

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPILARDA SÜRTÜNMELİ ELEMANLAR İLE VİSKOZ
SÖNÜMLEYİCİLERİN BİRLİKTE UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Tansu IŞIK

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı: Yrd.Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ

MAYIS 2006

**YAPILARDA SÜRTÜNMELİ ELEMANLAR İLE VİSKOZ
SÖNÜMLEYİCİLERİN BİRLİKTE UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tansu IŞIK

501011050

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / Mayıs / 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 / Haziran / 2006

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Reha ARTAN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Faruk YÜKSELER (Y.T.Ü.)

Mayıs 2006

ÖNSÖZ

Bir deprem ülkesi olan ülkemizde, depreme dayanıklı yapılar için yeni tasarım yöntemleri geliştirilmekte, aktif yada 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 izolatör kullanılmış yapılarda ve sürtünmeli izolatörlerle birlikte katlar arasına viskoz sönümleyiciler konulan yapılarda çeşitli deprem yüklerinin yapı üzerindeki etkileri araştırılmış, sürtünmeli izolatörün sürtünme katsayısının değişimi dikkate alınarak, yapının çeşitli deprem yüklerine verdiği yanıtlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan uygun birkaç sürtünme katsayısı seçilmiş ve bu sürtünme katsayıları sabit tutularak, yapıya çeşitli şekillerde yerleştirilen viskoz sönümleyicilerin sönüm katsayısının değişimi ile yapının yanıtında oluşan değişimler incelenmiştir.

Bu çalışma boyunca yardımları, gösterdikleri ilgi ve sabırları için değerli hocam Yrd.Doç. Dr. Abdullah Gedikli 'ye içtenlikle teşekkür ederim. Tez çalışmamda hep yanımda olup bana yardımcı olan Cem Aydemir'e, Ayrıca bu tezi tamamlamam için bitmek tükenmek bilmeyen ısrarları ve cesaretlendirmeleri için Hüsnü Alparslan ve Banu Göktürk'e de çok teşekkür ederim. Hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen ailem; Mehmet, Ayşe, ağabeyim Fırat ve sevgili kardeşim Merve Işık'a her zaman minnettarım.

Tansu IŞIK

Mayıs, 2006

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	4
2. SİSMİK KORUMA TEKNİKLERİ	5
2.1 Pasif Kontrol Sistemleri	5
2.1.1 Sismik İzolasyon Sistemleri	6
2.1.1.1 Temel İzolasyonu	6
2.1.1.2 Elastomerler	8
2.1.1.3 Düşük Sönümlü Elastomerler	9
2.1.1.4 Kurşun Gövdeli Elastomerler	10
2.1.1.5 Yüksek Sönümlü Elastomerler	10
2.1.1.6 Sürtünmeli İzolatörler	11
2.1.1.6.1 Sürtünmeli Sarkaç	11
2.1.1.6.2 Sürtünme Dayanımlı İzolatör	13
2.1.2 Pasif Enerji Sönümleyiciler	14
2.1.2.1 Eğilmeli Metal Sönümleyiciler.	14
2.1.2.2 Sürtünmeli sönümleyiciler.	15
2.1.2.3 Viskoelastik sönümleyiciler	16
2.1.2.4 Viskoz sönümleyiciler	16
2.1.2.5 Ayarlı Kütle Sönümleyiciler	17
2.1.2.6 Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler	19
2.2 Aktif Kontrol Sistemleri	20
2.2.1 Aktif kontrol sistemlerinin çeşitleri:	21
2.2.1.1 Aktif Kiriş Kontrolü	21
2.2.1.2 Aktif Kütle Sönümleyicisi	22
2.2.1.3 Aktif Rijitlik Değiştirici	23
2.2.2 Aktif Kontrolün Dezavantajları	24
2.2.3 Karma Ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri	25
2.3 Hareketli Mesnetlenmiş Sürtünmeli Sistemler	25
3. TEMEL DENKLEMLER	28
3.1 Problemin Çözümü İçin Yapılan Kabuller	28

3.2	Hareket Denklemi	29
3.2.1	Hareket Denklemine Çözümü	30
3.2.2	Kayma Fazı ve Rölatif Hareketsiz Faz	33
3.2.3	Sürtünmeli Sarkaç ve Eşdeğer Yay Modeli	34
3.2.4	Sayısal Çözüm Yöntemi	36
4.	SAYISAL UYGULAMALAR	38
4.1	Dört Katlı Düzlem Çerçeve Modeli	38
4.1.1	Sürtünmeli Sismik İzolatör Kullanılmış Dört Katlı Çerçeve Modeli	38
4.1.1.1	Çeşitli Deprem Hareketleri İçin Çözümler	41
4.1.1.2	Temel Bloğu kütlesi Normal Kat Ağırlığının İki Katına Çıkarılarak Yapılan Çözümler	46
4.1.1.3	Temel Bloğu Kütlesi Üç Katı olması durumu	48
4.1.1.4	Tüm Kat Kütlelerinin İki Katı Olması Durumu	50
4.1.2	Sürtünmeli Sismik İzolatör İle Birlikte Her Katta Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılması Durumu	52
4.1.2.1	İki Katta Bir Viskoz Sönüm Elemanı kullanılmış Model	55
4.1.2.2	Tek Bir Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılmış Sistem	57
4.2	Dokuz Katlı Düzlem Çerçeve Modeli	60
4.2.1	Dokuz Katlı Sistemin Çeşitli Deprem Hareketleri İçin Çözümleri	62
4.2.2	Dokuz Katlı Sistemde harmonik hareketin Frekansı ve genliği değiştirilerek yapılan çözümler	66
4.2.2.1	Genlik değiştirerek yapılan çözümler	66
4.2.2.2	Frekans Değiştirilerek Yapılan Çözümler	67
4.2.3	Sürtünmeli Sismik İzolatör İle Birlikte Her Katta Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılmış Dokuz Katlı Sistem	68
4.2.4	Sürtünmeli Sismik İzolatör İle Birlikte İki Katta Bir Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılmış Dokuz Katlı Sistem	70
5.	SONUÇLAR	73
	ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Şematik ivme spektrum eğrisi	8
Şekil 2.2 Elastomer tipindeki izolatör	9
Şekil 2.3 Elastomer tipindeki izolatör	9
Şekil 2.4. Düşük sönümlü elastomer	10
Şekil 2.5 Kurşun gövdeli elastomer	11
Şekil 2.6. Sürtünmeli sarkaç	12
Şekil 2.7 Sürtünmeli sarkaç sistemi	12
Şekil 2.9. Sürtünme dayanımlı izolatör.	14
Şekil 2.10. Eğilmeli metal sönümleyiciler ve kuvvet deformasyon Diyagramı	15
Şekil 2.11. Sürtünmeli sönümleyiciler ve kuvvet–deformasyon diyagramı	15
Şekil 2.12. Viskoelastik sönümleyiciler ve kuvvet–deformasyon diyagramı	16
Şekil 2.13. Viskoz sönümleyici	17
Şekil 2.14. Bir destekle yerleştirilmiş sönümleme mesnedi	17
Şekil 2.16. Ayarlı kütle sönümleyici uygulama fotoğrafı	18
Şekil 2.17. Ayarlı kütle sönümleyici tipleri	19
Şekil 2.18. Ayarlı sıvı sönümleyici	20
Şekil 2.19. Aktif kontrol elemanı çalışma şeması	20
Şekil 2.20. Aktif giriş kontrolü	22
Şekil 2.21. Aktif kütle sönümleyicisi	23
Şekil 2.22. Aktif rijitlik değiştirici	24
Şekil 3.1. Sürtünme kuvveti – Rölatif deplasman bağıntısı	28
Şekil 3.2. Sürtünme Kuvveti – Kayma hızı bağıntısı	29
Şekil 3.3 Sürtünme kuvvetinin $[t_{k-1}, t_k]$ zaman aralığındaki değişimi	32
Şekil 3.4 Sürtünmeli Sarkaç sisteminin parametreleri	35
Şekil 3.5 Programın akış diyagramı	37
Şekil 4.1 Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve sistemin modeli	39

Şekil 4.2 Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve sistemin matematik modeli	
(a) Sadece sürtünmeli izolatör kullanılması durumu	
(b) Sürtünmeli izolatör ile birlikte sönümleyici kullanılması durumu	39
Şekil 4.3 Temel bloğunun yere göre deplasmanın zamana göre değişimi, (m).	42
Şekil 4.4 Rölatif deplasmanın zamana göre değişimi, (m)	42
Şekil 4.5 Sürtünme kuvveti deplasman ilişkisi.	43
Şekil 4.6 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	43
Şekil 4.7 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	44
Şekil 4.8 Dört katlı yapının Kocaeli depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	44
Şekil 4.9 Dört katlı yapının Düzce depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	45
Şekil 4.10 Dört katlı yapının çeşitli yer hareketleri etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	45
Şekil 4.11 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	47
Şekil 4.12 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	47
Şekil 4.13 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	48
Şekil 4.14 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	49
Şekil 4.15 Temel bloğunun kütlesi değişiminin sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri üzerine etkileri (Harmonik yer hareketi)	49
Şekil 4.16 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	51
Şekil 4.17 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	51
Şekil 4.18 Dört katlı yapıdaki kütle değişiminin harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkilerine etkisi	52
Şekil 4.19 Her katta viskoz sönümleyici kullanılması durum	53
Şekil 4.20 Dört katlı yapıda harmonik hareket etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri	54

Şekil 4.21	Dört katlı yapının El Centro kaydı etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri	55
Şekil 4.22	İki katta bir viskoz sönümleyici kullanılması durum	55
Şekil 4.23	Dört katlı yapıda harmonik hareket etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri	56
Şekil 4.24	Dört katlı yapının El Centro kaydı etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri	57
Şekil 4.25	Tek bir viskoz sönümleyici kullanılması durumu	57
Şekil 4.26	Dört katlı yapıda harmonik hareket etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri	58
Şekil 4.27	Dört katlı yapının El Centro kaydı etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri	59
Şekil 4.28	Sönümleyicilerin farklı biçimlerde yerleştirilmelerinin sönüm-deplasman ilişkileri üzerine etkileri	59
Şekil 4.29	Hareketli mesnetlenmiş 9 katlı düzlem çerçeve sistemin modeli	60
Şekil 4.30	Dokuz katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	63
Şekil 4.31	Dokuz katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	63
Şekil 4.32	Dokuz katlı yapının Kocaeli depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	64
Şekil 4.33	Dokuz katlı yapının Düzce depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	64
Şekil 4.34	Dokuz katlı yapının çeşitli yer hareketleri etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri	65
Şekil 4.35	Dokuz katlı yapıda harmonik hareket etkisinde taban kütlesi değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler	66
Şekil 4.36	Dokuz katlı yapıda El Centro deprem ivme kaydı etkisinde taban kütlesi değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler	66
Şekil 4.37	Dokuz katlı yapıda harmonik hareketin genliğinin değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler	67
Şekil 4.38	Dokuz katlı yapıda harmonik hareketin frekansının değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler	67
Şekil 4.39	Harmonik hareketin etkisindeki her katta sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.	69

Şekil 4.40 El Centro deprem ivme kaydı etkisindeki her katta sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.	69
Şekil 4.41 Harmonik hareketin etkisindeki iki katta bir sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.	71
Şekil 4.42 El Centro deprem ivme kaydı etkisindeki iki katta bir sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.	72
Şekil 4.43 Harmonik hareket etkisindeki her katta ve iki katta bir sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanların karşılaştırması.	72

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 VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİLERİN BİRLİKTE UYGULANMASI

ÖZET

Bir yapının depremde hasar görmesini veya yıkılmasını engellemek, yapıya yeterince dayanıklılık kazandırarak yada yapıyı yerden izole ederek mümkün olabilir. İlk yaklaşıma göre, deprem kuvvetlerinin yapıya doğrudan iletildiği varsayılır ve yapının her elemanı depremle oluşacak olası maksimum kuvvetlere karşı çeşitli süneklilik kriterleri göz önüne alınarak yapı tasarımı yapılır. İkinci yaklaşıma göre, çeşitli izolasyon elemanları kullanılarak yapıda oluşacak maksimum 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 maksimum 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

Bu çalışmada sürtünmeli izolatör ve sürtünmeli izolatörlerle birlikte katlar arasında viskoz sönümleyiciler kullanılmış yapıların çeşitli deprem yükleri etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Sürtünmeli İzolatörün sürtünme katsayısının değişimi dikkate alınarak, yapının çeşitli deprem yüklerine verdiği yanıtlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan uygun birkaç sürtünme katsayısı seçilmiş ve bu sürtünme

katsayıları sabit tutularak, yapıya çeşitli şekillerde yerleştirilen viskoz sönümleyicilerin sönüm katsayısının değişimi ile yapının yanıtında oluşan değişimler incelenmiştir. Bununla birlikte yapıya etkiyen harmonik hareketin frekansı ve genliği değiştirilerek yapının yanıtında oluşan değişimler incelenmiştir.

SEISMIC CONTROL OF STRUCTURES ISOLATED WITH SLIDING SUPPORT AND VISCOUS DAMPER

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

In this study, it has been investigated the response of the structures, which is used sliding support alone and sliding support combined with viscous damper, in the several earthquake motion. By changing the friction coefficient of the base-isolated system, it has been investigated the displacement of the structures in several earthquakes effect. The friction coefficient is selected from the result, and then viscous dampers are inserted in various ways into the structure. And with the change of the friction coefficient of dampers the displacement are examined.

In addition to this, by changing frequency and amplitude of harmonic motion, we observed how the displacements of the structures are changed.

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 yada 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, İngiltere’de bir tıp doktoru olan Johannes Avetican Calantarients yapıları, temelleri ile zemin arasına yerleştireceği bir kum, mika yada talk tabakasıyla ayırmayı önermiş ve bu sistemin patentini almıştır [1].

Hindistan’da meydana gelen 1930 Dubai 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 Çin’de meydana gelen Tangshan depreminden sonra Çinli mühendisler yapmışlardır. Bu gözlemde, depremden sonra ayakta kalan binaların temelden yaklaşık 6 cm 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. Yapıya temelden eklenen tek bir sürtünmeli izolatör ve katlar arasına çeşitli şekillerde yerleştirilen viskoz sönümleyiciler ile yapıda oluşan taban ve rölatif deplasmanların, sürtünmeli izolatörün değişimi ve de uygun birkaç sürtünme katsayısı sabit alınarak eklenen viskoz sönüm elemanının değişimiyle nasıl değiştiği araştırılmıştır.

2. SİSMİK KORUMA TEKNİKLERİ

Koruma teknikleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bunlardan biri konuma göre sınıflandırmadır. Bu çeşit sınıflandırmaya göre iki çeşit izolatör vardır. Dış koruma sağlayan izolatörler (Temellerde kullanılan izolatörler yapının dışında konumlandığı için bu gruba girer.) ve iç koruma sağlayan izolatörler (Yapı taşıyıcı sistemine yerleştirilen enerji sönümleyiciler bu gruba girer). Daha yaygın olarak kullanılan sınıflandırma sistemi ise uygulama yöntemine göre sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre iki çeşit kontrol sistemi vardır.

- Pasif Kontrol Sistemleri
- Aktif Kontrol Sistemleri

2.1 Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri yapıya yerleştirilen özel elemanlar aracılığı ile sisteme dışardan giren enerjiyi ısıya dönüştürürler veya üzerlerine alırlar. Pasif kontrol sistemlerinin hesabı kolay ve maliyeti düşüktür. Bu sistemde yapıya dışardan bir kuvvet uygulanmaz bu yüzden bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar. Fakat aktif kontrol yöntemleri kadar etkin değildirler. Yapının ömrü boyunca maruz kalabileceği deprem büyüklükleri göz önüne alınarak tasarlanırlar dolayısıyla tasarlanandan daha büyük bir deprem meydana gelirse yapıda büyük deplasmanlar meydana gelebilir. Pasif kontrol sistemleri ;

- Sismik izolasyon sistemleri

- Pasif enerji sönümleyiciler

Olmak üzere iki gruba ayrılır. Pasif enerji sönümleyiciler sisteme ilave edilen araçlar sayesinde sistemin enerji yutma kapasitesini artırır. Sismik izolasyon sistemleri ise genelde temel ile yapı arasına yerleştirilip yapıya zemin hareketinden gelecek kuvvetleri sınırlandırır.

2.1.1 Sismik İzolasyon Sistemleri

1929 da Martel, 1935 de Green ve Bednarski ve 1938 de Jacobsen gibi yapı mühendisleri depreme dayanıklı yapı tasarımı için ‘elastik davranışlı ilk kat’ 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 yada tamamen göçmesine neden olmaktadır. Bu yaklaşımda birinci kat kolonlarının elastik deformasyon yaptıkları varsayımı nedeniyle sönüm düşüktür.

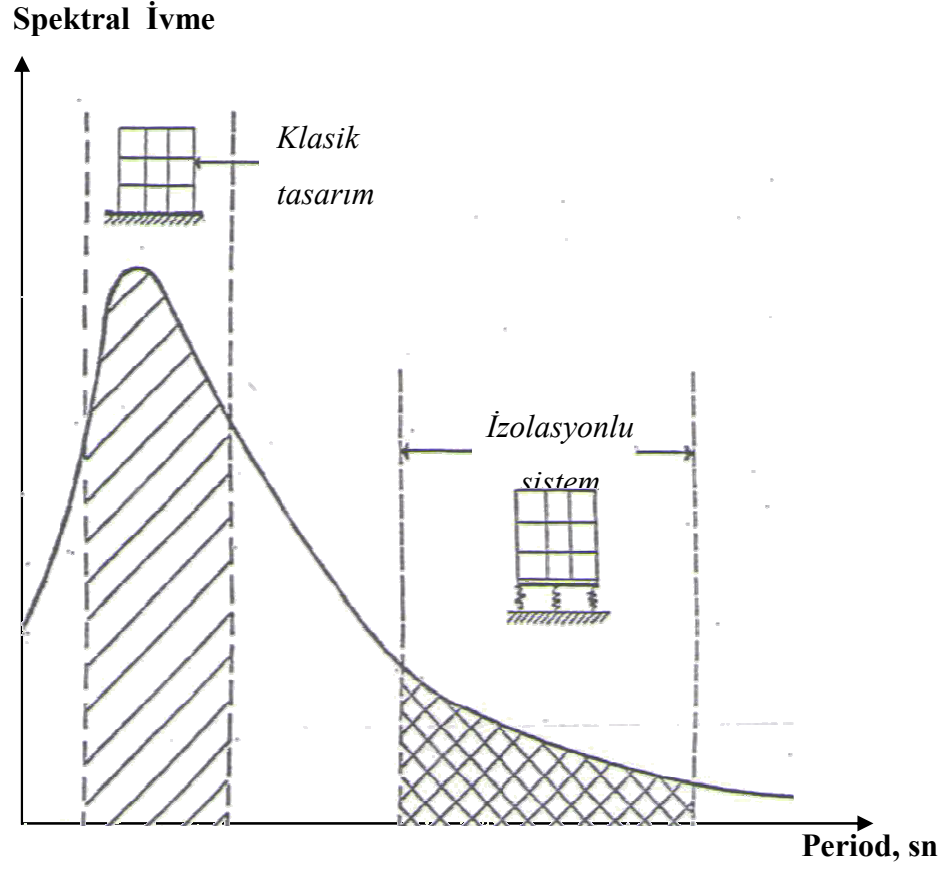
1969 da Fintel ve Khan ‘elastik davranışlı ilk kat’ kavramını geliştirerek ‘plastik davranışlı ilk kat’ kavramını sunmuşlardır. Bu yaklaşımda birinci kat kolonlarının plastik deformasyon yaparak enerjiyi sönümlemesi önerilmiştir. Böylece yeterli sönüm oluşturularak deplasmanlar kontrol edilebilir. Ancak 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.

2.1.1.1 Temel İzolasyonu

Temel izolasyonu kavramı, son 25 yıl içinde çok tabakalı elastomerlerin geliştirilmesi ve üretilmesiyle depreme dayanıklı yapı tasarımındaki yerini,

uygulamaları ile almıştır. Bugün temel izolasyon sistemleri deprem riski altındaki bir çok ülkede, bunların başında Japonya, Yeni Zelanda, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri gelmektedir, başarıyla uygulanmakta ve yönetmeliklerdeki yerini almaktadır [3]. 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 esnek tasarlanmasıyla azaltılabilir, ancak bu yol ise kat deplasmanlarının artmasına sebep olur. Kat deplasmanlarını ve kat ivmelerini aynı anda azaltmanın pratik yolu temel izolasyon sistemini kullanmaktır. Bu sistem gerekli elastikiyeti izolasyon sistemine odaklı deplasmanlar ile sağlar.

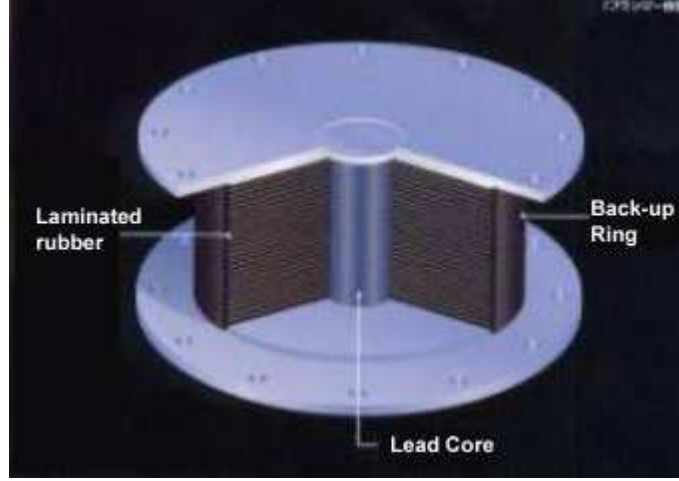
Temel izolasyon sistemi, yapıları yer hareketinin yatay bileşenlerinden, yapıların temelleri ile zemin arasına yatay rijitliği yapıların kolonlarına göre düşük elemanlar yerleştirilerek ayırır. Bu düşük rijitlikli elemanların yerleştirilmesi yapılara, yere ankastre mesnetlenmiş durumdaki frekanslarından 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 bağlı değildir, ancak belli bir sönüm oranı izolasyon sisteminin rezonans frekansından uzaklaşmak için faydalıdır.



Şekil 2.1. Şematik ivme spektrum eğrisi

2.1.1.2 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 [3]. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4’ de elastomerlere ait resimler sunulmuştur.



Şekil 2.2 Elastomer tipindeki izolatör

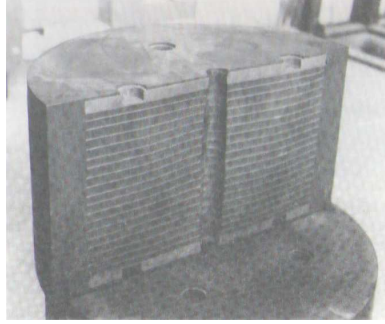


Şekil 2.3 Elastomer tipindeki izolatör

2.1.1.3 Düşük Sönümlü Elastomerler

Doğal ve sentetik kauçuktan üretilen düşük sönümlü elastomerler viskoz sönümleyici, çelik yada 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 2.4. 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 alması nedeniyle, ek sönüm sistemlerine ihtiyaç duyulmasıdır.

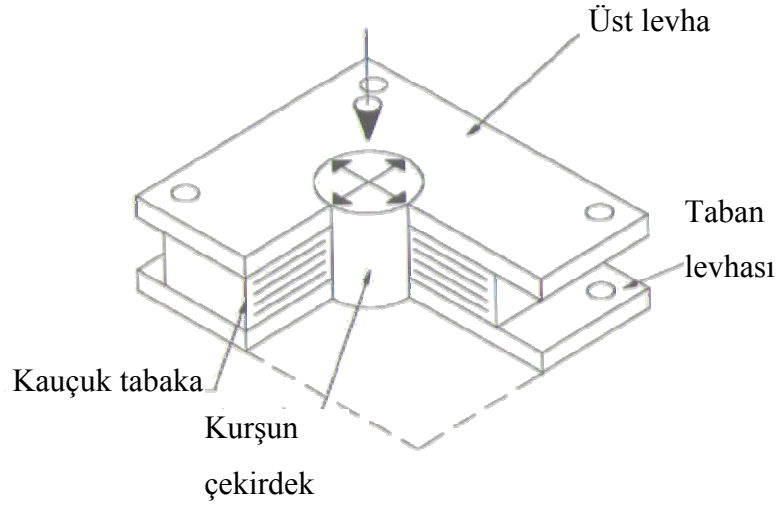
2.1.1.4 Kurşun Gövdeli Elastomerler

Kurşun gövdeli izolatörler, Yeni Zelanda’da üretilmiş ve başta bu ülkede olmak üzere, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri’nde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [3]. 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, 10 MPa 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 Norridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi performans göstermişlerdir [3].

2.1.1.5 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.



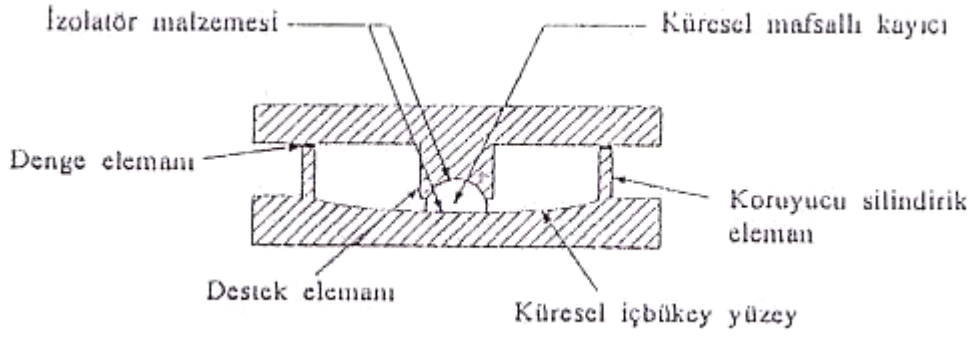
Şekil 2.5 Kurşun gövdeli elastomer

Bu tip elastomerlerin kullanıldığı sistemlerde ek sönüm elemanlarına ihtiyaç duyulmaz. İzolatörün sönümü ‘exrafine karbon blokları’ 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 [3]. Dolayısı ile bu tip izolatörlerin modellenmesinde histerik model ve viskoz sönüm modelinin beraber kullanılması daha doğru sonuçlar vermektedir.

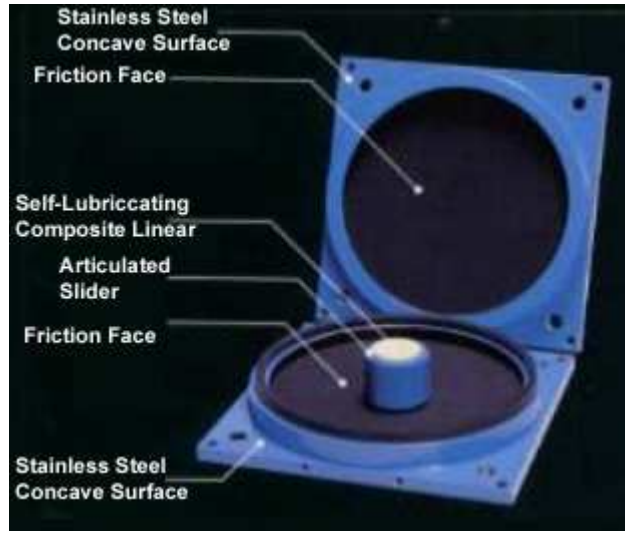
2.1.1.6 Sürtünmeli İzolatörler

2.1.1.6.1 Sürtünmeli Sarkaç

Sürtünmeli sarkaç sistemi iki paslanmaz çelik levha arasına yerleştirilen sürtünme katsayısı düşük kompozit malzeme ile kaplı bir kayıcının hareketinden oluşur (Şekil 1.7). 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.

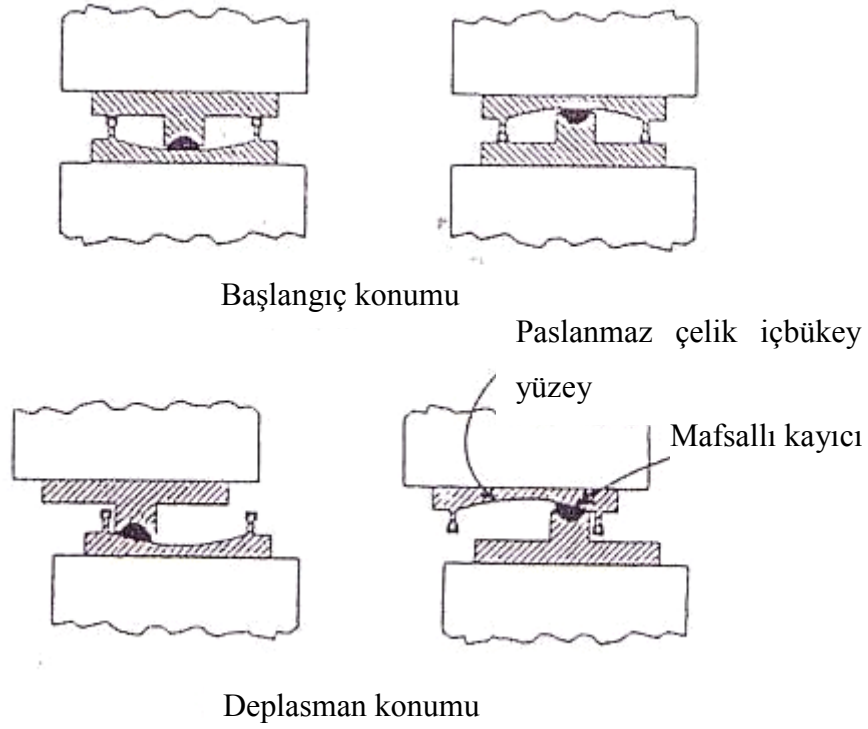


Şekil 2.6. Sürtünmeli sarkaç



Şekil 2.7 Sürtünmeli sarkaç sistemi

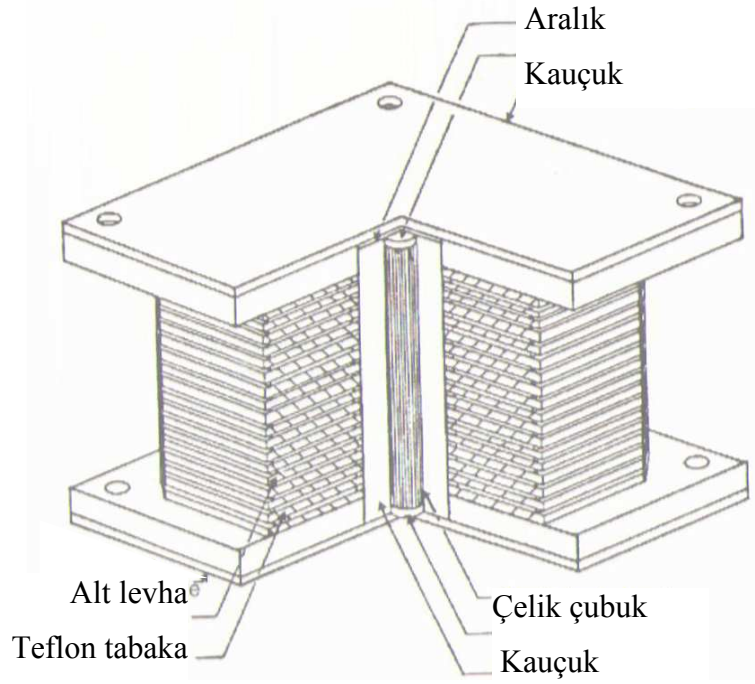
Bu tip izolatörlerin hareket periyotları, basit sarkacın hareket periyoduna benzer olarak $T = 2\pi\sqrt{R/g}$ 'dir. Burada R küresel yüzeyli levhanın eğrilik yarıçapını ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Bu izolatörlerin periyotlarının taşıdıkları kütleden bağımsızdır. Hareket periyodu ve eşdeğer yatay rijitlik tek parametre olan R ile kontrol edilebilir. Yüzeyler arasındaki sürtünme sönümü oluşturur.



Şekil 2.8 Sürtünmeli sarkaç sistemlerinin başlangıç ve deplasman konumları

2.1.1.6.2 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 izolatöre yaymak için çoğu zaman kauçuk çekirdeğin içine çubuk yerleştirilir.



Şekil 2.9. Sürtünme dayanımlı izolatör.

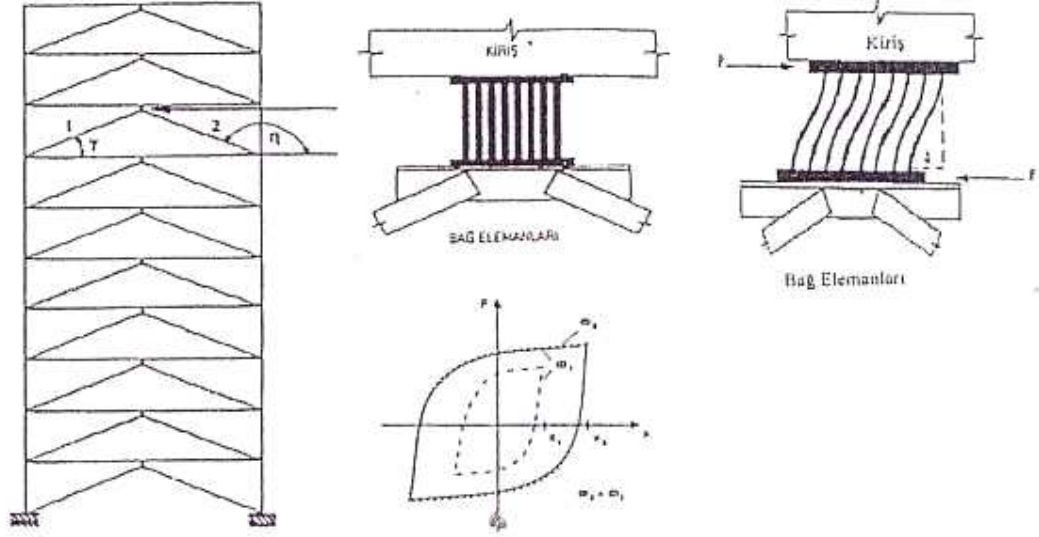
2.1.2 Pasif Enerji Sönümleyiciler

Pasif enerji sönümleyiciler; deprem ve şiddetli rüzgar gibi dış etkilerin yapıya verdiği enerjiden dolayı oluşan kesit zorlarını ve yer değiştirmeleri istenen düzeyde tutmak için geliştirilmiş aletlerdir.

Enerji sönümlemek; kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürmek veya enerjiyi titreşim enerjisine çevirmek şeklinde olabilir. Birinci yol sürtünme katsayısıyla, metallerin eğilmesiyle, metallerin faz değiştirmesiyle viskoelastik katı ve sıvıların deformasyonu ile olabilir. İkinci yol ise yapıya sarkaç ilave ederek, sarkacın dinamik sönümleyici gibi davranmasını sağlayarak gerçekleştirilebilir.

2.1.2.1 Eğilmeli Metal Sönümleyiciler.

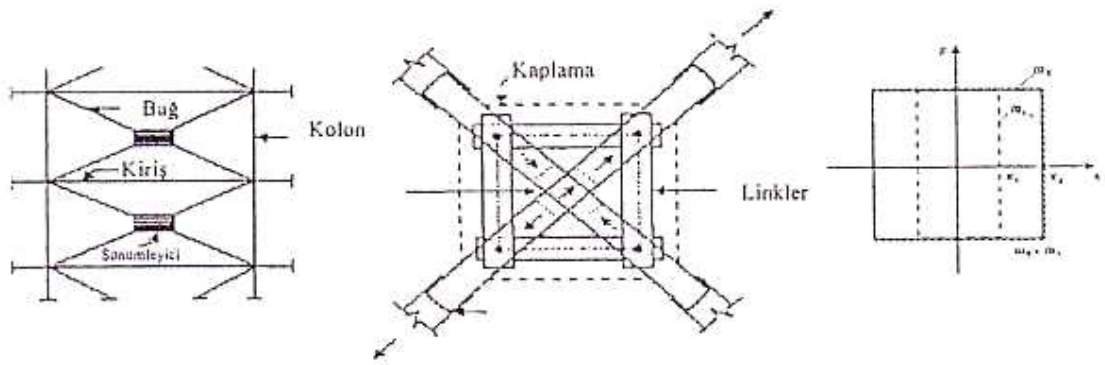
Binaya yerleştirilen yumuşak çelik elemanların elastik olmayan deformasyon yapması sonucu enerji yutulur. Enerjinin belli noktalarda yoğunlaşması sağlanır ve bu sayede taşıyıcı sistem zarar görmez. Şekil değiştirmiş araçlar daha sonra sökülebilir ve yerine yenisi takılabilir. Bu sistem için bükülebilen kiriş, esnek kiriş, U şerit enerji sönümleyici gibi birçok eleman geliştirilmiştir.



Şekil 2.10. Eğilmeli metal sönümleyiciler ve kuvvet deformasyon Diyagramı

2.1.2.2 Sürtünmeli sönümleyiciler.

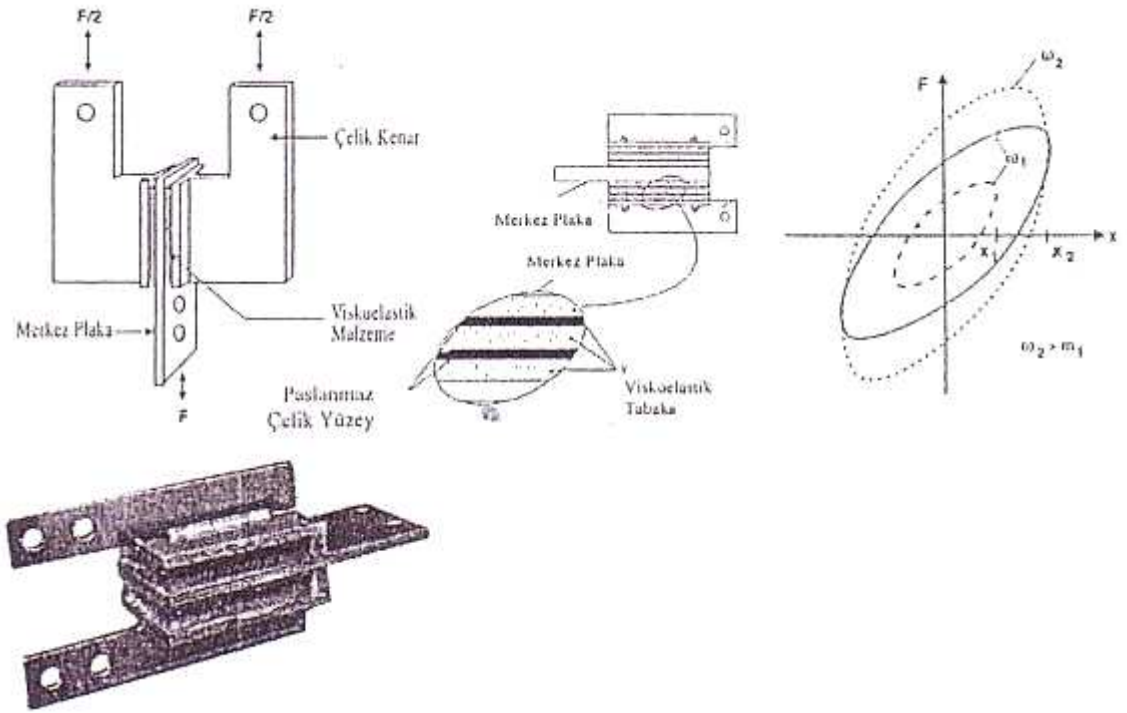
Sürtünmeli araçlar yapıya eklenen elemanlar aracılığı ile hareketin kinetik enerjisini ısı enerjisine dönüştürürler. Bu elemanlar yapıdaki kuşaklamalar arasına koyulan enerji yutuculardır. Elemanlar kayma sürtünmesi aracılığı ile sönüm sağlar. Kuşaklamalar belli bir miktar yük taşıırken, kalan yükler de düzlem çerçeveler tarafından taşınır. Enerjinin yapı içinde dağılması sayesinde sönüm kapasitesinde önemli bir artış sağlanır.



Şekil 2.11. Sürtünmeli sönümleyiciler ve kuvvet-deformasyon diyagramı

2.1.2.3 Viskoelastik sönümleyiciler

Metalik ve sürtünmeli araçlar öncelikle sismik etki için tanımlanmıştır. Diğer taraftan viskoelastik katı maddeler her seviyedeki deformasyon enerjisini azaltmak için kullanılabilir. Dolayısıyla viskoelastik sönümleyiciler hem rüzgar hem de depreme karşı korumada kullanılabilir.



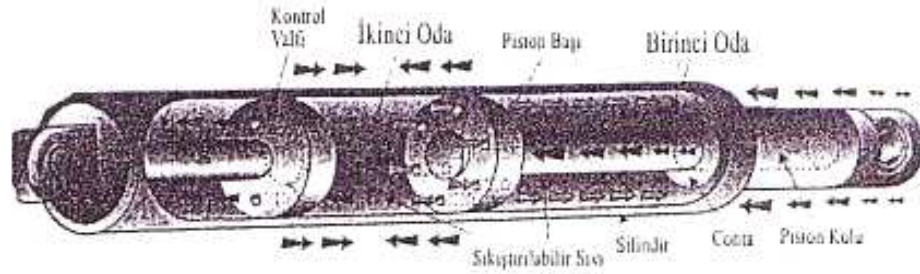
Şekil 2.12. Viskoelastik sönümleyiciler ve kuvvet–deformasyon diyagramı

Metalik ve sürtünmeli sönümleyicilerden farklı olarak viskoelastik sönümleyici içeren lineer yapı lineer kalmaktadır, inşaat mühendisliğinde kullanılan viskoelastik malzemeler genelde co-polimer veya camsı maddelerdir. Sönümleyiciler viskoz sönümün artmasına yardımcı olduğu gibi yanıl rijitliği de arttırır.

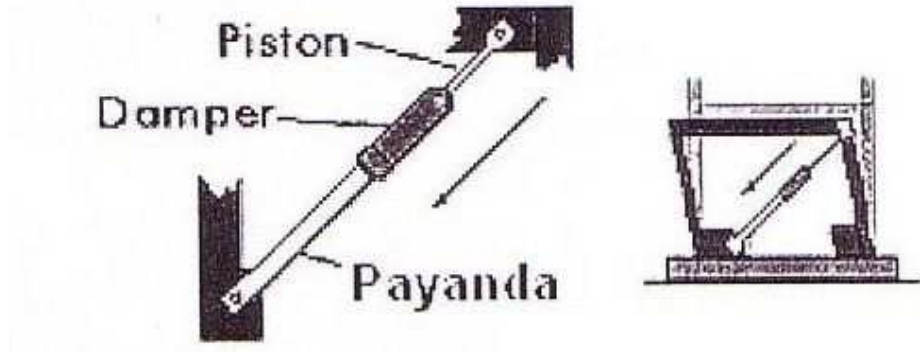
2.1.2.4 Viskoz sönümleyiciler

Viskoz sönümleyiciler genelde silikon veya yağın bir bileşeni olup içlerinde bir piston bulundurmaktadırlar. Viskoz malzemenin geniş frekans aralığında etkili olması, ısıya duyarlı olması ve darbe etkisine karşı sıkıştırılamıyor olması gibi özellikleri bu malzemenin yapı uygulamalarında kullanılmasında etkili olmuştur. Viskoz sönümleyiciler uzun yıllar boyunca uzay çalışmaları ve askeri alanlarda, sonra

otomotiv sektöründe kullanılmış olup, günümüzde yapı uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır.



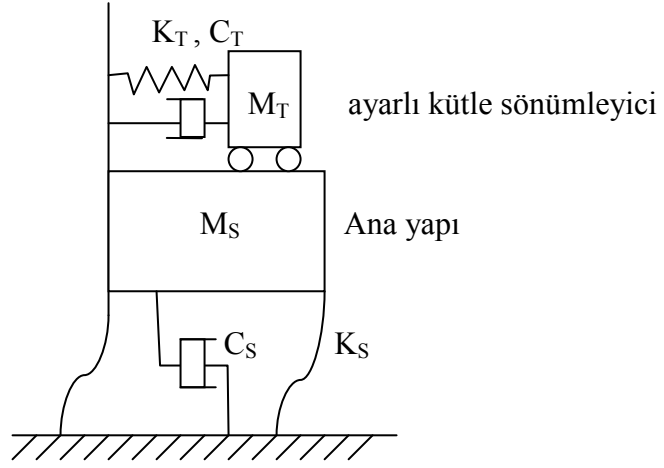
Şekil 2.13. Viskoz sönümleyici



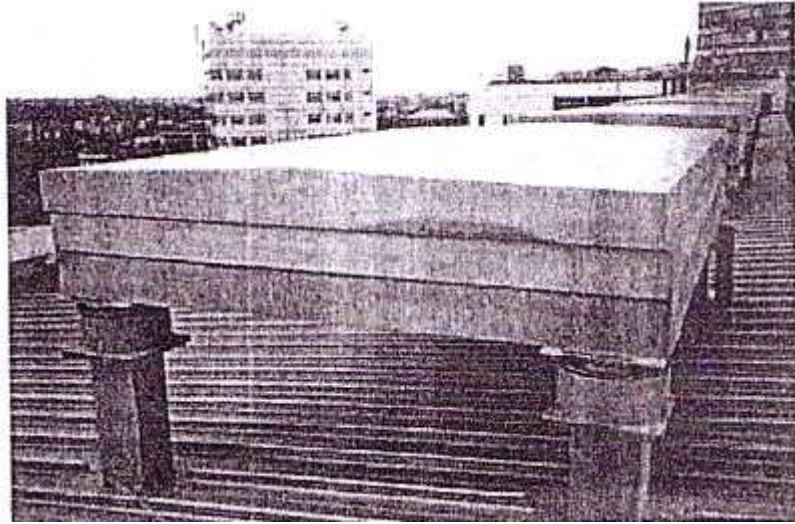
Şekil 2.14. Bir destekle yerleştirilmiş sönümleme mesnedi

2.1.2.5 Ayarlı Kütle Sönümleyiciler

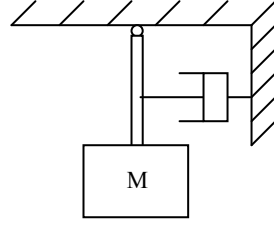
Ayarlı kütle sönümleyiciler (tuned mass damper) yapının dinamik davranışını istenen şekilde değiştirerek deprem etkilerinin hafifletilmesini sağlar bu sönümleyiciler frekansa bağlı bir hareket oluşturup yapının sürtünmesini arttıran, yay ve sürtünme elemanları ile uyumlu ikincil bir ağırlık içermektedir rüzgar etkisi altındaki yapılarda etkisi kanıtlanmıştır. Son yıllarda depremdeki etkisini arttırmak için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır.



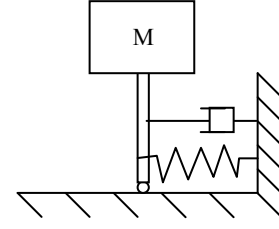
Şekil 2.15. Ayarlı kütle sönümleyici matematik modeli



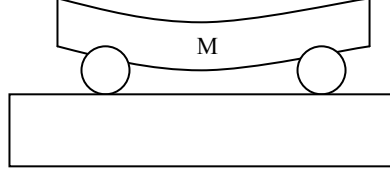
Şekil 2.16. Ayarlı kütle sönümleyici uygulama fotoğrafı



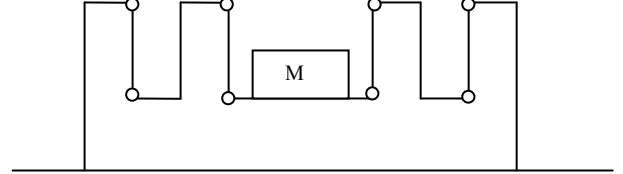
a. Sönümleyici pandül



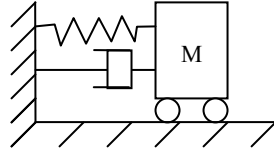
b. Yay ve sönümleyici
ters pandül



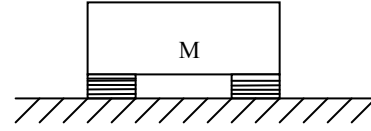
c. Dairesel izolatörler üzerinde
salınan kütle (kayıcı tip)



d. Yer tasarrufu sağlayan asılı sarkaç



e. Yay ve sönümleyici ile
birlikte kayıcı kütle

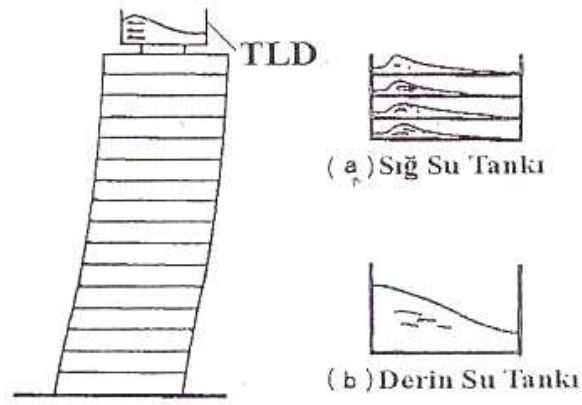


f. Kauçuk izolatör üzerine
oturan kütle

Şekil 2.17. Ayarlı kütle sönümleyici tipleri

2.1.2.6 Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler

Ayarlı sıvı sönümleyicilerde (Tuned Liquid Damper), ayarlı kütle sönümleyicilerine benzer olarak yapıya direkt olarak sönüm vermeden yapının performansını artırır. Yapının enerjisini akışkanın viskoz hareketi ve dalga kırınlarla azaltılır. Çalışmalar sonucu rüzgarın neden olduğu titreşimlere karşı pratik uygulamalar geliştirilmiştir.

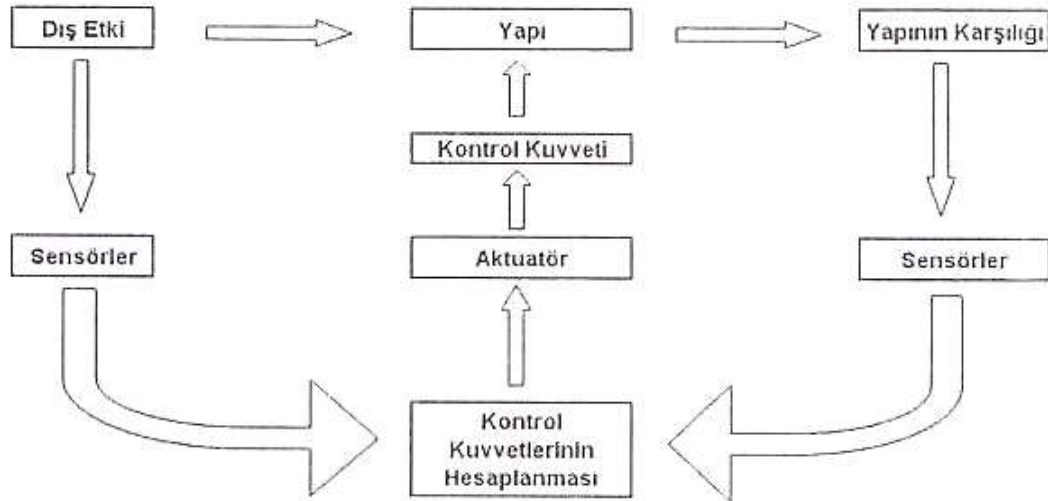


Şekil 2.18. Ayarlı sıvı sönümleyici

2.2 Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemlerinde yapıya eklenen elemanlar, sisteme dışardan gelen etkileri sensörler aracılığı ile algılayıp yapıya kontrol kuvveti uygularlar böylelikle deplasmanları istenilen düzeyde tutarlar. Bunun içinde enerji kaynağına ihtiyaçları vardır. Orta şiddetteki depremlerin oluşturduğu titreşimler karşısında binada yaşayanların konforunu artırır. Aktif kontrol sistemlerinde yapıya dışardan bir kuvvet uygulanır.

Aktif kontrol sistemlerinin çalışma şeması aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.19. Aktif kontrol elemanı çalışma şeması

Yeni malzemelerin keşfinden sonra binalar artık daha yüksek ve daha esnek hale gelmiştir. Aktif kontrolün amacı aşırı titreşimlere karşı yapıyı korumaktır. Aktif kontrol sisteminin yapının sağlamlaştırılmasında kullanılmasının bir nedeni de pasif

kontrol sistemleri gibi çok yer kaplamamasıdır. Bu sistemler yapıya daha az yer kaplayacak biçimde yerleştirilebilir. Bazı yapılar değerli veya çok hassas malzemeler barındırıyor olabilir. Bu malzemelerin düzgün çalışması hayati önem taşıyor olabilir. Aktif kontrolün monte edilmesi ile bu elemanların uygun koşullarda çalışmaları sağlanabilir. Aktif kontrol sistemlerinin pasif kontrol sistemlerine göre bir artışı da pasif kontrol sistemlerinin başarılarının sistemin doğası nedeniyle sınırlı kalmasıdır. Örneğin ayarlı kütle sönümleyiciler genelde yapının birinci mod frekansına göre ayarlandığından sadece birinci modun etkin olduğu titreşimlerde etkilidir. Ancak aktif kontrol sistemleri daha geniş bir frekans aralığında etkilidir.

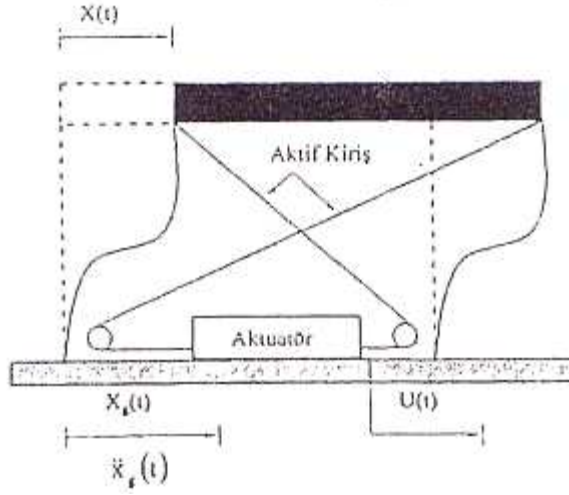
2.2.1 Aktif kontrol sistemlerinin çeşitleri:

Yapıların kontrolü için birçok sistem geliştirilmiştir. Bunlar:

- Aktif kiriş kontrolü
- Aktif kütle sönümleyicisi
- Yerçekimi harekete geçirici sistem
- Aktif rijitlik değiştirici.

2.2.1.1 Aktif Kiriş Kontrolü

Aktif kiriş kontrol sistemi, gerilimi elektro hidrolik mekanizma tarafından kontrol edilen binaya bağlanmış öngerilmeli kirişlerden oluşmaktadır. Kontrol bilgisayarına binanın çeşitli yerlerine yerleştirilmiş sensörlerden sinyaller gönderilir. Kontrol bilgisayarı bu sinyalleri değerlendirir ve çeşitli hesaplamalar yaparak aktuatör sinyaller gönderir. Aktuatör kontrol bilgisayarından gelen bu sinyaller doğrultusunda binaya, dış etkiyi azaltacak yönde kuvvetleri uygular. Aktif kiriş kontrolünde kontrol kuvvetleri binaya direk uygulanır.



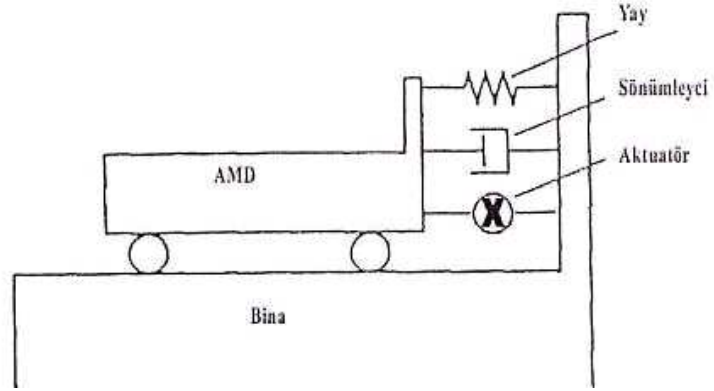
Şekil 2.20. Aktif kiriş kontrolü

Aktif kiriş kontrol sisteminin tercih edilmesinin sebeplerinden bir tanesi kirişlerin birçok binada zaten mevcut olmasıdır. Böylece mevcut kirişler kullanılmak suretiyle kapsamlı eklemeler ve modifikasyonlar yapılmasına gerek kalmaz. Sistemin bir diğer özelliği de hem çarpma modunda hem de devamlı–zaman modunda kullanılabilmesidir. Dolayısıyla aktif kiriş kontrolü hem devamlı–zaman hem de çarpma algoritmasını barındırabilir. Aktif kiriş kontrolü narin yapılarda, yüksek binalarda, köprülerde ve deniz üzerindeki yapılarda kullanılabilir.

2.2.1.2 Aktif Kütle Sönümleyicisi

Ayarlı kütle sönümleyiciler pasif kontrol sistemi olarak yüksek binalarda hareketi kontrol etmek için kullanılmaktadır. Pasif ayarlı kütle sönümleyici, birinci esas frekansa ayarlandığı için birinci modun egemen olduğu titreşim modlarında etkilidir ancak yapı, deprem tipi yüklemelere maruz kaldığı durumlarda titreşim enerjisi daha geniş bir frekans bandına yayılır aktif kütle sönümleyiciler dış etkinin çok sayıda doğal modu için projelendirilebilir.

Sistem yardımcı bir kütle ve harekete geçiriciden (Aktuatör) oluşmaktadır. Yapının çeşitli yerlerine yerleştirilmiş sensörlerden gelen sinyaller kontrol bilgisayarında toplanır. Kontrol bilgisayarı bu sinyalleri analiz eder ve hesaplamalar yapıp aktuatöre sinyaller gönderir aktuatör bilgisayardan gelen bu sinyallere göre yardımcı kütleli harekete geçirir. Bu hareketten dolayı yardımcı kütlede oluşan atalet kuvveti yapıya dışarıdan verilen etkiyi azaltmak için kullanılır.

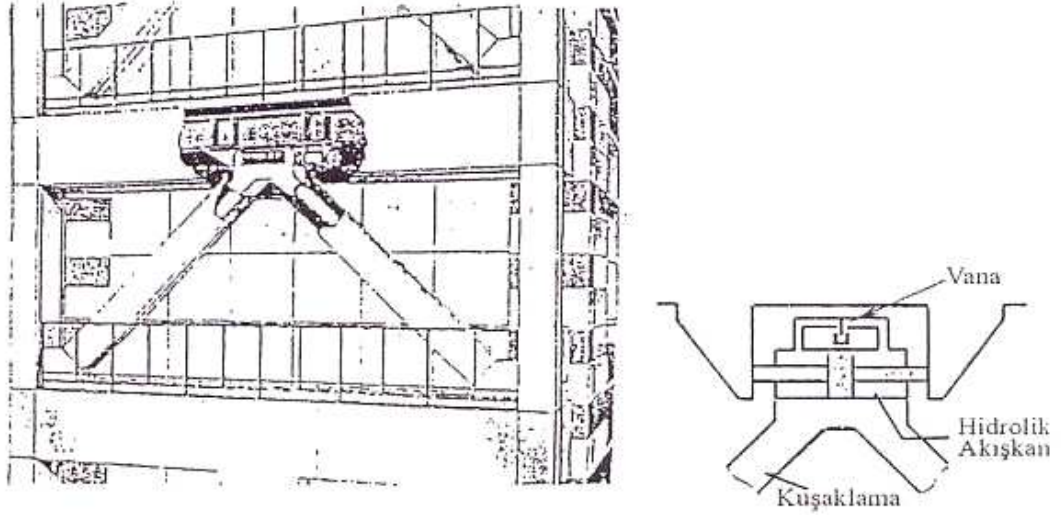


Şekil 2.21. Aktif kütle sönümleyicisi

Aktif kütle sönümleyicisi yardımcı kütlenin ataletini kontrol kuvveti olarak kullanmaktadır. Aktif kiriş kontrolde ise bir aktuatör yardımıyla sisteme kontrol kuvveti direkt olarak uygulanır. Söz edilen sistemlerin ortak özelliği basit ve çalıştırılmalarının kolay olmasıdır. Ancak bina büyüdükçe ve depremin şiddeti arttıkça sistemi çalıştırmak için gerekli güç artmaktadır. Söz konusu iki sistemin diğer bir dezavantajı ise sistemin çalışması için sürekli bulundurulması gereken dış enerjidir.

2.2.1.3 Aktif Rijitlik Değiştirici

Aktif rijitlik değiştirici, sistem rijitliğinin deprem doğasına göre değiştirilmesi yolu ile yapıyı dış etkilerden korumayı amaçlamaktadır. Koruma, kontrol bilgisayarından gelen sinyallere göre bağ ve kiriş arasında bağlanma şartları değiştirilerek sağlanır. Aktif rijitlik değiştiren araç iki ucu kapalı hidrolik silindir ve iki silindiri birbirine bağlayan vanadan oluşur. Vananın açık veya kapalı fonksiyonu yağın hareketi ile kontrol edilir. Bağ ve kiriş arasında vananın açık veya kapalı olması her kat için iki ayrı rijitliğin oluşmasına neden olur



Şekil 2.22. Aktif rijitlik değıştirici

Aktif rijitlik değıştirici araçlarındaki vanaların çalışması için gerekli enerji çok azdır. Bu da aktif kontrol sistemlerinin enerji problemlerine önemli bir çözüm olmuştur.

2.2.2 Aktif Kontrolün Dezavantajları

Yapıların, deprem etkilerine karşı korunmasında aktif kontrol sistemlerinin olumlu sonuçlar vermesi gelecek için umut vericidir. Fakat bu sistemlerin yapılarda pratik olarak kullanılabilmesi için çözülmesi gereken bazı problemler vardır. Bunlardan önemli birkaçı:

- Yapıların maruz kaldıkları kuvvetleri karşılayabilecek gücün sağlanması sorunu.
- Söz konusu bu gücü sağlayacak olan ve aktif kontrol sistemi çalıştıracak olan enerjinin sürekli bulundurulması gerekliliği.
- Sistemin kurulum, işletim ve bakım maliyetlerinin yüksek olması.

Uygulamada karşılaşılan problemlerin en önemlileri ise şunlardır;

- Modelleme hataları
- Zaman gecikmesi
- Yapının depremde lineer davranış göstermemesi
- Yapı parametrelerindeki belirsizlikler

2.2.3 Karma Ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri, sistemde istenmeyen titreşimleri azaltmak için kullanılan basit, güvenilir ve ucuz sistemlerdir. Fakat sabit sönümleyici oldukları için performansları kısıtlıdır. Dar bir bantta frekansları azaltabildikleri gibi sabit olmayan dış etki karşısında verimli değildirler.

Aktif kontrol sistemleri, yüksek ve narin yapılar için uygundur. Tek bir aktif kontrol elemanı, örneğin aktif kütle sönümleyici, dış etkinin çok sayıda doğal modu için projelendirilebilir. Ancak tüm bu sistemler rüzgar ve orta şiddetteki depremler için uygundur.

Karma ve yarı aktif kontrol mekanizmaları pasif kontrol sisteminde ve aktif kontrol sistemindeki bazı sorunların çözümünde umut verici gelişmeler sağlamıştır.

Karma kontrol sistemleri; aktif ve pasif kontrol sistemlerinin birlikte kullanılması olarak tanımlanabilir. Yarı aktif kontrol sistemi ise pasif kontrol sistemlerinin güvenilirliğini arttıran aynı zamanda aktif kontrol sisteminin çok yönlülüğünü ve kendini adapte edebilme özelliğini birleştiren sistemler olarak tanımlanabilir. Yarı aktif kontrol elemanları kontrol edilebilen pasif elemanlar olarak görülür. Gerekli olan kontrol enerjisi aktif kontrol sistemindekine göre oldukça düşüktür.

2.3 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 maksimum 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 maksimum 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 maksimum 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 [4] 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 [5] 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 [6] 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 [7] tabandaki sürtünme kuvvetini bir takım yaklaşıklık parametreleri içeren sürekli fonksiyonlar ile ifade ederek yaptıkları çözümleri Den Hartog [4] un yaptığı çözümler ile karşılaştırmışlardır.

Yang [8] 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 entegrasyon metodlarından Newmark'ın ortalama sabit ivme şeması kullanılmış ve geçiş süreleri için iterasyon yapılmıştır.

Fan, Ahmadi ve Tadjbakhsh [9], harmonik yer hareketi etkisindeki 3 serbestlik dereceli bir sistemin analizini sabit zaman artımı ($\Delta t = 0.00025s$) ile dördüncü mertebeden Runge-Kutta şemasını kullanarak yapmışlardır.

Fan, Ahmadi, Mostaghel ve Tadjbakhsh [10] 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 [11,12] 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 [13] 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.

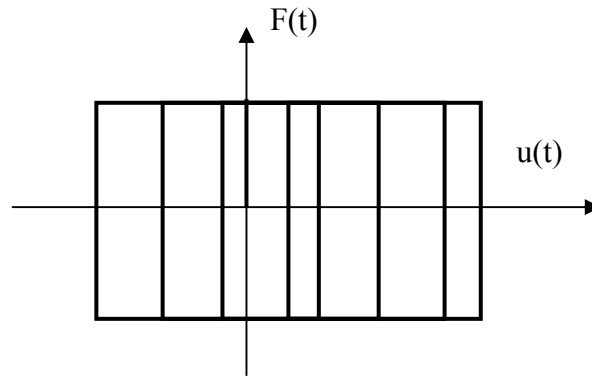
Vafai, Hamidi ve Ahmadi [14], Yang [8]'ın kullandığı elasto-plastik fiktif yay modelini rijit plastik model ile değiştirerek ve Newmark'ın ortalama sabit ivme metodunu kullanarak 5 serbestlik dereceli bir sistemin harmonik yer hareketi için davranışını incelemişlerdir. Faz-geçiş anlarını belirlemek için iterasyon yapmak yerine zaman adımını $\Delta t = 0.0002$ sn olarak tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir ve Yang [8]'ın elde ettikleri ile karşılaştırmışlardır.

3. TEMEL DENKLEMLER

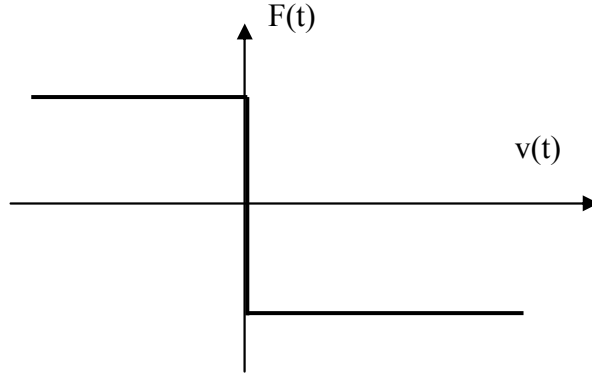
Sürtünmeli bir yüzeye kayıcı mesnetlenmiş bir sistemin hareketi tabandaki sürtünme kuvvetinin sürekli yön değiştirmesi nedeniyle süreksizlik içeren bir problemdir ve sistemin davranışı nonlineerdir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda problemin analitik çözümü, çoğu zaman bir takım kabuller ile harmonik dış yük altında en fazla iki serbestlik dereceli sistemler için verilmiştir. Ayrıca, gerçek yer hareketinin analitik fonksiyonlar ile ifade edilememesi, problemin sayısal yöntemlerle çözülmesini gerektirmektedir.

3.1 Problemin Çözümü İçin Yapılan Kabuller

- Yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin Coulomb sürtünmesi, statik ve kinetik sürtünme katsayılarının eşit ve sabit olduğu varsayılmıştır.
- Sürtünme kuvveti $f = \mu N$ dir. Programda μ 'nün zamanla değişmediği varsayıp N normal kuvveti dışarıdan uygulanan kuvvet olarak değiştirilmiştir.
- 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.
- Yer hareketinin yalnızca yatay bileşeni göz önüne alınmıştır, düşey bileşeninin etkileri ihmal edilmiştir.
- Sistemde devrilme momentlerinin oluşmadığı kabul edilmiştir.
- Sürtünme kuvveti için kabul edilen modelde kuvvet-rölatif hız ve kuvvet-rölatif deplasman bağıntıları ideal plastik malzemeninki ile aynıdır. (Şekil-3.1, 3.2)



Şekil 3.1. Sürtünme kuvveti – Rölatif deplasman bağıntısı



Şekil 3.2. Sürtünme Kuvveti – Kayma hızı bağıntısı

3.2 Hareket Denklemi

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

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{B}\mathbf{F}(t) + \mathbf{E}\mathbf{w}(t) \quad (3.1)$$

denklemi ile ifade edilir. Burada, n sistemin serbestlik derecesi ve r sürtülmeli 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. (3.1) denklemi soldan kütle matrisinin tersi ile çarpılıp, $\mathbf{v}(t) = d\mathbf{u}(t)/dt$ dönüşümü yapılırsa,

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{v}(t) \quad (3.1.a)$$

$$\dot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{v}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{F}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{w}(t) \quad (3.1.b)$$

denklemleri elde edilir. (3.1.a) ve (3.1.b) denklemleri birleştirilip matris formda

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \dot{\mathbf{v}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{F}(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{w}(t) \quad (3.1.c)$$

denklemi ile yazılabilir. Burada

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

durum vektörü kullanılırsa, (3.1.c) denkleminin bir mertebe indirgenmesiyle

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(t) \quad (3.2)$$

denklemini elde edilir. Burada,

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

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

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

3.2.1 Hareket Denkleminin Çözümü

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

$$\mathbf{z}(t) = \Phi(t)\mathbf{z}(0) \quad (3.3)$$

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

$$\Phi(t) = e^{\mathbf{A}_c t} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \mathbf{A}_c^n = \mathbf{I} + t\mathbf{A}_c + \frac{t^2}{2!} \mathbf{A}_c^2 + \frac{t^3}{3!} \mathbf{A}_c^3 + \dots + \frac{t^n}{n!} \mathbf{A}_c^n + \dots \quad (3.4)$$

şeklindedir. (3.1) denkleminin özel çözümünün

$$\mathbf{z}(t) = \Phi(t)\bar{\mathbf{z}}(t) \quad (3.5)$$

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

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \dot{\Phi}(t)\bar{\mathbf{z}}(t) + \Phi(t)\dot{\bar{\mathbf{z}}}(t) \quad (3.6)$$

olur ve bu özel çözüm (3.2) denkleminde yerine yazılırsa

$$\dot{\Phi}(t)\bar{\mathbf{z}}(t) + \Phi(t)\dot{\bar{\mathbf{z}}}(t) = \mathbf{A}_c \Phi(t)\bar{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c \mathbf{w}(t) \quad (3.7)$$

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

$$\dot{\Phi}(t) = \mathbf{A}_c \Phi(t) \quad (3.8)$$

bağıntısı (3.7) denkleminde yerine yazılırsa

$$\Phi(t)\dot{\bar{\mathbf{z}}}(t) = \mathbf{B}_c\mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c\mathbf{w}(t) \quad (3.9)$$

denklemini elde edilir. (3.9) denklemini soldan geçiş matrisinin tersi ile çarpılırsa

$$\dot{\bar{\mathbf{z}}}(t) = \Phi^{-1}(t)[\mathbf{B}_c\mathbf{F}(t) + \mathbf{E}_c\mathbf{w}(t)] \quad (3.10)$$

elde edilir. Geçiş matrisinin

$$\Phi^{-1}(t) = \Phi(-t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(-t)} \quad (3.11a)$$

ve

$$\Phi(t_1)\Phi(t_2) = \Phi(t_1 + t_2) \quad (3.11b)$$

özellikleri kullanılırsa

$$\bar{\mathbf{z}}(t) = \int_0^t \Phi(-\tau)[\mathbf{B}_c\mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c\mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (3.12)$$

elde edilir. O halde özel çözüm

$$\mathbf{z}(t) = \int_0^t \Phi(t - \tau)[\mathbf{B}_c\mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c\mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (3.13)$$

denklemini ile elde edilir. (3.2) denkleminin analitik çözümü homojen ve özel çözümlerin toplanmasıyla

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t)}\mathbf{z}(0) + \int_0^t \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t-\tau)}[\mathbf{B}_c\mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c\mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (3.14)$$

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

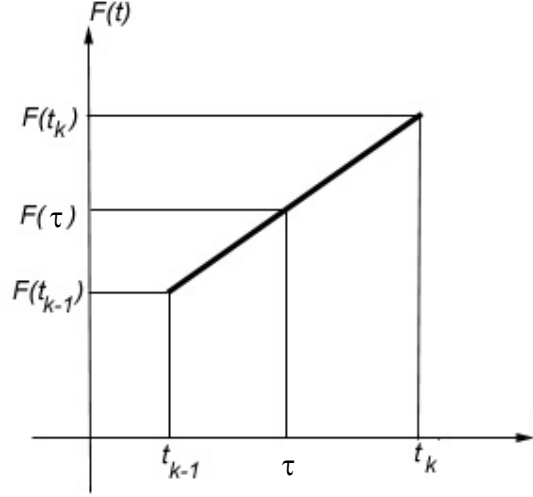
$$\mathbf{z}(t_2) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t_2-t_1)}\mathbf{z}(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{e}^{\mathbf{A}_c(t_2-\tau)}[\mathbf{B}_c\mathbf{F}(\tau) + \mathbf{E}_c\mathbf{w}(\tau)] d\tau \quad (3.15)$$

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,

$$\mathbf{F}(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t}\mathbf{F}[k-1] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t}\mathbf{F}[k], \quad t_1 \leq \tau \leq t_2 \quad (3.16a)$$

$$\mathbf{w}(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} \mathbf{w}[k-1] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} \mathbf{w}[k], \quad t_1 \leq \tau \leq t_2 \quad (3.16b)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 3.3 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 $\mathbf{F}[k] = \mathbf{F}(k\Delta t)$ dir. $\mathbf{z}[k] = \mathbf{z}(k\Delta t)$ olmak üzere, (3.16) denklemleri (3.15) analitik çözümünde yerine yazılırsa, integral işleminden sonra

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{Z}[k] + \mathbf{B}_1 \mathbf{F}[k] \quad (3.17a)$$

şeklinde rekürsiv bir fark denklemi elde edilir. Burada

$$\mathbf{Z}[k] = \mathbf{A} \mathbf{z}[k-1] + \mathbf{B}_0 \mathbf{F}[k-1] + \mathbf{E}_0 \mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1 \mathbf{w}[k] \quad (3.17b)$$

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,

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}^{\mathbf{A}_C \Delta t} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^k}{k!} \mathbf{A}_C^k, \quad \mathbf{A}_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^{k+1}}{(k+2)k!} \mathbf{A}_C^k, \quad \mathbf{A}_1 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^{k+1}}{(k+2)!} \mathbf{A}_C^k \quad (2.18a)$$

olmak üzere

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{B}_C, \quad \mathbf{B}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_C, \quad \mathbf{E}_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{E}_C, \quad \mathbf{E}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{E}_C \quad (3.18b)$$

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 serilerin terimlerinin hızla sıfıra yaklaştığı ve ilk 8 terimlerinin, bu serileri yeterli yaklaşıklıkla temsil ettiği görülmüştür.

Meirovitch [17] 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,

$$\Phi(t) \cong \Phi_m(t) = \sum_{n=0}^m \frac{t^n}{n!} \mathbf{A}_C^n = \mathbf{I} + t\mathbf{A}_C + \frac{t^2}{2!} \mathbf{A}_C^2 + \frac{t^3}{3!} \mathbf{A}_C^3 + \dots + \frac{t^m}{m!} \mathbf{A}_C^m \quad (3.19)$$

yada

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

formunda yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \mathbf{I} + \frac{t}{m} \mathbf{A}_C \\ \Psi_2 &= \mathbf{I} + \frac{t}{m-1} \mathbf{A}_C \Psi_1 \\ \Psi_3 &= \mathbf{I} + \frac{t}{m-2} \mathbf{A}_C \Psi_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \Phi_m(t) &= \mathbf{I} + t\mathbf{A}_C \Psi_{m-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

(3.20) 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.

$$\Phi(t, \tau) = \Phi(t, t_1) \Phi(t_1, t_2) \dots \Phi(t_{k-1}, t_k) \Phi(t_k, \tau) \quad (3.21)$$

3.2.2 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 maksimum sürtünme kuvvetine ulaşmıştır. Yani,

$$F_i[k] = \mu_i W_i \text{sgn}(\dot{u}_i[k]) \quad (3.22a)$$

$$\dot{u}_i[k] \neq 0 \quad (3.22b)$$

Burada, i , izolatör numarası, $F_i[k]$ ve W_i , izolatöre etkiyen kesme kuvveti ve normal kuvvet, μ_i yüzeyler arası sürtünme katsayısı, $\dot{u}_i$ 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 maksimum sürtünme kuvvetinden küçüktür. Yani,

$$|F_i[k]| < \mu_i W_i \quad (3.23a)$$

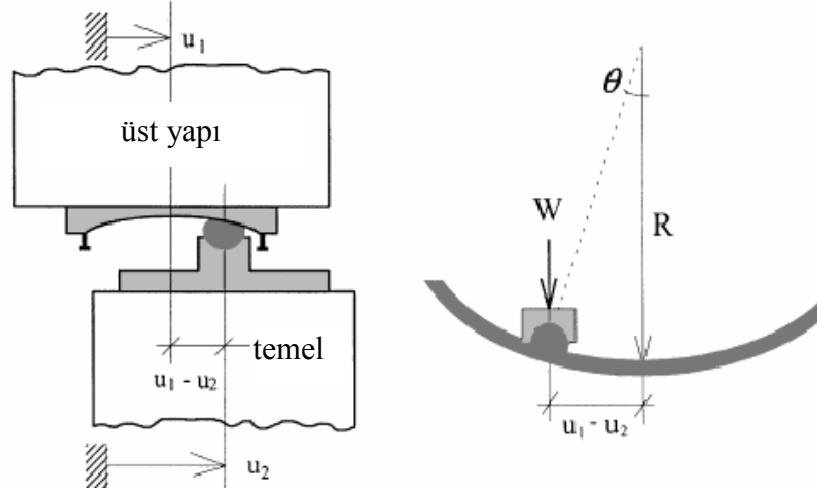
$$\dot{u}_i[k] = 0 \quad (3.23b)$$

olur. (3.17a) 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 (3.22) ve (3.23) denklemlerinden de görüldüğü gibi, yüzeyler arasındaki kesme kuvvetleri ve yüzeylerin birbirlerine göre rölatif hızları hareket fazlarının bulunmasında belirleyicidirler. Kayma fazı süresince sürtünme kuvveti (3.22a) 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 (3.23b) denkleminde belirtildiği gibi sıfırdır. Dolayısıyla, bilinmeyen olarak sürtünme kuvveti yada rölatif hız, fazlara bağlı olarak belirlenebilir. k inci zaman adımındaki sürtünme kuvveti vektörü $\mathbf{F}[k]$ belirlendikten sonra, (3.17a) fark denkleminde $\mathbf{z}[k]$ durum vektörü kolaylıkla hesaplanabilir.

3.2.3 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 3.4 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 3.4 Sürtünlmeli Sarkaç sisteminin parametreleri

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

$$V = WR(1 - \cos \theta) \quad (3.24)$$

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

$$\theta \cong \sin \theta = \frac{u_1 - u_2}{R} \quad \text{ve} \quad \cos \theta \cong 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (3.25)$$

değerleri kullanılırsa potansiyel enerji,

$$V = WR \frac{\theta^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{W}{R} (u_1 - u_2)^2 \quad (3.26)$$

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

$$\bar{k}(u_1 - u_2) = \frac{W}{R}(u_1 - u_2) \quad (3.27)$$

(3.27) denkleminde

$$\bar{k} = \frac{W}{R} \quad (3.28)$$

olarak elde edilir.

3.2.4 Sayısal Çözüm Yöntemi

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

$$\mathbf{y}[k] = \mathbf{D}\mathbf{z}[k] \quad (3.29)$$

denklemi yazılabilir. Burada $\mathbf{y}[k]$, $rx1$ boyutunda izolator hız vektörü, $\mathbf{D}=[\mathbf{0} , \mathbf{B}^T]$ $rx2n$ boyutunda izolator hızı yerleşim matrisidir.

Denklem (3.17), denklem (3.29)' da yerine konursa, izolator kesme kuvveti $\mathbf{F}[k]$, denklem (3.30) ile tahmin edilir.

$$\overline{\mathbf{F}}[k] = -(\mathbf{D}\mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1\mathbf{w}[k] + \mathbf{B}_0\mathbf{F}[k-1]) \quad (3.30)$$

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

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

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

$$|\overline{F}_i[k]| < \mu_i W_i \quad \forall \quad i=1,...,r \quad (3.31)$$

Bu durum, başlangıçta kabul edilen rölatif hareketsiz faz kabuluna uygundur.

Sürtünme kuvveti vektörü $\mathbf{F}[k] = \overline{\mathbf{F}}[k]$ olur, dinamik sistemin davranışı $\mathbf{z}[k]$, denklem (2.18) ile belirlenebilir.

B) Tüm izolatorler için, izolator kesme kuvvetleri, maksimum sürtünme kuvvetlerinden büyük veya eşittir.

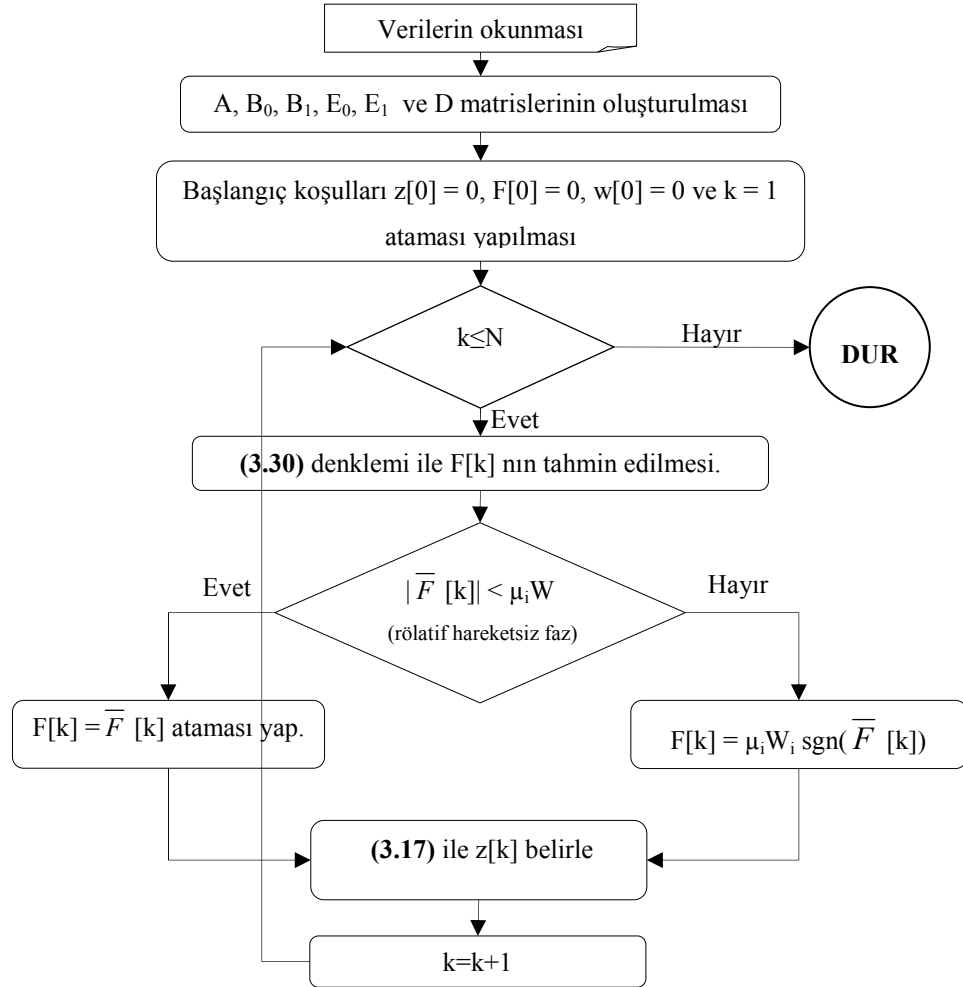
$$|\overline{F}_i[k]| \geq \mu_i W_i \quad \forall \quad i=1,...,r \quad (3.32)$$

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

$$F_i[k] = \mu_i W_i \operatorname{sgn}(\overline{F}_i[k]) \quad \forall \quad i=1,...,r \quad (3.33)$$

denklemleri ile belirlenir.

$F[k]$ belirlendikten sonra, dinamik sistemin davranışı $z[k]$, denklem (3.17) ile belirlenebilir. Yukarıda anlatılan çözüm yöntemi ile ilgili akış şeması Şekil 3.5’de sunulmuştur.



Şekil 3.5 Programın akış diyagramı

4. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde, yapılan analizlerde ilk olarak sadece sürtünmeli izolatör kullanılmış bir modelde, sürtünmeli izolatöre etkiyen eksenel yük ve/veya sürtünme katsayısı değişiminin yapı yanıtı üzerindeki etkileri, ikinci olarak ise sürtünmeli izolatör ile viskoz sönüm elemanlarının birlikte kullanıldığı modelde, sabit sürtünmeye karşı değişken sönümün yapı yanıtına etkisini incelemek amaçlanmaktadır. Bu amaç için, 2 farklı düzlem çerçeve modeli (4 ve 9 katlı), 3 farklı deprem ivme kaydı ve çeşitli harmonik hareketler etkisinde analiz yapılmıştır. Analizlerde, Düzce ve Kocaeli depremleri için zaman artımı (Δt) 0.05 sn, El Centro depremi için $\Delta t = 0.02$ sn, Harmonik hareket içinse $\Delta t = 0.01$ sn alınmıştır.

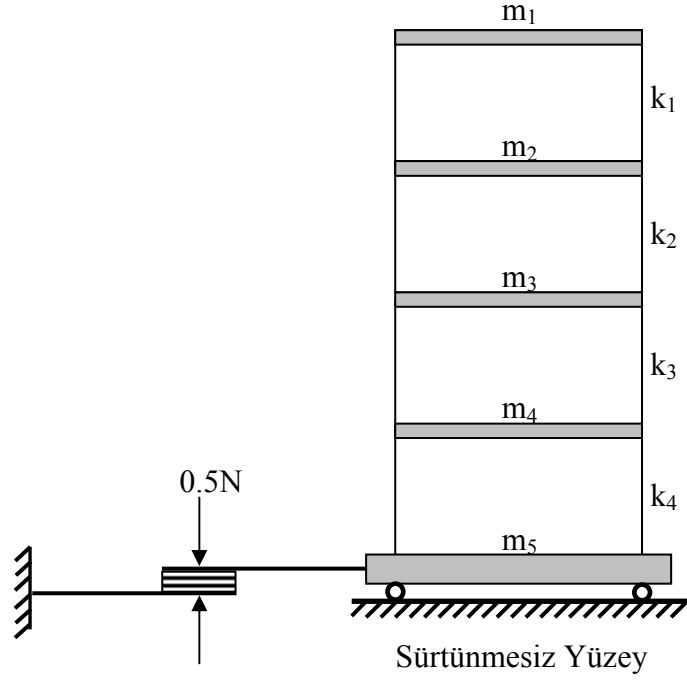
Ele alınan modelde sadece sürtünmeli izolatör olması durumunda, sürtünmeli izolatöre etkiyen eksenel yük ve/veya sürtünme katsayısı değişiminin yapı yanıtına etkisi yapının taban ve rölatif tavan deplasmanları gözlenerek incelenmiştir. Yapı kütlelerinin veya sadece taban bloğu kütlelerinin artması ile yapı cevabının değişimi de incelenmeye çalışılmıştır.

Sürtünmeli izolatör ile viskoz sönüm elemanlarının birlikte kullanıldığı modelde, sadece sürtünme elemanı kullanılmış model için belirlenmiş olan birkaç uygun sürtünme kuvveti değeri esas alınmıştır. Bu adımda sönüm katsayısı sıfırdan (yani sürtünme elemanı kullanılmamış durumdan) 24000 (Nsn/m)'ye kadar arttırılarak yapının taban ve rölatif tavan deplasmanları belirlenmiştir. Buna ek olarak viskoz sönüm elemanlarının katlar arasında değişik şekillerde kullanılması durumları da incelenmeye çalışılmıştır.

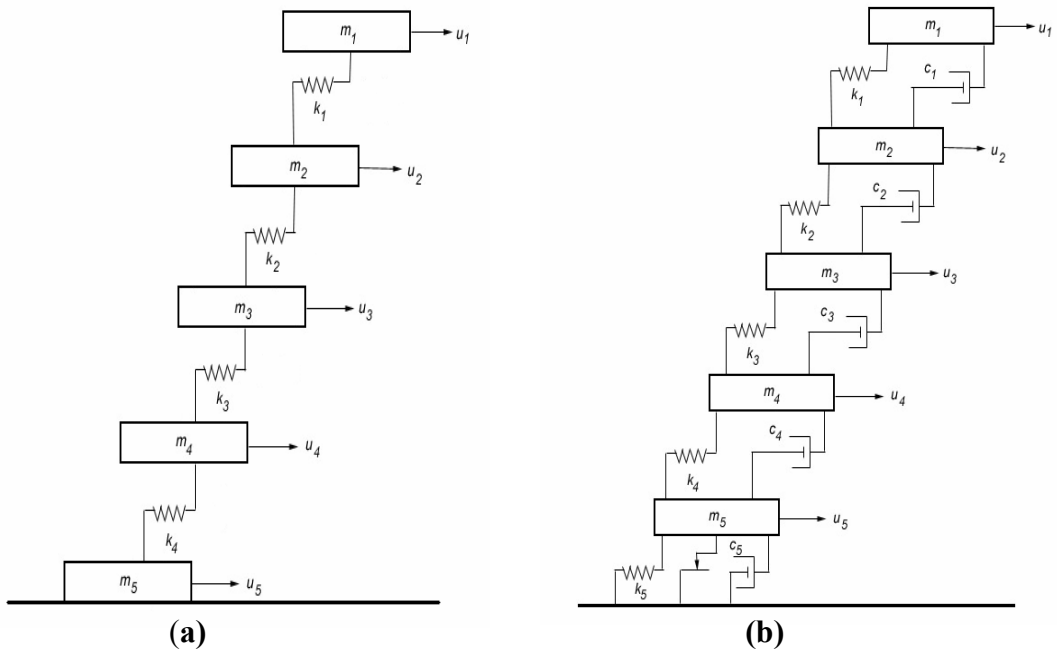
4.1 Dört Katlı Düzlem Çerçeve Modeli

4.1.1 Sürtünmeli Sismik İzolatör Kullanılmış Dört Katlı Çerçeve Modeli

Bu bölümde, yapıda sadece sürtünmeli izolatör olması durumu için Şekil 4.1'de verilmiş olan düzlem çerçeve modeli dikkate alınmıştır.



Şekil 4.1 Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve sistemin modeli



Şekil 4.2 Hareketli mesnetlenmiş 4 katlı düzlem çerçeve sistemin matematik modeli

(a) Sadece sürtünmeli izolatör kullanılması durumu

(b) Sürtünmeli izolatör ile birlikte sönümleyici kullanılması durumu

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, yer çekim sabiti $g = 9.81$ m/sn² olarak alınmıştır. Sistemin kütle ve rijitlik matrisleri oluşturulurken kat döşemelerinin rijit diyafram çalıştıkları varsayılmış ve düğüm noktalarının yalnızca yatay doğrultudaki deplasmanları hesaba katılmıştır. Düğüm noktalarının dönmeleri ve düşey deplasmanları dikkate alınmamıştır. Tabandaki kesme kuvveti, maksimum 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 maksimum 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 [18]. Sistemin birinci mod frekansı $\omega_1 = 23.66$ sn⁻¹ ve

ikinci mod frekansı $\omega_2=45.92 \text{ sn}^{-1}$ kullanılır ve bu modlar için sönüm oranları $\xi_1=\xi_2=0.05$ alınırsa,

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_2} & \omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

denklem sisteminden,

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,562 \\ 0,001437 \end{bmatrix}$$

değerleri elde edilir. Sönüm matrisi

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (4.2)$$

formülünden hesaplanarak aşağıdaki gibi elde edilir,

$$C = \begin{pmatrix} 1371.2297 & -824.327 & 0 & 0 & 0 \\ -824.327 & 2195.5568 & -824.327 & 0 & 0 \\ 0 & -824.327 & 2195.5568 & -824.327 & 0 \\ 0 & 0 & -824.327 & 2195.5568 & -824.327 \\ 0 & 0 & 0 & -824.327 & 1553.4786 \end{pmatrix}$$

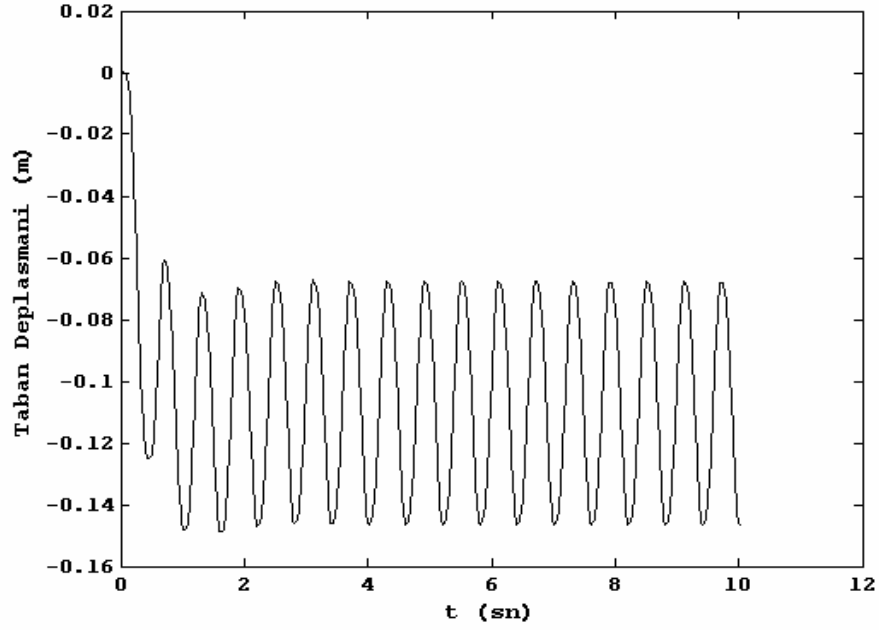
modelde sadece en alta tek bir sürtünme elemanı kullanılmıştır bu durum için sürtünme kuvveti yerleşim matrisi olan B matrisi ve dış yükler sadece kat seviyelerinde etki ettiği varsayımı ile oluşan E, dış yük yerleşim matrisi aşağıda verilmiştir.

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

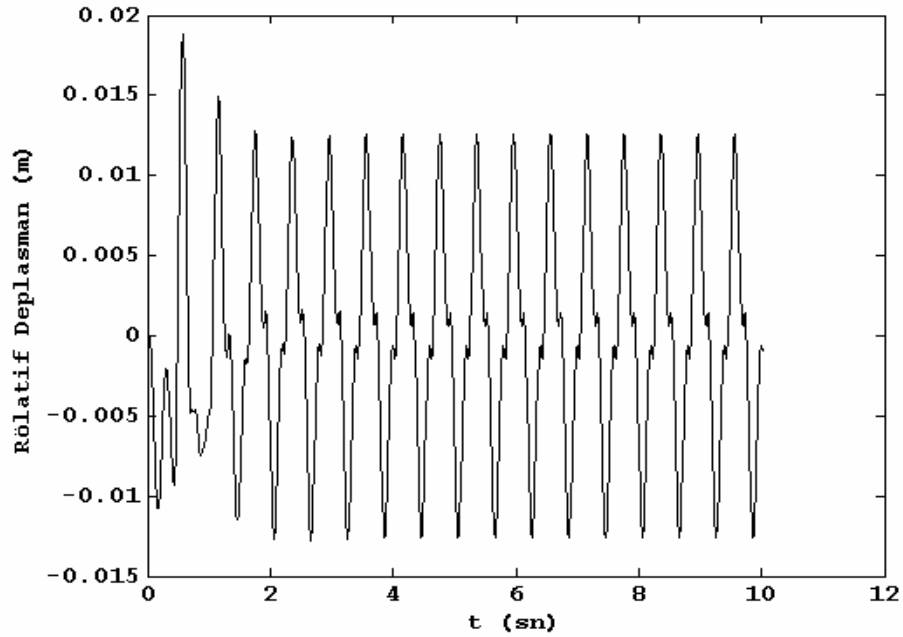
4.1.1.1 Çeşitli Deprem Hareketleri İçin Çözümler

Modelin çeşitli deprem hareketleri etkisi altında yapılan analizlerinde, sürtünme kuvveti-deplasman ilişkileri belirlenirken uygulanan işlem adımları, örneğin harmonik yer hareketi ($\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$) için aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

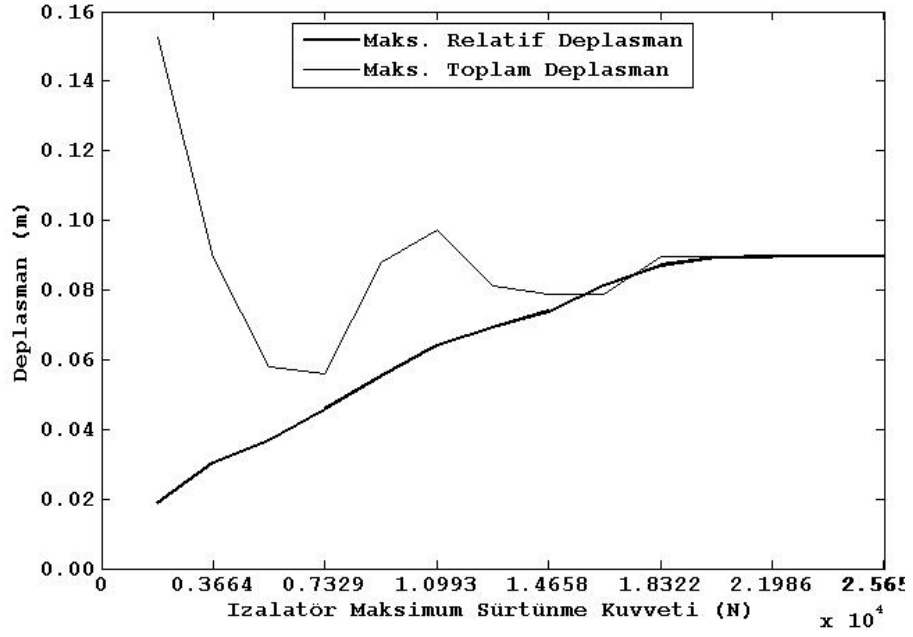
Belirli bir taban sürtünme kuvveti için, Şekil 4.3’de görülen temel bloğunun yere göre deplasmanının zamanla değişimi ve Şekil 4.4’de görülen rölatif deplasmanın zamana göre değişimleri elde edilip, kabul edilen sürtünme kuvveti için maksimum deplasmanlar belirlenir. Bu prosedür çeşitli sürtünme kuvvetleri için tekrar edilerek, elde edilen sürtünme kuvveti deplasman çiftleri yardımı ile Şekil 4.5’de görülen sürtünme kuvveti-deplasman ilişkileri elde edilebilir.



Şekil 4.3 Temel bloğunun yere göre deplasmanının zamana göre değişimi, (m).

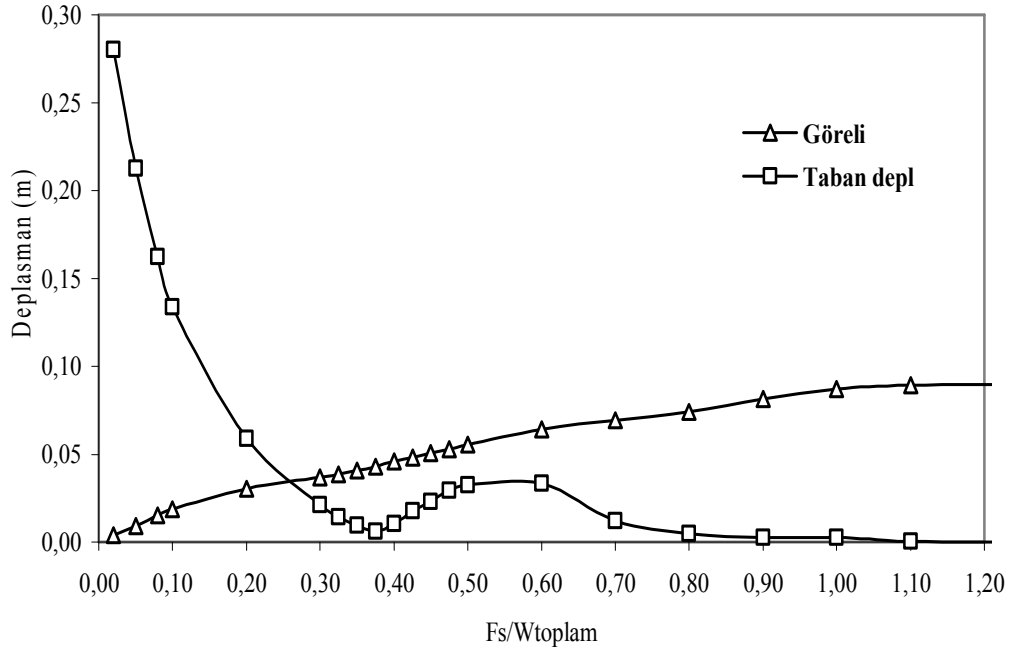


Şekil 4.4 Rölatif deplasmanının zamana göre değişimi, (m)



Şekil 4.5 Sürtünme kuvveti deplasman ilişkisi.

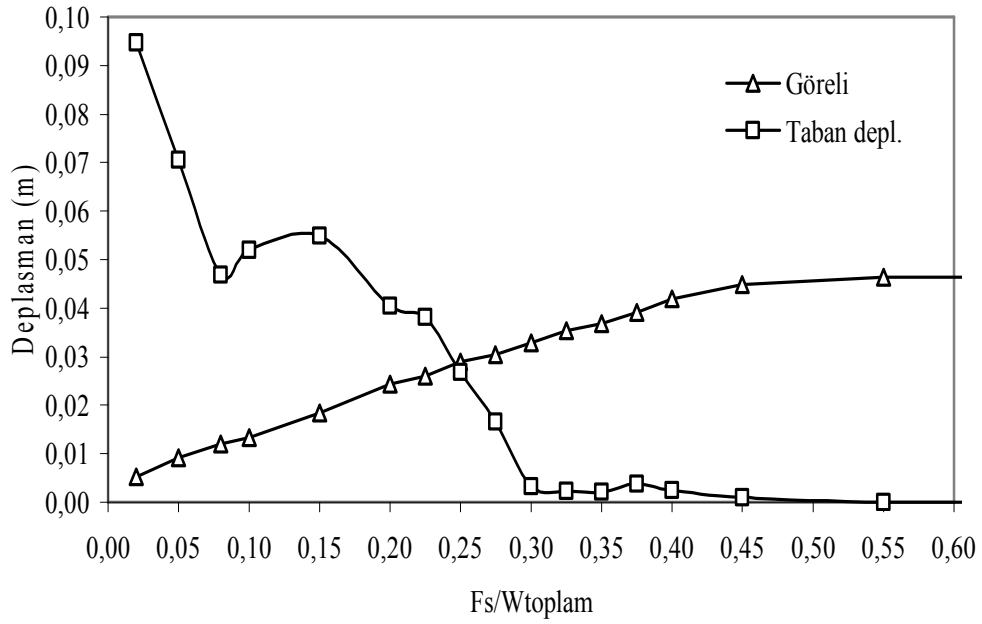
Bu modelin davranışı, $\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$ harmonik yer hareketi için incelenmiş, $f = \mu.N$ formülündeki N normal kuvvet değeri değiştirilerek yapıya uygulanan toplam sürtünme kuvveti değiştirilmiştir.



Şekil 4.6 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

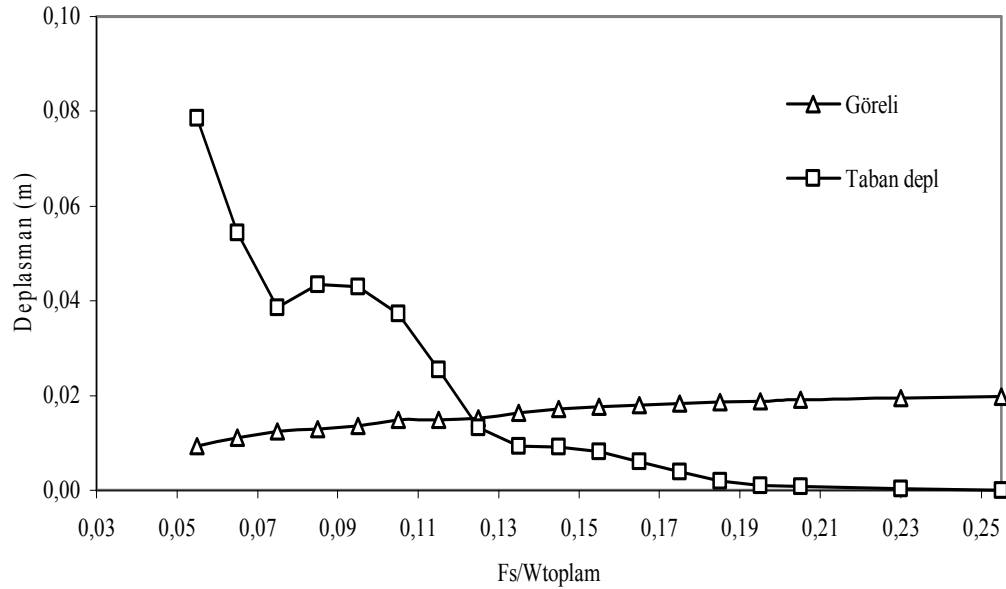
Şekil 4.6'da normal kuvvet değişiminin maksimum taban ve rölatif tepe deplasmanları üzerine etkileri görülmektedir.

El Centro yer hareketi için yapılan çözümlerden aşağıdaki 4.7 diyagramı elde edilmiştir.



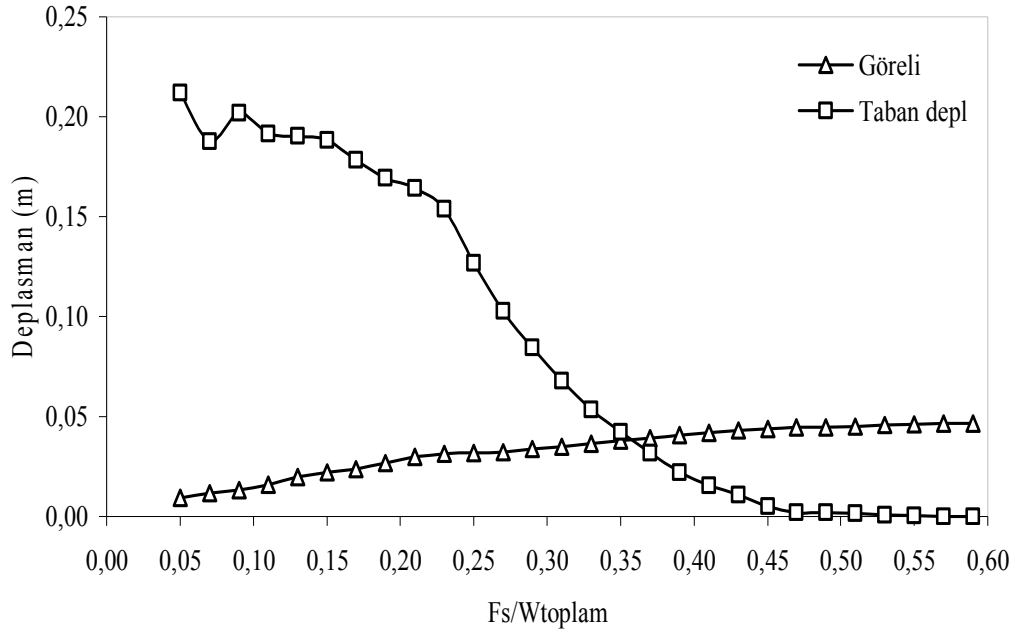
Şekil 4.7 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Kocaeli yer hareketi için yapılan çözümlerden aşağıdaki 4.8 diyagramı elde edilmiştir.



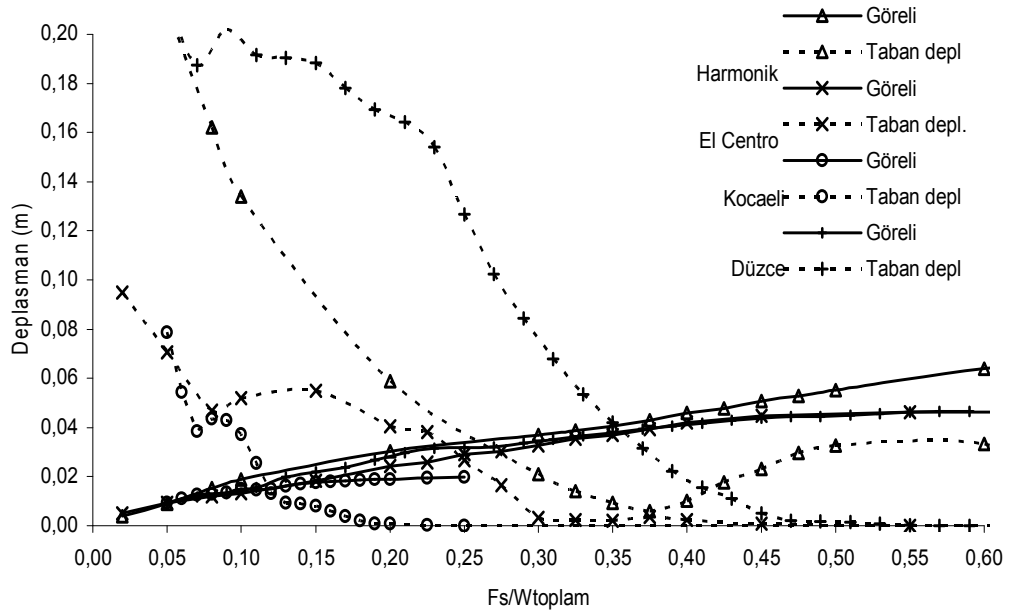
Şekil 4.8 Dört katlı yapının Kocaeli depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Düzce yer hareketi için yapılan çözümlerde ele alınan modelin sürtünme kuvveti deplasman ilişkisi Şekil 4.9 'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Dört katlı yapının Düzce depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Analizlerde göz önüne alınmış olan tüm yer hareketlerine karşı yapının cevabı Şekil 4.10'da toplu olarak görülebilir.



Şekil 4.10 Dört katlı yapının çeşitli yer hareketleri etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Temel bloğunun kütlesi değişiminin yapı deplasmanların üzerine etkilerini görebilmek amacı ile temel bloğu kütlesi normal kat kütlelerinin 2 ve 3 katı olduğu varsayılarak aşağıdaki çözümler yapılmıştır.

4.1.1.2 Temel Bloğu kütlesi Normal Kat Ağırlığının iki Katına Çıkarılarak Yapılan Çözümler

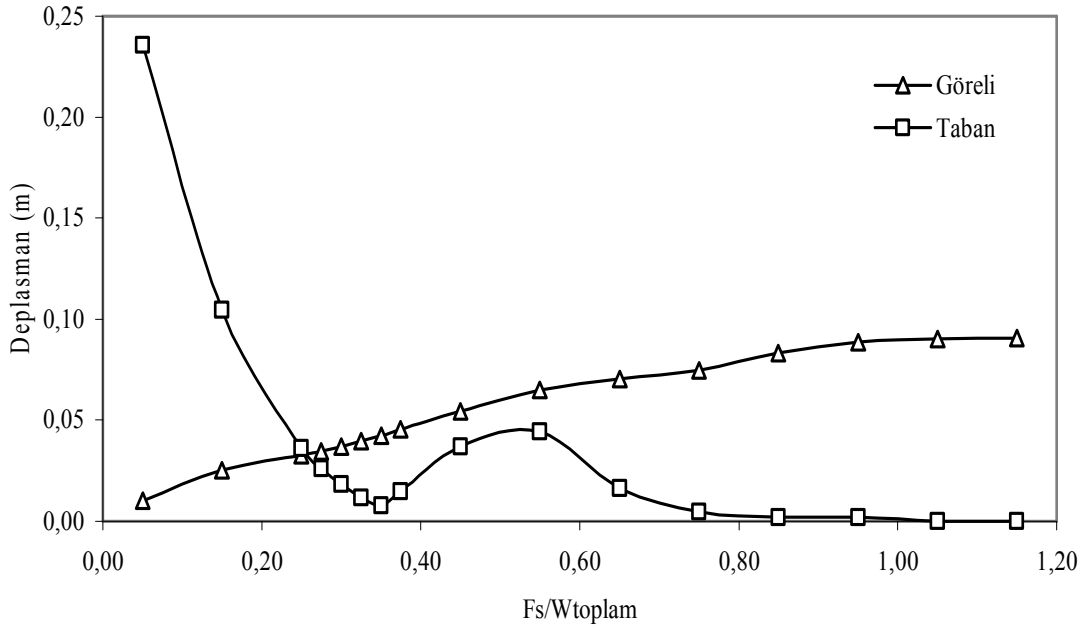
Temel bloğu ağırlığı iki katı olduğu durumda kütle matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$M = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 700 \end{bmatrix}$$

Bu durumdaki sistemin 1. mod frekansı $\omega_1=21,726 \text{ sn}^{-1}$, 2. Mod frekansı ise $\omega_2=44,107 \text{ sn}^{-1}$ olarak bulunur. Ele alınan modelin rijitlik matrisi değişmeyeceğine göre, sönüm matrisi aşağıdaki gibi olur.

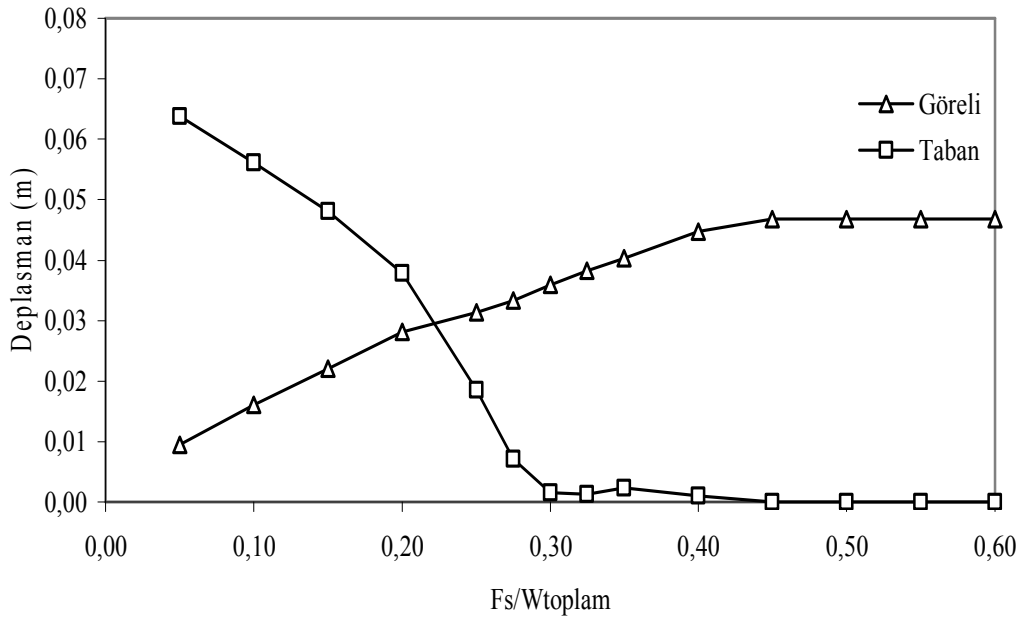
$$C = \begin{pmatrix} 1381.0483 & -871.2948 & 0 & 0 & 0 \\ -871.2948 & 2252.3432 & -871.2948 & 0 & 0 \\ 0 & -871.2948 & 2252.3432 & -871.2948 & 0 \\ 0 & 0 & -871.2948 & 2252.3432 & -871.2948 \\ 0 & 0 & 0 & -871.2948 & 1890.2196 \end{pmatrix}$$

Harmonik yer hareketi ($\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$) için yapılan çözümlerden Şekil 4.11 verilmiş olan diyagram elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

El Centro yer hareketi için yapılan çözümlerden aşağıdaki 4.12 diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 4.12 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

4.1.1.3 Temel Bloğu Kütlesi Üç Katı olması durumu

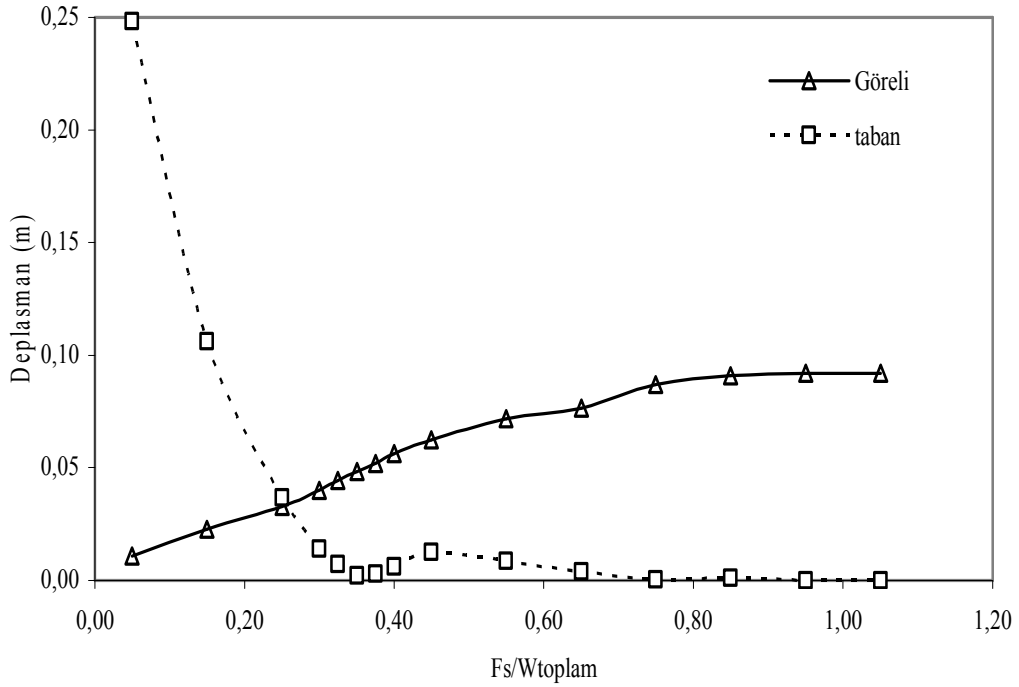
Temel bloğu üç katına çıkarıldığında oluşan kütle matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$M = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1400,7 \end{bmatrix}$$

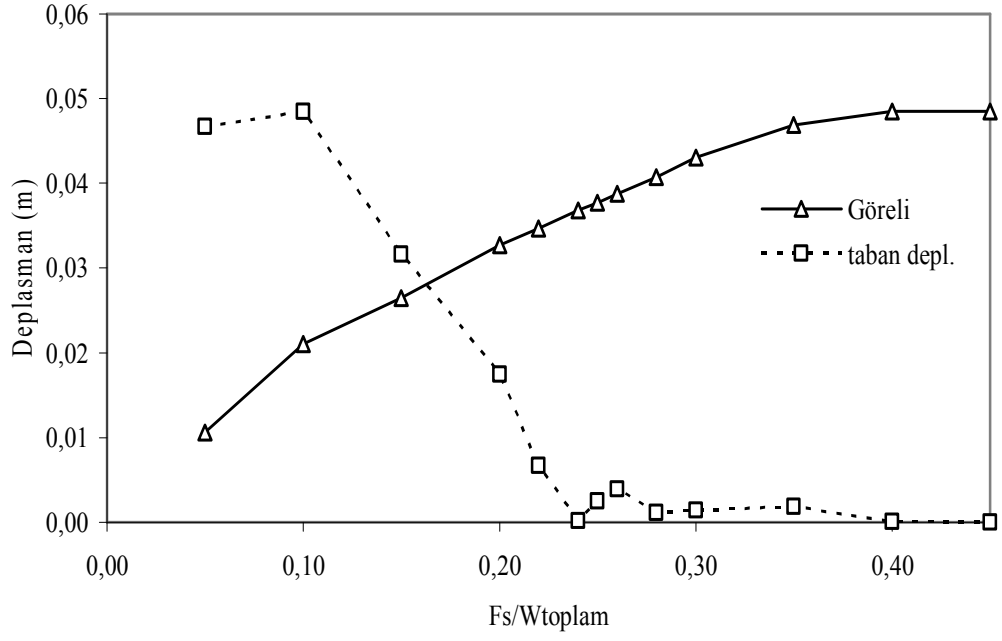
bu durumdaki sistemin 1. mod frekansı $\omega_1=18,802 \text{ sn}^{-1}$, 2. Mod frekansı ise $\omega_2=42,245 \text{ s}^{-1}$ olarak bulunur. Rijitlik matrisi değişmeyecektir. Bu duruma göre bulunan yeni sönüm matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$C = \begin{pmatrix} 1395.2593 & -939.6059 & 0 & 0 & 0 \\ -939.6059 & 2334.8651 & -939.6059 & 0 & 0 \\ 0 & -939.6059 & 2334.8651 & -939.6059 & 0 \\ 0 & 0 & -939.6059 & 2334.8651 & -939.6059 \\ 0 & 0 & 0 & -939.6059 & 2762.0895 \end{pmatrix}$$

Bu durumda, Harmonik ($\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$) ve El Centro yer hareketleri için yapılan çözümlerden aşağıdaki 4.13 ve 4.14 diyagramları elde edilmiştir.

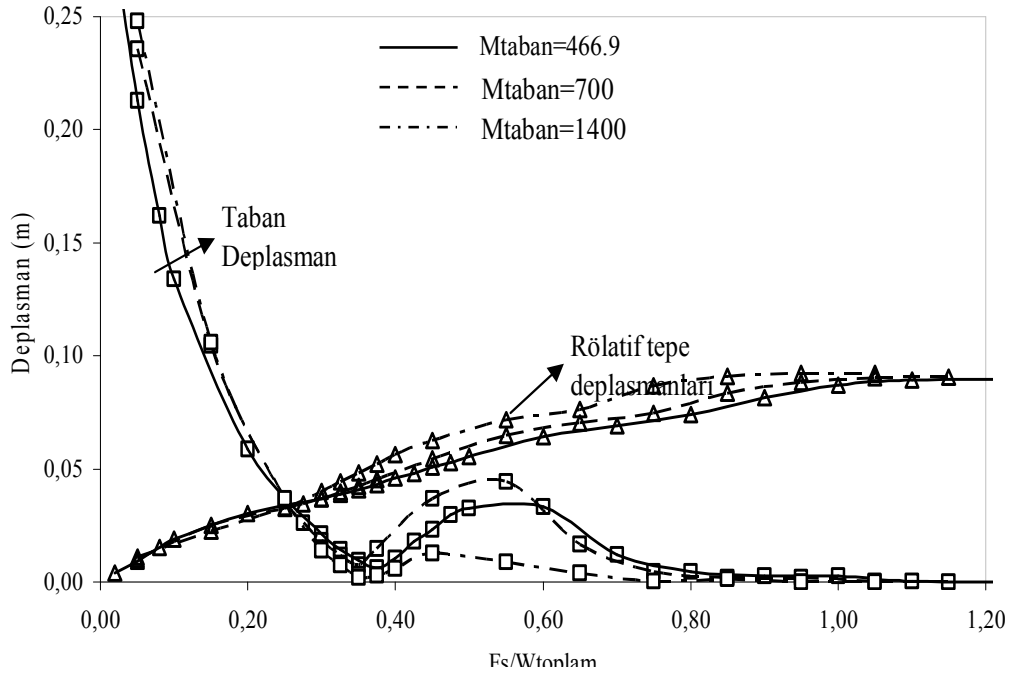


Şekil 4.13 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri



Şekil 4.14 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Şekil 4.15 de, temel bloğunun kütlesi değişiminin yapı deplasmanlarının üzerine etkilerini görebilmek için yapılan tüm çözümler bir arada verilmiştir.



Şekil 4.15 Temel bloğunun kütlesi değişiminin sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri üzerine etkileri (Harmonik yer hareketi)

Şekil 4.15 de verilmiş olan grafiklerden de görüldüğü, taban deplasmanını minimum yapan sürtünme katsayıları, taban kütlesi değişiminden pek etkilenmemektedir.

4.1.1.4 Tüm Kat Kütlelerinin İki Katı Olması Durumu

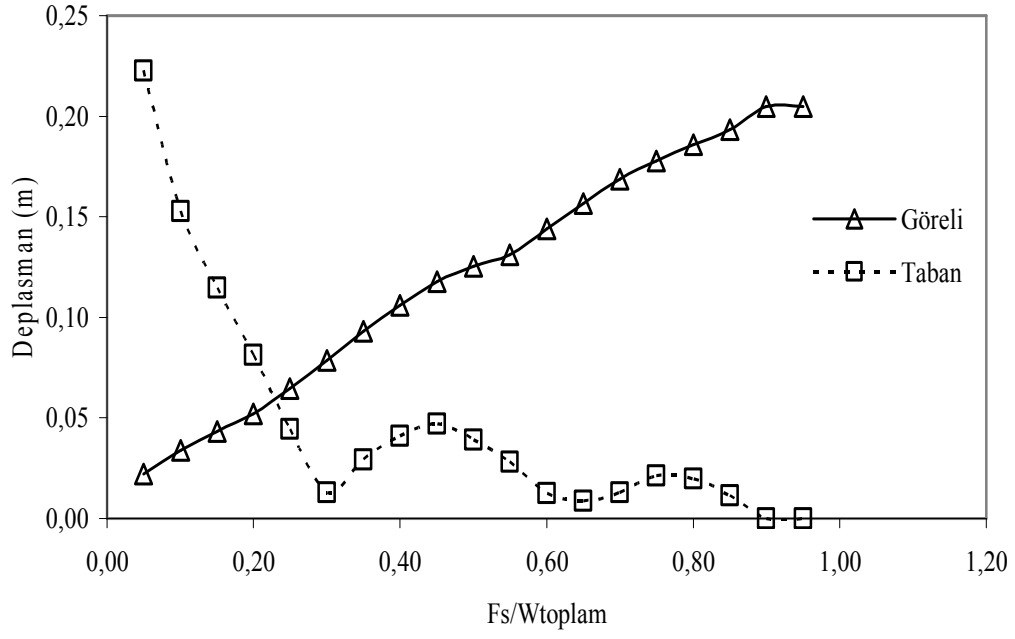
Tüm kütleler iki katına çıkarıldığında oluşan kütle matrisi ise aşağıdaki gibi olur.

$$M = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 700,4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 700,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 700,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 700,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 933,8 \end{bmatrix}$$

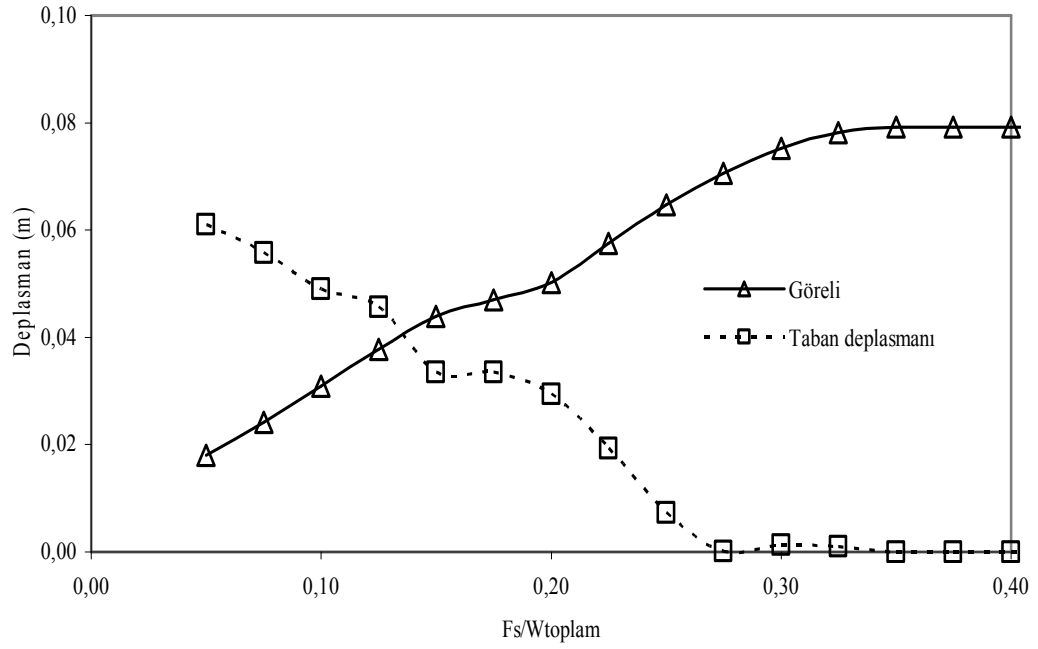
bu durumdaki sistemin 1. mod frekansı $\omega_1=16,734 \text{ sn}^{-1}$, 2. Mod frekansı ise $\omega_2=32,469 \text{ sn}^{-1}$ olarak bulunur. Rijitlik matrisi değişmeyecektir. Bu duruma göre bulunan yeni sönüm matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$C = \begin{pmatrix} 1939.2117 & -1165.7745 & 0 & 0 & 0 \\ -1165.7745 & 3104.9862 & -1165.7745 & 0 & 0 \\ 0 & -1165.7745 & 3104.9862 & -1165.7745 & 0 \\ 0 & 0 & -1165.7745 & 3104.9862 & -1165.7745 \\ 0 & 0 & 0 & -1165.7745 & 2196.9505 \end{pmatrix}$$

Bu durumda, Harmonik ($\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$) ve El Centro yer hareketleri için yapılan çözümlerden aşağıdaki 4.16 ve 4.17 diyagramları elde edilmiştir.

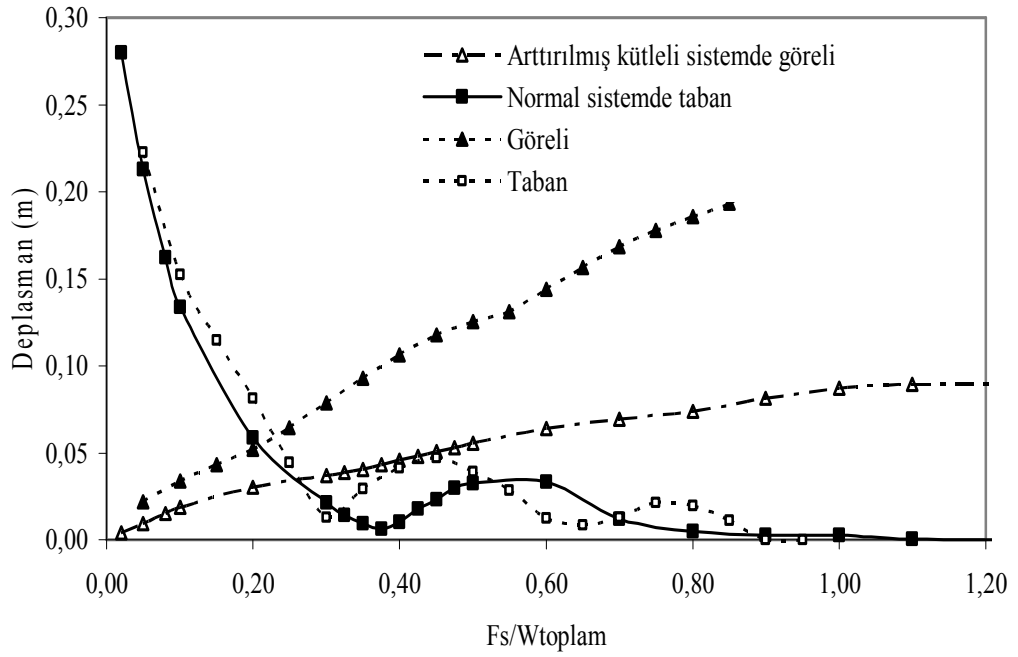


Şekil 4.16 Dört katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri



Şekil 4.17 Dört katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

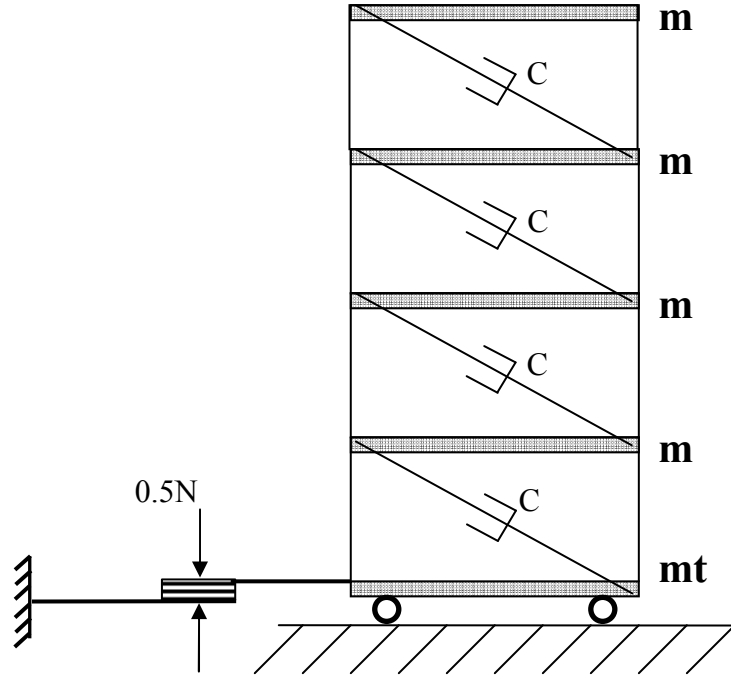
Harmonik hareketi etkisinde, kat kütlelerinin 2 kat arttırılmış durum ile arttırılmamış durumda sürtünmeli izolatöre etkiyen eksenel yük ve/veya sürtünme katsayısı değişiminin yapı yanıtına şekil 4.18 'de verilmiştir.



Şekil 4.18 Dört katlı yapıdaki kütle değişiminin harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkilerine etkisi

4.1.2 Sürtünmeli Sismik İzolatör İle Birlikte Her Katta Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılması Durumu

Bu bölümde, yapıda hem sürtünmeli izolatör hem de viskoz sönüm elemanı kullanılması durumu incelenecektir. Viskoz sönümleyici konfigürasyonu da değişken alınacağından, ilk olarak Şekil 4.19 'da verilmiş olan düzlem çerçeve modeli göz önüne alınmıştır.



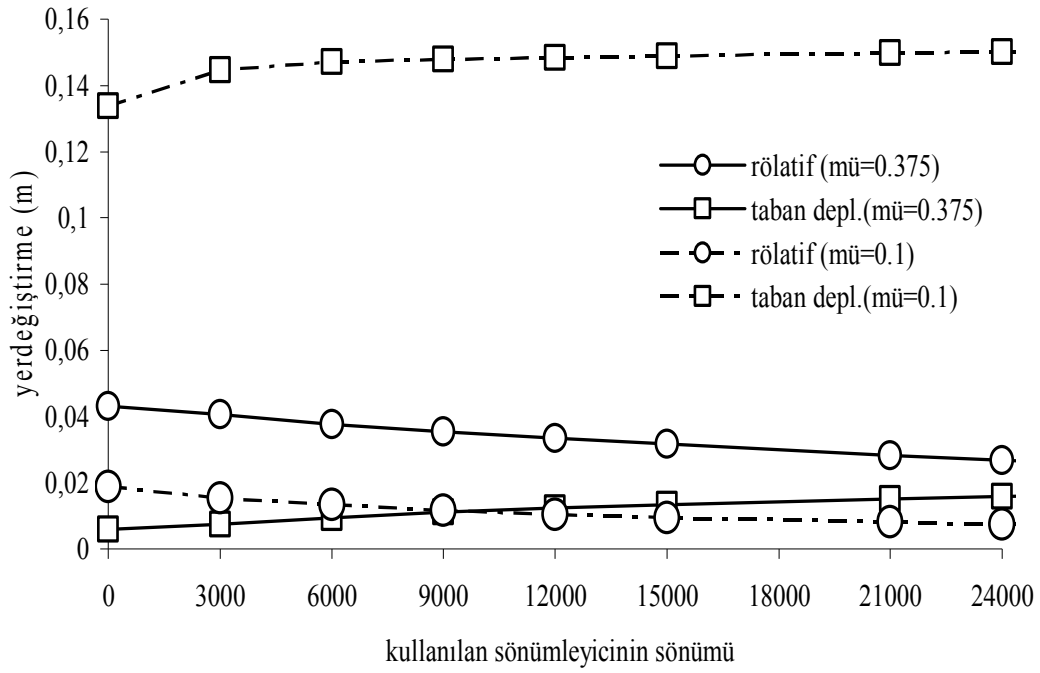
Şekil 4.19 Her katta viskoz sönümleyici kullanılması durum

Ele alınan sistemin sönüm matrisinin belirlenmesinde, viskoz sönümleyici eklenmesi durumunda aşağıda C^+ olarak tanımlanan ilave bir sönüm matrisi yapının doğal sönümüne eklenecektir. Şekil 4.19 da verilmiş olan model için, söz konusu ilave sönüm matrisi aşağıdaki gibidir.

$$C^+ = \begin{bmatrix} c & -c & 0 & 0 & 0 \\ -c & 2c & -c & 0 & 0 \\ 0 & -c & 2c & -c & 0 \\ 0 & 0 & -c & 2c & -c \\ 0 & 0 & 0 & -c & c \end{bmatrix}$$

Aşağıda yapılan irdelemelerde, ilave sönüm matrisinde (C^+) “c” olarak gösterilmiş olan sönüm değerleri sıfırdan başlayıp arttırılmasının, yapının cevabı üzerindeki etkileri incelenmeye çalışılmıştır. İrdellemelerde, 4.1.1 bölümünde verilmiş olan sürtünme kuvveti deplasman ilişkilerindeki uygun görülen birkaç sürtünme katsayısı esas alınmıştır.

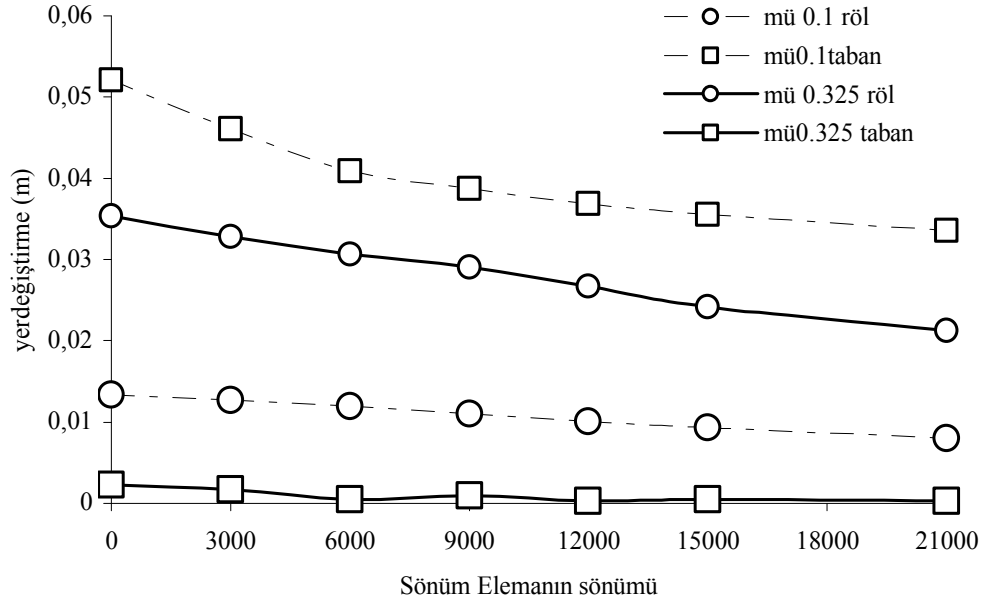
Şekil 4.19 da verilmiş olan modelin, $\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$ harmonik yer hareketi için yapılan çözümlerden Şekil 4.20 verilmiş olan diyagram elde edilmiştir.



Şekil 4.20 Dört katlı yapıda harmonik hareket etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri

Şekil 4.20’de verilmiş olan ilişkilerin belirlenmesinde, sürtünmeli sönüm elemanın sürtünme katsayısı olarak $\mu=0,325$ ve $\mu=0,1$ olarak alınmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, sürtünme katsayısı farklılığı, incelenen durum için yapıda taban deplasmanları arasında farklılığın sebebidir. Ayrıca sürtünmeli elemanın sönüm katsayısı arttıkça taban deplasmanlarında artış ve rölatif deplasmanlarda azalma olmaktadır.

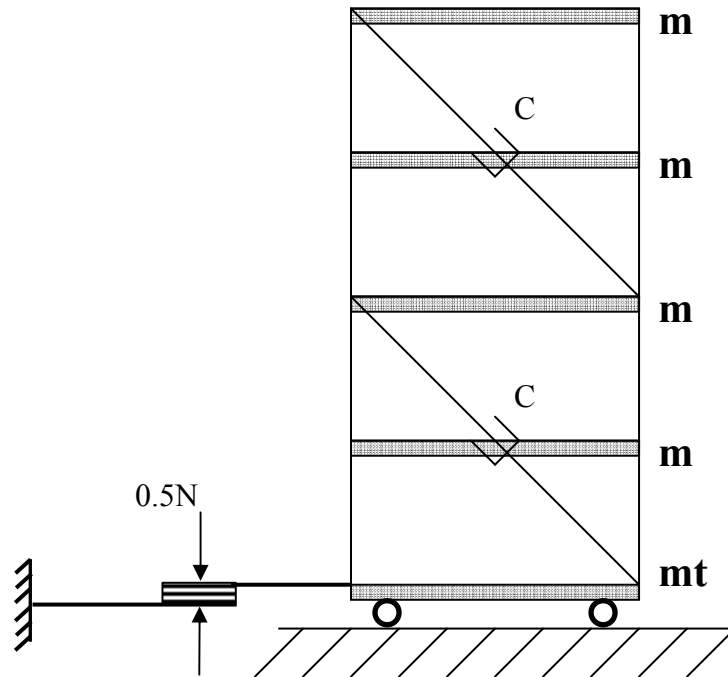
El Centro depremi yer kaydı için , sürtünmeli sönüm elemanın sürtünme katsayısı olarak $\mu=0,325$ ve $\mu=0,1$ olarak alınarak, modelin sönüm deplasman ilişkisi Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 Dört katlı yapının El Centro kaydı etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri

4.1.2.1 İki Katta Bir Viskoz Sönüm Elemanı kullanılmış Model

Bu bölümde, viskoz sönümleyici konfigürasyonunun Şekil 4.22 'de verilmiş olan düzlem çerçeve modeli göz önüne alınmıştır.

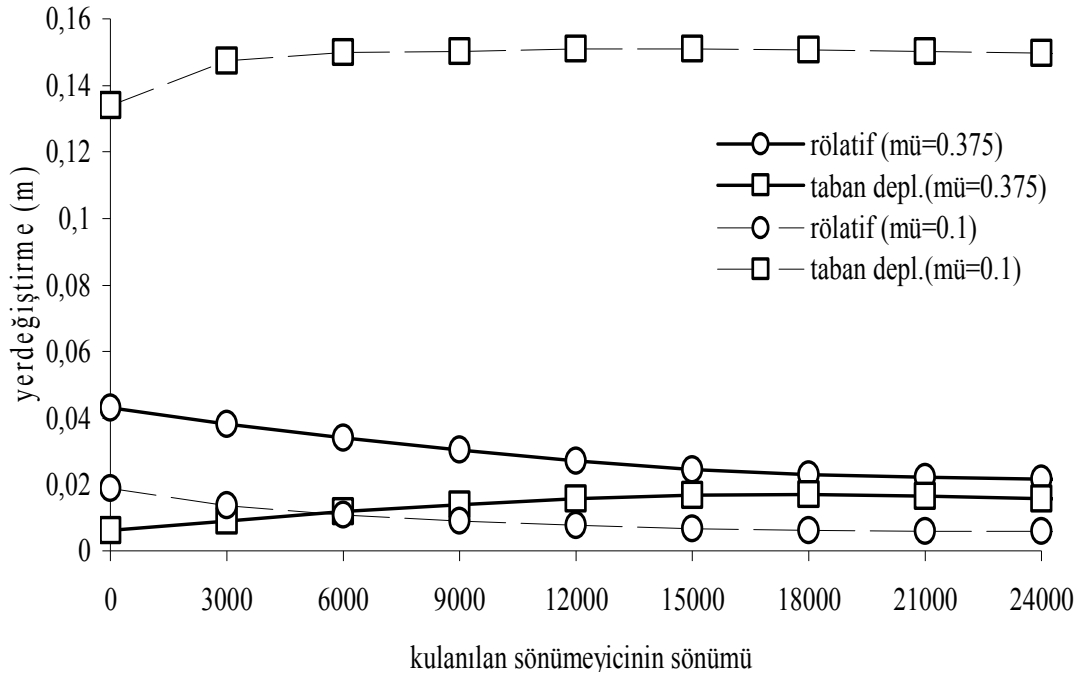


Şekil 4.22 İki katta bir viskoz sönümleyici kullanılması durum

Şekil 4.22’de verilmiş olan sisteme eklenen sönüm elemanlarından gelecek ilave sönüm C^+ aşağıdaki gibidir.

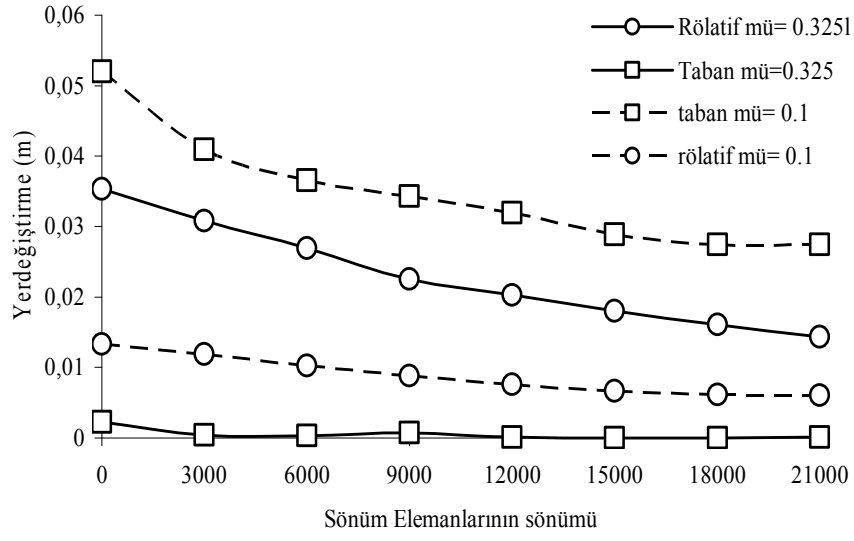
$$C^+ = \begin{bmatrix} c & 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & 0 & 2c & 0 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c & 0 & c \end{bmatrix}$$

Harmonik yer hareketi ($\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$) için Şekil 4.22 ‘de verilmiş olan modelin analizinden Şekil 4.23 verilmiş olan diyagram elde edilmiştir.



Şekil 4.23 Dört katlı yapıda harmonik hareket etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri

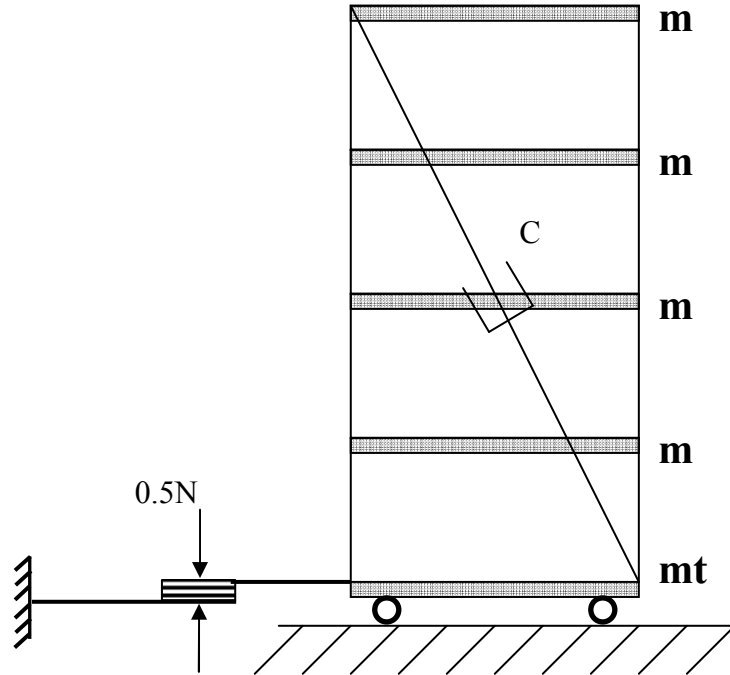
Sürtünmeli sönüm elemanın sürtünme katsayısı olarak $\mu=0,325$ ve $\mu=0,1$ olarak alınarak, El Centro depremi yer kaydı için modelin sönüm deplasman ilişkisi Şekil 4.24’de verilmiştir.



Şekil 4.24 Dört katlı yapının El Centro kaydı etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri

4.1.2.2 Tek Bir Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılmış Sistem

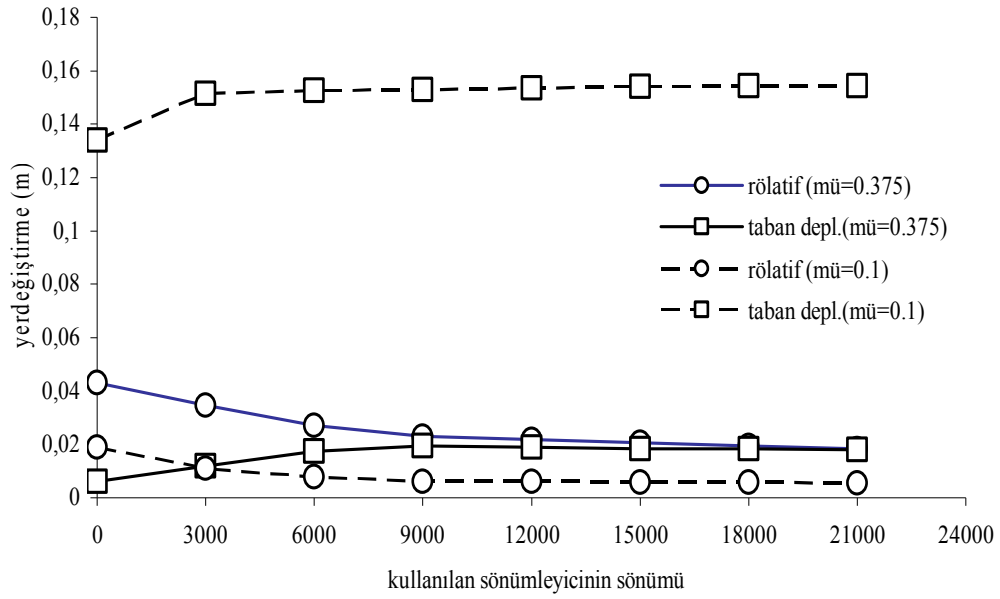
Viskoz sönümleyici konfigürasyonunun Şekil 4.25 'de verilmiş olan düzlem çerçeve modeli olması durumunda, ilave sönüm matrisi (C^+), ele alınan sistem için aşağıdaki şekilde yazılmalıdır.



Şekil 4.25 Tek bir viskoz sönümleyici kullanılması durumu

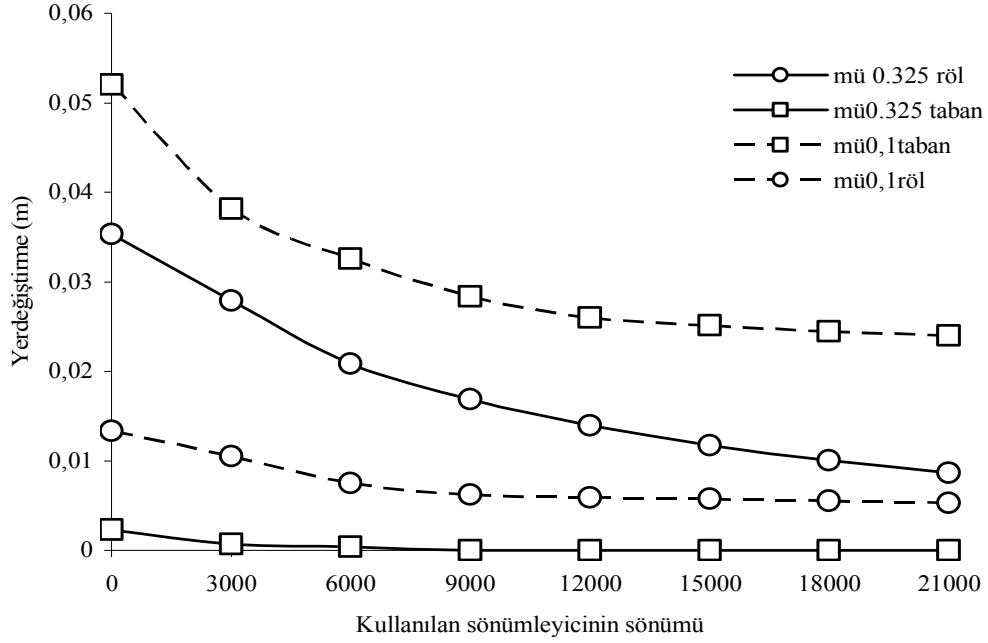
$$C^+ = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 & 0 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix}$$

Harmonik yer hareketi ($\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$) için Şekil 4.25 'de verilmiş olan modelin sönüm deplasman ilişkisi Şekil 4.26'da verilmiştir.



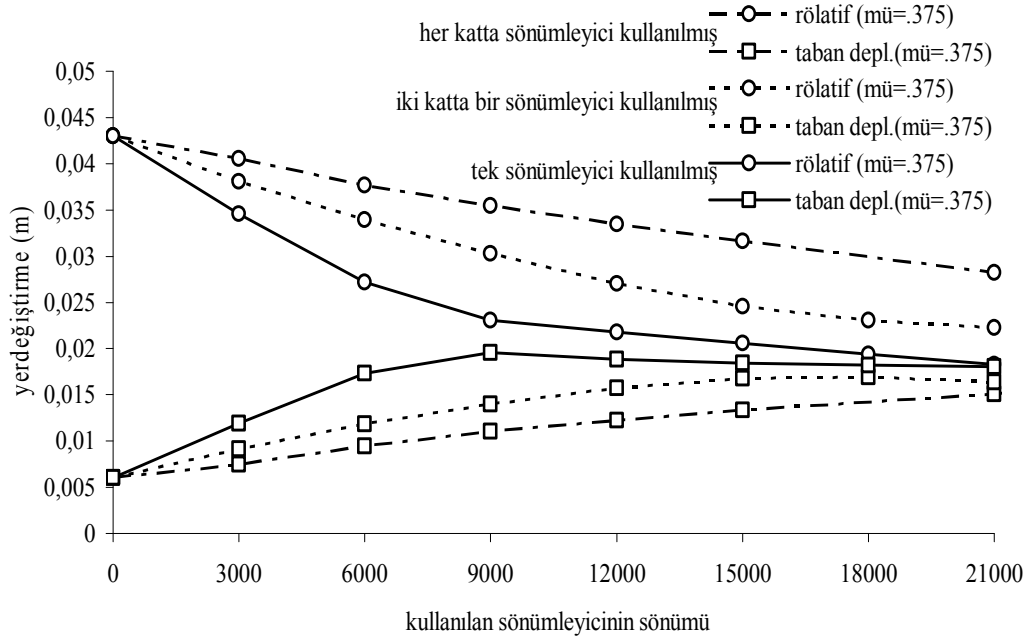
Şekil 4.26 Dört katlı yapıda harmonik hareket etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri

El Centro depremi yer kaydı için incelenen modelin sönüm deplasman ilişkisi Şekil 4.27'de verilmiştir.



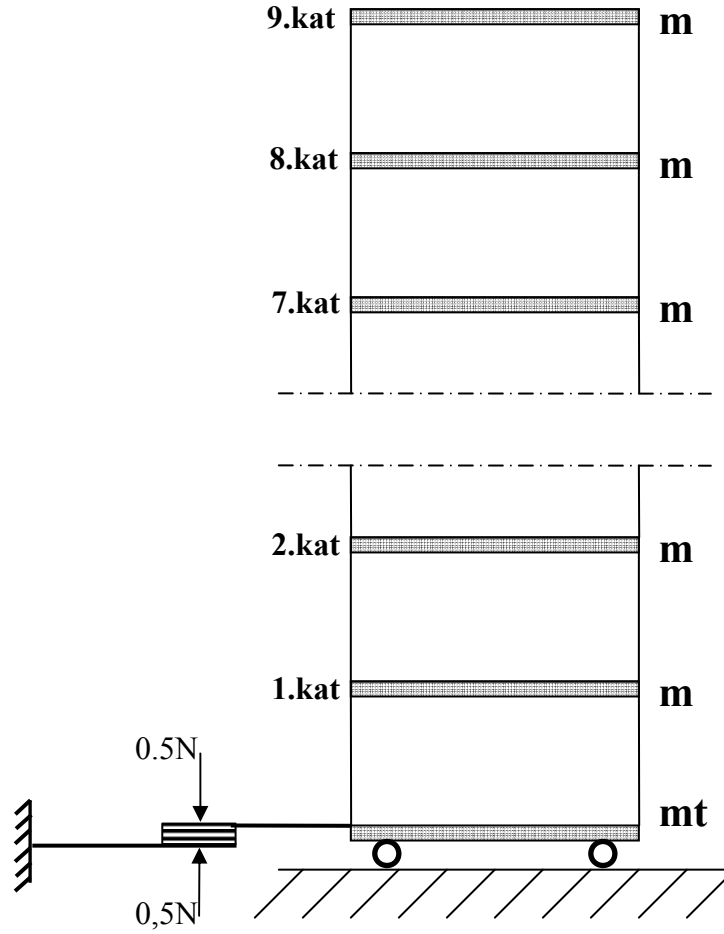
Şekil 4.27 Dört katlı yapının El Centro kaydı etkisindeki sönüm deplasman ilişkileri

Sönümleyicilerin farklı şekillerde yerleştirilmelerinin yapı yanıtı üzerine etkileri Şekil 4.28'de görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, kullanılan sönümleyici sayısının azalması ve sönümleyicilerin bağlandığı kat aralığının artması, taban deplasmanlarının artmasına ve rölatif deplasmanlar azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.28 Sönümleyicilerin farklı biçimlerde yerleştirilmelerinin sönüm-deplasman ilişkileri üzerine etkileri

4.2 Dokuz Katlı Düzlem Çerçeve Modeli



Şekil 4.29 Hareketli mesnetlenmiş 9 katlı düzlem çerçeve sistemin modeli

Sistem parametreleri, $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = k_6 = k_7 = k_8 = k_9 = 573600$ N/m, $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = m_6 = m_7 = m_8 = m_9 = 350.2$ kg, $m_t = 466.2$ kg, yer çekim sabiti $g = 9.81$ m/sn² olarak alınmıştır. Sistemin kütle ve rijitlik matrisleri oluşturulurken kat döşemelerinin rijit diyafram çalıştıkları varsayılmış ve düğüm noktalarının yalnızca yatay doğrultudaki deplasmanları hesaba katılmıştır. Düğüm noktalarının dönmeleri ve düşey deplasmanları dikkate alınmamıştır. Tabandaki kesme kuvveti maksimum 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 $V_{base} = f_{max} \text{sgn}(du_5/dt)$ bağıntısından hesaplanır. Sistemin kütle ve rijitlik matrisleri,

$$M = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & mt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 350,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 466,9 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k1 & -k1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k1 & k1+k2 & -k2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k2 & k2+k3 & -k3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k3 & k3+k4 & -k4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k4 & k4+k5 & -k5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k5 & k5+k6 & -k6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k6 & k6+k7 & -k7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k7 & k7+k8 & -k8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k8 & k8+k9 & -k9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k9 & k9 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} 5.736 \times 10^5 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 1.147 \times 10^6 & -5.736 \times 10^5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.736 \times 10^5 & 5.736 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

Sistemin sönüm matrisi, Rayleigh orantılı sönümü varsayılarak kütle ve rijitlik matrislerinden elde edilir [18]. Sistemin birinci mod frekansı $\omega_1=12,27 \text{ sn}^{-1}$ ve ikinci mod frekansı $\omega_2=24.33 \text{ sn}^{-1}$ kullanılır ve bu modlar için sönüm oranları $\xi_1=\xi_2=0.05$ alınırsa,

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

denklem sisteminden,

$$a = \begin{pmatrix} 0.816 \\ 2.733 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

değerleri elde edilir. Sönüm matrisi

$$C = a_0 M + a_1 K$$

formülünden hesaplanarak aşağıdaki gibi elde edilir,

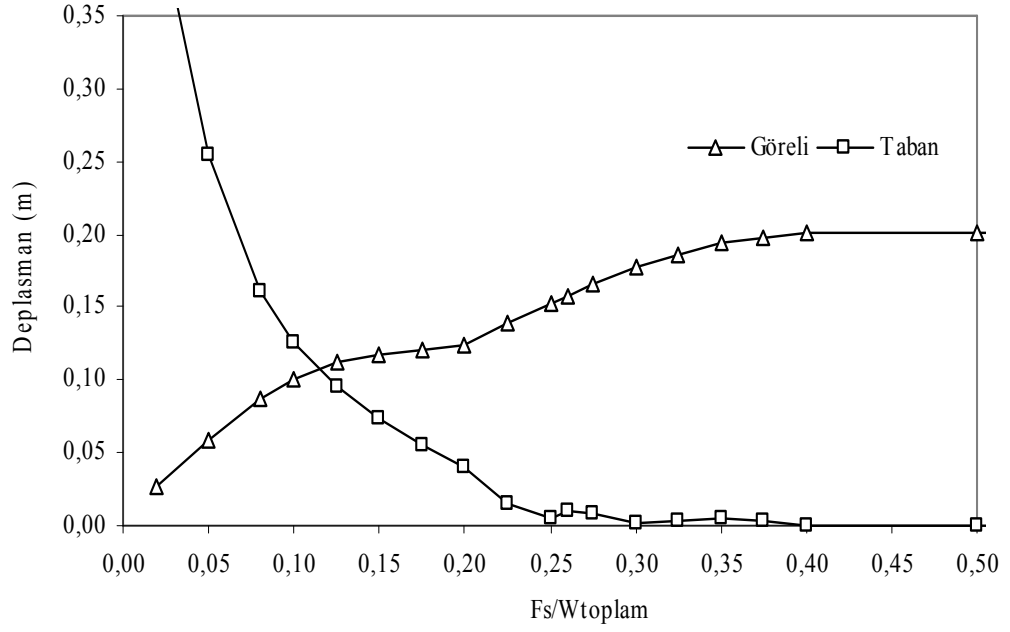
$$C = \begin{pmatrix} 1853.02906 & -1567.40315 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1567.40315 & 3420.43221 & -1567.40315 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1567.40315 & 1948.2105 \end{pmatrix}$$

modelde sadece en alta tek bir sürtünme elemanı kullanılmıştır bu durum için sürtünme kuvveti yerleşim matrisi olan B matrisi ve dış yükler sadece kat seviyelerinde etki ettiği varsayımı ile oluşan E, dış yük yerleşim matrisi aşağıda verilmiştir.

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

4.2.1 Dokuz Katlı Sistemin Çeşitli Deprem Hareketleri İçin Çözümleri

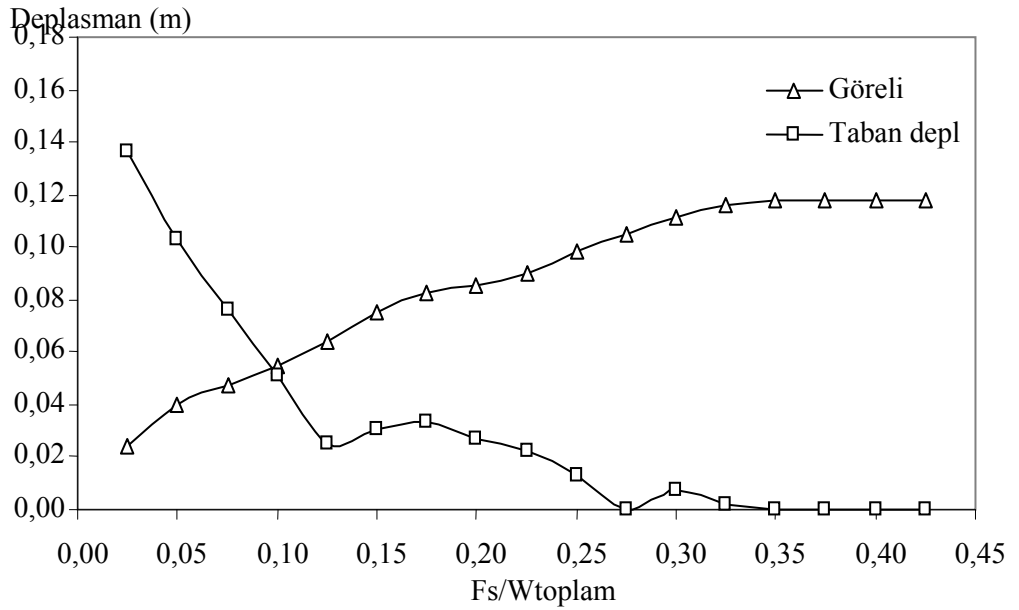
Bu modelin davranışı, $\ddot{u}_g = 0.5g \sin(10.472t)$ harmonik yer hareketi için sürtünme kuvveti deplasman ilişkisi Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.30 Dokuz katlı yapının harmonik hareket etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

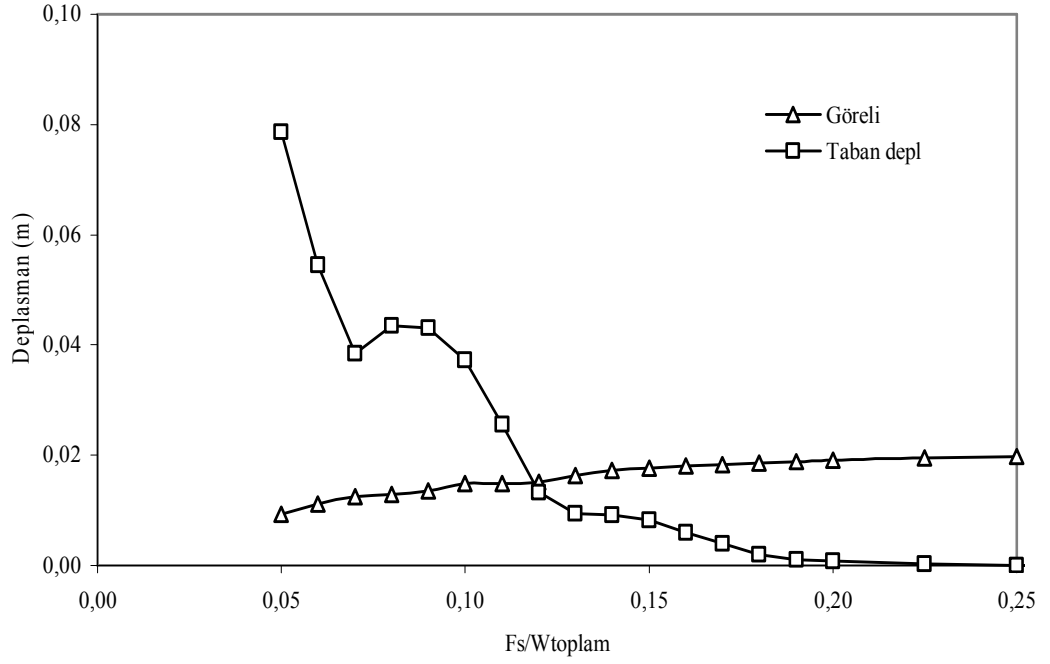
Şekilden de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının yaklaşık 0,25 olduğu durum için taban deplasmanı oldukça küçük bir değer almaktadır.

Modelin, El Centro deprem kaydı için sürtünme kuvveti deplasman ilişkisi Şekil 4.30 da görülmektedir.



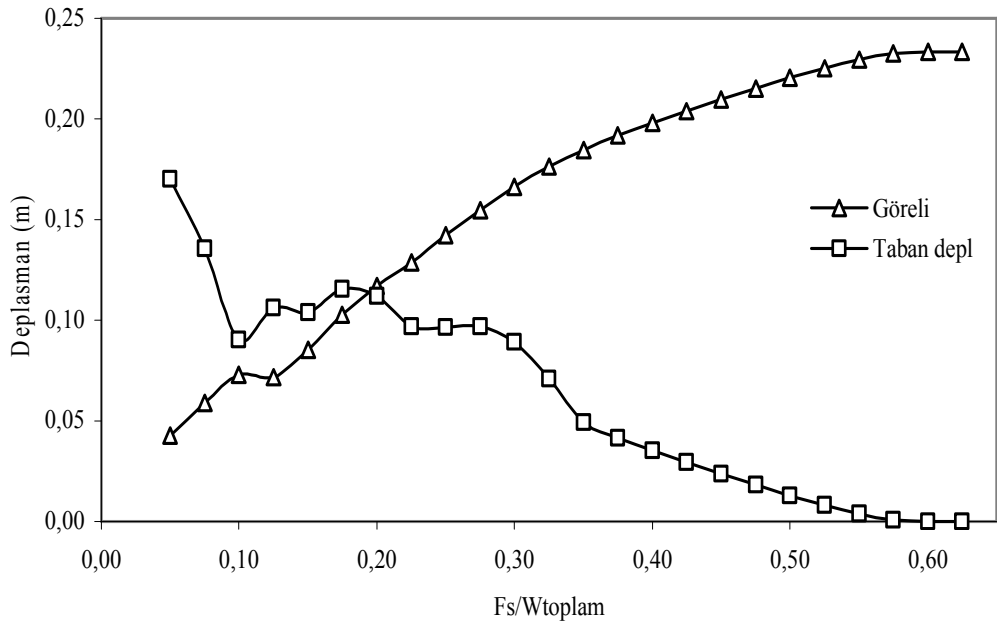
Şekil 4.31 Dokuz katlı yapının El Centro depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Modelin, Kocaeli deprem kaydı için sürtünme kuvveti deplasman ilişkisi Şekil 4.31 de görülmektedir.



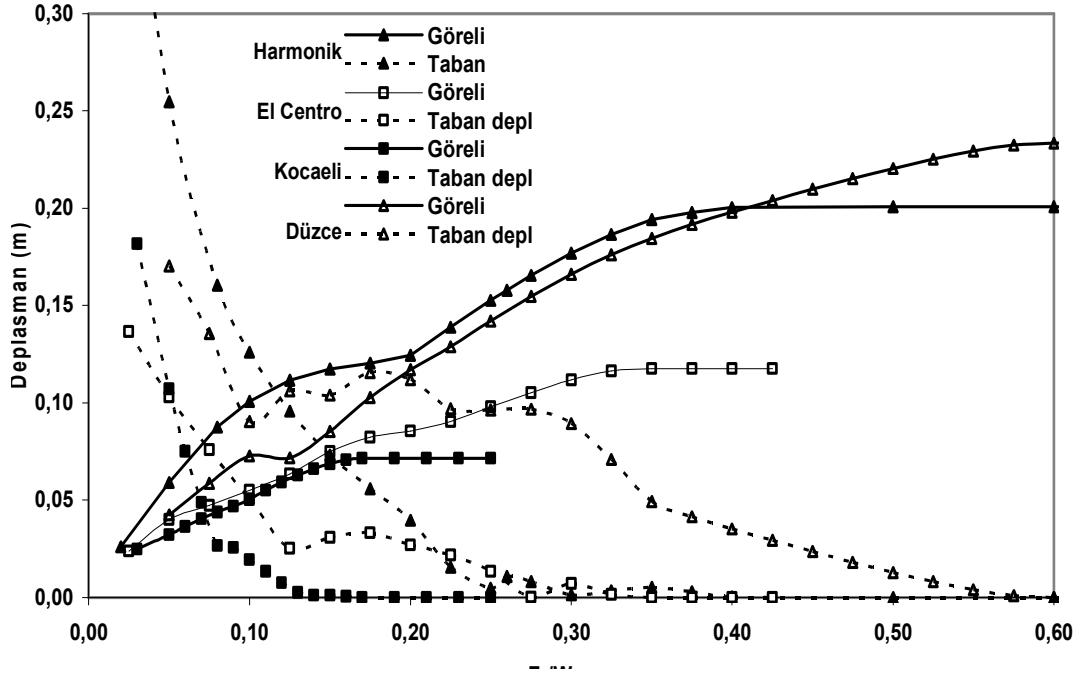
Şekil 4.32 Dokuz katlı yapının Kocaeli depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Modelin, Düzce deprem kaydı için sürtünme kuvveti deplasman ilişkisi Şekil 4.32'de görülmektedir.



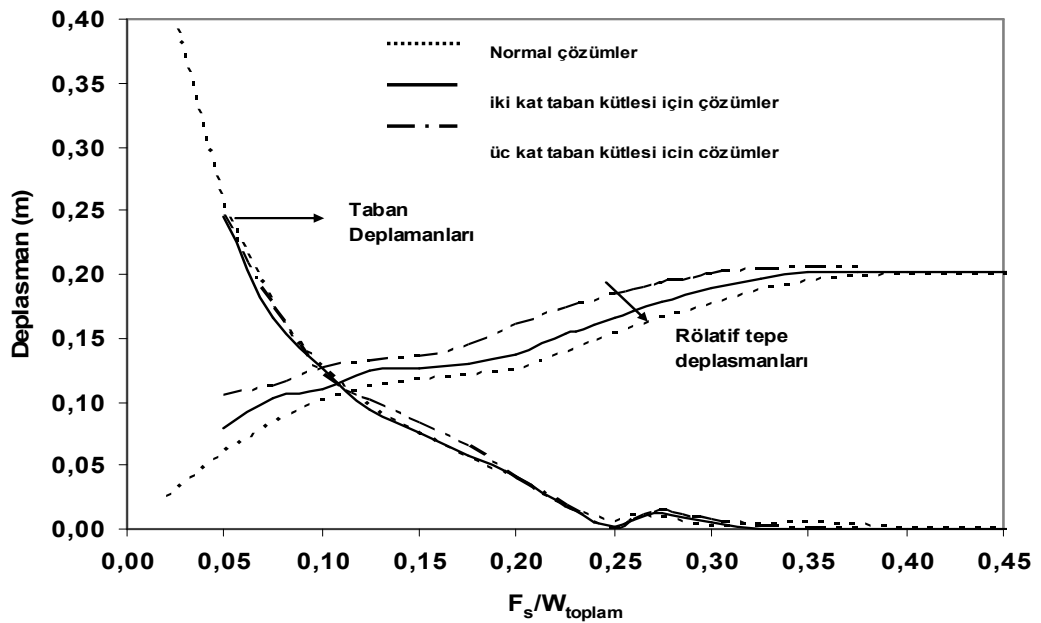
Şekil 4.33 Dokuz katlı yapının Düzce depremi etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Şekil 4.33’de, karşılaştırmalarda esas alınan tüm deprem kayıtları için elde edilen sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri bir arada verilmiştir.

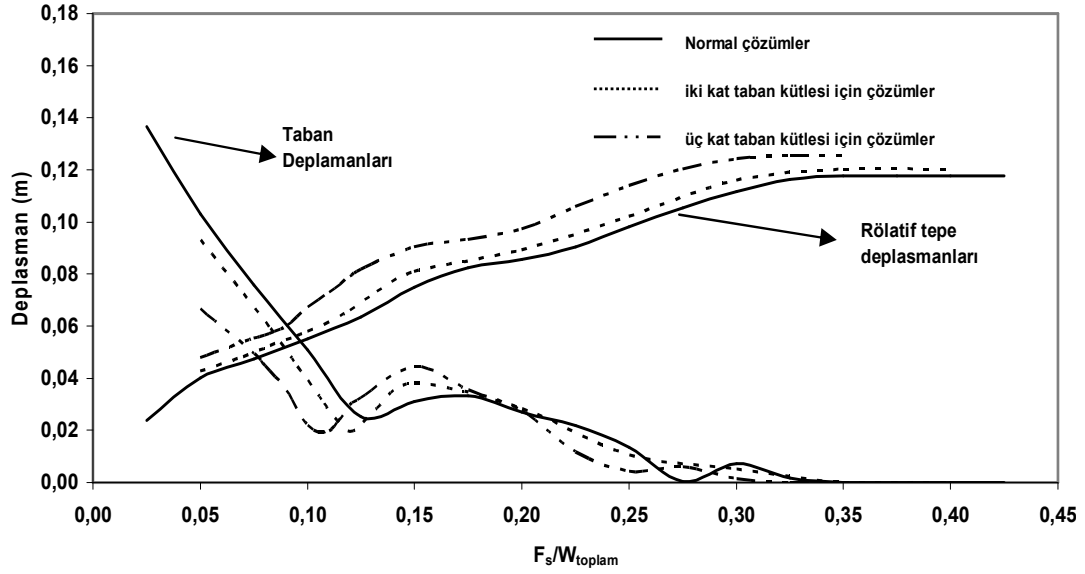


Şekil 4.34 Dokuz katlı yapının çeşitli yer hareketleri etkisindeki sürtünme kuvveti deplasman ilişkileri

Dört katlı sistemdekine benzer şekilde bu sistemde de temel bloğunun kütlesi önce diğer katların iki katına sonra taban kütlesinin 3 katına kadar çıkarıldı çözümler yapıldı. Aşağıdaki grafikte bunların karşılaştırmalı olarak çözüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.35 Dokuz katlı yapıda harmonik hareket etkisinde taban kütlesi değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler

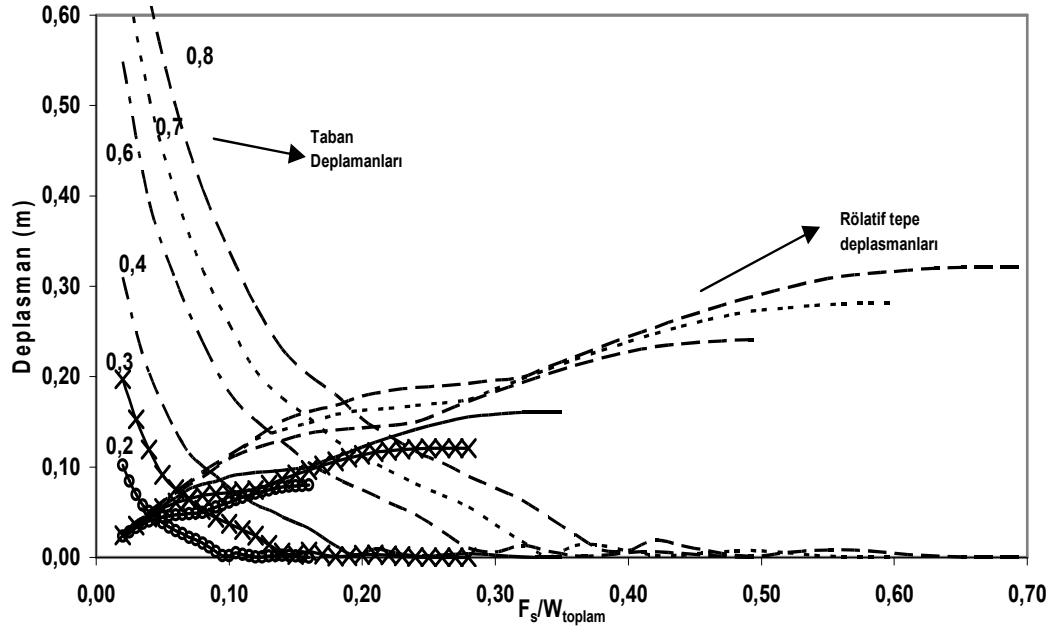


Şekil 4.36 Dokuz katlı yapıda El Centro deprem ivme kaydı etkisinde taban kütlesi değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler

4.2.2 Dokuz Katlı Sistemde harmonik hareketin Frekansı ve genliği değiştirilerek yapılan çözümler

4.2.2.1 Genlik değiştirerek yapılan çözümler

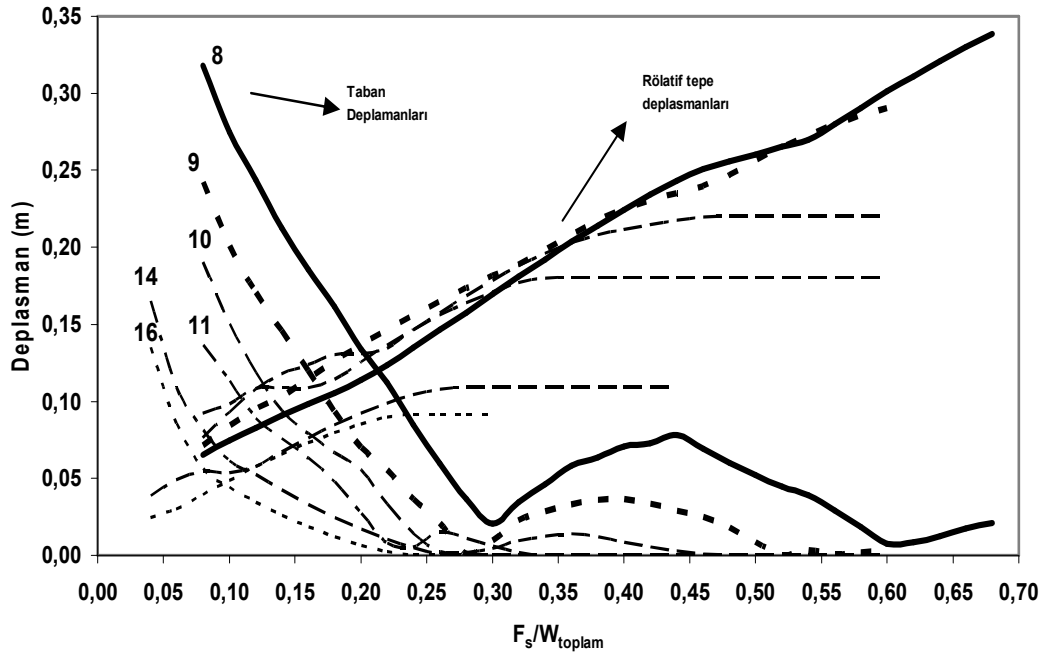
Daha önceki çözümlerde kullanılan harmonik hareketin genliği 0,5 olarak alınmıştı. Genlik değişimi ile sistemdeki değişimi gözlemek için sistemi genliği 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,6 – 0,7 – 0,8 olarak değiştirip çözümler yapıldı. Bu çözümlerin karşılaştırması aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.37 Dokuz katlı yapıda harmonik hareketin genliğinin değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler

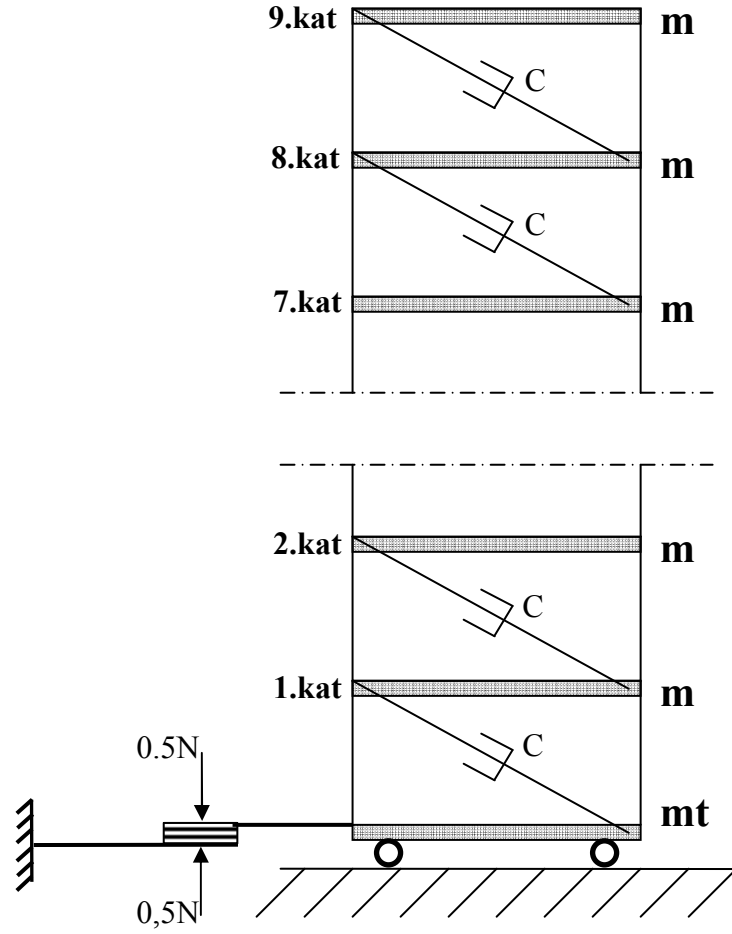
4.2.2.2 Frekans Değiştirilerek Yapılan Çözümler

Daha önceki çözümlerde 10,472 olan harmonik hareketin frekansı 8, 9, 10, 11, 14, 16 olarak değiştirilmiştir ve yapılan çözümler aşağıdaki tabloda karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.38 Dokuz katlı yapıda harmonik hareketin frekansının değişimi ile yapının deplasmanlarında oluşan değişiklikler

4.2.3 Sürtünmeli Sismik İzolatör İle Birlikte Her Katta Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılmış Dokuz Katlı Sistem

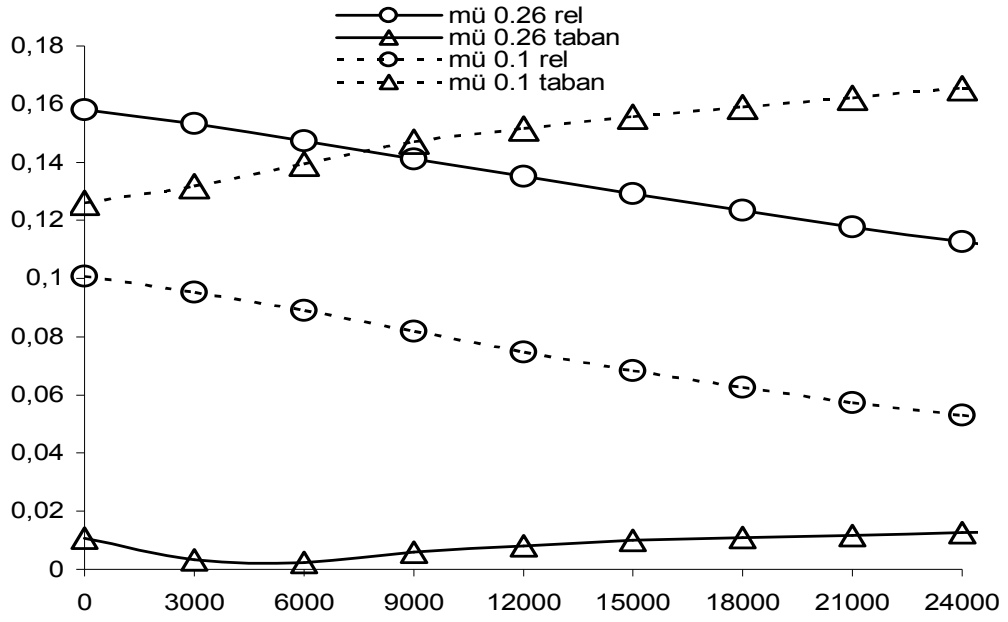


Sürtünmeli sönüm elemanı kullanılmış dokuz katlı her katta sönüm elemanı eklenmiş çerçeve sistem.

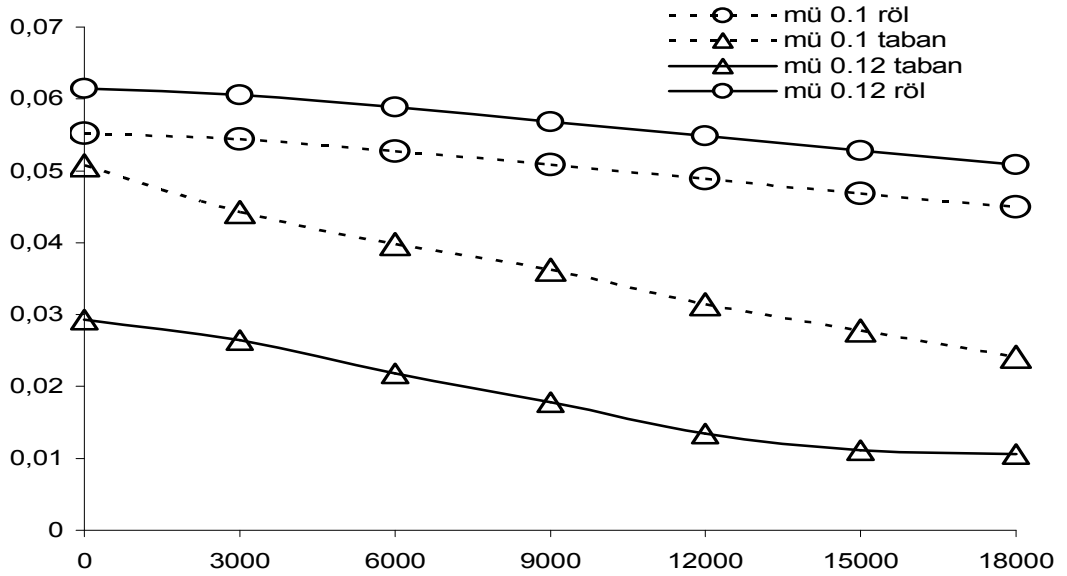
$$C^+ = \begin{bmatrix} c & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & 2c & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 2c & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c & 2c & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c & 2c & -c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 2c & -c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 2c & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 2c & -c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 2c & -c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & c \end{bmatrix}$$

Bu yapının harmonik hareket etkisinde kullanılan sönüm elemanın sönümü değiştirilerek yapılmış çözümleri aşağıdadır.

Harmonik hareket için çözümler

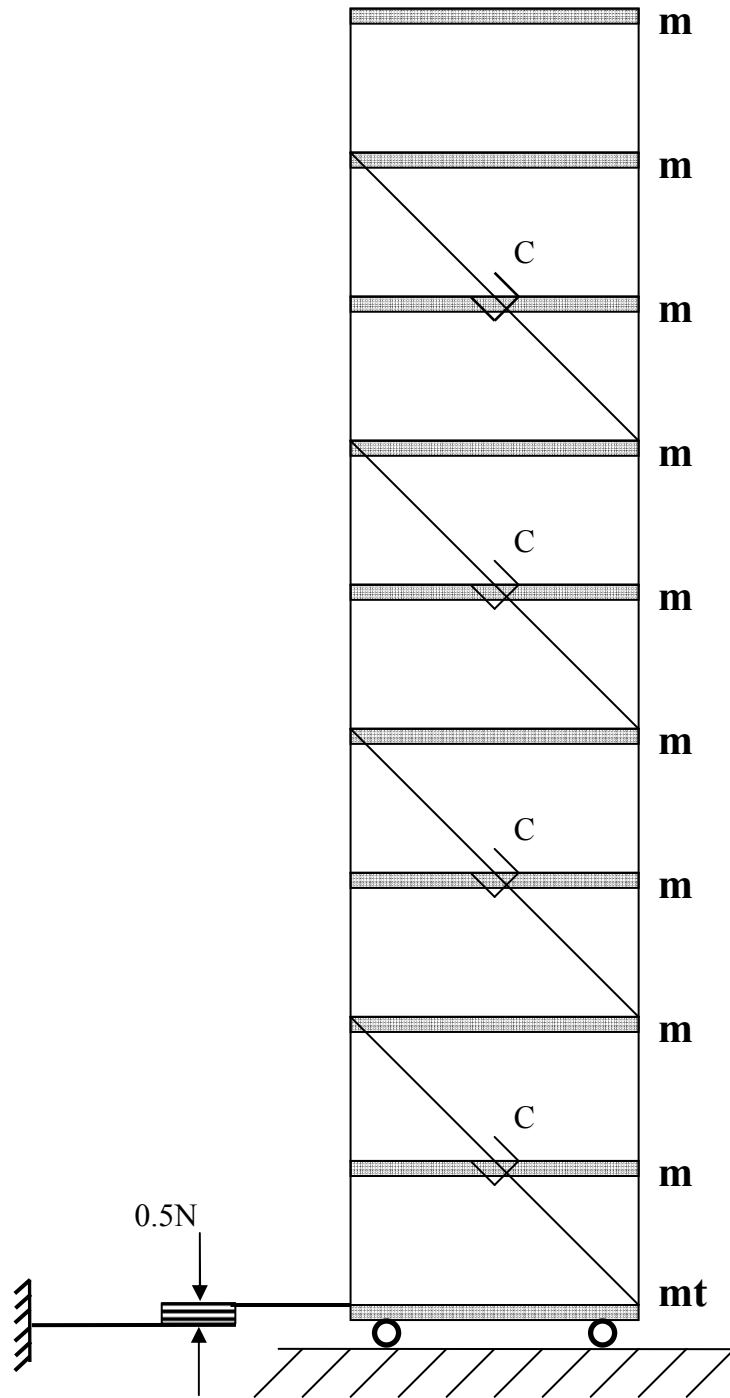


Şekil 4.39 Harmonik hareketin etkisindeki her katta sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.



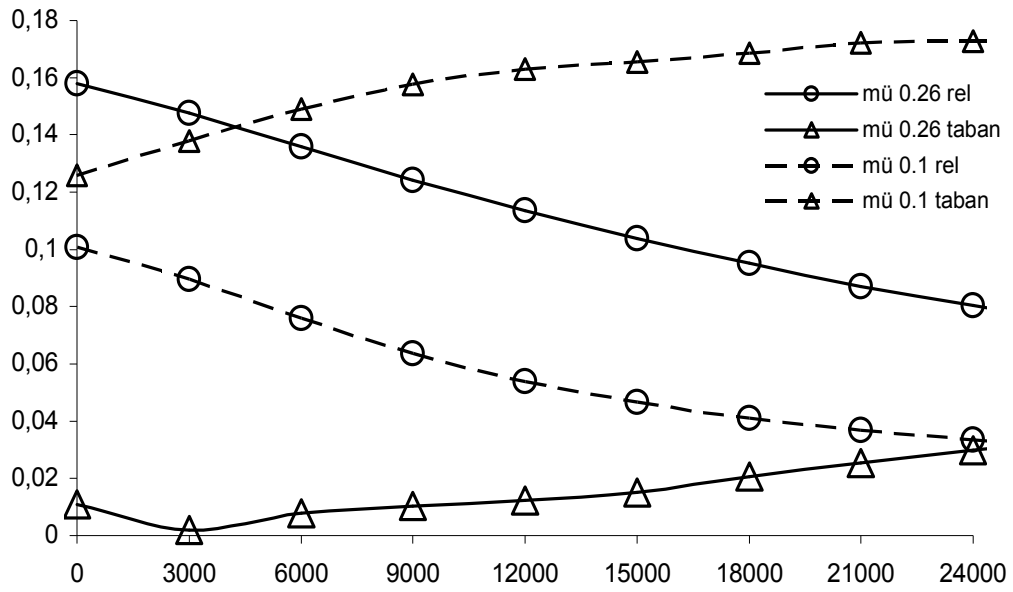
Şekil 4.40 El Centro deprem ivme kaydı etkisindeki her katta sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.

4.2.4 Sürtünmeli Sismik İzolatör İle Birlikte İki Katta Bir Viskoz Sönüm Elemanı Kullanılmış Dokuz Katlı Sistem

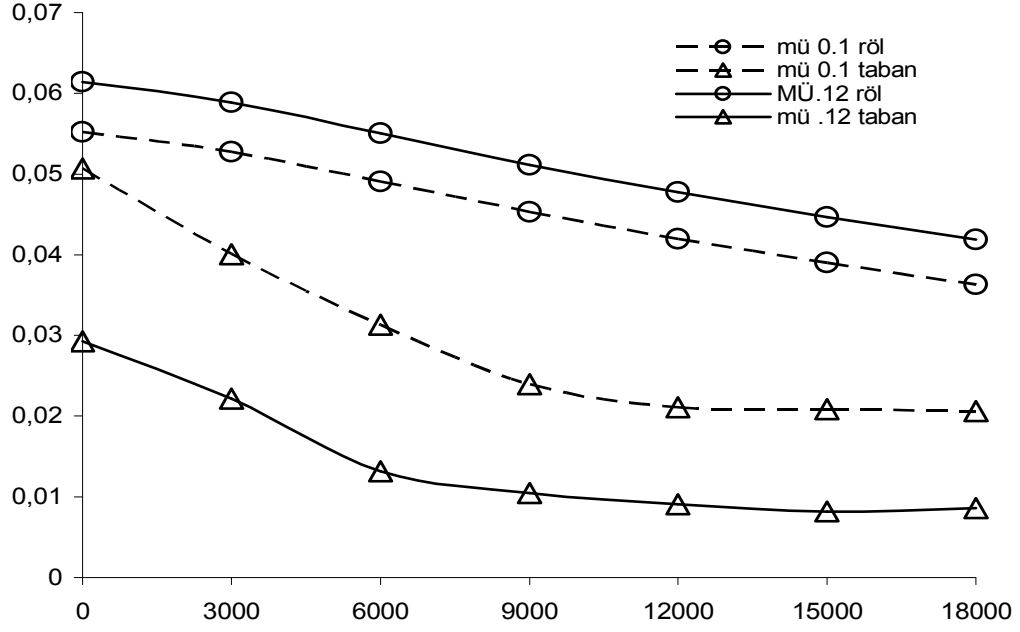


Sürtünmeli sönüm elemanı kullanılmış dokuz katlı iki katta bir sönüm elemanı eklenmiş çerçeve sistem.

$$C^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 & -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C & 0 & 2C & 0 & -C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C & 0 & 2C & 0 & -C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 0 & 2C & 0 & -C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 0 & C \end{bmatrix}$$

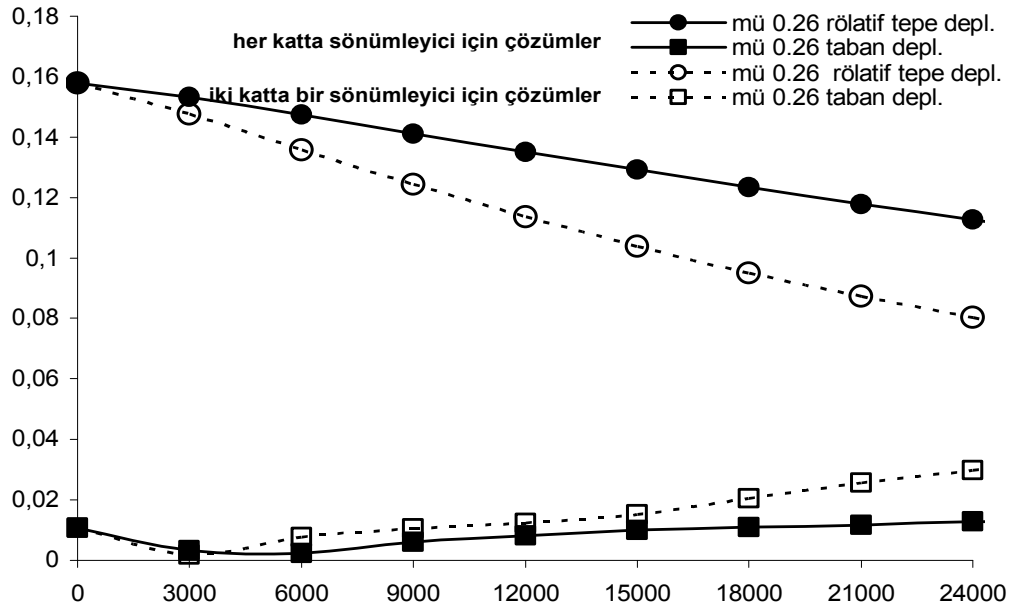


Şekil 4.41 Harmonik hareketin etkisindeki iki katta bir sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.



Şekil 4.42 El Centro deprem ivme kaydı etkisindeki iki katta bir sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanlar.

iki katta bir sönüm elemanı kullanılmış sistemle her katta sönüm elemanı kullanılmış sistemin karşılaştırması



Şekil 4.43 Harmonik hareket etkisindeki her katta ve iki katta bir sönümleyiciler kullanılmış dokuz katlı yapıda oluşan deplasmanların karşılaştırması.

Bu karşılaştırmalı grafikten de görüldüğü gibi sönümleyici iki katta bir yerleştirildiğinde taban deplasmanı artıyor fakat rölatif tepe deplasmanında taban deplasmanına göre daha büyük bir azalma sağlanıyor. Bu da toplam deplasmanda (rölatif tepe deplasmanı + taban deplasmanı), bir azalma sağlandığı anlamına geliyor.

5. SONUÇLAR

Depremleri önceden belirlemek veya engellemek mümkün olmadığına göre yapılarımızı deprem etkilerine hazır olacak şekilde tasarlamak gerekmektedir. Yapıların çökmesini engellemek amacıyla aşırı güçlendirerek şiddetli depremler etkisinde hasar görmesini kabullenmek yerine bu deprem kuvvetlerinin yapıya ulaşmasını kısmen engellemek ve azaltmak yapıyı depremden korumak için daha akılcı ve konforlu bir metot olacaktır.

Yapılan bu çalışmada, sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemlerin, depreme dayanıklı yapı tasarımında son derece olumlu sonuçlar verdiği sayısal örnekler ile gösterilmiştir. Ayrıca sistemlerin modellenmesi ve analizinde, basit çözüm metotları ile gerçeğe yakın sonuçlar bulmanın mümkün olduğu görülmektedir.

Dünyada son zamanlarda yaşanan depremler, özellikle deprem sonrasında operasyonlara devam etmesi beklenen hastane, iletişim merkezleri, itfaiye, enerji santralleri, köprü ve viyadükler gibi yapılarda hasar meydana gelmemesini, yapı içeriğinin korunmasını ve fonksiyonlarının kesintisiz devamını da öngören yeni yönetmeliklerin gelişmesi ihtiyacını göstermektedir. Deprem performans beklentilerindeki bu artış yaygınlaştıkça ve yönetmeliklerde yer buldukça geleneksel yöntemlere kıyasla sismik izolasyon çok daha avantajlı konuma gelecek ve kullanımı hızla artacaktır.

Bu sistemlerin kullanımının, yapım maliyetlerinde önemli derecede azalma sağlayabileceği de düşünüldüğünde, sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemlerin, depreme dayanıklı yapı tasarımında elimizdeki en önemli araçlardan olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kelly JM.** 1986, Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 5(3): 202-217.
- [2] **Olariu, I.,** 1994, *Passive Control and Base Isolation, Proceedings of the 10th Conference on Earthquake Engineering*, Volume 1, Vienna s. 703-713.
- [3] **Naeim F, Kelly JM.** 1999, *Design of Seismic Isolated Structures; From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York,
- [4] **Den Hartog JP.** 1931, Forced vibration with combined coulomb and viscous friction. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (ASME)*; 53: 107
- [5] **Westermo B, Udvardia F.** 1983, Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 11: 135-146.
- [6] **Mostaghel N, Hejazi M, Tanbakuchi J.** 1983, Response of sliding structures to harmonic support motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 11: 355-366.
- [7] **Mostaghel N, Davis T.** 1997, Representations of Coulomb friction for dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 26: 541-548.
- [8] **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

- [9] **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.
- [10] **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
- [11] **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.
- [12] **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.
- [13] **Wang YP, Liao WH.** 2000, Dynamic analysis of sliding structures with unsynchronized support motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 29:297-313.
- [14] **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.
- [15] **Mokha AS, Constantinou MC, Reinhorn AM.** 1990, Teflon bearing in base isolation. I: testing: *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 116(2):438-454.
- [16] **Mokha AS, Constantinou MC, Reinhorn AM.** 1990, Teflon bearing in base isolation. II: Modeling. : *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 116(2):455-474.
- [17] **Meirovitch L.** 1990, *Dynamics and Control of Structures*. Wiley: New York

- [18] **Clough RW, Penzien J.** 1993, *Dynamics of Structures*. Mc Graw-Hill, New York, International editions.
- [19] **Chopra AK.** 1995, *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- [20] **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.
- [21] **Lu LY, Yang YB.** 1997, Dynamic response of equipment in structures with sliding support. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 26:61-77.
- [22] **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.
- [23] **Meirovitch L.** 1980, *Computational Methods in Structural Dynamics*, Sijthoff & Noordhoff, Netherlands
- [24] **Meirovitch L.** 1997, *Principle and techniques of vibrations*, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall
- [25] **Mostaghel N, Tanbakuchi J.** 1983, Response of sliding structures to earthquake support motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 11: 729-748.
- [26] **Mostaghel N, Khodaverdian M.** 1987, Dynamics of resilient-friction base isolator (R-FBI). *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 15: 379-390.

- [27] **Mostaghel N, Khodaverdian M.** 1988, Seismic response of structures supported on R-FBI system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 16: 839-854.
- [28] **Younis CJ, Tadjbakhsh IG.** 1984, Response of sliding rigid structure to base excitation. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*; 110: 417-432.
- [29] **Albanesi, T., Nuti, C.,** 1999, Seismic response of nonlinear structures using the concepts of variable damping response spectrum

ÖZGEÇMİŞ

Tansu IŞIK, 20.03.1979'da Ordu'da doğdu. Lise öğrenimini Ordu Atatürk Lisesinde tamamladı. 1996-1997 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı ve 1997-1998 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne geçiş yaptı. 11.09.2001'de aynı bölümden mezun oldu. 2001 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana bilim dalı Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans Programına kaydoldu.