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.19 Üst katın zemine göre deplasmanı (cm)

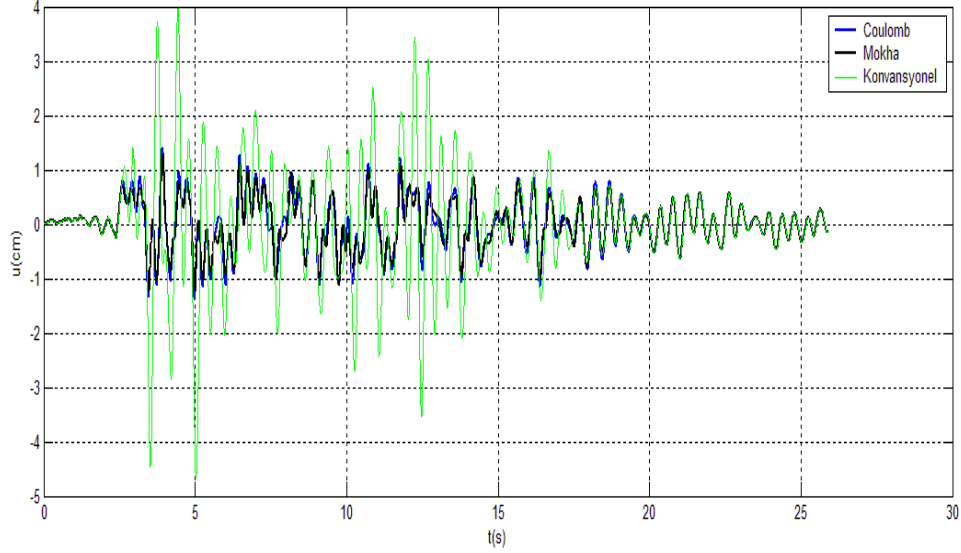
(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Düzce



Şekil 3.20 Temel bloğunun zemine göre deplasmanı, (cm)

(a) Coulomb Sürtünme Modeli, (b) Mokha Sürtünme Modeli, Düzce

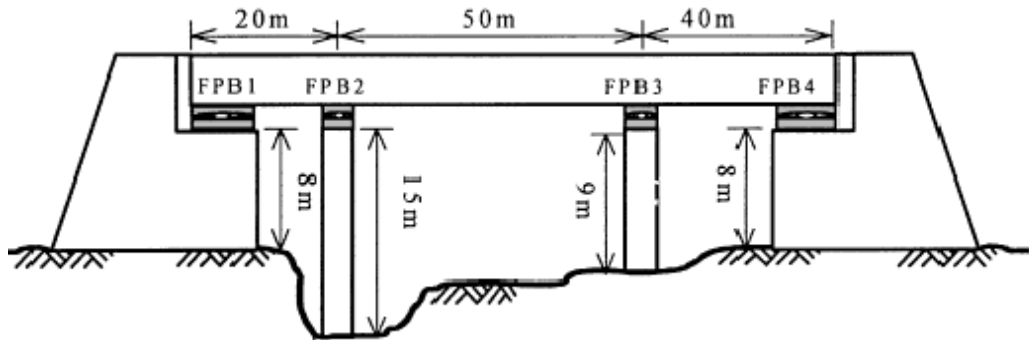
Şekil 3.21’de, Düzce depremi ile Coulomb, Mokha ve konvansiyonel modeller için izole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasman grafikleri sunulmuştur.



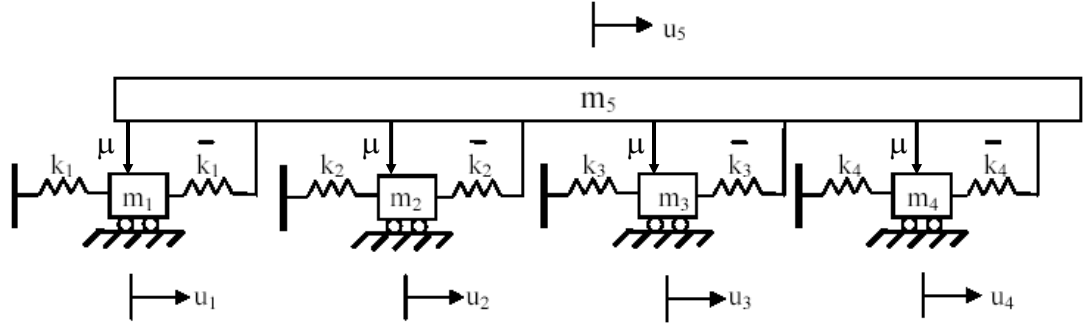
Şekil 3.21 İzole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasmanı (cm), Düzce

3.2 Üç Açıklıklı Köprü Modeli

Bu örnekte, Şekil 3.22’de şekli ve boyutları sunulan simetrik olmayan üç açıklıklı sürekli köprü modeli incelenmiştir. Bu modelde birden çok ve bağımsız çalışan sürtünme elemanı vardır. Tabliye rijit varsayılarak sistem 5 serbestlik dereceli ayrık sisteme indirgenmiştir. Coulomb sürtünme modelinin geçerli olduğu varsayılmıştır. Sistem için kurulan matematiksel model Şekil 3.13’de gösterilmiştir. Köprü elemanlarının özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.22 Üç açıklıklı simetrik olmayan köprü ve boyutları



Şekil 3.23 Üç açıklıklı köprü için kurulan matematiksel model

Tablo 3.3 Köprü elamanlarını özellikleri

	Tabliye	Orta Ayaklar	Kenar Ayaklar
Alan [m ²]	1.538	4.5	15
Atalet Momenti [m ⁴]	3.7	0.84	2.81
Elastisite Modülü [N/m ²]	2.04E11	2.05E10	2.05E10
Birim kütle [t/m ³]	7.8	2.4	2.4

*Sürtünmeli sarkaç sistemi (FPS) kullanılarak yapılan çözümlerde; sürtünmeli yüzeylerin eğrilik yarıçapları (sarkaç boyu) $R=1\text{m}$ alınmıştır, izolatorlerin periyotları $T = 2\pi\sqrt{R/g}$ formülünden yaklaşık olarak $T = 2\text{sn}$ olarak belirlenir.

*Değişken frekanslı sarkaç izolator (VFPI) kullanarak yapılan çözümlerde, $b=0.09\text{m}$, $d=0.30\text{ m}$ olarak alınmıştır.

Burada köprü ayakları, bir ucu serbest diğer ucu ankastre mesnetlenmiş konsol çubuk olarak alınmış ve yanal rijitlikleri

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (3.3)$$

formülü ile belirlenmiştir. Ayakların kütleleri için kütle matrisinde yatay doğrultudaki serbestlik derecesine karşı gelen

$$m = \frac{13}{35} m_T \quad (3.4)$$

değeri alınmıştır. Burada m_T kolonun toplam kütlesidir. Sürtünme kuvveti ve dış yük yer gösterme matrisleri sırasıyla,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. Kesme kuvveti ve dış yük vektörleri sırasıyla,

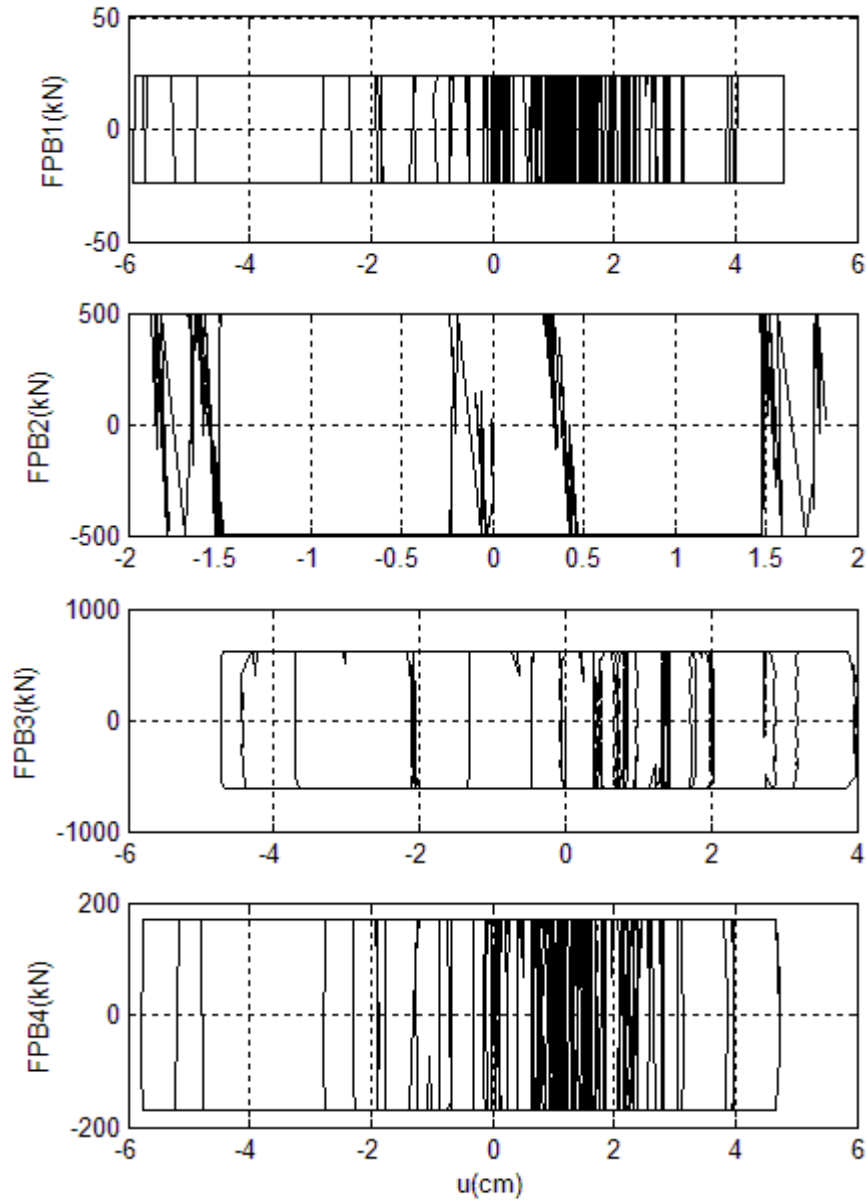
$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ F_4(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}(t) = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix} \mathbf{g}(t)$$

şeklindedir.

3.2.1 Elcentro deprem ivmeleri ile analiz

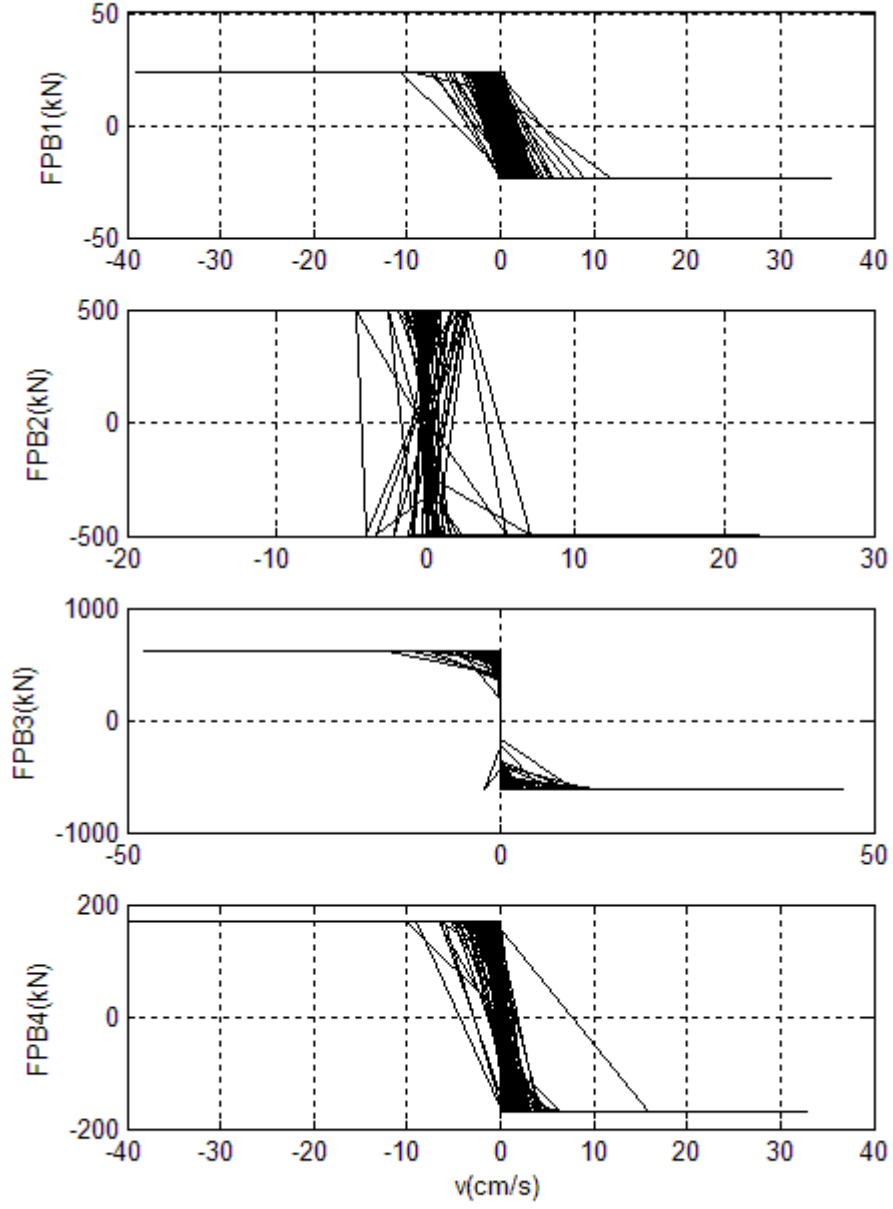
3.2.1.1 VFPI'li sistem için analiz

Şekil 3.24'de, Elcentro depremi ile VFPI'li sistem için rölative deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri sunulmuştur.



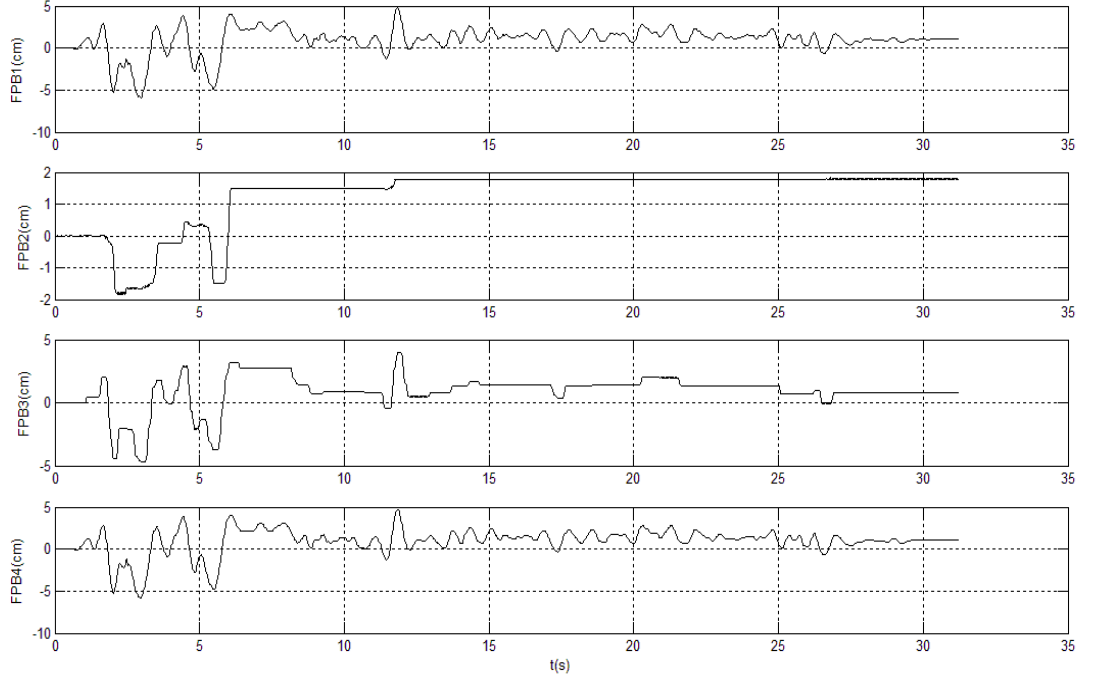
Şekil 3.24 İzolatörlerde rölative deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrileri
Elcentro ,VFPI

Şekil 3.25’de, Elcentro depremi ile VFPI’li sistem için izolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları sunulmuştur.

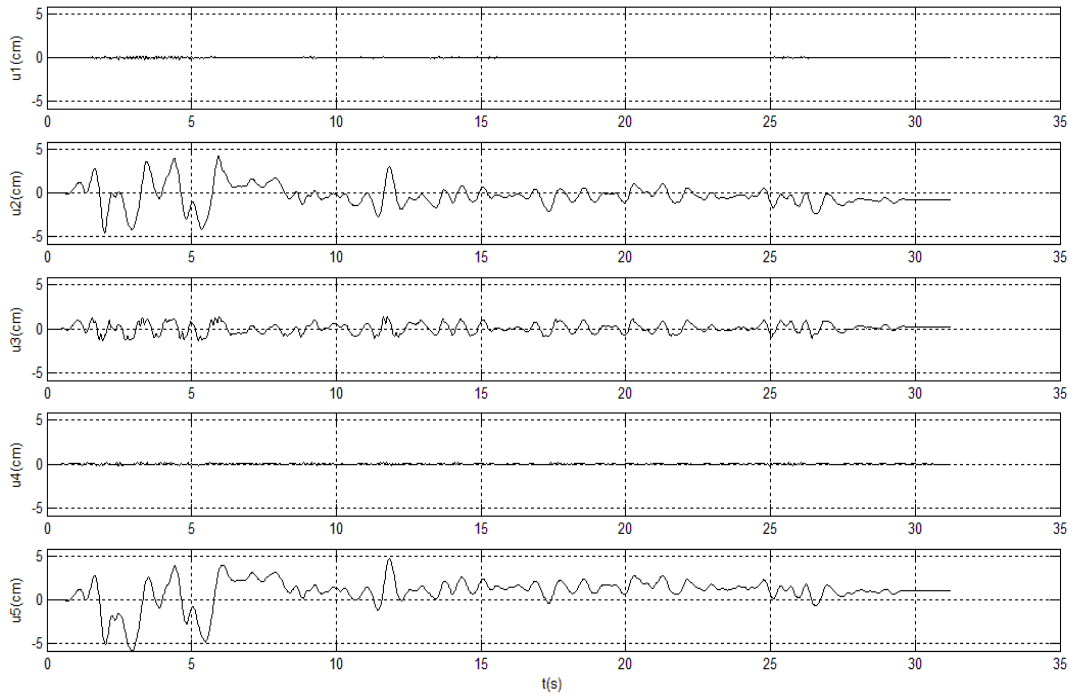


Şekil 3.25 İzolatörlerde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramları, Elcentro,VFPI

Şekil 3.26’da, El-Centro depremi ile VFPI’li sistemler için, izolatörlerde rölatif deplasmanlar sunulmuştur. Şekil 3.27’de, El-Centro depremi ile VFPI’li sistemler için, izole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları sunulmuştur.



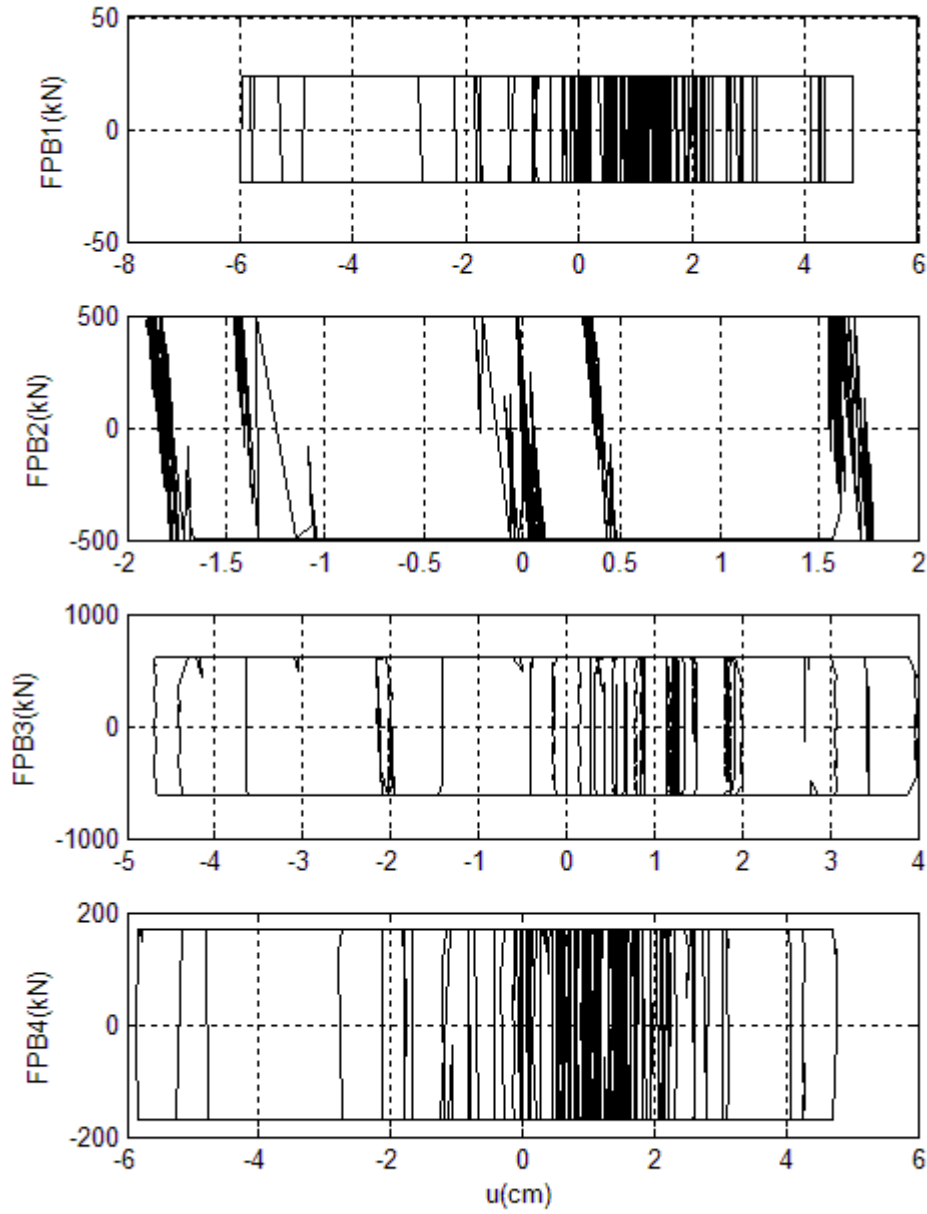
Şekil 3.26 İzolatörlerde rölatif deplasmanlar (cm), Elcentro, VFPI



Şekil 3.27 İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları (cm), Elcentro , VFPI

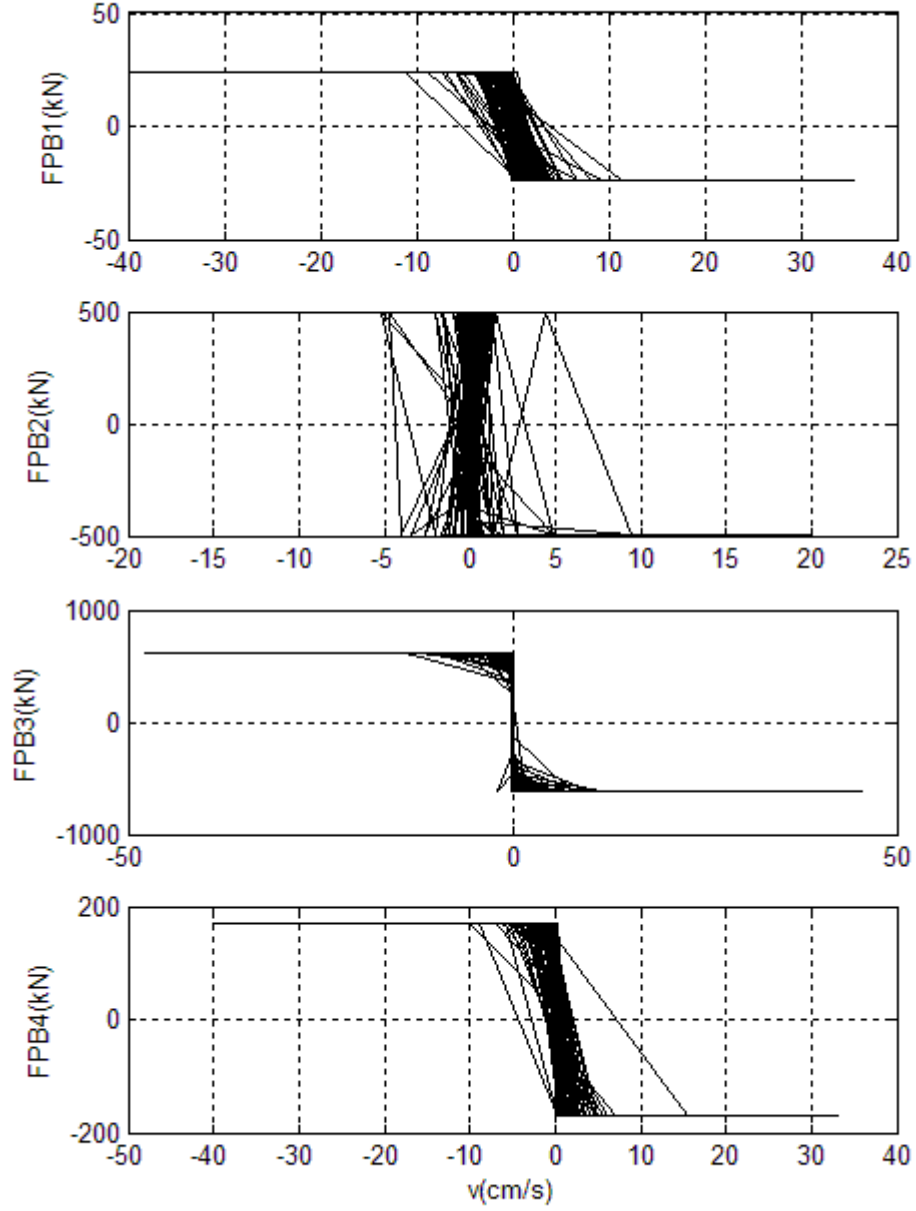
3.2.1.2 FPS'li sistem için analiz

Şekil 3.28'de, El-Centro depremi ile FPS'li sistemler için, izolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri sunulmuştur.



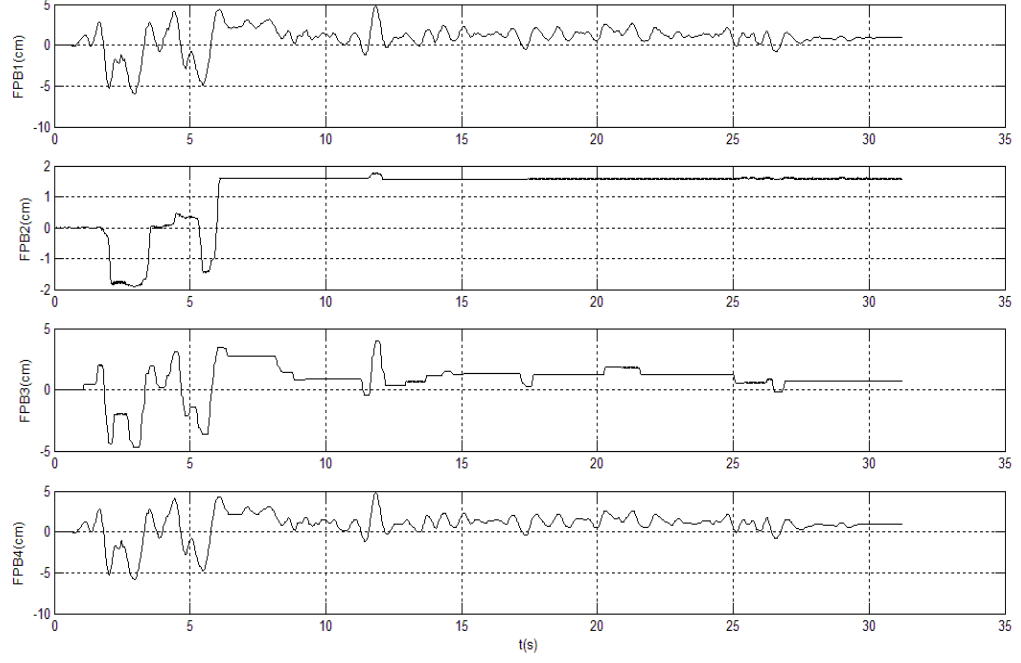
Şekil 3.28 İzolatörlerde rölatif deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrileri Elcentro, FPS

Şekil 3.29’da, El-Centro depremi ile FPS’li sistemler için, izolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları sunulmuştur.

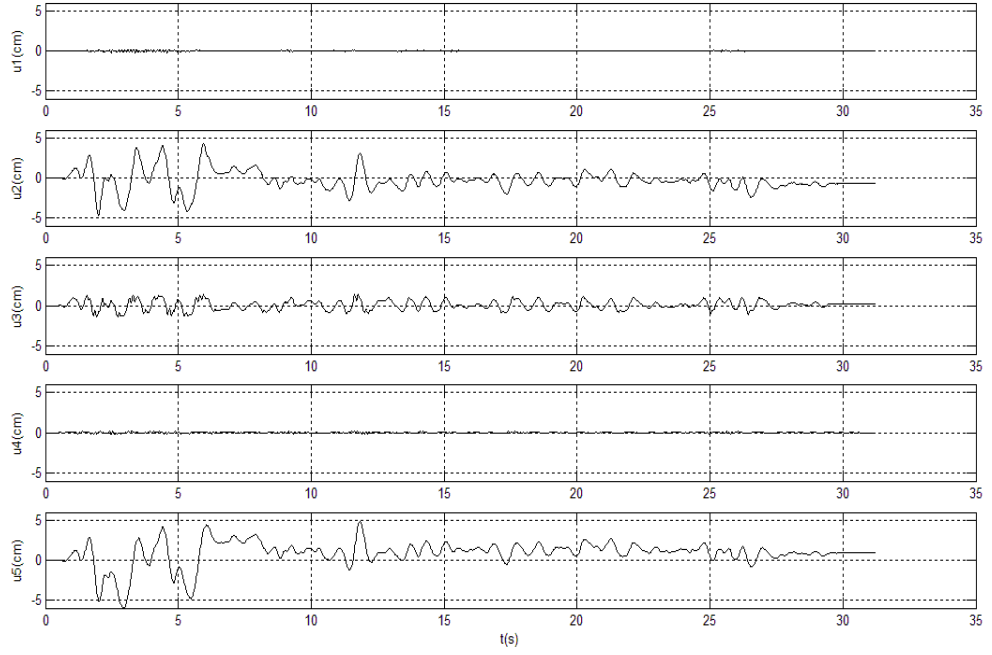


Şekil 3.29 İzolatörlerde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramları
Elcentro , FPS

Şekil 3.30'da, El-Centro depremi ile FPS'li sistemler için, izolatörlerde rölatif deplasmanlar sunulmuştur. Şekil 3.31'de, El-Centro depremi ile FPS'li sistemler için, izole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları sunulmuştur.



Şekil 3.30 İzolatörlerde rölatif deplasmanlar (cm), Elcentro, FPS

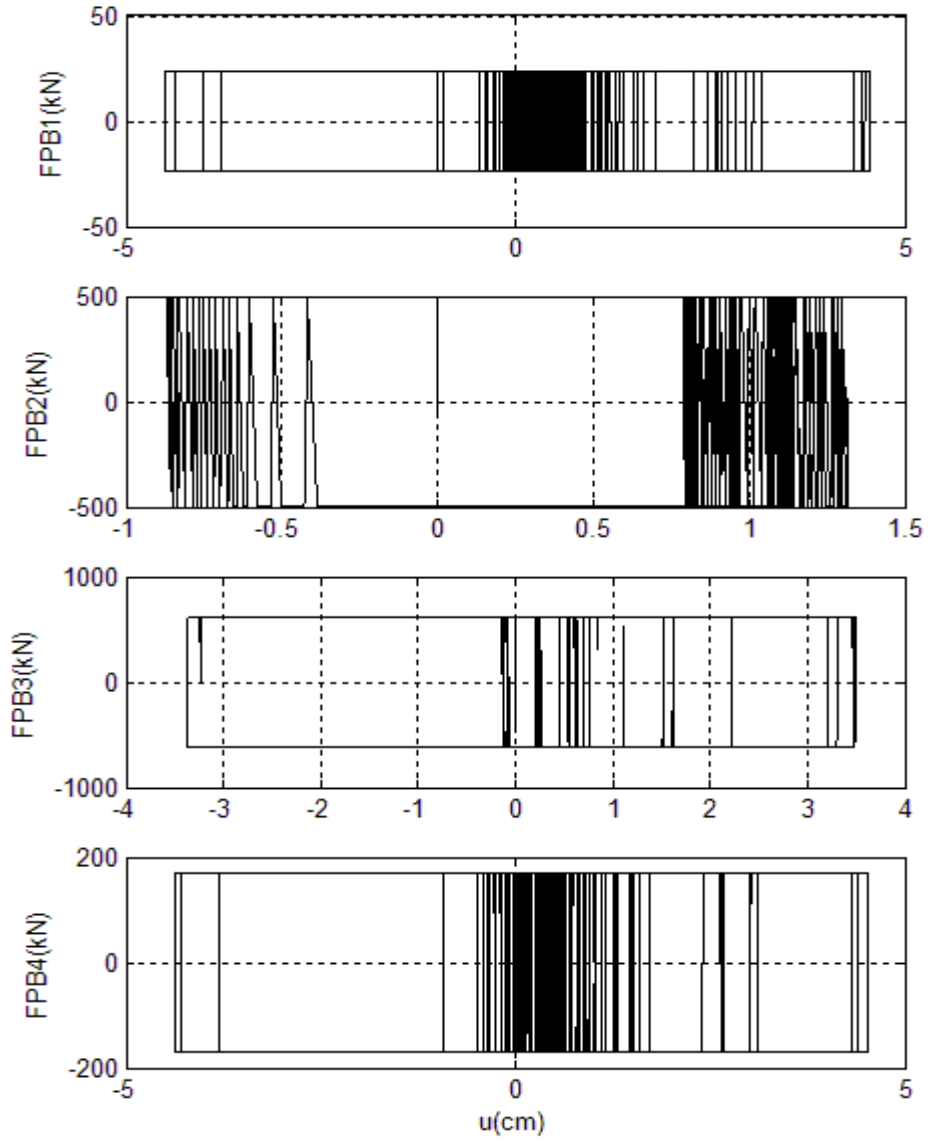


Şekil 3.31 İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları (cm), Elcentro, FPS

3.2.2 Kocaeli depremi ile analiz

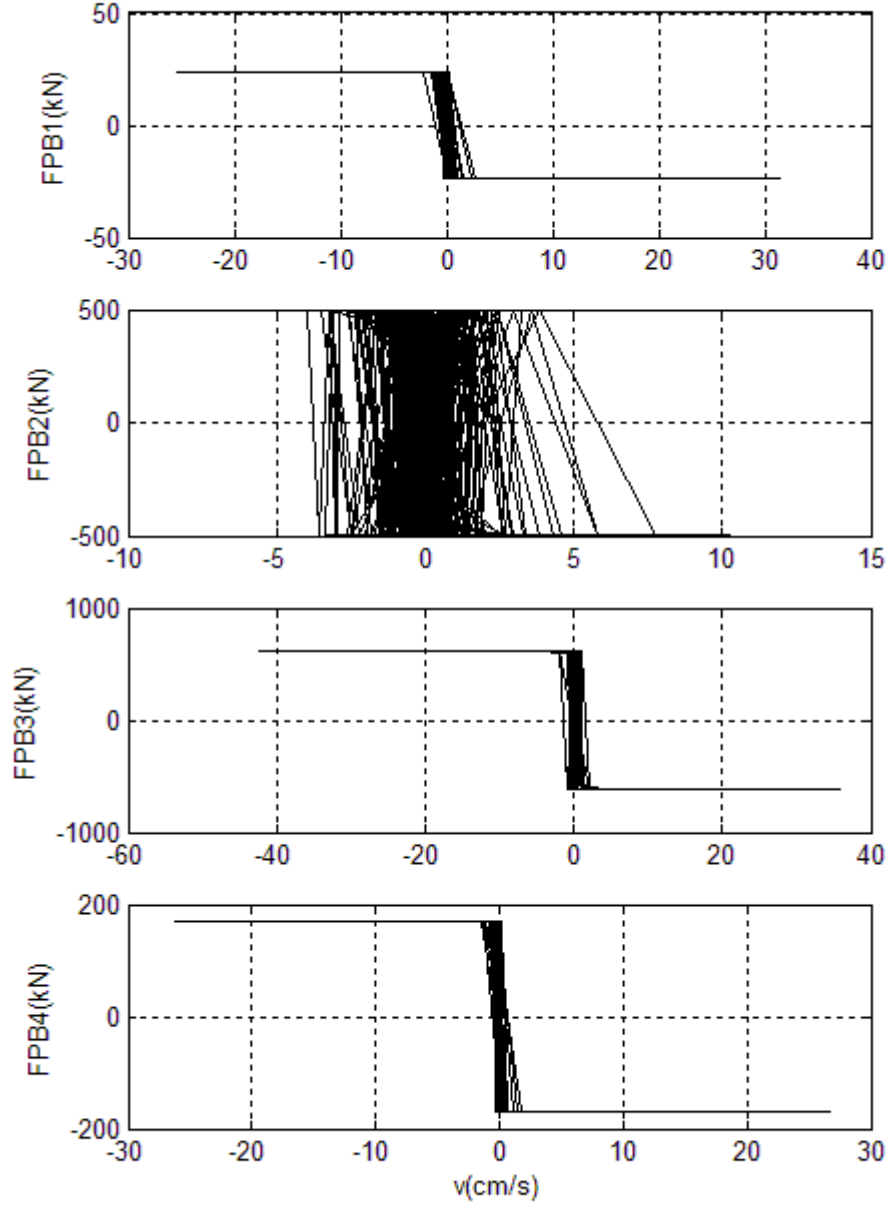
3.2.2.1 VFPI'li sistem için analiz

Şekil 3.32'de, Kocaeli depremi ile VFPI'li sistem için rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri sunulmuştur.



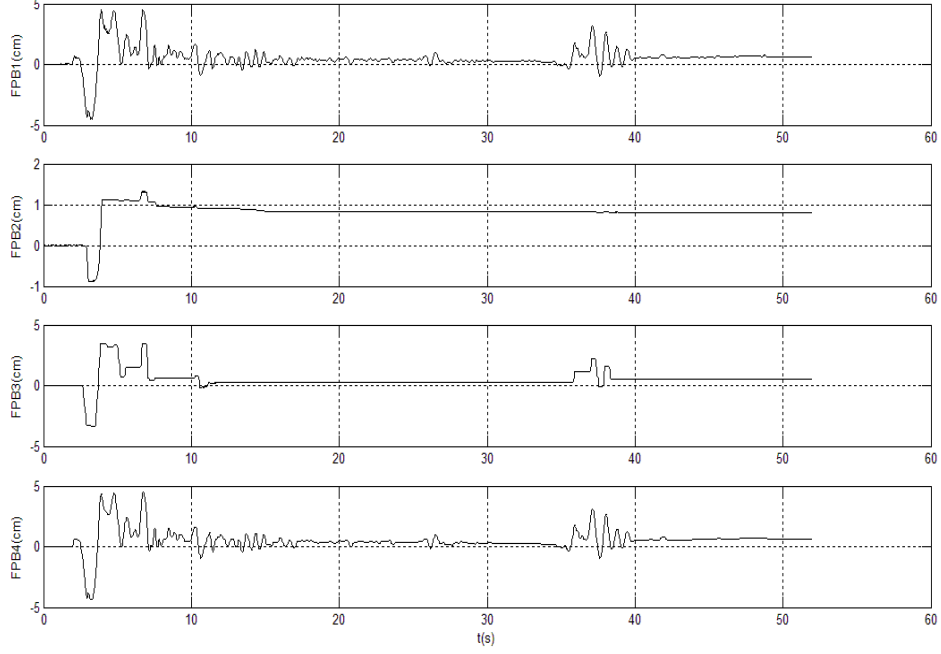
Şekil 3.32 İzolatörlerde rölatif deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrileri
Kocaeli, VFPI

Şekil 3.33’de, Kocaeli depremi ile VFPI’li sistem için izolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları sunulmuştur.

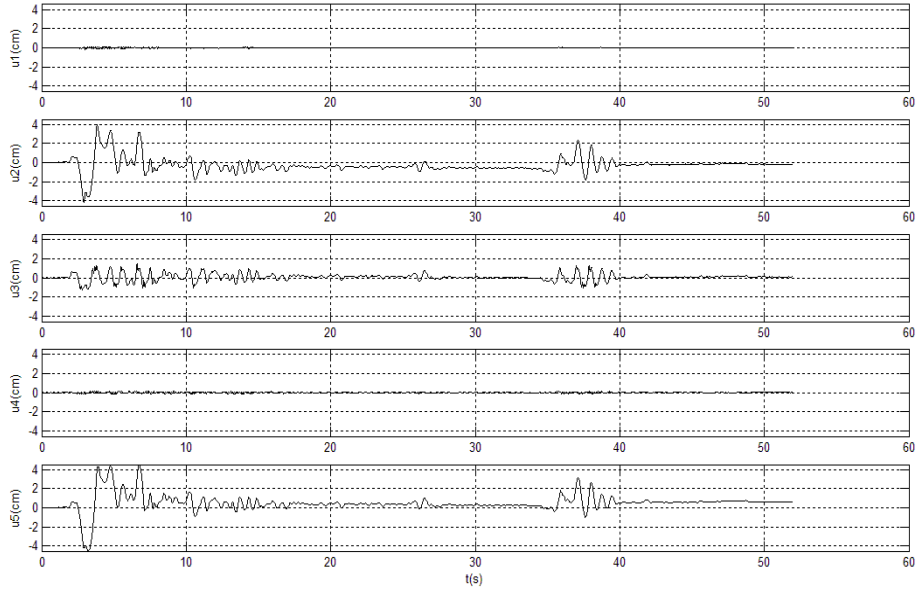


Şekil 3.33 İzolatörlerde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramları, Kocaeli, VFPI

Şekil 3.34’de, Kocaeli depremi ile VFPI’li sistemler için, izolatörlerde rölatif deplasmanlar sunulmuştur. Şekil 3.35’de, Kocaeli depremi ile VFPI’li sistemler için, izole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları sunulmuştur.



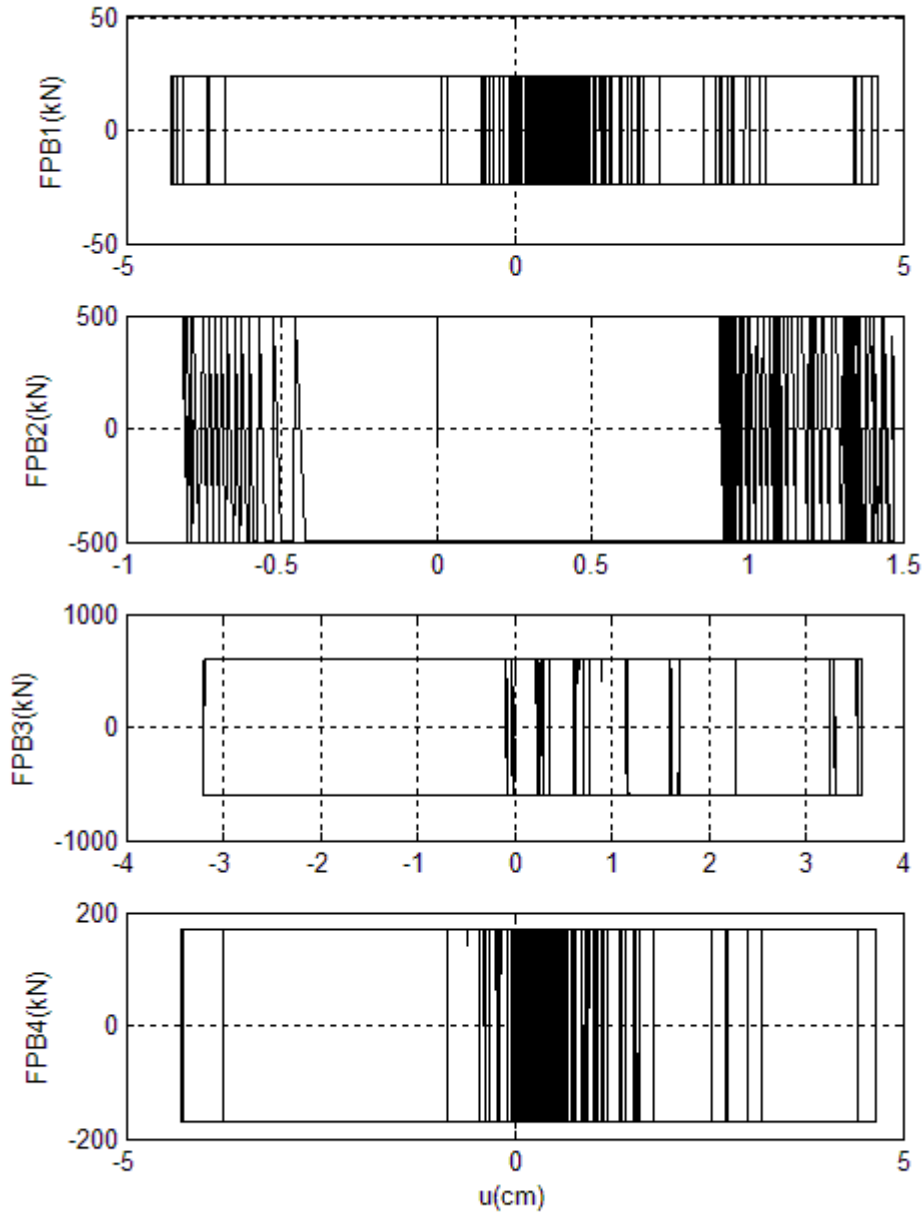
Şekil 3.34 İzolatörlerde rölatif deplasmanlar (cm), Kocaeli, VFPI



Şekil 3.35 İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları (cm), Kocaeli, VFPI

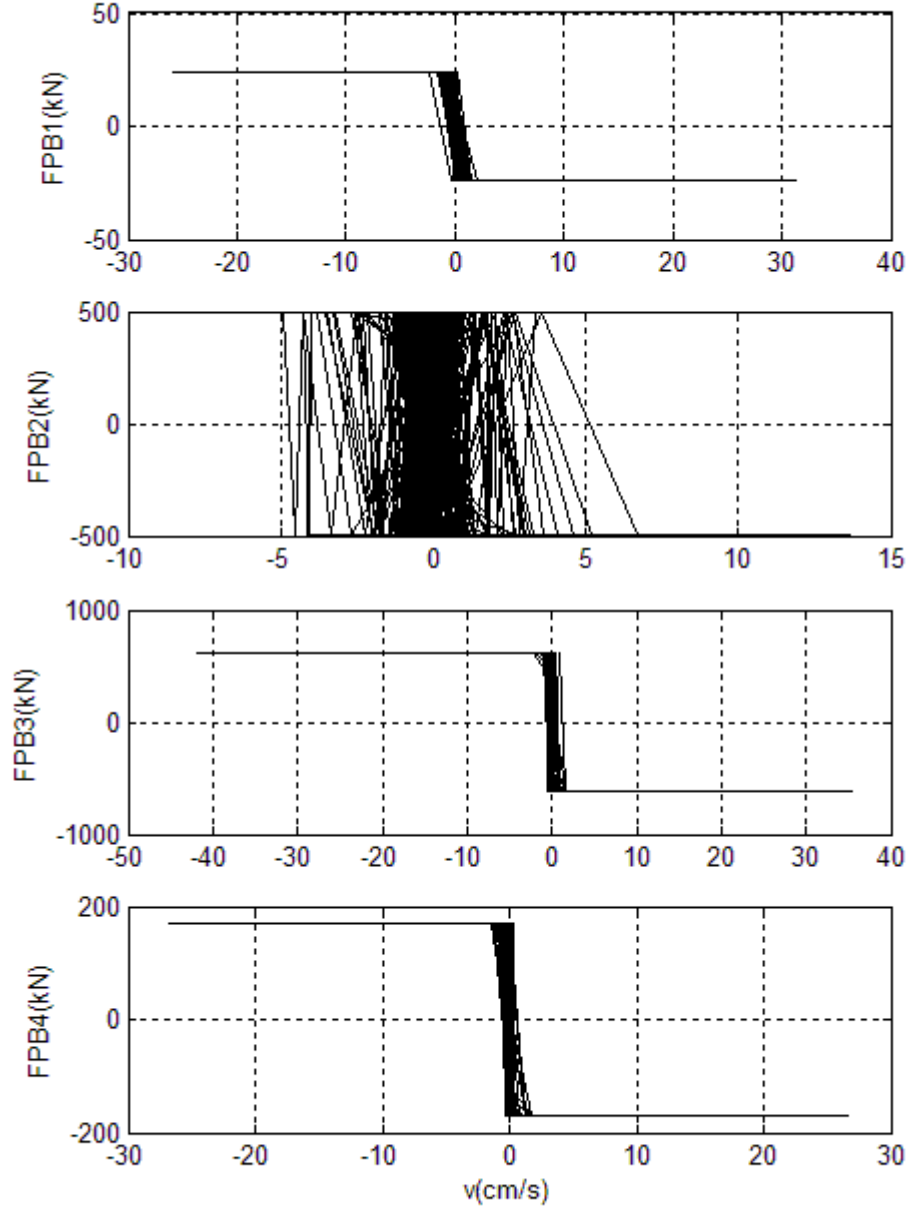
3.2.2.2 FPS'li sistem için analiz

Şekil 3.36'da, Kocaeli depremi ile FPS'li sistemler için, izolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri sunulmuştur.



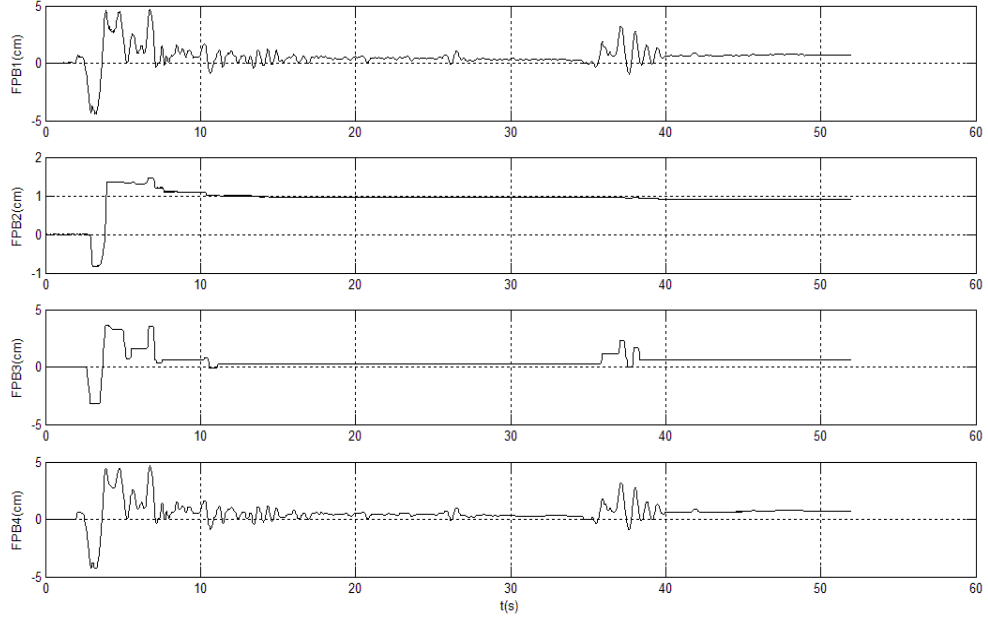
Şekil 3.36 İzolatörlerde rölatif deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrileri
Kocaeli, FPS

Şekil 3.37’de, Kocaeli depremi ile FPS’li sistemler için, izolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları sunulmuştur.

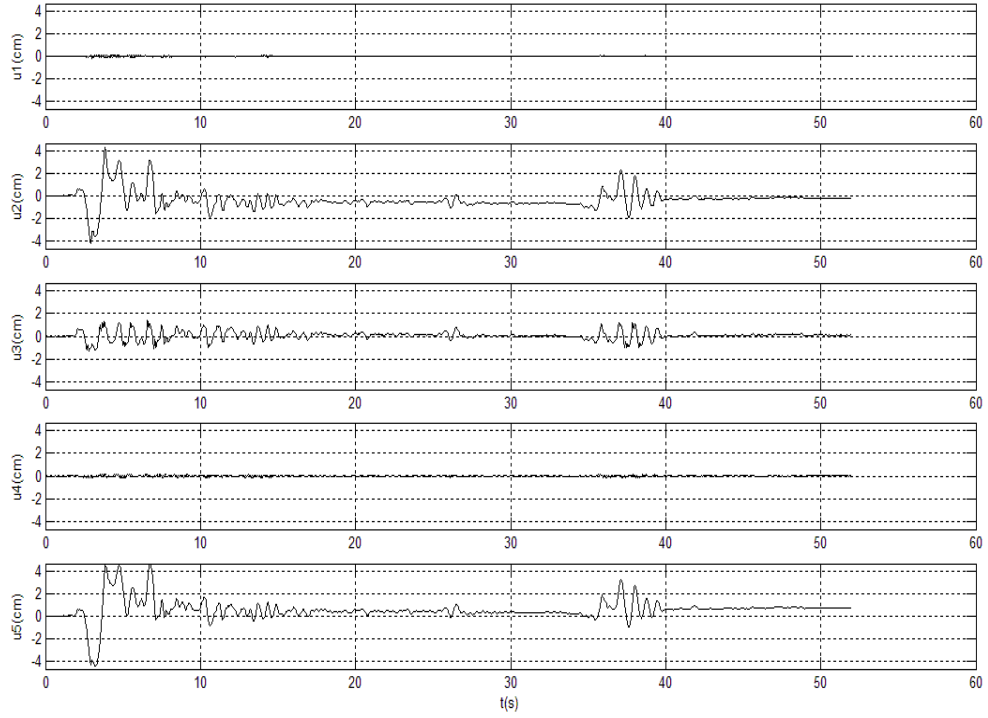


Şekil 3.37 İzolatörlerde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramları, Kocaeli, FPS

Şekil 3.38’de, Kocaeli depremi ile FPS’li sistemler için izolatörlerde rölatif deplasmanlar sunulmuştur. Şekil 3.39’da, Kocaeli depremi ile FPS’li sistemler için, izole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları sunulmuştur.



Şekil 3.38 İzolatörlerde rölatif deplasmanlar (cm), Kocaeli, FPS

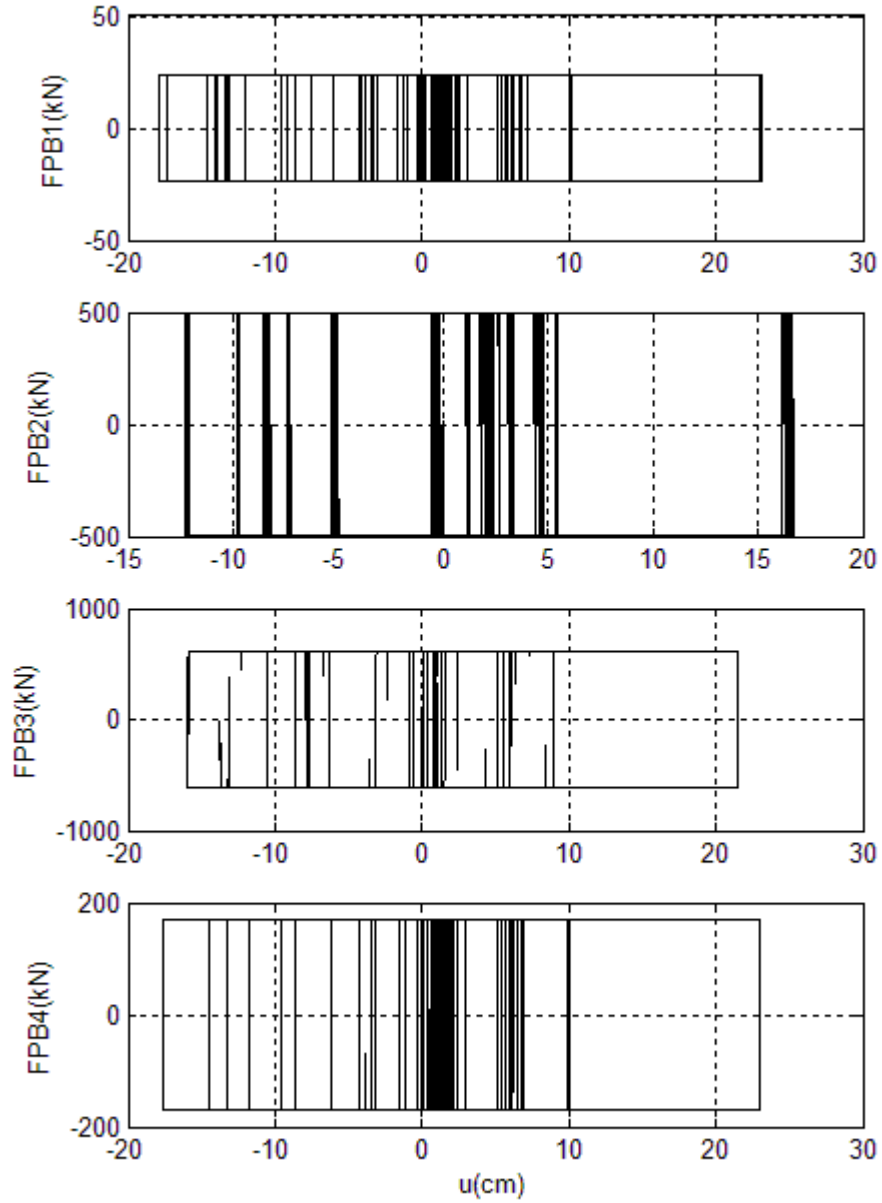


Şekil 3.39 İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları (cm), Kocaeli, FPS

3.2.3 Düzce depremi ile analiz

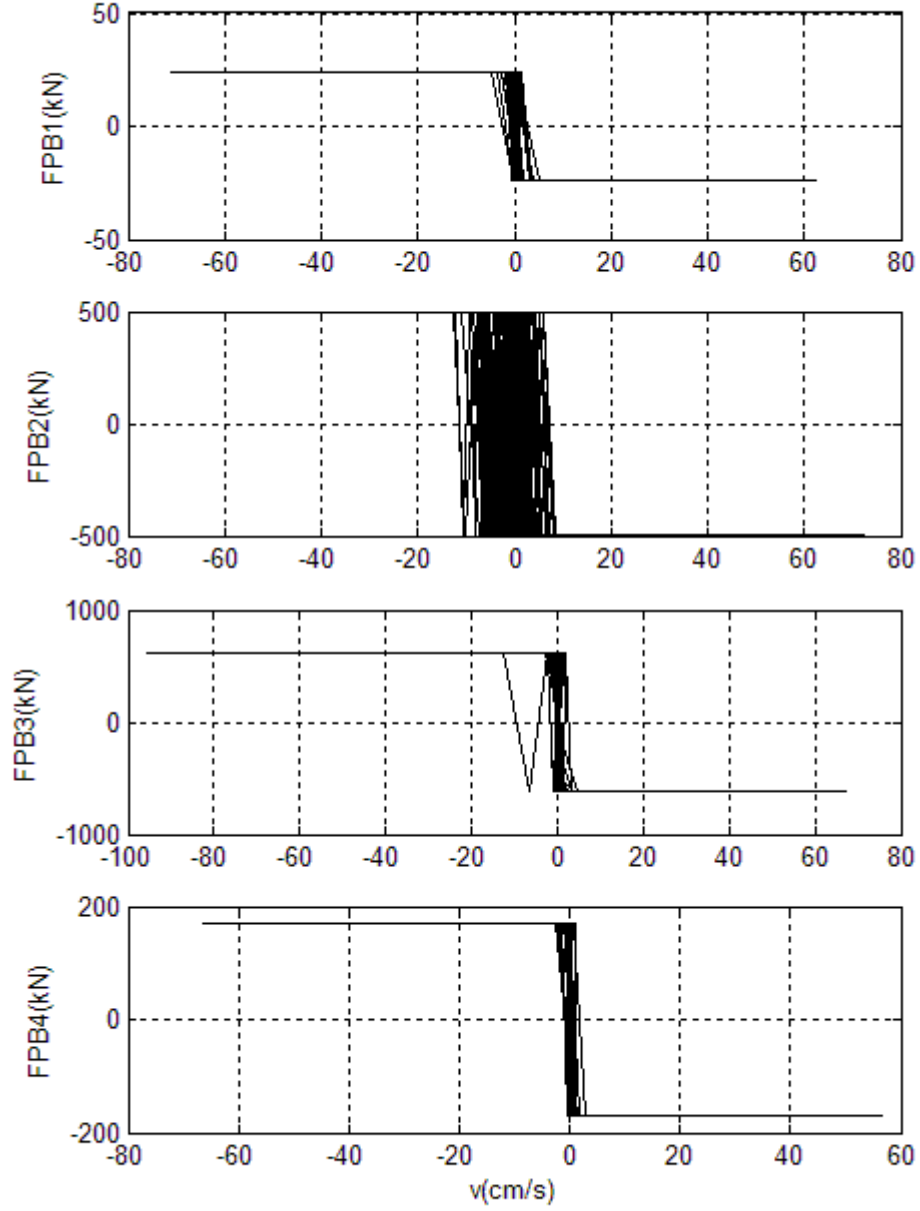
3.2.3.1 VFPI'li sistem için analiz

Şekil 3.40'da, Düzce depremi ile VFPI'li sistem için rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri sunulmuştur.



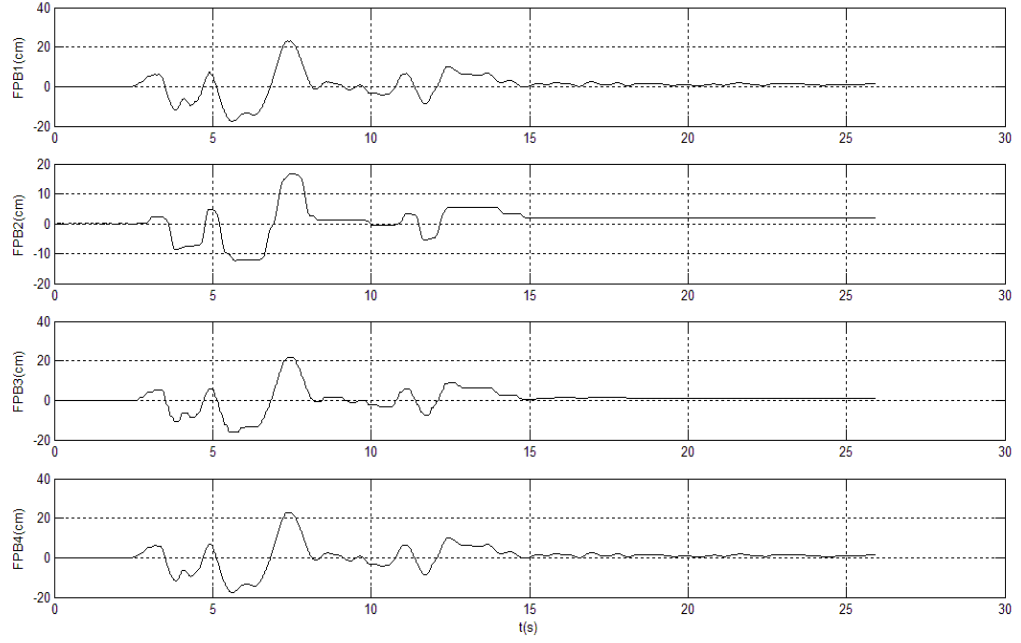
Şekil 3.40 İzolatörlerde rölatif deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrileri
Düzce , VFPI

Şekil 3.41’de, Düzce depremi ile VFPI’li sistem için izolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları sunulmuştur.

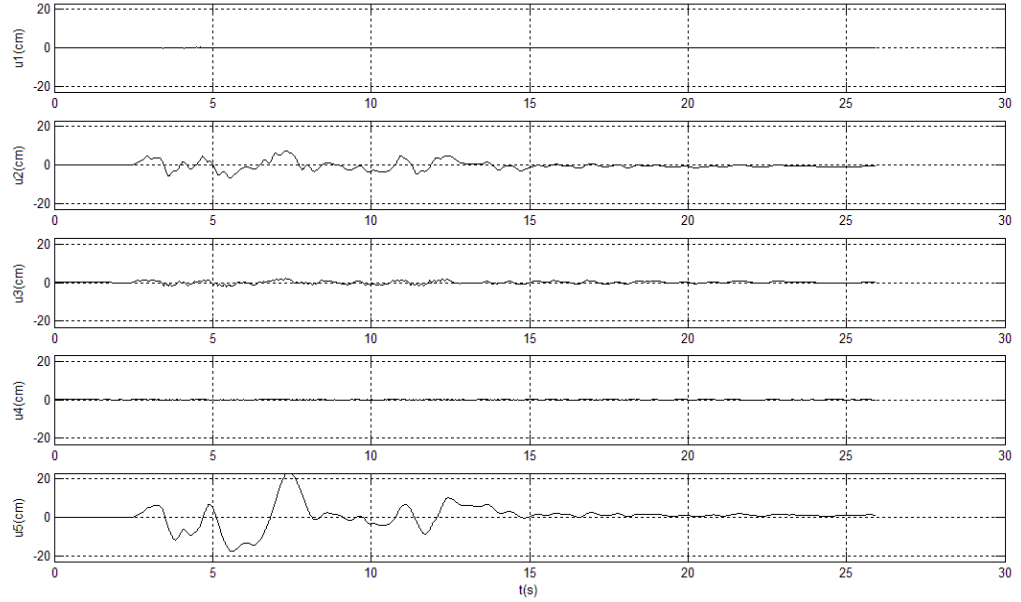


Şekil 3.41 İzolatörlerde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramları, Düzce, VFPI

Şekil 3.42’de, Düzce depremi ile VFPI’li sistem için izolatörlerde rölatif deplasmanlar sunulmuştur. Şekil 3.43’de, Düzce depremi ile VFPI’li sistem için, izole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları sunulmuştur.



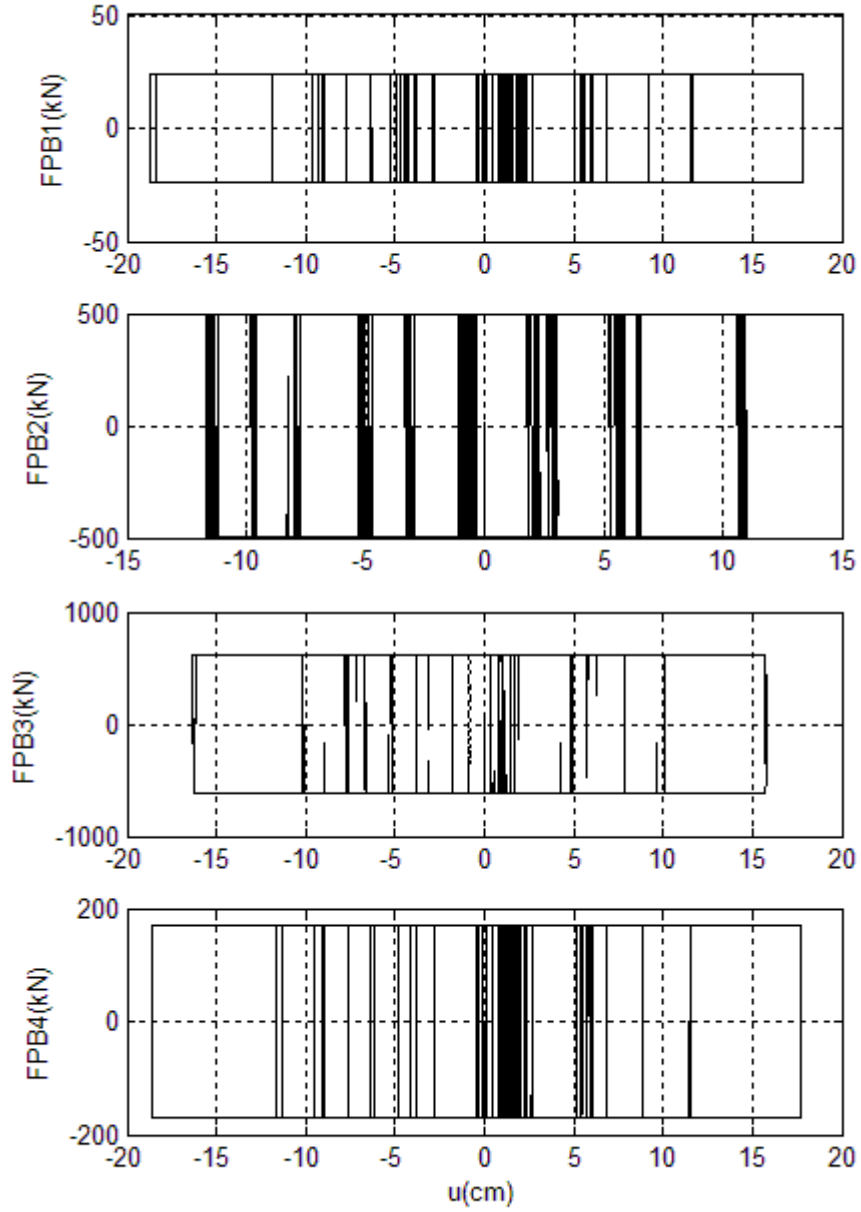
Şekil 3.42 İzolatörlerde rölatif deplasmanlar (cm), Düzce, VFPI



Şekil 3.43 İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları (cm), Düzce, VFPI

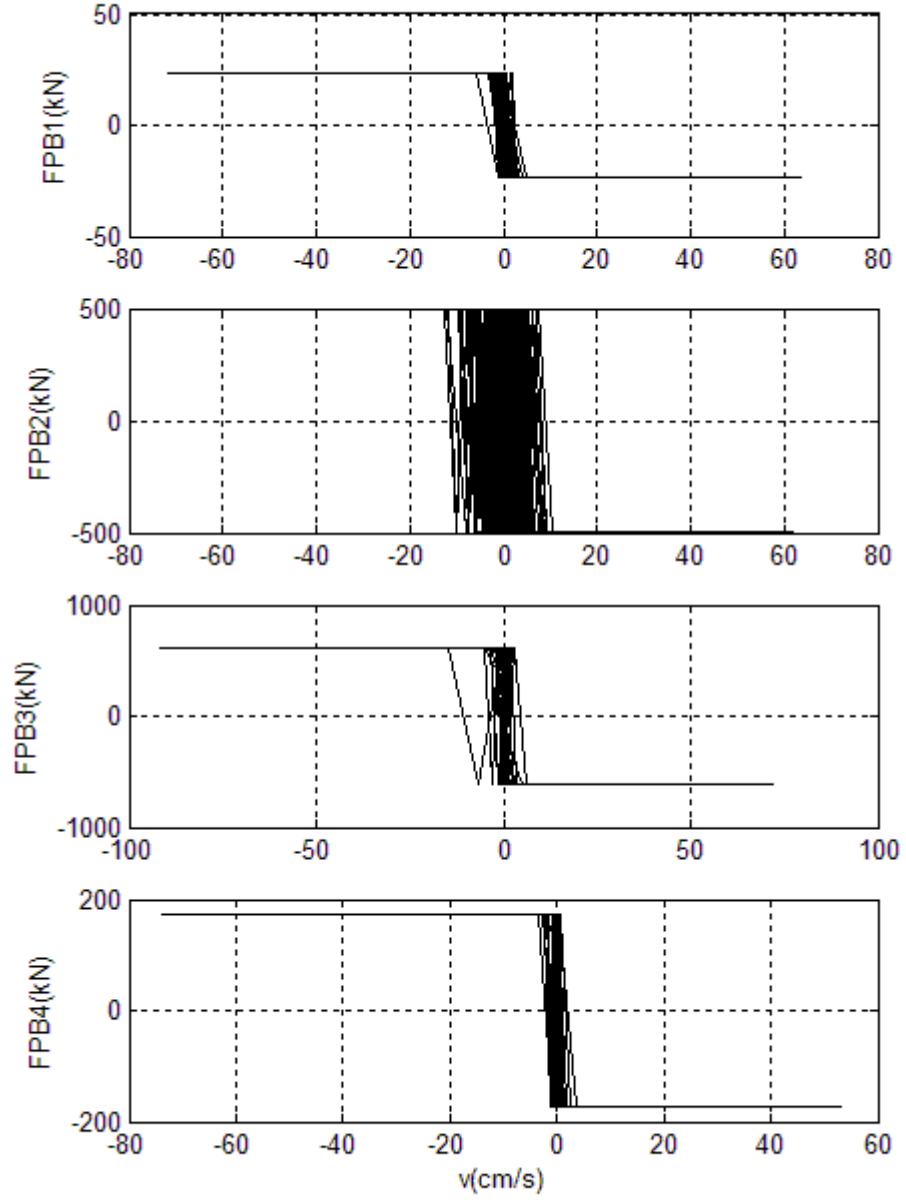
3.2.3.2 FPS'li sistem için analiz

Şekil 3.44'de, Düzce depremi ile FPS'li sistem için izolatörlerde rölatif deplasman - kesme kuvveti histerisis eğrileri sunulmuştur.



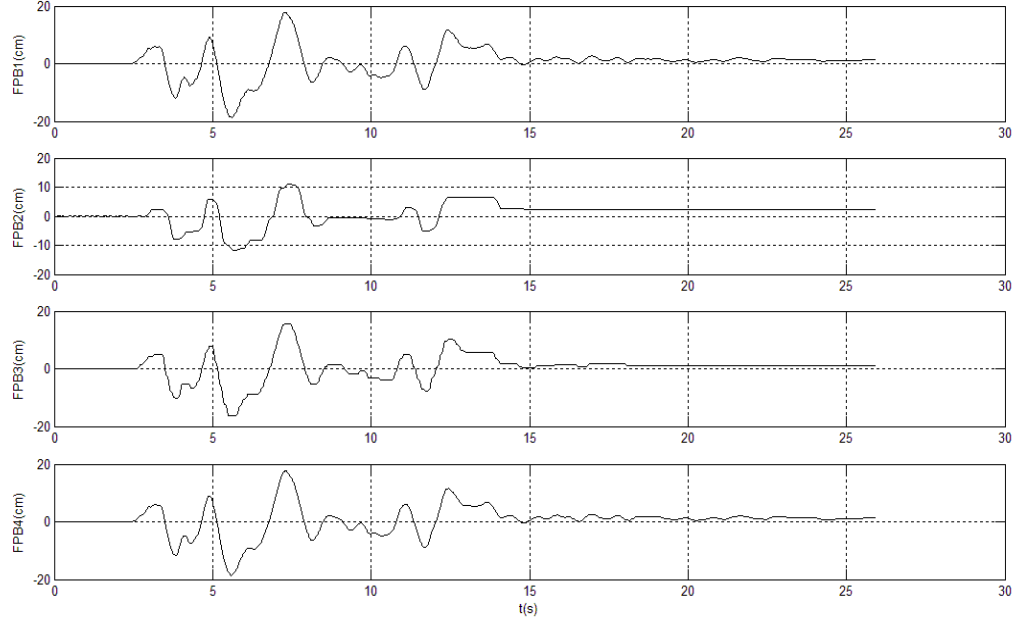
Şekil 3.44 İzolatörlerde rölatif deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrileri
Düzce, FPS

Şekil 3.45’de, Düzce depremi ile FPS’li sistem için izolatörlerde hız - kesme kuvveti diyagramları sunulmuştur.

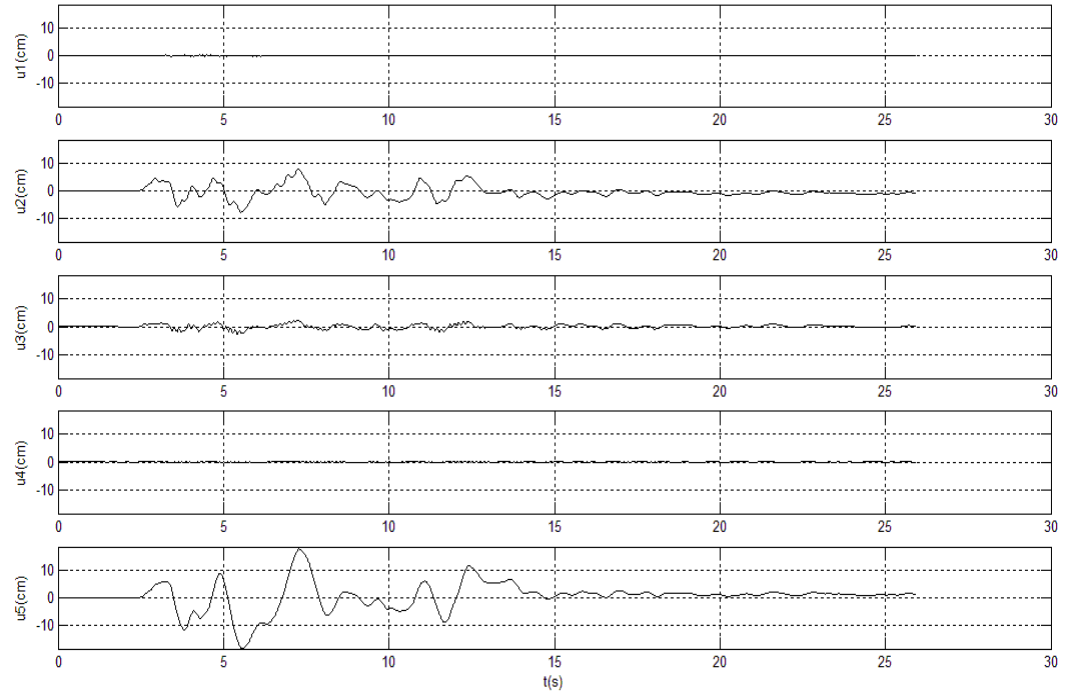


Şekil 3.45 İzolatörlerde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramları, Düzce, FPS

Şekil 3.46’da, Düzce depremi ile FPS’li sistem için izolatörlerde rölatif deplasmanlar sunulmuştur. Şekil 3.47’de, Düzce depremi ile FPS’li sistem için izole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları sunulmuştur.

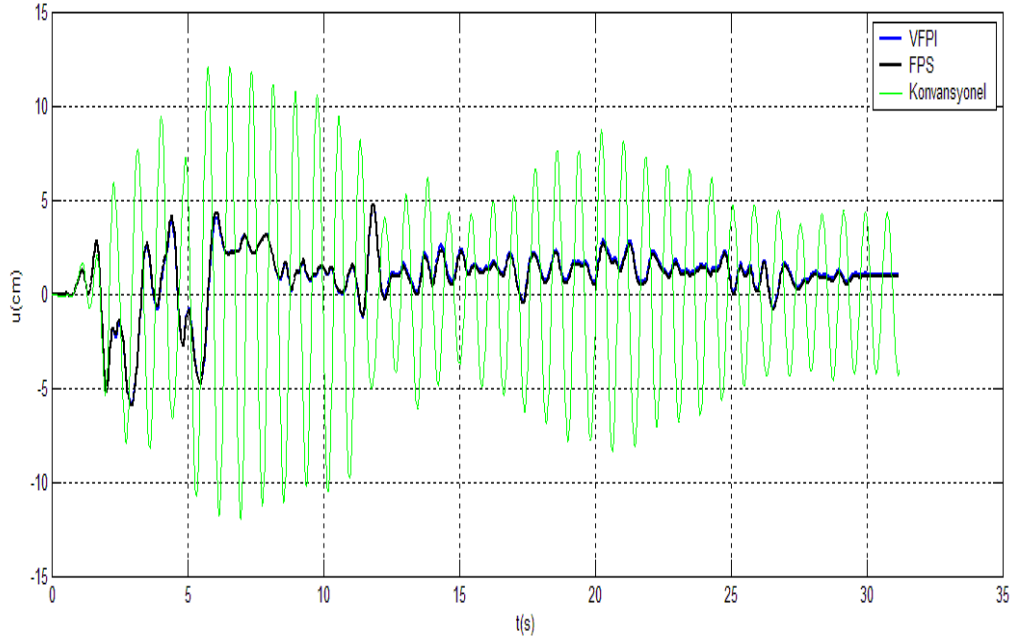


Şekil 3.46 İzolatörlerde rölatif deplasmanlar (cm), Düzce, FPS

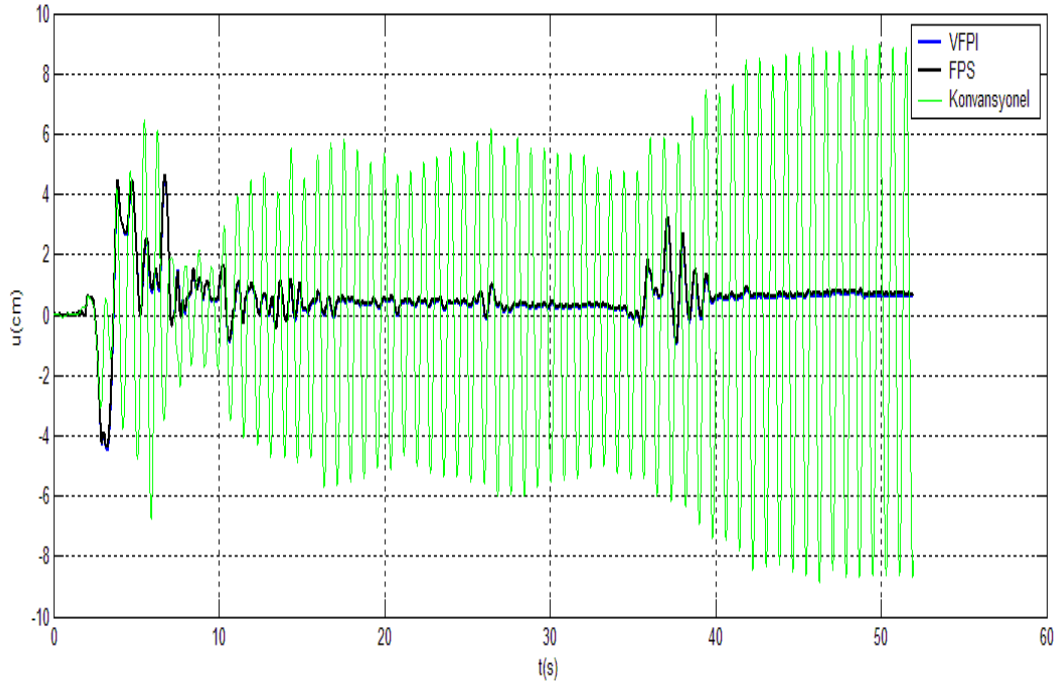


Şekil 3.47 İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları (cm), Düzce, FPS

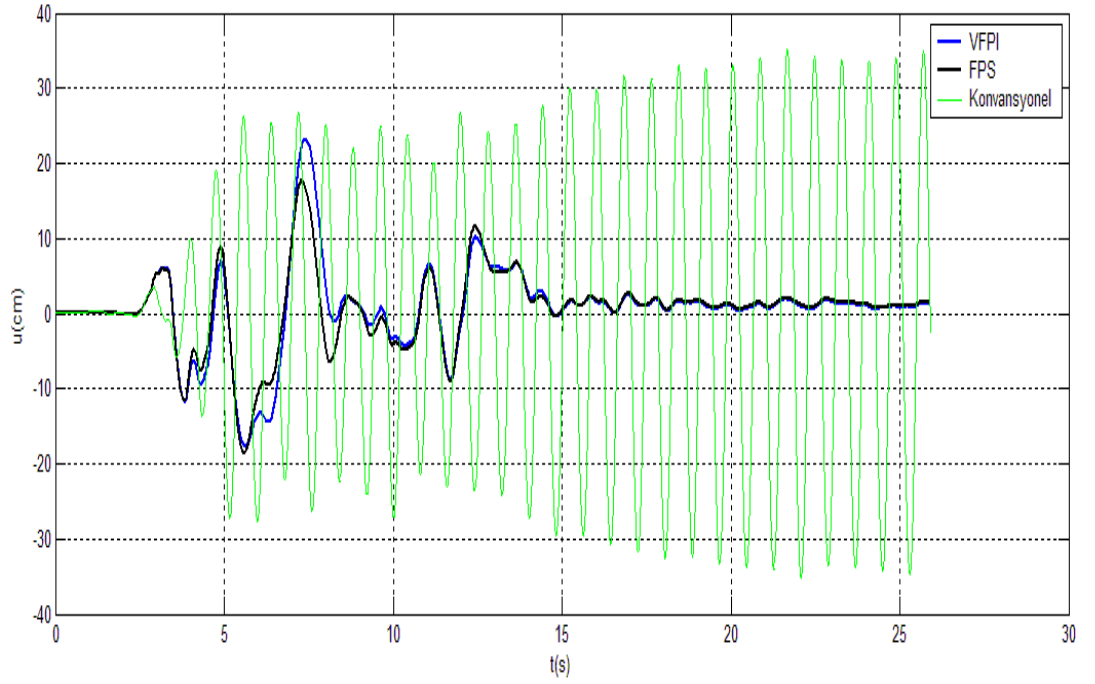
Tüm analizler sonucunda, VFPI ile izole edilmiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı, FPS ile izole edilmiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı ve izole edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanlarını gösteren grafikler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 3.48 İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı (cm), Elcentro



Şekil 3.49 İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı (cm), Kocaeli



Şekil 3.50 İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı (cm),
Düzce

Tüm analizler sonunda tabliyede oluşan maksimum mutlak deplasmanlar, Tablo 3.4 de sunulmuştur.

Tablo 3.4 Analizler sonunda tabliyede oluşan maksimum mutlak deplasmanlar (cm)

(cm)	Elcentro	Kocaeli	Düzce
VFPI	5.87	4.53	23.09
FPS	5.94	4.64	18.63
Ankastre	12.10	8.98	35.29

4. SONUÇLAR

Birinci uygulamada; hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve modeli ele alınmıştır ve bu modelin, harmonik zorlama ve üç farklı depreme karşı davranışı belirlenmiştir. Buna göre aşağıda sunulan sonuçlara varılmıştır.

* Hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli izolatörlerin, yer hareketleri ile yapıda meydana gelen olumsuzlukları azalttığı tespit edilmiştir. Bu sonuca varmak için; İzole edilmiş ve edilmemiş sistemlerde; ilk kat kolonları kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması, şekil değiştirme enerjilerinin karşılaştırılması gibi yöntemlere başvurulmuştur. Örnek olarak, Şekil 3.5 incelendiğinde, izole edilmiş sistemdeki kat kolonları kesme kuvvetleri, izole edilmemiş sistemdeki kat kolonları kesme kuvvetlerinden yaklaşık olarak 6 kat daha küçüktür. Şekil 3.6 incelendiğinde, izole edilmiş sistemdeki şekil değiştirme enerjisi, izole edilmemiş sistemdeki şekil değiştirme enerjisinden çok daha küçük olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, depremin yapıda oluşturacağı zararlı etkiler azaltılmıştır.

* Coulomb sürtünme modeli ile Mokha sürtünme modeli çözümleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafikler incelendiğinde; iki modele göre yapılan çözümlerin de birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, Mokha sürtünme modeli, daha komplike çözümler istenildiği durumlarda kullanılabilir.

İkinci uygulamada; üç açıklıklı köprü modeli ele alınmış ve bu modelin, üç farklı depreme karşı davranışı incelenmiştir. Bu modelde birden çok ve bağımsız çalışan sürtünme elemanı vardır . Buna göre aşağıda sunulan sonuçlara varılmıştır.

* Hareketli mesnetlenmiş sürtünmeli izolatörlerin, yer hareketleri ile yapıda meydana gelen olumsuzlukları azalttığı tespit edilmiştir. Bu sonuca varmak için; İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.48, Şekil 3.49 ve Şekil 3.50 incelendiğinde; izole edilmiş durumdaki tabliyenin mutlak deplasmanları, izole edilmemiş durumdaki tabliyenin mutlak deplasmanlarından oldukça küçük olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, depremin yapıda oluşturacağı zararlı etkiler azaltılmıştır.

* Hareketli mesnetlenmiş sarkaç izolatörler (FPS) ve Değişken frekanslı sarkaç izolatörlerin (VFPI), yer hareketinin yapılarda meydana getirdiği olumsuzlukları azaltmadaki etkinlikleri Şekil 3.48, Şekil 3.49 , Şekil 3.50 ve Tablo 3.3 incelendiğinde görülebilir. FPS ve VFPI tipindeki izolatörlü yapıların depreme karşı davranışı, konvansyonel yapıların depreme karşı davranışından daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ancak, FPS ve VFPI karşılaştırıldığında; Elcentro ve Kocaeli depremi için VFPI daha iyi sonuç vermiştir, Düzce depremi için FPS daha iyi sonuç vermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kelly JM.** 1986, Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 5(3): 202-217.
- [2] **Naeim F, Kelly JM.** 1999, *Design of Seismic Isolated Structures; From Theory to Practise*, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York
- [3] **Den Hartog JP.** 1931, Forced vibration with combined coulomb and viscous friction. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (ASME)*; 53: 107.
- [4] **Westermo B, Udawadia F.** 1983, Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 11: 135- 146.
- [5] **Mostaghel N, Hejazi M, Tanbakuchi J.** 1983, Response of sliding structures to harmonic support motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 11:355-366.
- [6] **Mostaghel N, Davis T.** 1997, Representations of Coulomb friction for dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 26: 541-548.
- [7] **Yang YB, Lee TY, Tsai IC.** 1990, Response of multi-degree-of freedom structure with sliding supports. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 19:739-752
- [8] **Fan FG, Ahmadi G, Tadjbakhsh IG.** 1990, Multi-storey base-isolated buildings under a harmonic ground motion Part I: A comparison of performances of various systems. *Nuclear Engineering and Design*; 123: 1-16.

- [9] **Fan FG, Ahmadi G, Mostaghel N, Tadjbakhsh IG.** 1991, Performance analysis of a seismic base isolation systems for a multi-storey building. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 10: 152-171
- [10] **Dimova S, Georgiev V.** 1992, Numerical algorithm for the dynamic analysis of base- isolated structures with dry friction. *Journal of Natural Hazards*; 6: 71-86.
- [11] **Dimova S, Meskouris K, Kratzig WB.** 1995, Numerical technique for dynamic analysis of structures with friction devices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 24: 881-898.
- [12] **Wang YP, Liao WH.** 2000, Dynamic analysis of sliding structures with unsynchronized support motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 29:297-313.
- [13] **Vafai A, Hamidi M, Ahmadi G.** 2001, Numerical modeling of MDOF structures with sliding supports using rigid plastic link. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 30:27– 42.
- [14] **Mokha AS, Constantinou MC, Reinhorn AM.** 1990, Teflon bearing in base isolation. I: testing: *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 116(2):438-454.
- [15] **Mokha AS, Constantinou MC, Reinhorn AM.** 1990, Teflon bearing in base isolation. II: Modeling. : *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 116(2):455-474.
- [16] **Meirovitch L.** 1990, *Dynamics and Control of Structures*. Wiley: New York
- [17] **Clough RW, Penzien J.** 1993, *Dynamics of Structures*. Mc Graw-Hill, New York, International editions.
- [18] **Chopra AK.** 1995, *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ

- [19] **Iura M, Matsui K, Kosaka I.** 1992, Analytical expressions for three different modes in harmonic motion of sliding structures. *Earthquake Engineering and Structural and Dynamics*; 21: 757-769.
- [20] **Lu LY, Yang YB.** 1997, Dynamic response of equipment in structures with sliding support. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 26:61-77.
- [21] **Matsui K, Iura M, Sasaki T, Kosaka I.** 1991, Periodic response of a rigid block resting on a footing subjected to harmonic excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 20: 683-697.
- [22] **Meirovitch L.** 1980, *Computational Methods in Structural Dynamics*, Sijthoff & Noordhoff, Netherlands
- [23] **Meirovitch L.** 1997, *Principle and techniques of vibrations*, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall
- [24] **Mostaghel N, Tanbakuchi J.** 1983, Response of sliding structures to earthquake support motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 11: 729-748.
- [25] **Mostaghel N, Khodaverdian M.** 1987, Dynamics of resilient-friction base isolator (R-FBI). *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 15: 379-390.
- [26] **Mostaghel N, Khodaverdian M.** 1988, Seismic response of structures supported on R-FBI system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 16: 839-854.
- [27] **Wang YP, Chung LL, Liao WH.** 1998, Seismic response analysis of bridges isolated with friction pendulum bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 27:1069-1093.
- [28] **Younis CJ, Tadjbakhsh IG.** 1984, Response of sliding rigid structure to base excitation. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*; 110: 417-432.

- [29] **M. Pranesh , Ravi Sinha** 2000, VFPI: an isolation device for aseismic design.
Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 29: 603-627
- [30] **Yen-Po Wang , Wei-Hsin Liao, Chien-Liang Lee** 2001, A state-space approach
for dynamic analysis of sliding structures, *Engineering Structures*
23:790–801
- [31] **Ravi Sinha and Pranesh Murnal** 2003, Earthquake Resistant Design
of Buildings Using VFPI, *New Technologies for Urban Safety of Mega
Cities in Asia*
- [32] **Pranesh Murnal and Ravi Sinha, M.ASCE**, 2002, Earthquake Resistant Design
of Structures using the Variable Frequency Pendulum Isolator ,*Journal
of Structural Engineering*,Vol. 128, No. 7
- [33] **Pranesh Murnal and Ravi Sinha, M.ASCE**, 2004, Behavior of Torsionally
Coupled Structures with Variable Frequency Pendulum Isolator,
Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No. 7
- [34] **Glenn J. Madden (M. ASCE), Nat Wongprasert (S.M. ASCE) and
Michael D. Symans (M. ASCE)**, Analytical Study of an Adaptive
Sliding Base Isolation System for Seismic Protection of Buildings
- [35] **Biswajit Basu and Vinay K. Gupta**, 2000, Wavelet-based non-stationary
response analysis of a friction base-isolated structure ,*Earthquake
Engng Struct. Dyn.* 29:1659-1676
- [36] **Abhijit K. Agrawal** ,2000, Behaviour of equipment mounted over a torsionally
coupled structure with sliding support, *Engineering Structures* 22 :72–
84.
- [37] **Jose L. Almaza N, Juan C. De La Llera, and Jose A. Inaudi**, 1998, Modelling
Aspects of Structures Isolated with the Frictional Pendulum System,
Earthquake Engng. Struct. Dyn. 27, 845–867

- [38] **Giulio Fatica and Claudio Floris, M.ASCE**, 2003, Moment Equation Analysis of Base-Isolated Buildings Subjected to Support Motion, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 1
- [39] **Jose L. Almazan and Juan C. De la Llera**, 2003, Physical model for dynamic analysis of structures with FPS isolators, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 32:1157–1184
- [40] **Ivo Calio , Massimo Marletta, Francesco Vinciprova**, 2003, Seismic response of multi-storey buildings base-isolated by friction devices with restoring properties *Computers and Structures* 81 :2589–2599
- [41] **Yen-Po Wang, Lap-Loi Chung, and Wei-Hsin Liao**, 1998, Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearings, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 27, 1069–1093
- [42] **M. Hamidi, M. H. El Naggar, A. Vafai and G. Ahmadi**, 2003, Seismic isolation of buildings with sliding concave foundation (SCF), *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 32:15–29
- [43] **R.S. Jangid**, 2000, Optimum frictional elements in sliding isolation systems, *Computers and Structures* 76 :651-661
- [44] **J. J. Chen, B. D. Yang and C. H. Menq**, 2000, Periodic Forced Response of Structures Having Three-Dimensional Frictional Constraints, *Journal of Sound and Vibration* 229(4), 775-792
- [45] **Jose L. Almazan and Juan C. de la Llera**, 2003, Accidental torsion due to overturning in nominally symmetric structures isolated with the FPS, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 32: 919-948
- [46] **Jose L. Almazan and Juan C. De la Llera**, 2002, Analytical model of structures with frictional pendulum isolators, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 31:305-332

- [47] **Jose L. Almazan and Juan C. De la Llera**,2002, Analytical model of structures with frictional pendulum isolators, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 31:305-332
- [48] **H. Shakib , A. Fuladgar**,2003, Effect of vertical component of earthquake on the response of pure-friction base-isolated asymmetric buildings, *Engineering Structures* 25 :1841–1850
- [49] **Keri L. Ryan and Anil K. Chopra**, 2004, Estimating the seismic displacement of friction pendulum isolators based on non-linear response history analysis, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 33:359–373
- [50] **C. S. TSAI**, 1997, Finite Element Formulations For Friction Pendulum Seismic Isolation Bearings, *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40: 29-49
- [51] **J. Enrique Luco**,2004, Response of a double-wedge base-isolation device *Earthquake Engng Struct. Dyn.*33:1271-1286
- [52] **H. Shakib , A. Fuladgar**,2003, Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation,*Computers and Structures* 81 :189–196
- [53] **R. S. Jangid**,2001, Response of Sliding Structures to Bi-Directional Excitation, *Journal of Sound and Vibration* 243(5): 929-944
- [54] **M. Hamidi, M. H. El Naggari and A. Vafai**,2003, Response of structures supported on SCF isolation systems, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 32:1555-1584
- [55] **M.C. Kunde and R.S. Jangid**, 2003, Seismic behavior of isolated bridges: A-state-of-the-art review, *Electronic Journal of Structural Engineering*
- [56] **Juan C. de la Llera, and Jose L. Almazan**,2003, An experimental study of nominally symmetric and asymmetric structures isolated with the FPS, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*32:891-918

- [57] **Gilberto Mosqueda; Andrew S. Whittaker; and Gregory L. Fenves**,2004,
Characterization and Modeling of Friction Pendulum Bearings
Subjected to Multiple Components of Excitation, *Journal of Structural
Engineering*, Vol. 130, No. 3
- [58] **Glenn J. Madden, M.ASCE; Michael D. Symans, A.M.ASCE; and Nat
Wongprasert, M.ASCE**,2002, Experimental Verification of Seismic
Response of Building Frame with Adaptive Sliding Base-Isolation
System, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 8
- [59] **Ulusoy H. S**, 2003, Yapılarda Sürtünmeli Elemanlar ile Sismik Kontrol , Yüksek
Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi,
İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

Cüneyt Ayhan 09.10.1980’de İzmit’de doğdu. Lise öğrenimini Atafen Fen Lisesi’nde tamamladı. 1998-1999 öğretim yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı ve 2002’de aynı bölümden mezun oldu. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı Deprem Mühendisliği Yüksek Lisans Programına kaydoldu.