

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPILARDA SÜRTÜNMELİ ELEMANLAR İLE
SİSMİK KONTROL**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Hasan Saltık ULUSOY

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2003

**YAPILARDA SÜRTÜNMELİ ELEMANLAR İLE
SİSMİK KONTROL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Saltık ULUSOY
501001241**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2003**

**Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasan ENGİN (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Faruk YÜKSELER (Y.T.Ü.)**

Mayıs 2003

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 sürtünmeli izolatörlerin, depremin yapı üzerindeki olumsuz etkilerini olumlu yönde ne ölçüde değiştirdiği araştırılmış, ayrıca birbirinden bağımsız izolatörler içeren yapıların sayısal analizi için bir çözüm algoritması sunulmuştur.

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

Mayıs, 2003

Hasan Saltık ULUSOY

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖZET.....	vii
SUMMARY.....	ix
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 izolasyon (Base isolation).....	3
1.1.4 Elastomerler.....	4
1.1.5 Sürtünmeli izolatörler.....	6
1.2 Hareketli Mesnetlenmiş Sürtünmeli Sistemler.....	8
2. TEMEL DENKLEMLER.....	11
2.1. Problemin Çözümü İçin Yapılan Kabuller.....	11
2.2. Hareket Denklemi.....	12
2.2.1 Hareket denkleminin çözümü.....	14
2.2.2 Kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz.....	17
2.2.3 Sürtünmeli sarkaç ve eşdeğer yay modeli.....	19
2.2.4 Sayısal çözüm yöntemi.....	20
3. SAYISAL UYGULAMALAR.....	24
3.1. Düzlem Çerçeve Modeli.....	24
3.1.1. Harmonik yer hareketi ile analiz.....	26
3.1.2. El-Centro deprem ivme kaydı ile analiz.....	28
3.2. Üç Açıklıklı Köprü Modeli.....	30
4. SONUÇLAR.....	38
KAYNAKLAR.....	39
ÖZGEÇMİŞ.....	43

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Köprü elamanlarının özellikleri.....	30
--	----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Şematik spektral ivme eğrisi.....	4
Şekil 1.2. Düşük sönümlü elastomer.....	5
Şekil 1.3. Kurşun gövdeli elastomer.....	6
Şekil 1.4. Sürtünmeli sarkaç.....	7
Şekil 1.5. Sürtünme dayanımlı izolator.....	8
Şekil 2.1. Sürtünme kuvveti – Rölatif deplasman bağıntısı.....	12
Şekil 2.2. Sürtünme kuvveti – Kayma hızı bağıntısı.....	12
Şekil 2.3. Sürtünme kuvvetinin $[t_{k-1}, t_k]$ zaman aralığındaki değişimi.....	16
Şekil 2.4. Sürtünmeli sarkaç sisteminin parametreleri.....	19
Şekil 3.1. Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve ve matematiksel model.....	23
Şekil 3.2. İzolatörde rölatif deplasman-kesme kuvveti histerisis eğrisi.....	25
Şekil 3.3. İzolatörde hız-kesme kuvveti diyagramı.....	26
Şekil 3.4. Temel bloğunun yere göre deplasmanı.....	26
Şekil 3.5. İzole edilmiş ve edilmemiş sistemin ilk kat kolonları kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	26
Şekil 3.6. Şekil değiştirme enerjisi.....	27
Şekil 3.7. İzolatörde rölatif deplasman-kesme kuvveti histerisis eğrisi.....	27
Şekil 3.8. İzolatörde hız-kesme kuvveti diyagramı.....	28
Şekil 3.9. Üst katın zemine göre deplasmanı.....	28
Şekil 3.10. Temel bloğunun zemine göre deplasmanı.....	28
Şekil 3.11. İzole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasmanı.....	28
Şekil 3.12. Üç açıklıklı simetrik olmayan köprü ve boyutları.....	29
Şekil 3.13. Üç açıklıklı köprü için kurulan matematiksel model.....	29
Şekil 3.14. İzolatörlerde rölatif deplasman-kesme kuvveti histerisis eğrileri.....	32
Şekil 3.15. İzolatörlerde hız-kesme kuvveti diyagramları.....	33
Şekil 3.16. İzolatörlerde rölatif deplasmanlar.....	34
Şekil 3.17. İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları.....	35
Şekil 3.18. İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı.....	36

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, T	: Dönüşüm matrisi, period
u, u	: Rölatif deplasman, öngörülen durum vektörü
v, y	: Öngörülen rölatif hız, rölatif hız
w, w	: Deprem ivmesi, deplasman türünden dış yük vektörü
W	: Ağırlık
z	: Durum-uzayı vektörü

YAPILARDA 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, sürtünmeli yüzeylere hareketli mesnetlenmiş çok serbestlik dereceli sistemlerin davranışı araştırılmıştır. Hareketli mesnetlenmiş sistemlerin dinamiği,

sürtünme kuvvetleri nedeniyle lineer olmayan bir problemdir. Bu problemin analitik çözümü karmaşık ve bir takım idealize edilmiş hareket koşulları altında yalnızca harmonik dış yük etkisinde serbestlik derecesi iki ve daha küçük sistemler ile sınırlıdır. Problemin çözümü için bu çalışmada aşağıda sıralanan varsayımlar yapılmıştır: (i) sürtünme yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısının sabit kaldığı; (ii) malzemenin lineer elastik olduğu; (iii) deformasyonların yapıda geometrik nonlineer etkiler oluşturmayacak kadar küçük olduğu; (iv) kayma fazında ve rölatif hareketsiz fazda devrilme momentlerinin oluşmadığı varsayılmış ve (v) yer hareketinin yalnızca yatay bileşeni gözönüne alınmıştır.

Bu çalışmada, hareketli mesnetlenmiş sistemlerin dinamik probleminin çözümü için basit ve sayısal analize uygun bir prosedür sunulmuştur. Bu prosedürde, her zaman adımında, iterasyona gerek duyulmadan izolatörlerin hareket durumları olası durumlar arasından kesin olarak belirlenir. Burada kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için kullanılan iki farklı hareket denklemi birleştirilerek ayrık 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 azaltılmasında etkinliği iki örnek üzerinde gösterilmiştir.

SEISMIC CONTROL OF STRUCTURES ISOLATED WITH FRICTIONAL BEARINGS

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, the response of multi-degrees of freedom structures with sliding supports is investigated. Dynamics of sliding structures is highly nonlinear problem due to friction forces. Analytical solutions are complicated and restricted to harmonic

motions with no more than two degrees of freedom, under idealized motion conditions. The following assumptions are adopted in this study to simplify the problem. (i) the coefficient of friction between the sliding surfaces remains constant throughout the motion of the structure; (ii) the material of the structure is linearly elastic; (iii) no overturning or tilting will occur as the structure slides on contact surface; (iv) the deformations of structures are so small that no geometric nonlinear effects will be induced; (v) only horizontal ground motions, either harmonic or earthquake motions, will be considered.

A logically simple and numerically efficient procedure is proposed to solve the dynamic problem of sliding systems with unsynchronized support motions. In this procedure, at each time step the true motion case for bearings is determined among the possible cases without iteration. The motion equations for the sliding and non-sliding modes of isolated structure are unified into a single equation that is represented as a difference equation in a discrete-time state-space form. The base shear forces between sliding interfaces can be determined through simple matrix algebraic analysis. The response 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 transition between the nonsliding 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 and 1940 El Centro earthquake.

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 İtalyada 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. Bu prosedürde, her zaman adımında izolatörlerin hareket durumları olası durumlar arasından kesin olarak belirlenir. Burada kayma fazı ve rölatif hareketsiz faz için kullanılan iki farklı hareket denklemi birleştirilerek ayrık 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.

1.1 Sismik İzolasyon Teknikleri

1.1.1 Elastik Davranışlı İlk 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 İlk 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.

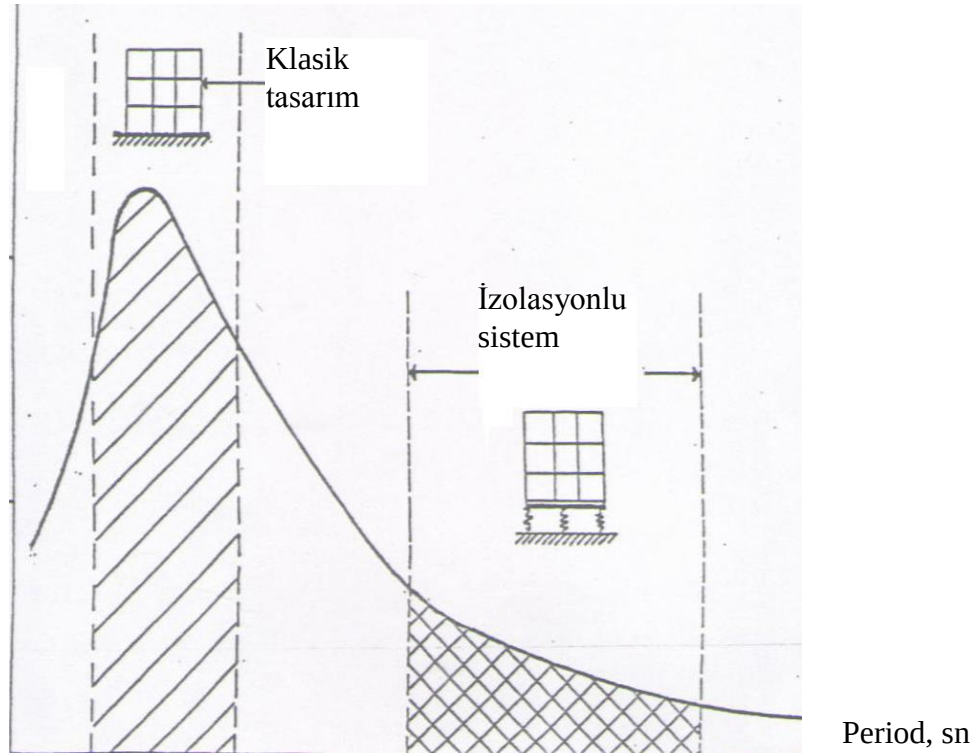
1.1.3 Temel İzolasyonu (Base Isolation)

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 artırılması 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 yerleştirilerek 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.

Spektral İvme



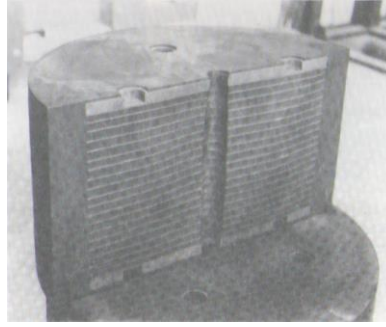
Şekil 1.1. Şematik ivme spektrum eğrisi

1.1.4 Elastomerler

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, ilk elastomerler 1969 yılında Makedonyada 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].

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 1.2. 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 alması nedeniyle, ek sönüm sistemlerine ihtiyaç duyulmasıdır.

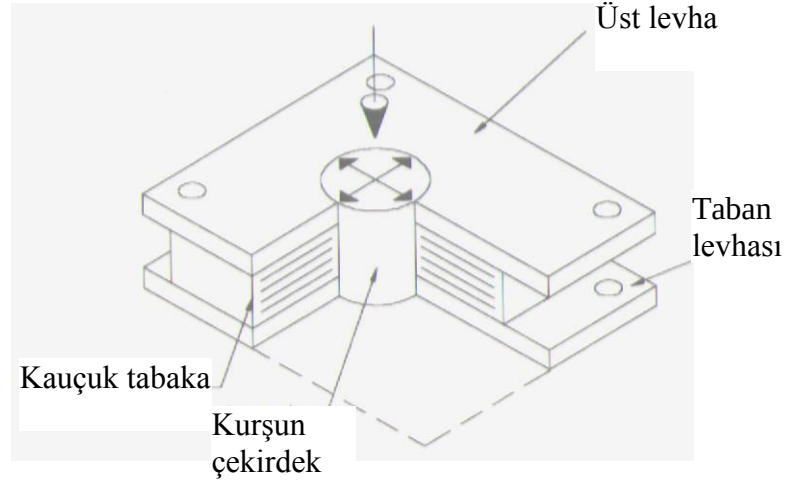
1.1.4.2 Kurşun Gövdeli Elastomerler

Kurşun gövdeli izolatörler, Yeni Zelanda'da üretilmiş ve başta bu ülkede olmak üzere, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde 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.



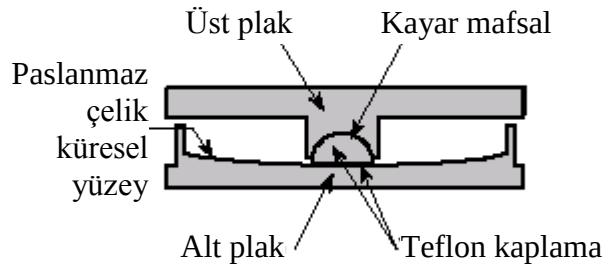
Şekil 1.3 Kurşun gövdeli elastomer

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 orantılı iken 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 İzolatörler

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 (Şekil 1.1). 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.



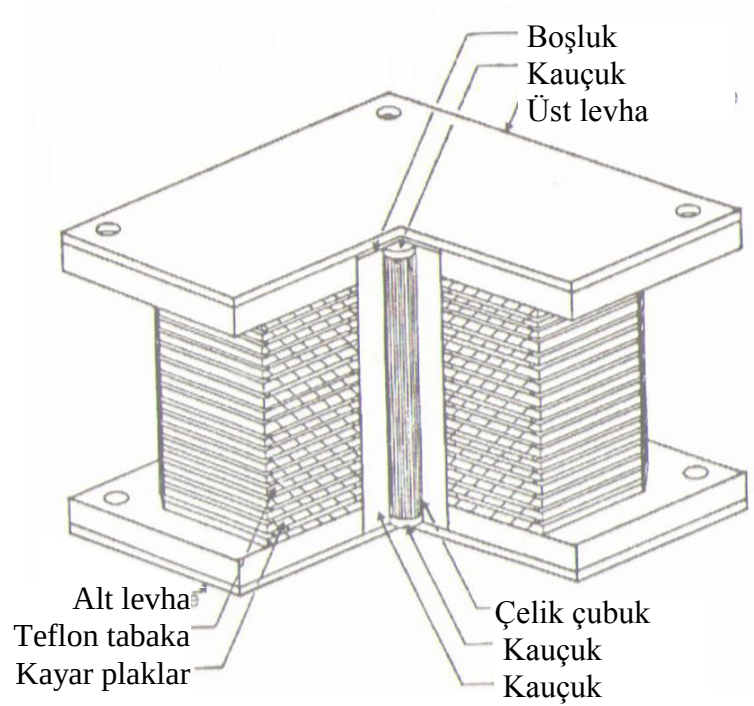
Şekil 1.4. Sürtünmeli sarkaç

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 İzolatör

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 izolatore yaymak için çoğu zaman kauçuk çekirdeğin içine çubuk yerleştirilir.



Şekil 1.5. Sürtünme dayanımlı izolatör.

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 için 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]'ın 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]'ın elde ettikleri ile karşılaştırmışlardır.

Konuyla ilgili yapılmış birçok çalışmadan bazıları kaynaklarda sunulmuştur [19-27].

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 tez çalışmasında bir ya da birden fazla bağımsız sürtünme elemanına sahip sistemlerin hareket denklemleri bazı kabuller altında faz-geçiş koşulları göz önüne alınarak olası hareket durumları arasında uygun durumu belirleyen bir algoritma ile çözülmüştür. Bu çözüm algoritması iterasyon içermediğinden elde edilen sonuçların başlangıçta problemin çözümü için yapılan kabuller ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yang [7] faz-geçiş anlarını içeren zaman adımlarında iterasyon yapmıştır. Vafai [13] faz-geçiş anları için zaman adımlarını küçültmüştür. Sistemde birden fazla sürtünme elemanı olması bu algoritmanın önemli bir avantajıdır.

2.1. Problemin Çözümü İçin Yapılan Kabuller

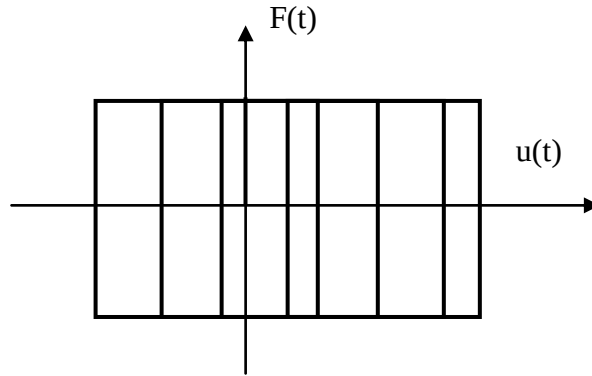
1) Yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin Coulomb sürtünmesi, statik ve kinetik sürtünme katsayılarının eşit ve sabit olduğu varsayılmıştır. Constantinou ve Mokha [14,15] teflon kaplı yüzeyler için basınca ve rölatif hıza bağlı olan sürtünme katsayısı için,

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

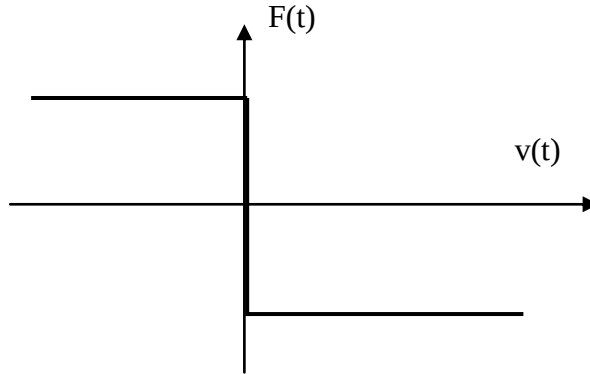
formülünü önermişlerdir. Burada a basınca bağlı olarak değişen bir katsayı ve v izolatörün rölatif hızıdır.

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.
- 6) Sürtünme kuvveti için kabul edilen modelde kuvvet-rölatif hız ve kuvvet-rölatif deplasman bağıntıları ideal plastik malzemeninki ile aynıdır. (Şekil-2.1, 2.2)



Şekil 2.1. Sürtünme kuvveti – Rölatif deplasman bağıntısı



Şekil 2.2. Sürtünme Kuvveti – Kayma hızı bağıntısı

2.2. Hareket Denklemi

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

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

denklemleri 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, $\mathbf{v}(t) = d\mathbf{u}(t)/dt$ dnm yapılırsa,

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

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

denklemleri elde edilir. (2.2.a) ve (2.2.b) denklemleri birletirilip matris formda

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

denklemleri 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 merteye indirgenmesiyle

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

denklemleri elde edilir. Burada,

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

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

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

2.2.1 Hareket Denkleminin Çözümü

1.1.1 (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

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

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

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

elde edilir. Geçiş matrisinin

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

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

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

denklemleri 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,

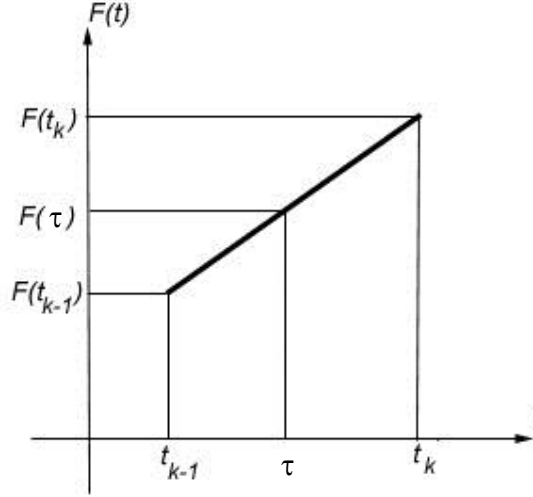
$$\mathbf{z}(t_2) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t_2-t_1)} \mathbf{z}(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t_2-\tau)} [\mathbf{B}_c \mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (2.16)$$

olarak elde edilir. Burada $\mathbf{F}(\tau)$ sürtünme kuvveti fonksiyonu parçalı sürekli ve $\mathbf{w}(\tau)$ 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,

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

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

şeklinde yazılabilir.



Şekil 2.3 Sürtünme kuvvetinin $[t_{k-1}, t_k]$ zaman aralığındaki değişimi

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

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{Z}[k] + \mathbf{B}_1 \mathbf{F}[k] \quad (2.18a)$$

şeklinde rekürsiv bir fark denklemi elde edilir. Burada

$$\mathbf{Z}[k] = \mathbf{A} \mathbf{z}[k-1] + \mathbf{B}_0 \mathbf{F}[k-1] + \mathbf{E}_0 \mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1 \mathbf{w}[k] \quad (2.18b)$$

Burada $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}_0$, $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{E}_0$ ve $\mathbf{E}_1$ 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) rekürsiv 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) , ..., (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,

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

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

Burada, i , izolatör numarası, $F_i[k]$ ve W_i , izolatöre etkiyen kesme kuvveti ve normal kuvvet, μ_i yüzeyler arası sürtünme katsayısı, $\dot{\mathbf{z}}_i$ 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,

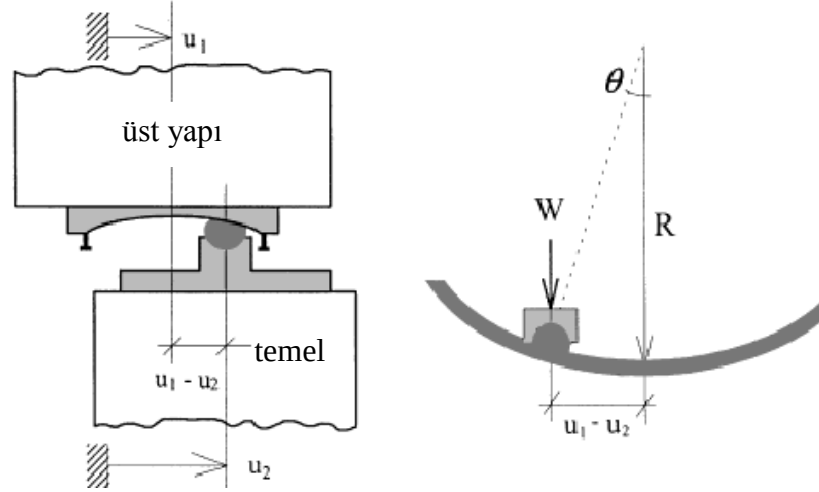
$$|F_i[k]| < \mu_i W_i \quad (2.24a)$$

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

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.

2.2.3 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 2.4 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 2.4 Sürtünmeli Sarkaç sisteminin parametreleri

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

$$V = WR(1 - \cos \theta) \quad (2.25)$$

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

$$\theta \cong \sin \theta = \frac{u_1 - u_2}{R} \quad \text{ve} \quad \cos \theta \cong 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (2.26)$$

değerleri kullanılırsa potansiyel enerji,

$$V = WR \frac{\theta^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{W}{R} (u_1 - u_2)^2 \quad (2.27)$$

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

$$\bar{k}(u_1 - u_2) = \frac{W}{R}(u_1 - u_2) \quad (2.28)$$

(2.28) denkleminde

$$\bar{k} = \frac{W}{R} \quad (2.29)$$

olarak elde edilir.

2.2.4 Sayısal Çözüm Yöntemi

Yapının dinamik analizi için sürtünmeli ayırıklaştırıcıların (izolatörlerin) rölatif hızlarının bulunması önemlidir çünkü izolatördeki kesme kuvvetinin şiddeti ve yönü (2.23) ve (2.24) denklemlerinde belirtildiği gibi rölatif hıza bağlı olarak değişir. Bir sürtünmeli ayırıklaştırıcının rölatif hızı için olası durumlar $v < 0$, $v = 0$ veya $v > 0$ durumlarıdır. Bu konuda yazılmış başka bir çok çalışmada ayırıklaştırıcının kaymaya ne zaman başlayacağı, kaymanın ne zaman duracağı ya da hareketsizliğin devam etmesi gibi koşullar ile ilgili olarak açıklamalar yapılmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, her üç durum için doğru oldukları varsayılarak ayrı ayrı bir ön çözüm yapılmış ve bunlardan hareket denklemlerini sağlayan çözüm ayırıklaştırıcının alması gereken durum olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemle göre, r tane ayırıklaştırıcı bulunan bir sistem için 3^r tane farklı durum söz konusu olur. Her Δt zaman adımı için yapılması gereken 3^r tane ön çözüm zaman alıcı bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Ancak sunulan çözüm yöntemi ardışık yaklaşım gerektirmemektedir. Ayırıklaştırıcıların bir önceki zaman adımında sahip oldukları durum ile işlemlere devam edildiğinde, bu yöntemin ardışık yaklaşım gerektiren çözümlerden daha fazla zaman alıcı olmadığı görülmüştür. Herbir ayırıklaştırıcının rölatif hızı, bir ayırıklaştırıcının i ve j uçlarının göreceli hareketinden,

$$\mathbf{v}[k] = \mathbf{qz}[k] \quad (2.30)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. (2.18a) denklemi (2.30)'de yerine konursa

$$\mathbf{v}[k] = \mathbf{PF}[k] + \mathbf{Q}[k] \quad (2.31)$$

ifadesi yazılabilir. Burada

$$\mathbf{P} = \mathbf{qB}_1 \quad (2.32)$$

$$\mathbf{Q}[k] = \mathbf{qZ}[k] \quad (2.33)$$

ve

$$\mathbf{q} = [\mathbf{0}, \mathbf{B}^T] \quad (2.34)$$

şeklindedir.

2.2.4.1 Çözüm Adımları

A1) İzolatörler için olası durumların belirlenmesi: $m = 3^r$ durumdan j.incisinde izolatörler için öngörülen $\text{sgn}(\mathbf{v}) = -1$, $\text{sgn}(\mathbf{v}) = 0$ veya $\text{sgn}(\mathbf{v}) = 1$ durumları

$$\mathbf{S}_j = \{j_{(3)}\}_{m \times 1} - \{1, 1, \dots, 1\}_{m \times 1}, \quad (j = 1, \dots, m) \quad (2.35)$$

şeklinde bir işaret vektörü ile belirlenir. Burada $j_{(3)}$, j'nin 3 tabanına göre r basamaklı ifadesi olup, $\mathbf{S}_j$ vektörünün i.nci elemanı aynı zamanda, j.nci öngöründe i.nci ayırıklaştırıcının kayma hızının işaretidir. r ise ayırıklaştırıcı sayısidir. Yani 'sgn' işaret fonksiyonu olmak üzere

$$\mathbf{S}_j = \text{sgn}(\mathbf{v}) \quad (2.36)$$

olur.

A2) Başlangıç koşulları: $\mathbf{z}[0] = \mathbf{0}$, $\mathbf{F}[0] = \mathbf{0}$, $\mathbf{w}[0] = \mathbf{0}$ ataması yap

A3) $k = 1$ ataması yap

A4) $k \leq N$ ise A5'e devam et, değilse A13'e git

A5) (2.18b)'den $\mathbf{Z}[k]$ ve (2.33)'den $\mathbf{Q}[k]$ ifadesini hesapla
deprem ivme kaydı $\mathbf{w}[k]$ verisini oku

A6) $j = 1$ ataması yap

A7) $j \leq m$ ise A8'e devam et, değilse 'Uygun durum bulunamadı!' A13'e git

A8) $\mathbf{u} = \mathbf{S}_j$ ataması yap

A9) Eğer $\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u} = 0$ ise bu durumda ayırıklaştırıcıların hiçbirinde rölatif hareket söz konusu değildir, rölatif hızlar sıfırdır.

$\mathbf{v}[k] = \mathbf{0}$ ataması yap

(2.31)'den kesme kuvveti vektörünü $\mathbf{F}[k] = -\mathbf{P}^{-1}\mathbf{Q}[k]$ ifadesi ile belirle

Eğer $|F_i[k]| < f_i$, ($i = 1, \dots, r$) ise öngörülen durum uygun çözümdür A12'ye git

A10) Eğer $\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u} = r$ ise bu durumda bütün ayırıklaştırıcılarda rölatif hareket söz konusudur. Başka bir deyişle, $\mathbf{v}[k] \neq \mathbf{0}$ dir.

$F_i[k] = u_i f_i$, ($i = 1, \dots, r$) ataması yap

(2.31)'den $\mathbf{v}[k]$ 'yı hesapla

Eğer $\text{sgn}(\mathbf{v}[k]) = \mathbf{u}$ ise öngörülen durum uygun çözümdür A12'ye git

A11) Eğer $\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u} < r$ ise bu durumda öngörülen rölatif hızlar bazı ayırıklaştırıcılarda sıfır bazılarında da değildir. $\mathbf{u}$ vektöründe kayma hızı sıfır olan elemanlar $\mathbf{u}_1^* = \mathbf{0}$ ve kayma hızı sıfırdan farklı olanlar $\mathbf{u}_2^* \neq \mathbf{0}$ olacak şekilde gruplanarak $\mathbf{u}^*$ vektörü aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\mathbf{u}^* = \{\mathbf{0}, \mathbf{u}_2^*\}^T = \mathbf{T}\mathbf{u} \quad (2.37)$$

Burada $\mathbf{T}$ matrisi dönüşüm matrisidir. Bu dönüşüm matrisi yardımı ile denklem (2.31)'de verilen ifade

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{P}^* \mathbf{F}^* + \mathbf{Q}^* \quad (2.38)$$

ya da açık formda

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{v}_2^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11}^* & \mathbf{P}_{12}^* \\ \mathbf{P}_{21}^* & \mathbf{P}_{22}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_1^* \\ -\mathbf{u}_2^* \mathbf{f}_2^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{Q}_1^* \\ \mathbf{Q}_2^* \end{Bmatrix} \quad (2.39)$$

dönüştürülmüş değerler cinsinden elde edilmelidir. Burada

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{T}\mathbf{v}[k], \mathbf{P}^* = \mathbf{T}\mathbf{P}\mathbf{T}^{-1}, \mathbf{F}^* = \mathbf{T}\mathbf{F}[k], \mathbf{Q}^* = \mathbf{T}\mathbf{Q}[k] \text{ ve } \mathbf{f}^* = \mathbf{T}\mathbf{f}[k] \quad (2.40)$$

dir. Burada elemanları bilinmeyenlerden oluşan vektörler $\mathbf{F}_1^*$ ve $\mathbf{v}_2^*$ dir ve bilinenlerden oluşanlar da $\mathbf{v}_{1i}^* = 0$, ($i = 1, \dots, s$) ve $\mathbf{F}_{2i}^* = -\mathbf{u}_{2i}^* \mathbf{f}_{2i}^*$, ($i = 1, \dots, r-s$) dir. Denklem (2.39) iki ayrı denklem halinde yazılırsa,

$$\mathbf{F}_1^* = -\mathbf{P}_{11}^{*-1}(\mathbf{P}_{12}^* \mathbf{F}_2^* + \mathbf{Q}_1^*) \quad (2.41a)$$

$$\mathbf{v}_2^* = \mathbf{P}_{21}^* \mathbf{F}_1^* + \mathbf{P}_{22}^* \mathbf{F}_2^* + \mathbf{Q}_2^* \quad (2.41b)$$

elde edilir.

Eğer $|F_{1j}^*| \leq f_{1j}^*$ ve $\text{sgn}(v_{2j}^*) = u_{2j}^*$, ($j = 1, \dots, r$) ise

öngörülen durum uygun çözüm olup $F[k] = T^{-1}F^*$ ters dönüşümü yaparak A12'ye git

değilse, $j \rightarrow j + 1$ ataması yap ve A7'ye git

A12) j. durumu liste başı yap.

(2.18a)'dan $z[k]$ 'yı hesapla.

$k \rightarrow k + 1$ ataması yap ve A4'e git

A13) DUR

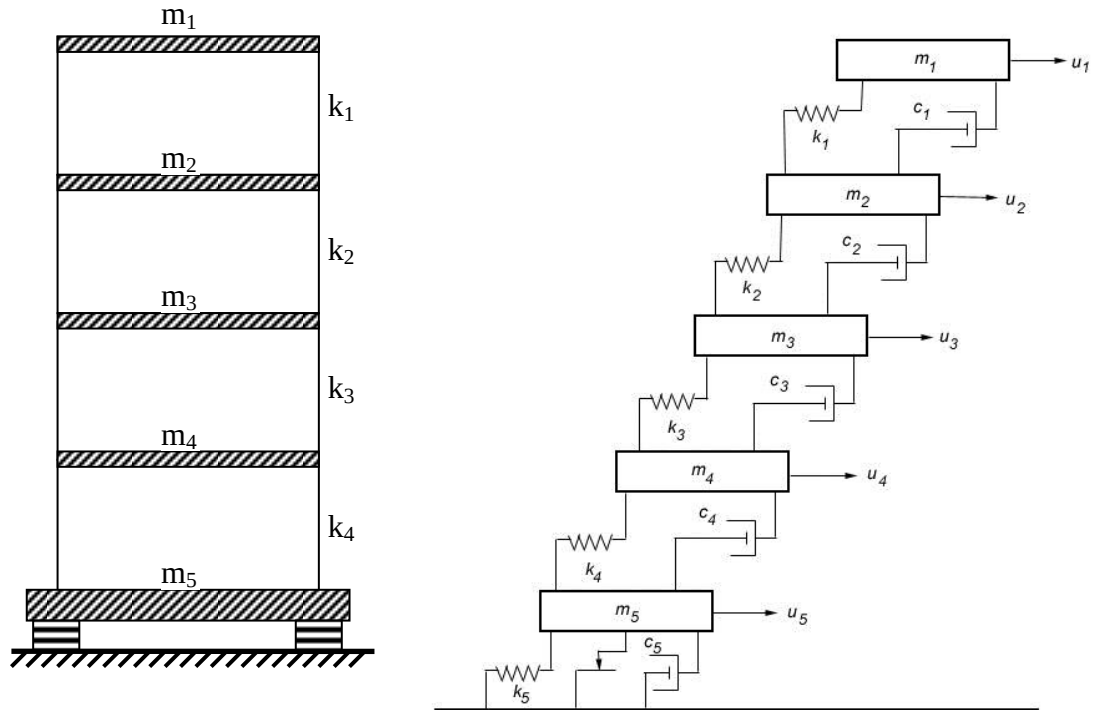
Bu algoritma ile elde edilen sonuçlar Wang [12]'in elde ettiği sonuçlar ile mertebe olarak birbirine yakın, fakat yaklaşıklığı [12]'den daha iyidir. Çünkü bu çalışmada sunulan algoritmada, izolatörlerin hareketleri olası durumlar arasından kesin olarak belirlendikten sonra, izolatör-sürtünme kuvvetleri iterasyona gerek duyulmaksızın hesaplanır. Wang [12]'in algoritmasında ise izolatörlerin durumları iterasyon yolu ile belirlenmektedir. Ancak iterasyonla bulunan sonuçlar bazı durumlarda bu problemin çözümü için kabul edilen $F_i = \mu W_i \text{sgn}(v_i)$ bağıntısını sağlamamaktadır. Bu da Wang'ın önermiş olduğu algoritmanın bir eksikliğidir.

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Hareketli mesnetlenmiş sistemlerin yer hareketinin etkilerinin azaltılmasında etkili olduğunu göstermek amacıyla iki tane farklı tipte model seçilerek, bunların davranışı hem harmonik yer hareketi hem de El-Centro deprem ivme kayıtları için incelenmiştir. Örneklerin tümünde zaman artımı $\Delta t=0.01$ sn alınmıştır. Her iki modelde de sistem ayrık sisteme indirgenerek serbestlik derecesi azaltılmıştır. Ayrıca modellerin yere ankastre mesnetlenmiş duruma göre davranışları da incelenmiş ve bu sonuçlar yere hareketli mesnetlenmiş durumdaki davranış ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen histerisis eğrileri, izole edilmiş ve edilmemiş durumlara ait mutlak ve rölatif deplasmanlar, ilk kat kolonları kesme kuvveti ve şekil değiştirme enerjisi diyagramları grafikler halinde aşağıda sunulmuştur.

3.1 Düzlem Çerçeve Modeli

İlk örnek olarak Şekil 3.1 deki düzlem çerçeve modeli göz önüne alınmıştır [7,13].



Şekil 3.1 Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve ve matematiksel model

Sistem parametreleri, $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 573600$ N/m, $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 350.2$ kg, $m_5 = 466.2$ kg, sürtünme katsayısı $\mu=0.1$ ve yerçekim sabiti $g = 9.81$ m/sn² olarak alınmıştır. Sistemin kütle ve rijitlik matrisleri oluşturulurken kat döşemelerinin rijit diyafram çalışmaları varsayılmış ve düğüm noktalarının yalnızca yatay doğrultudaki deplasmanları hesaba katılmıştır. Düğüm noktalarının dönmeleri ve düşey deplasmanları dikkate alınmamıştır. Tabandaki kesme kuvveti, maximum sürtünme kuvvetinden, $f_{\max} = (m_1+m_2+m_3+m_4+m_5)\mu g = 1831.5$ kg m/sn², küçük olduğu zaman taban bloğu yer ile beraber hareket eder (yere göre rölatif hızı sıfırdır, $du_5/dt = 0$). Tabandaki kesme kuvveti maximum sürtünme kuvvetine ulaştığında taban bloğu yerden ayrılarak kaymaya başlar. Bu durumda bloğun yere göre rölatif hızı sıfırdan farklıdır. Bu durumda taban kesme kuvveti sabittir ve değeri $V_{\text{base}} = f_{\max} \text{sgn}(du_5/dt)$ bağıntısından hesaplanır. Sistemin kütle ve rijitlik matrisleri,

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

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

$$= \begin{bmatrix} 573600 & -573600 & 0 & 0 & 0 \\ -573600 & 1147200 & -573600 & 0 & 0 \\ 0 & -573600 & 1147200 & -573600 & 0 \\ 0 & 0 & -573600 & 1147200 & -573600 \\ 0 & 0 & 0 & -573600 & 573600 \end{bmatrix}$$

Sistemin sönüm matrisi, Rayleigh orantılı sönümü varsayılarak kütle ve rijitlik matrislerinden elde edilir [17]. Sistemin birinci mod frekansı $\omega_1=14.04\text{sn}^{-1}$ ve ikinci mod frekansı $\omega_2=40.455\text{sn}^{-1}$ kullanılır ve bu modlar için sönüm oranları $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ alınır,

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_2} & \omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

denklem sisteminden,

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.042276 \\ 0.001835 \end{bmatrix}$$

değerleri elde edilir. Sönüm matrisi

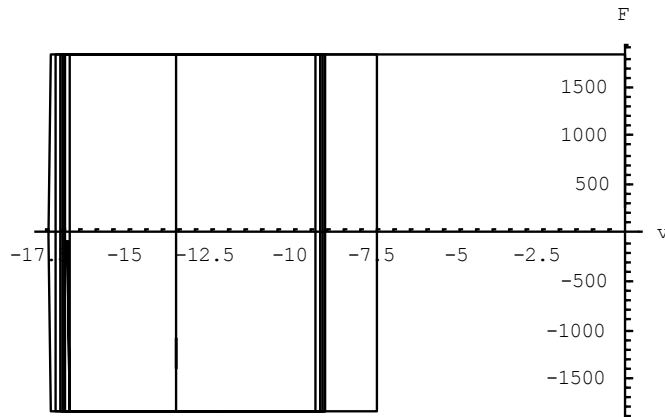
$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K} \quad (3.2)$$

formülünden hesaplanarak aşağıdaki gibi elde edilir,

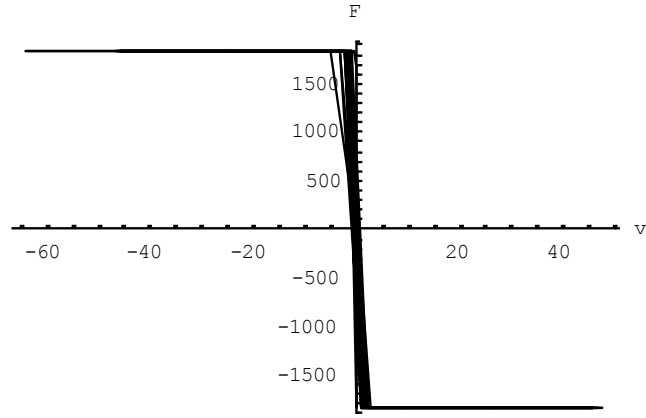
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1417.56 & -1052.56 & 0 & 0 & 0 \\ -1052.56 & 2470.11 & -1052.56 & 0 & 0 \\ 0 & -1052.56 & 2470.11 & -1052.56 & 0 \\ 0 & 0 & -1052.56 & 2470.11 & -1052.56 \\ 0 & 0 & 0 & -1052.56 & 1539.19 \end{bmatrix} \quad 3.1.1.$$

Harmonik Yer Hareketi İle Analiz

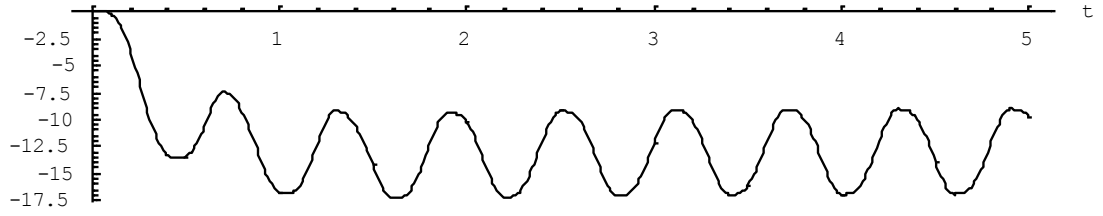
Bu modelin davranışı, $\ddot{x}_g = 0.5g \sin(10.472t)$ harmonik yer hareketi için incelenmiştir.



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

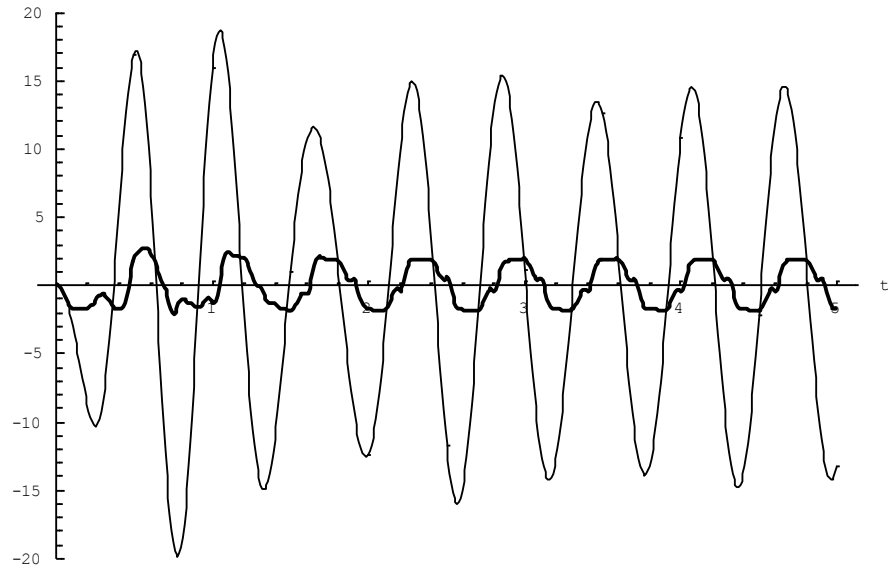


Şekil 3.3 İzolatörde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramı.

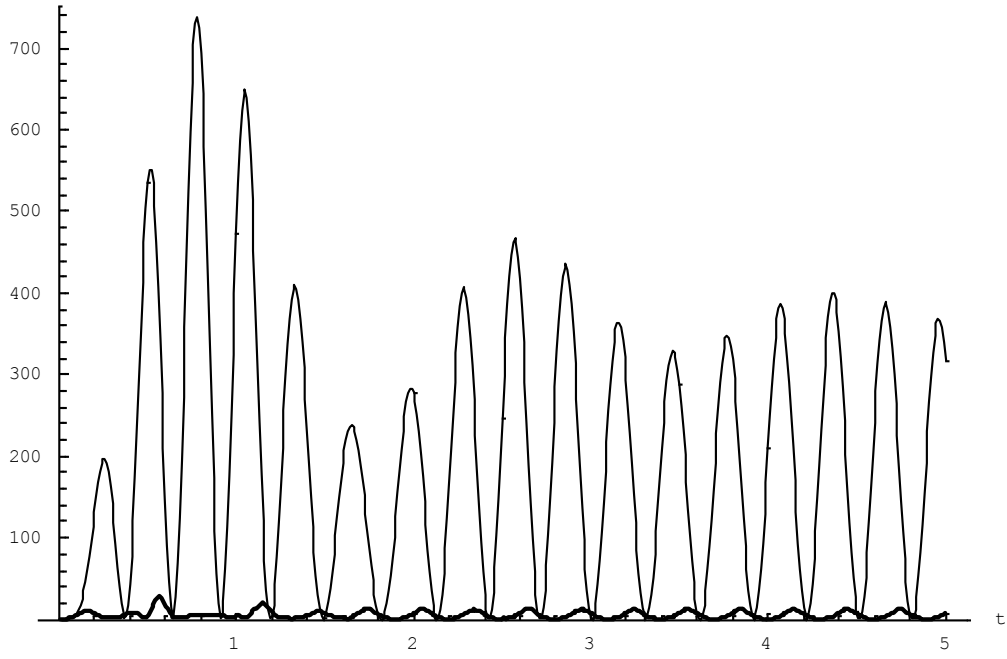


Şekil 3.4 Temel bloğunun yere göre deplasmanı, (cm).

Şekil 3.4’de temel bloğunun ilk kayma hareketini tamamladıktan bir süre sonra periyodik harekete girdiği görülmektedir. Burada elde edilen sonuç [4] ile uyum içindedir.



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

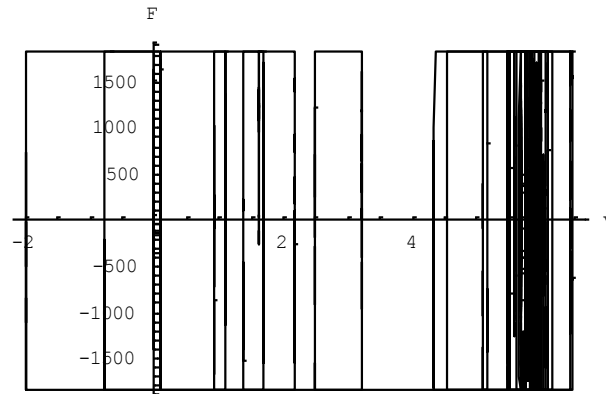


Şekil 3.6 Şekil değıştirme enerjisinin karşılaştırılması (Nm)

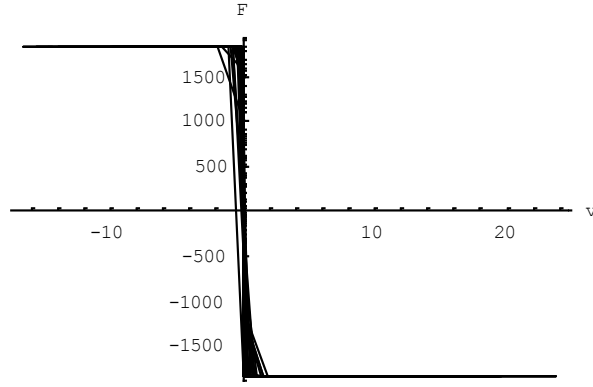
Şekil 3.5’den görüldüğü üzere, izole edilmiş sistemin ilk kat kolonları kesme kuvvetleri edilmemiş sisteminkinden oldukça küçüktür. Bu durum öngörülen izolasyon sisteminin harmonik hareket için etkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar [13]’de sunulanlar ile hemen hemen üst üste düşmektedir. Diğer taraftan Şekil 3.6’da, yer hareketi ile sisteme iletilen şekil değıştirme enerjisinin izole edilmiş durumda oldukça azaldığı görülmektedir [7].

3.1.2. El-Centro Deprem İvme Kaydı İle Analiz

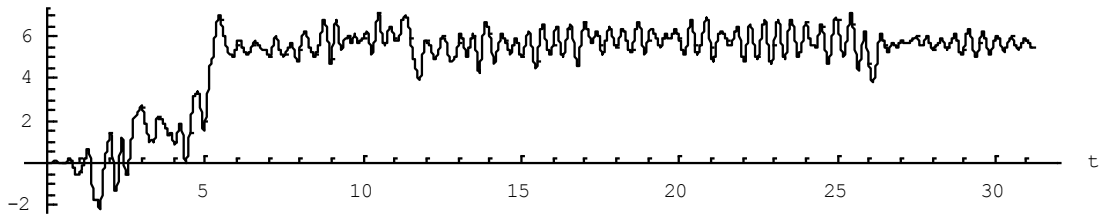
Aynı modelin El-Centro deprem ivme kaydı ile yapılan analizinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



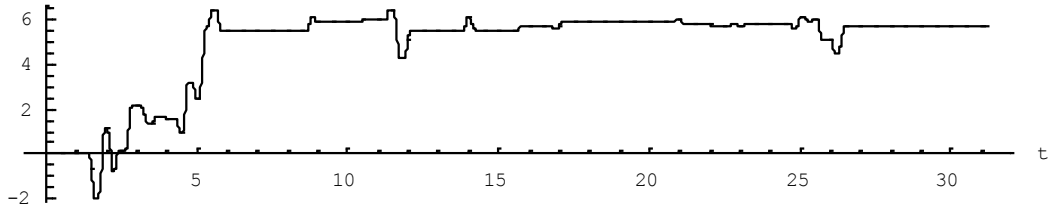
Şekil 3.7 İzolatörde rölatif deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrisi



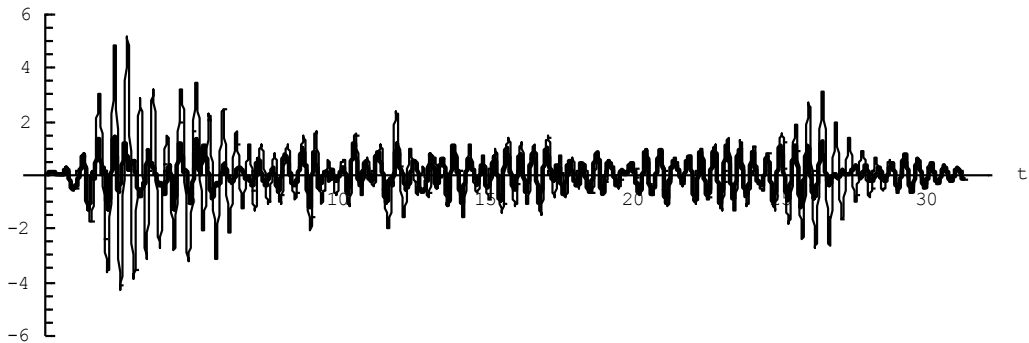
Şekil 3.8 İzolatörde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramı



Şekil 3.9 Üst katın zemine göre deplasmanı, (cm)



Şekil 3.10 Temel bloğunun zemine göre deplasmanı, (cm)



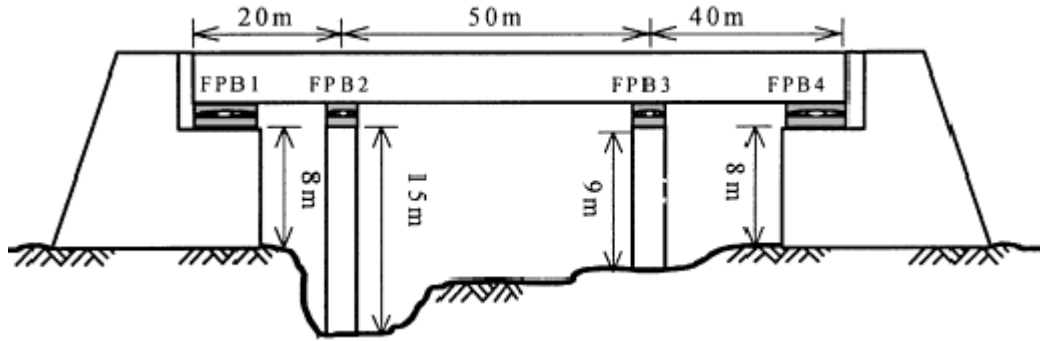
Şekil 3.11 İzole edilmiş ve edilmemiş durumlarda üst katın temel bloğuna göre rölatif deplasmanı (cm)

Şekil 3.11 den görüldüğü üzere, izole edilmiş sistemde üst katın temel seviyesi kat'a göre rölatif deplasmanı izole edilmemiş sisteminkinden küçüktür. Bu durum öngörülen izolasyon sisteminin deprem hareketi için de etkili olduğunu

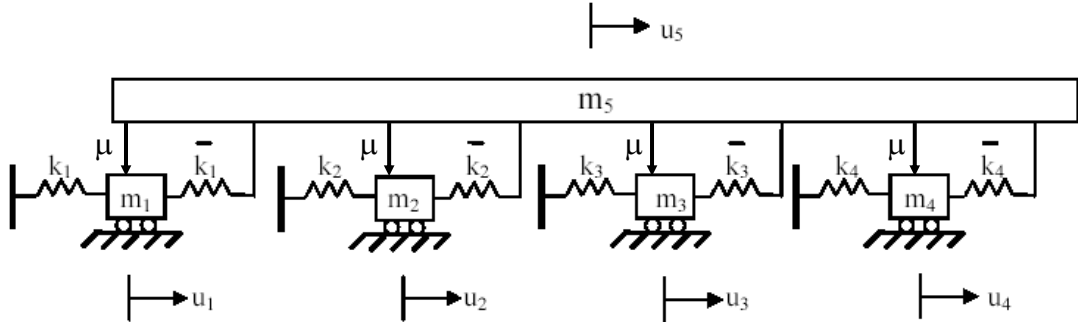
göstermektedir. Elde edilen sonuçlar [7,13]'de sunulanlarla hemen hemen üst üste düşmektedir.

3.2 Üç Açıklıklı Köprü Modeli

İkinci örnek olarak Şekil 3.12'deki simetrik olmayan üç açıklıklı sürekli bir köprü modeli seçilmiştir [12]. İlk örnekten farklı olarak bu modelde birden çok ve bağımsız çalışan sürtünme elemanı vardır. Tabliye rijit varsayılarak sistem 5 serbestlik dereceli ayırık sisteme indirgenmiştir. Sistem için kurulan matematiksel model Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Köprü elemanlarının özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.12 Üç açıklıklı simetrik olmayan köprü ve boyutları



Şekil 3.13 Üç açıklıklı köprü için kurulan matematiksel model

Tablo 3.1 Köprü elemanlarının 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

Bu modelde sürtünmeli sarkaç sistemi kullanılmıştır. Sürtünmeli yüzeylerin eğrilik yarıçapları (sarkaç boyu) 1m alınırsa, izolatörlerin periyotları $T = 2\pi\sqrt{R/g}$ formülünden yaklaşık olarak $T = 2\text{sn}$ olarak belirlenir. Sistem kütle matrisi,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 106.97 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 60.17 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36.10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 106.97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1319.60 \end{bmatrix}$$

sistem rijitlik matrisi,

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

$$= \begin{bmatrix} 337859 & 0 & 0 & 0 & -330 \\ 0 & 20096 & 0 & 0 & -4790 \\ 0 & 0 & 76984 & 0 & -6120 \\ 0 & 0 & 0 & 339236 & -1706 \\ -330 & -4790 & -6120 & -1706 & 12945 \end{bmatrix}$$

olarak denge denklemlerinden elde edilir. Burada köprü ayakları, bir ucu serbest diğer ucu ankastre mesnetlenmiş konsol çubuk olarak alınmış ve rijitlikleri

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

formülü ile hesaplanmıştır. 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,

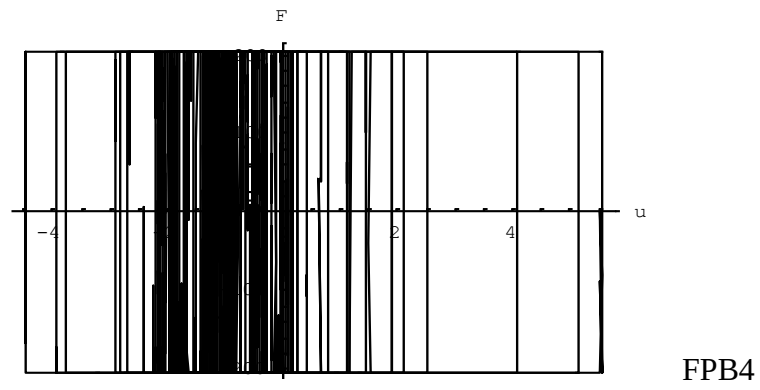
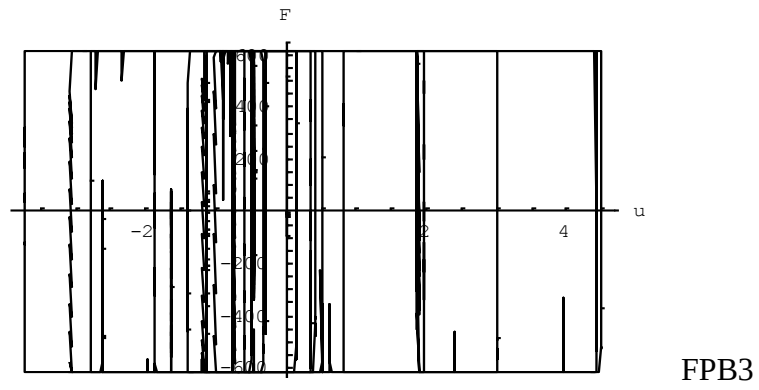
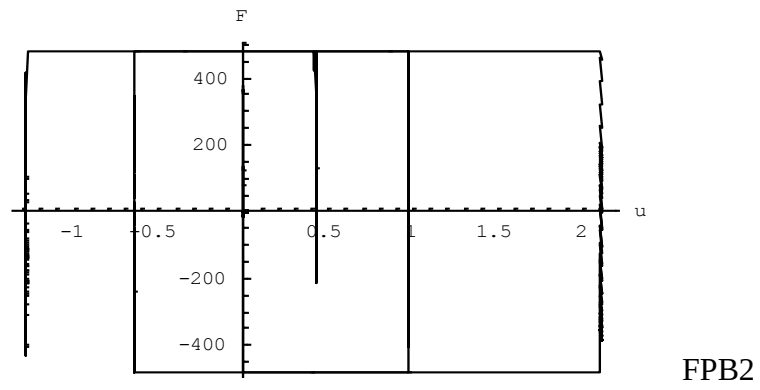
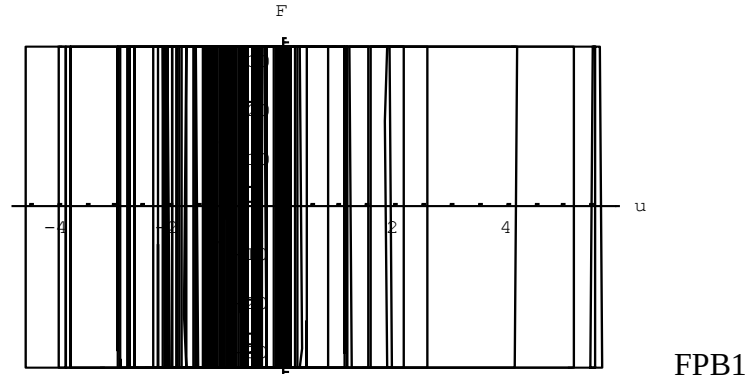
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

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

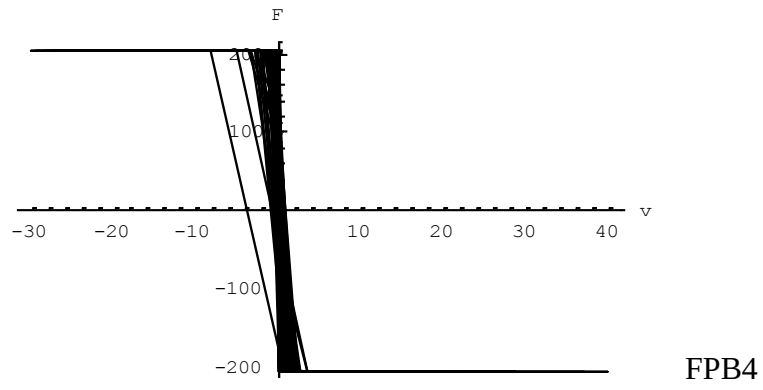
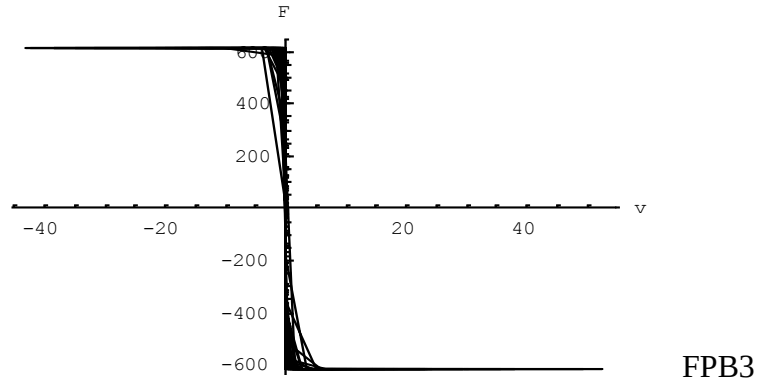
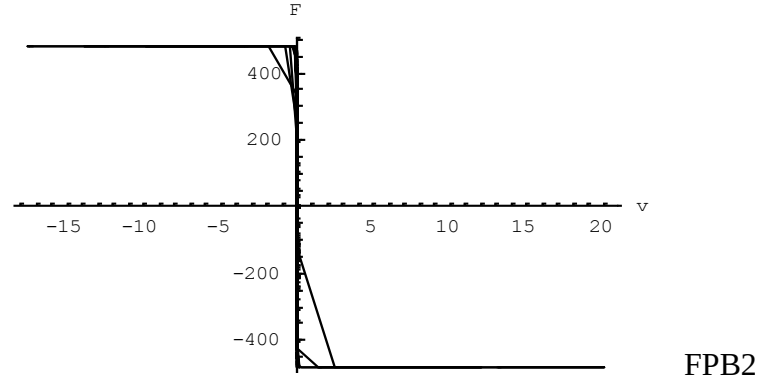
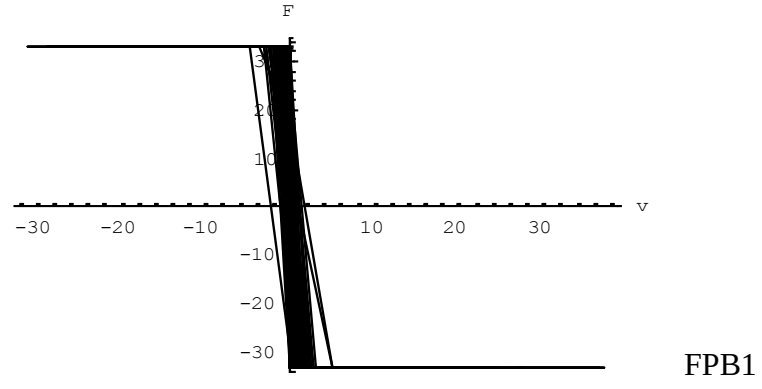
$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ F_4(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} 32.95 \\ 478.98 \\ 611.96 \\ 203.60 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}(t) = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t)$$

şeklindedir. Burada $\ddot{u}_g(t)$ skaler bir fonksiyondur ve yer hareketinin zamana bağlı ivmesini ifade eder.

Elde edilen histerisis eğrileri Şekil 3.14-15’de, izolatörlerdeki rölatif deplasmanlar Şekil 3.16’da, izole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları Şekil 3.17’de, izole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı da Şekil 3.18’de verilmiştir.

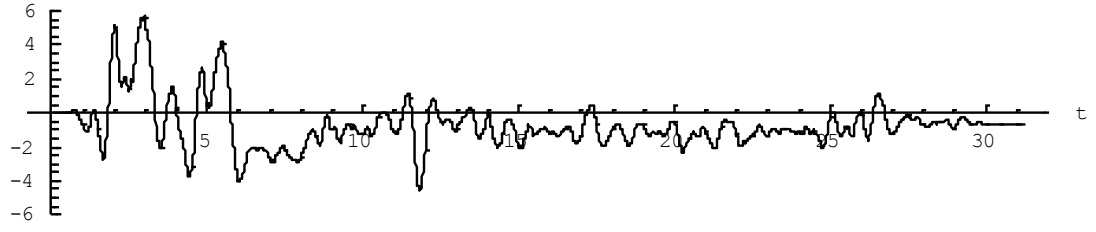


Şekil 3.14 İzolatörlerde rölatif deplasman (cm)-kesme kuvveti (N) histerisis eğrileri

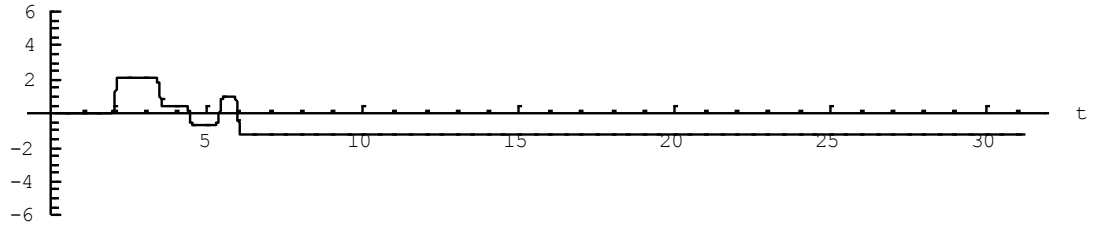


Şekil 3.15 İzolatörlerde hız (cm/sn)-kesme kuvveti (N) diyagramları

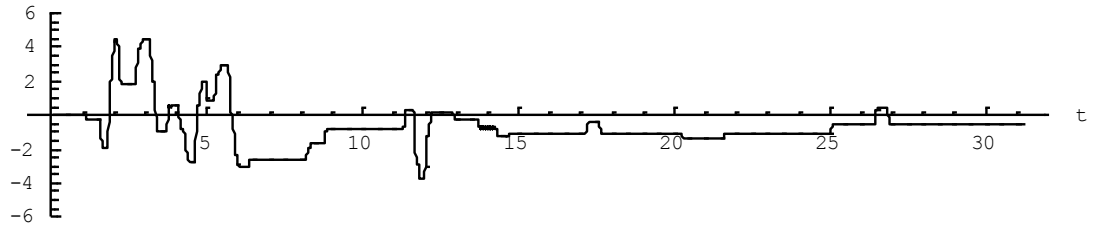
FPB1



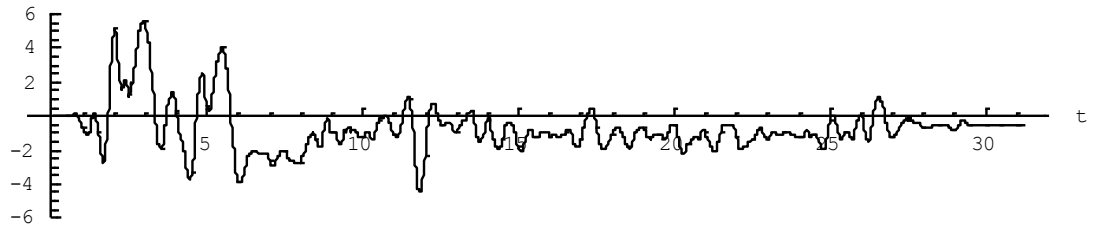
FPB2



FPB3

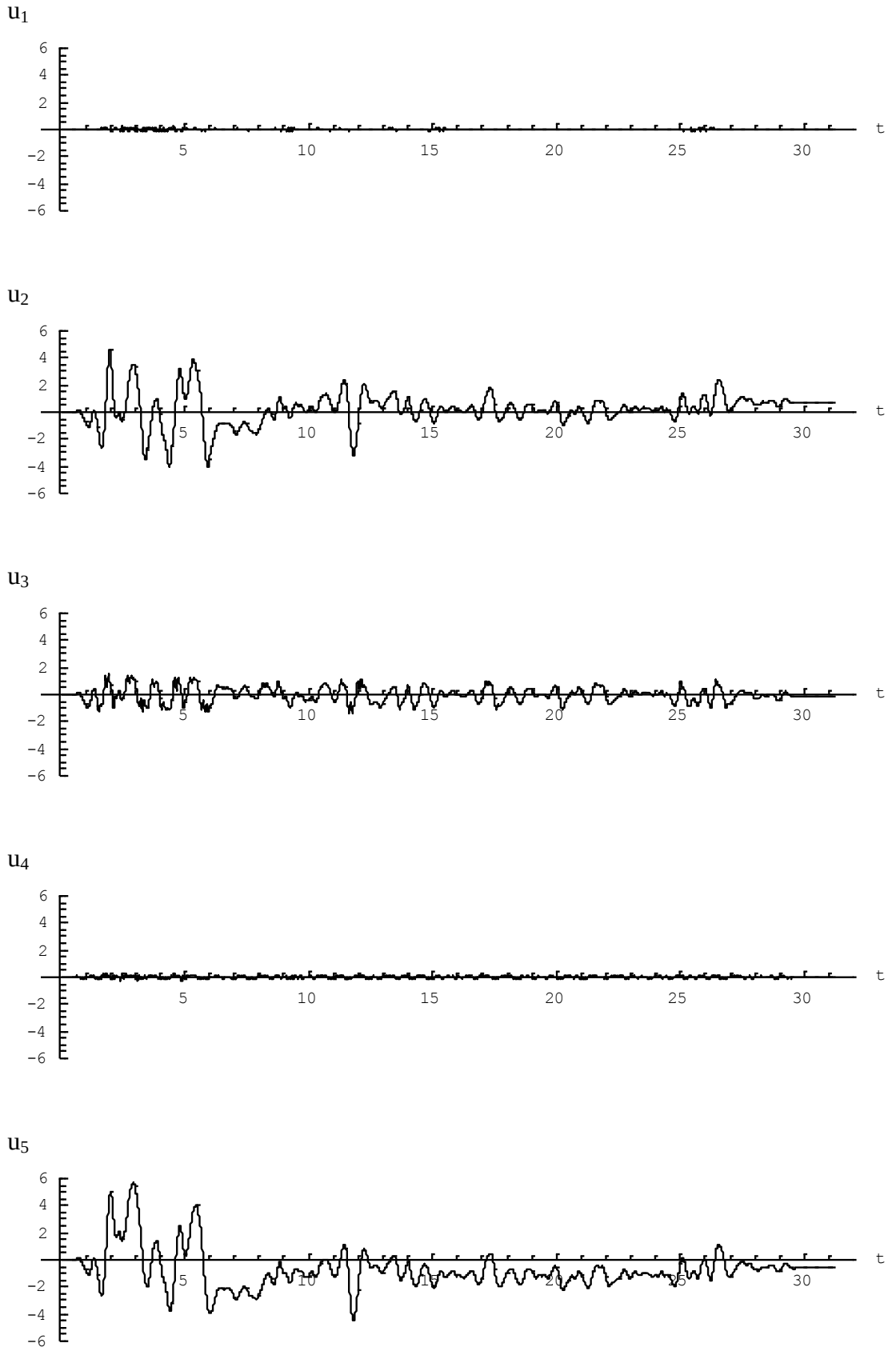


FPB4

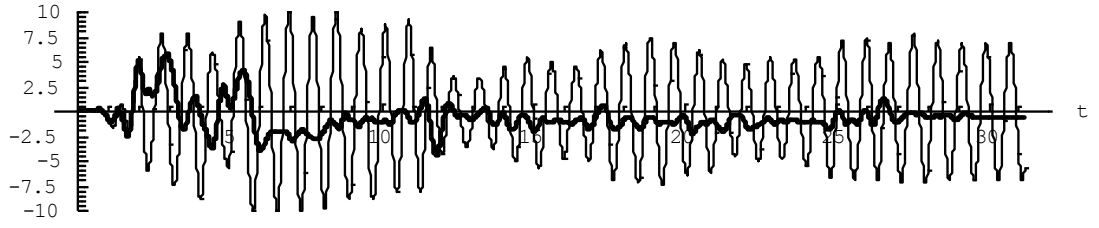


Şekil 3.16 İzolatörlerde rölatif deplasmanlar (cm).

İzolatörlerde oluşan rölatif deplasmanlar Wang [12]'in sunduklarına mertebe olarak yakındır. Şekil 3.16'da FB1 ve FB4 için elde edilen en büyük deplasman değeri 5.6cm iken Wang'ın vermiş olduğu değer 4.99cm dir.



Şekil 3.17 İzole edilmiş sistemin mutlak deplasmanları (cm).



Şekil 3.18 İzole edilmiş ve edilmemiş durumda tabliyenin mutlak deplasmanı (cm).

Tabliyenin mutlak deplasmanı izole edilmiş durumda 5cm iken edilmemiş durumda 10cm dir.Wang [12]'ın verdiği değer izole edilmiş durum için 5.16cm iken edilmemiş durum için 9.06cm dir. Şekil 3.16'da FB1 ve FB4 için elde edilen en büyük deplasman değeri 5.6cm iken Wang'ın vermiş olduğu değer 4.99cm dir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, hareketli mesnetlenmiş sistemlerin depreme dayanıklı yapı tasarımındaki etkinliği sayısal örnekler ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ilk örnekte izole edilmiş durum ile yere ankastre mesnetlenmiş durum karşılaştırıldığında, maximum kat deplasmanlarının ve kat ivmelerinin izole edilmiş durumda daha düşük olduğu görülmüştür. Bu örnekte, en üst katın ankastre mesnetlenmiş durumdaki deplasmanı 6 cm iken, izole edilmiş durumda deplasmanın 1.5 cm'e düştüğü görülmüştür. Deplasmanların, kat ivmelerinin ve kat kesme kuvvetlerinin düşük çıkması, üst yapıya yerden iletilen enerji miktarının azaltıldığını göstermektedir. Sistemin yerden izole edilmesi, sisteme daha düşük bir frekans sağlayarak yer hareketinin baskın frekansından uzaklaşılmasını sağlar. Üç açıklıklı köprü modelinde, tabliyenin orta ayaklara sabit, kenar ayaklara hareketli mesnetlenmiş olması durumunda, orta ayaklarda oluşan maximum deplasmanların 10 cm iken, sürtünmeli sarkaç sistemi kullanıldığında orta ayaklarda oluşan deplasmanların 5cm olduğu görülmüştür. Ayrıca izole edilmiş köprü modelinde ayaklara gelen deprem etkilerinin kontrollü olarak dağıldığı görülmüştür.

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, Udwadia 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.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Saltık Ulusoy 15.04.1977’de Kayseri’de doğdu. Lise öğrenimini Kayseri Lisesinde tamamladı. 1993-1994 öğretim yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı ve 31.07.1997’de aynı bölümden mezun oldu. 2001 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans Programına kaydoldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Matematik Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir.