

**Değişken Sönümlenme Katsayılı Amortisörlerin
Deprem Simülasyonu ile Üç Katlı Bir Yapıya Olan
Etkisinin Değerlendirilmesi**

Proje No: 107M353

Yrd.Doç.Dr. Gürsoy TURAN
Yrd.Doç.Dr. Ersin AYDIN

OCAK 2011
İZMİR

Önsöz

TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu tarafından desteklenmiş olan “Değişken Sönümleme Katsayılı Amortisörlerin Deprem Simülasyonu ile Üç Katlı Bir Yapıya Olan Etkisinin Değerlendirilmesi” adlı bu araştırmanın, depreme dayanıklı yapı tasarımı konusundaki yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve bu teknolojik elemanların yapılar üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında yol göstereceği kanaatindeyiz.

Deneysel ve teorik olarak yapılan bu araştırma, yarı aktif olarak kontrol uygulanan yapıların dinamik etkiler altındaki gerçek davranışlarının belirlenmesi, bu davranışların matematik olarak da modellenmesi, kontrol elemanlarının imal edilmesi ve malzeme davranış modellerinin ortaya çıkarılması ve bu aşamalarda teori ile deney sonuçlarının uyum içinde olması açısından oldukça faydalı sonuçlar ortaya koymuştur.

Bu araştırma projesine verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Saygılarımızla,

ÖZET

Bu çalışmada deprem etkisi altında üç katlı bir model yapının yarı aktif olarak kontrollü dinamik davranışı deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. İlk olarak tek yönlü deprem simülatörü üzerine boyutları normal ölçülere göre indirgenmiş üç katlı çelik yapı inşaa edilmiştir. Seçilen model yapının dinamik karakteristikleri önce teorik olarak belirlenmiş daha sonra deneyler ile bulunarak, sonuçların uyumluluğu gözlenmiştir. Yapıyı yarı aktif olarak kontrol edecek olan amortisör, yatlarda kullanılan bir dümen pistonu modifiye edilerek ve bir deşarz hattı eklenerek imal ettirilmiştir. Eklenen deşarz hattına yerleştirilen bir vana ve bu vananın üstüne vanayı kontrol edecek bir step motor monte edilmiştir. Tasarlanan amortisör yarı aktif bir sönümleyici olarak yapının birinci katı ile zemin arasına yerleştirilmiştir. Bu işlemde önce tasarlanan sönüm elemanının matematik modelinin kurulması için amortisör deneyleri yapılmış ve matematik model ortaya çıkarılmıştır. Kontrol işlemi, deşarz hattı üzerindeki vananın açıklığının değiştirilmesi ve bu değişime göre sönümleyici amortisörün sönüm katsayısının değişimi ile gerçekleştirilmiştir. Model yapının deprem etkisi altındaki davranışı amortisörsüz ve amortisörlü olarak deneyler ile test edilmiştir. Ayrıca, amortisörün sönüm özelliği sabit tutularak da deneyler yapılmış ve sonuçlar teorik hesap değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler ve sayısal analizler göstermiştir ki, yarı aktif kontrol edilen amortisör model yapının deprem davranışını oldukça iyileştirmektedir.

Anahtar Kelimeler:

Değişken sönümlenmeli amortisör, yapı kontrolü, yapı davranış benzetmesi, deprem davranışı, sönümleyiciler

ABSTRACT

In this study, the dynamic response of a semi actively controlled three storey model structure is investigated experimentally and theoretically. Firstly, the downsized three storey steel structure is constructed on one directional shaking table. After the dynamic characteristics of the structure chosen are theoretically obtained, the dynamic characteristics of the structure are found from the experiments and the compatibility of the results is observed. Semi active damper is manufactured by modifying a rudder piston which is utilized in the yachts and a discharge line is added to the damper. A valve which is added to the discharge line and a step motor which is mounted on the valve to control the valve are placed. Semi active damper is located between the base and the first floor. Before this stage, for determining the mathematical model of the manufactured damper, damper experiments are performed and the mathematical model of the damper is revealed. Control process is performed by arranging the valve orifice and changing the damping coefficient of the damper according to the orifice change. The seismic response of the model structure is tested with damper and without damper. Moreover, by holding the damper coefficient constant, some experiments are done and the results are compared by the theoretical values. The experimental and numerical results show that the semi actively controlled damper improves the model structure's seismic response.

Keywords:

Variable orifice damper, structural control, structural response simulation, earthquake response, dampers.

İçindekiler

Şekil Listesi	v
Tablo Listesi	vii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
3. GEREÇ ve YÖNTEM	6
3.1. Model Bina	6
3.2. Kullanılacak Depremler	7
3.3. Modelin Stabilite Kontrolü	11
3.4. Sönümlemesi Ayarlanabilir Amortisör	15
3.4.1. Amortisör Modeli	16
3.5. Amortisörün Sönüm Katsayısının Değişiminin Deprem Etkisi Altındaki Yapı Davranışına Etkisi	20
3.5.1. Sönümleyicili Yapının Mekanik Modeli	21
3.6. Amortisörün Optimum Yerleşiminin Belirlenmesi	29
3.6.1. Problemin Formülasyonu	30
3.6.2. Optimizasyon Problemi	31
3.6.3. Optimallik Kriterleri	32
3.6.4. Çözüm Algoritması	32
3.6.5. Optimizasyon Metodunun Model Yapıya Uygulanması	34
3.7. Kontrol Yasasının Oluşturulması ve Sayısal Analiz	37
3.7.1. Deplasman Kontrolü	39
3.7.2. İvme Kontrolü	42
3.7.3. Kalman Filtresi Tasarımı	45
3.8. Yarı-Aktif Sismik Sönümleyicinin Kazanç Programlamalı Kontrolü	47
3.8.1. Kazanç Programlamalı Kontrol	48
3.8.2. Yarı-Aktif Sönümleyicili Taban İzolasyonlu Sistemin Matematik Modeli	49
3.8.3. Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR)	49
3.8.4. Değişken Vana Açıklıklı Sönümleyici	50
3.8.5. Üst Kontrolcü	50
3.8.6. Model Bina ve Sismik Zemin İzolasyonu	51
3.8.7. Sayısal Benzetimler	52
3.9. Yapı Davranış Deneyleri	58
3.9.1. Model Yapının Serbest Titreşim Karakteristiklerinin Ölçümü	58
3.9.2. Model Yapının Deprem Davranışının Ölçülmesi	61
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	65
Kaynaklar	67

Şekil Listesi

Şekil 1: Yapılarda sönümleyici yerleşimleri.....	4
Şekil 2: Model bina görüntüsü.....	6
Şekil 3: Simülasyonda kullanılacak depremlerin ivme spektrum eğrileri.....	7
Şekil 4: Simülasyonda kullanılacak depremlerin hız spektrum eğrileri.....	8
Şekil 5: Simülasyonda kullanılacak depremlerin deplasman spektrum eğrileri.....	8
Şekil 6: El Centro depremi etkisi altında model binanın taban kesme kuvveti değişimi.....	9
Şekil 7: 17 Ağustos Sakarya Depremi etkisi altında model binanın taban kesme kuvveti değişimi.....	10
Şekil 8: 12 Kasım Bolu depremi etkisi altında model binanın taban kesme kuvveti değişimi.....	10
Şekil 9: Tek katlı çerçeve modeli.....	12
Şekil 10: Ötelenmiş tek katlı model çerçevede iç kuvvetler.....	13
Şekil 11: Ayarlanabilen amortisör şeması ve fotoğrafı.....	15
Şekil 12: Davranış ölçümü yapılan amortisörün bağlantısı.....	16
Şekil 13: Amortisör kuvvet ölçümleri (açı=40-52 derece arası).....	19
Şekil 14: Amortisör kuvvet ölçümleri (açı=0-38 derece arası).....	19
Şekil 15: Küresel vananın farklı açılar için en kesit görünümü.....	20
Şekil 16: Üç serbestlik dereceli yapının mekanik modeli.....	22
Şekil 17: Maximum görelî kat deplasmanlarının ile değişimi.....	23
Şekil 18: Maximum görelî kat hızlarının ile değişimi.....	24
Şekil 19: Maximum kat deplasmanlarının ile değişimi.....	25
Şekil 20: Maximum kat hızlarının ile değişimi.....	26
Şekil 21: Maximum kat ivmelerinin ile değişimi.....	27
Şekil 22: Maximum mutlak kat ivmelerinin ile değişimi.....	28
Şekil 23: Sönümleyicili yapının modeli.....	30
Şekil 24: Tasarım adımlarında sönüm katsayısının değişimi.....	35
Şekil 25: Sönüm katsayısının optimum ve üniform yerleşimleri.....	36
Şekil 26: Tasarım adımlarında amaç fonksiyonunun değişimi.....	36
Şekil 27: Tasarım adımlarında amaç fonksiyonunun değişimi.....	36
Şekil 28: Sönümleyicili ve sönümleyicisiz yapıdaki tasarımlar için El Centro K-G deprem ivme kaydı kullanılarak bulunan maksimum kat deplasmanları.....	37
Şekil 29: Üç katlı bina modeli ile birinci kata yerleştirilen amortisör.....	38
Şekil 30: Üç katlı bina modeli ile birinci kata yerleştirilen amortisör.....	40
Şekil 31: Deplasman Kontrolü: 1940 Imperial Valley (El Centro İstasyonu) depremi etkisi.....	41
Şekil 32: Deplasman Kontrolü: 12 Kasım 1999 Düzce (Bolu İstasyonu) depremi etkisi.....	42
Şekil 33: Deplasman Kontrolü: 17 Ağustos 1999 Kocaeli (Sakarya İstasyonu) depremi.....	42
Şekil 34: İvme Kontrolü: 1940 Imperial Valley (El Centro İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları.....	44
Şekil 35: İvme Kontrolü: 12 Kasım 1999 Düzce (Bolu İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları.....	44
Şekil 36: İvme Kontrolü: 17 Ağustos 1999 Kocaeli (Sakarya İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları.....	45
Şekil 37: Temel kontrol algoritması ve elemanları.....	46
Şekil 38: Gürültülü 1. kat deplasman ölçümü.....	47
Şekil 39: Kalman Filtresi ile 1. kat hızı.....	47
Şekil 40: Kalman filtresi ile 1. kat deplasmanı.....	47
Şekil 41: Denetleyici kontrol.....	48
Şekil 42: 1999 Düzce depreminin Bolu istasyonu kaydının Doğu-Batı bileşeni.....	52
Şekil 43: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat ötelenmeleri.....	53
Şekil 44: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat hızları.....	54
Şekil 45: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat mutlak ivmeleri.....	54
Şekil 46: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için sönümleyici kuvvetleri.....	55
Şekil 47: Değiştirilmiş 1999 Düzce depreminin Bolu istasyonu kaydının Doğu-Batı bileşeni.....	56
Şekil 48: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat ötelenmeleri (değiştirilmiş deprem için).....	56

Şekil 49: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat hızları (değiştirilmiş deprem için).....	57
Şekil 50: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat mutlak ivmeleri (değiştirilmiş deprem için).....	57
Şekil 51: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için sönümleyici kuvvetleri (değiştirilmiş deprem için).....	58
Şekil 52: Yapının serbest titreşimi (1. mod davranışı, deneysel).....	59
Şekil 53: Yapının serbest titreşimi (2. mod davranışı, deneysel).....	60
Şekil 54: Yapının serbest titreşimi (3. mod davranışı, deneysel).....	61
Şekil 55: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının 1. katının yer değiştirmesinin zamanla değişimi....	62
Şekil 56: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının 2. katının yer değiştirmesinin zamanla değişimi....	62
Şekil 57: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının 3. katının yer değiştirmesinin zamanla değişimi....	62
Şekil 58: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının amortisörlü ve amortisörsüz 1 kat deplasman davranışları (Deneysel).....	63
Şekil 59: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının amortisörlü ve amortisörsüz 2 kat deplasman davranışları (Deneysel).....	63
Şekil 60: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının amortisörlü ve amortisörsüz 3 kat deplasman davranışları (Deneysel).....	64

Tablo Listesi

Tablo 1: Yapısal kontrol sistemleri.....	4
Tablo 2: Kullanılan depremlerin oluşturduğu en büyük kesme kuvvetleri ve deplasmanlar.....	9
Tablo 3: Kolon ve kiriş ebadları.....	14
Tablo 4: Sinüs dalgalı bir hareketin $g=0.02$ m genlik için frekansına bağlı olarak en büyük hız değerleri.....	17
Tablo 5: Deplasman kontrolü: En büyük kontrol kuvvetleri.....	41
Tablo 6: İvme kontrolü: En büyük kontrol kuvvetleri.....	45
Tablo 7: Model yapının serbest titreşim karakteristiklerinin karşılaştırılması (teorik ve deneysel).....	59

1. GİRİŞ

Dünyada son yıllarda yapı tasarımı konusunda geleneksel yöntemlere ek olarak, yapıların özellikle dinamik etkilerden korunması için yapı kontrol sistemleri ortaya çıkmıştır. Makine, haberleşme, elektrik-elektronik, uçak teknolojileri ve benzeri pek çok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılan kontrol sistemleri, son 30 yıldır yapıların özellikle sismik ve rüzgar etkilerine karşı korunmasında tercih edilmektedir.

Yapı kontrolü, binaya yer hareketiyle transfer edilen enerji miktarını azaltmak ya da sismik enerji binaya transfer edildikten sonra bir kısmını sönmlemek amacıyla kullanılabilir (SYMANS, 1999). Pasif, yarı-aktif, aktif, ve karma yapı kontrol sistemleri bulunmaktadır. Mevcut çalışmada hem bileşenlerinin avantajlarını taşıdığı hem de bileşenlerinin zayıf özelliklerini tamamladığı için karma sistemlerle ilgilenilmiştir.

Sismik olarak izole edilmiş bir yapıya eklenen pasif sönm, izolasyon sisteminin deplasmanını sınırlandırmak için gerekli enerji sönmlemeyi sağlar. Bununla birlikte pasif sönm seviyesi arttırıldıkça sönmleyici tarafından sağlanan kuvvet de artar. Sönm katsayısı ayarlanabilen yarı-aktif bir sönmleyici içeren akıllı bir karma kontrol sistemi kullanmak, izolasyon sisteminin deplasmanını kontrol ederken eşzamanlı olarak sönm kuvvetini de sınırlandırmak için olası bir çözümdür (SYMANS, 1999).

Sönmleyiciler yapıdan enerji yutmak amacıyla kullanılırlar. Bu yüzden sönmü arttırdıkça görel deplasmanlar ve hızlar azalır, fakat eğer sönmleyicilerin rijitliğe ciddi bir katkısı varsa ivmeler artacaktır. Bu ikinci davranış sistem için zararlı değilse, bir sönmleyiciyi kontrol etme işi gereksiz olur. Çünkü en yüksek sönm değeri en iyi tepkiye sebep olacağı için sisteme bir kontrolcü yerleştirme ihtiyacı olmaz. Yapı tipi binalar için sönmleyicilerin kontrolünün avantajlı olduğu tek durum, binanın sismik izolatörlü olduğu durumdur. Bu tip yapılarda sönmleyicinin rolü izolatörün deplasmanını sınırlandırmaktır ki böylece izolatör bozulmayacaktır. Bir taban izolatörüne paralel olarak yerleştirilmiş sönmleyicinin varlığı yapının sismik izolasyonunun etkinliğini açıkça düşürmektedir. Fakat, bunun yanında, sismik izolatörleri yüksek deplasmanlardan koruyacaktır. Böylece taban izolasyon sistemi güvenlik altında olacaktır.

Mevcut araştırmada taban izolasyon sistemine paralel olarak yerleştirilmiş bir yarı-aktif sönmleyici incelenmiştir. Değişken vana açıklıklı sönmleyiciler yarı-aktif aygıtlardır. Yarı aktif kontrol, pasif ve aktif kontrolden sonra ortaya çıkan bir yeniliktir. Deprem esnasındaki enerjiyi absorbe etmek için kurulan pasif sistemlerin sönm özellikleri sabittir. Dış enerjiye ihtiyaç duymazlar. Aktif sistemler ise dışarıdan alınacak büyük enerjiye ihtiyaç duyarlar. Hesaplanan bazı kontrol kuvvetlerini üretecek enerji bulunamayabilir. Bu durum, piller ile çalışan yarı aktif olarak yapıyı kontrol edebilecek elemanların geliştirilmesine sebebiyet vermiştir. Bu elemanların sönm etkileri yapıya gelecek olan kuvvete göre hesaplanmakta ve her bir zaman anında değiştirilebilmektedir. Bu değişimi yapmak için küçük piller yeterlidir. Bu özellik yarı aktif kontrolü aktif kontrole göre daha güvenli ve kullanılabilir kılar.

Sönmleyiciler, kontrol edilen yapı sisteminin mekanik enerjisinin bir kısmını ısıya dönüştürerek uzaklaştırırlar ve bu şekilde sistemin tepkilerini azaltabilirler. Değişken vana açıklıklı sönmleyicilerde sönm değerleri vana açıklığı ayarlanarak değiştirilebilir. Bu tip

değişken sönümlü kontrol aygıtlarına uygulama fikri ilk olarak 1990 yılında Feng ve Shinozuka tarafından ortaya atıldı (FENG, 1990). İlk çalışmalarda, yarı aktif sistemlerin, yapısal davranışı pasif sistemlere ve tamamen aktif sistemlere göre daha iyi düşürdüğü gözlenmiştir (DYKE, 1996). Kontrol edilebilir bir valfin olduğu klasik hidrolik akışkan sönümleyicilerin ilk uygulaması ve depremde test edilmesi köprülerin hareketini kontrol etmek için olmuştur (FENG, 1990), (DYKE, 1996), (KAWASHIMA, 1992). Sonrasında kontrol edilebilir bir deşarj hattına sahip sönümleyiciler, Buffalo'da ABD ulusal deprem mühendisliği araştırma merkezinde çalışılmıştır (SHINZOKU, 1992), (SYMANS, 1994), (SYMANS, 1996). Trafik yüklerinden meydana gelen titreşimleri engellemek için tek açıklıklı bir köprüde değişken deşarj hattı olan bir yük uygulayıcı için deneyler yapılmıştır (SACK, 1993), (PATTEN, 1994).

Değişken deşarj hattı olan sönümleyicilerin olduğu yapılar sismik olarak sarsılarak bu modeller hem deneysel hem de teorik simülasyonlar ile gösterilmiştir (HROVAT, 1983), (MIZUNO, 1992), (SACK, 1994), (PATTEN, 1994), (KURATA, 1994), (LIANG, 1995). Wongprasert ile Symans'ın araştırmalarında, 3 katlı ve zeminden izole edilmiş çelik bir bina incelenmiştir (WONGPRASERT, 2005). Onların çalışmalarında, zemin ile binanın tabanı arasında sönümleme katsayısı değiştirilebilen bir amortisör bulunuyordu. Binanın her bir katı yaklaşık 1000 kg ağırlığında olup yapının birinci doğal periyodu 0.5 saniye idi. Onlar, elastomer pabuçların ve amortisörün modellerini deneysel çalışmayla bulmuşlardır. Symans ve Constantinou'nun yapmış oldukları deneylerde sönümleme kuvvetinin, $F=C*V_c*v$, denklemi ile gösterilebildiği belirtilmiştir. Burada, F ise amortisörün oluşturduğu kuvvetini, C sönüm katsayısını, V_c uygulanan kontrol voltajını, ve v amortisör uçları arasındaki hız farkını ifade eder. Kontrol voltajı belli sınırlar içerisinde olduğu sürece doğrusal bir davranış elde edilmiştir. Sato ve ekibi tarafından yapılan çalışmada da en yüksek hız veya kuvvet değerlerine yaklaşıldığında doğrusallığın kaybolduğu belirtilmektedir (SYMANS, 1999).

1999 yılında Patten ve arkadaşları, 1993'de Sack ve Patten tarafından tasarlanmış olan kontrol edilebilir vana açıklıklı bir hidrolik gerçekleyici gerçek boyutlu bir karayolu köprüsüne uyguladılar (PATTEN, 1999). 1997'de Symans ve Constantinou ve 1999'da Symans ve Kelly değişken vana açıklıklı sönümleyicileri binaların ve köprülerin sismik tepkilerin azaltılması uygulamaları için incelediler (SYMANS, 1997), (SYMANS, 1999).

Aldemir, yer hareketini Kalman filtresiyle tahmin eden bir kontrol algoritması önerdi. Önerilen algoritma, en yüksek değerler dışında, tamamen optimal olan bir kontrol sisteminin çıktılarıyla çok yakın sonuçlar veriyordu (ALDEMİR, 2009). Turan değişken vana açıklıklı yarı-aktif sönümleyicileri iki yönde yerleştirerek binanın yer itkisine karşı üç boyutlu kontrolünü gerçekleştirdi (TURAN, 2010).

Son gelişmelerin anlatıldığı makalelerde yapılan değerlendirmelerde kontrollü amortisörlerin yakın geleceğin kontrol aygıtları olacağı belirtilmektedir. Japonya ve Kore'de 5 katlıdan 27 katlı binalara kadar kullanımı bulunmaktadır. Yarı aktif kontrol elemanları, Kore'de de bir havaalanı trafik kontrol kulesinin sarsıntılarını azaltmak için kullanılmıştır. Başka bir uygulama olarak Kore'deki bir hızlı tren (350 km/h) köprüsü de gösterilebilir. Kore'de köprü sarsıntılarını azaltmak için, paralel deşarj hattı kontrol edilebilen amortisörler tasarlanmıştır (SPENCER, 2003).

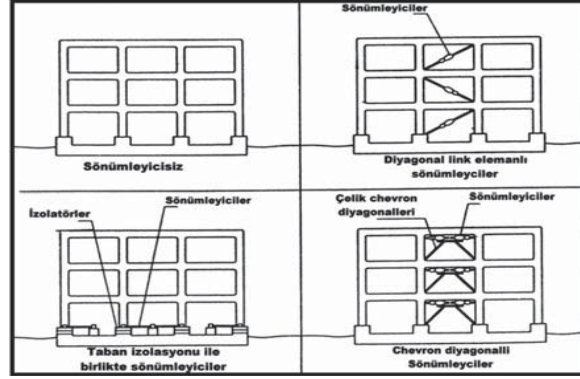
2. GENEL BİLGİLER

Kuvvetli yer hareketleri, kasırgalar ve tsunamiler gibi yıkıcı dinamik etkiler altındaki yapıların nasıl korunacağı fikri son yıllarda yaygın bir araştırma konusu olmuştur. Gelişmiş ülkelerde dahi ileri teknolojik malzeme ve teknikler kullanıldığı halde kuvvetli bir deprem veya kasırgada yapıların kesinlikle hasar görmeyeceği veya yıkılmayacağı garanti edilememektedir. Bu gibi dinamik kuvvetleri önceden tespit etmek mümkün olmadığından yapıların dizaynı belirli kriterleri sağlayan tasarım yüklerine göre yapılmaktadır. Dolayısıyla yapı tasarım yükünden farklı bir yüke maruz kaldığında ciddi hasarlar görebilmektedir. Geleneksel yaklaşımda yapıya iletilen sismik enerjinin tüketilmesi esas olarak plastik mafsalların oluşumu ile gerçekleşmektedir. Bu da yapının hasar görmesini kabul etme anlamına gelmektedir. Sismik enerjiyi yapısal hasara razı olarak tüketme yerine ek sönüm sistemleri ile tüketme alternatif bir yaklaşım olarak görülmektedir. İstatistikler göstermektedir ki maddi hasarın ve can kayıplarının önemli bir kısmı yapısal olmayan elemanların yüksek ivmeler altında hareket etmesi sonucunda oluşmaktadır. Dolayısıyla artık taşıyıcı sistemin çökmemesi yeterli görülmemekte buna ek olarak yapısal olmayan elemanların ve değerli hassas cihazların da korunması istenmektedir. Bir başka önemli nokta ise malzeme teknolojisindeki gelişmeler neticesinde malzeme mukavemeti artarken rijitliğin aynı oranda artmamasıdır.

Özellikle esneme kapasitesi fazla olan yüksek katlı çelik yapılarda büyük deplasmanların pratik açıdan kontrol edilmesi ek kontrol sistemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Son yıllarda yapıları ve yapısal olmayan elemanları dinamik dış etkilere karşı daha iyi korumak için mevcut klasik tasarıma ek olarak onu tamamlayıcı yeni yaklaşımlar üzerinde çalışılmaktadır. Bu yaklaşımlar, yapıya gelen etkileri o anda ölçüp karşı kuvvetler uygulayacak veya etkiyi kendi içinde sönümleyecek malzemeler ve sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. İnşaat mühendisliği alanındaki bu tür yeni yaklaşımlara dayalı teorik, deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar hakkında geniş bilgiler literatürde mevcuttur. Bu çalışmaların ortak sonucu bu tür yeni sistemlerin, gerek yeni yapılacak binalarda, gerekse mevcut binaların rehabilitasyonu veya güçlendirilmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği yönündedir. Dinamik etkilere karşı tasarıma yönelik yeni yaklaşımlar esas olarak aktif, pasif ve yarı aktif olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Aktif kontrol sistemlerinde kontrol kuvvetlerini üretebilmek için harici bir güç kaynağına ihtiyaç vardır. Zemine ve yapıya yerleştirilen sensörler aracılığıyla elde edilen bilgiler kontrol bilgisayarına iletilerek daha önceden belirlenmiş bir algoritmaya göre kontrol kuvvetleri hesaplanır. Bu kuvvetler kuvvet üreten mekanizmalar (actuator) aracılığıyla yapıya uygulanır. Pasif kontrol sistemleri ise harici bir güç kaynaklarına ihtiyaç duymazlar ve sismik enerjiyi kendi içlerinde sönümlerler. Değişken dinamik etkilere adaptasyon kabiliyeti olmayan bu sistemler çalışma prensipleri ve malzeme özellikleri itibari ile farklılıklar gösterir. Şekil 1'de görüldüğü gibi sönümleyicileri yapıya farklı şekillerde yerleştirmek mümkündür.

Yapıya eklenecek sönümün optimum miktarı ve bu sönümün yapı yüksekliği boyunca optimum dağılımı ayrı bir inceleme konusudur. Yarı aktif kontrol sistemleri sönüm ve rijitlikleri deprem esnasında kontrol edilebilen sistemlerdir. Aktif kontrolde büyük enerji ihtiyacı olmakla birlikte, yarı aktif sistemlerde gereken enerji çok küçük bataryalarla bile sağlanabilmektedir. Yarı aktif sistemlerin büyük bir kısmı elektrik veya manyetik alana hassas özel sıvılar içermektedir. Önceden belirli kontrol algoritmalarına bağlı olarak elektrik veya manyetik alan şiddeti değiştirilerek yarı aktif sistemlerin mekanik özellikleri kontrol edilebilmektedir.

Yapıya eklenecek sönümün optimum miktarı ve bu sönümün yapı yüksekliği boyunca optimum dağılımı ayrı bir inceleme konusudur. Yarı aktif kontrol sistemleri sönüm ve rijitlikleri deprem esnasında kontrol edilebilen sistemlerdir. Aktif kontrolde büyük enerji ihtiyacı olmakla birlikte, yarı aktif sistemlerde gereken enerji çok küçük bataryalarla bile sağlanabilmektedir. Yarı aktif sistemlerin büyük bir kısmı elektrik veya manyetik alana hassas özel sıvılar içermektedir. Önceden belirli kontrol algoritmalarına bağlı olarak elektrik veya manyetik alan şiddeti değiştirilerek yarı aktif sistemlerin mekanik özellikleri kontrol edilebilmektedir.



Şekil 1: Yapılarda sönümleyici yerleşimleri

Karma sistemler; aktif, yarı aktif ve pasif kontrol sistemlerinin bir arada kullanılması durumudur. Örneğin, çelik bir yapı visko-elastik sönümleyiciler ile donatılmış ve buna ek olarak aynı zamanda en üst katta aktif kütleli sönümleyici yerleştirilmiş olabilir. Benzer şekilde, bazı yapılara tabanda sismik izolatörler yerleştirilmiş ve izolatör seviyelerinde büyük genlikli hareketlere karşı bu bölgelerde yarı aktif veya pasif olarak çalışan sönümleyiciler eklenmiş olabilir. Karma sistemler yüksek enerji ihtiyacı olmadan çalışabilmektedir. Aktif, yarı aktif ve pasif sistemlerin geliştirilmesi ve yapı içinde kullanımına yönelik çalışmalarda son yıllarda ciddi bir artış vardır. Yapıların korunmasına yönelik modern sistemler Tablo 1'de verildiği gibi üç gruba bölünebilir.

Tablo 1: Yapısal kontrol sistemleri

Sismik İzolasyon	Pasif Kontrol	Yarı Aktif ve Aktif Kontrol
Düşük sönümlü kauçuk izolatörler	Metalik sönümleyiciler	Aktif kuvvet veren sistemler
Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler	Visko-elastik sönümleyiciler	Aktif kütleli sistemler
Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler	Sürtünme tipi sönümleyiciler	Değişken rijitlik ve sönüm veren sistemler
Kayma tipi izolatörler	Viskoz akışkanlı sönümleyiciler	Akıllı malzemeler
Yaylı sistemler	Ayarlı kütle sönümleyicileri	
	Ayarlı akışkan sönümleyicileri	
	Diğer sönümleyiciler	

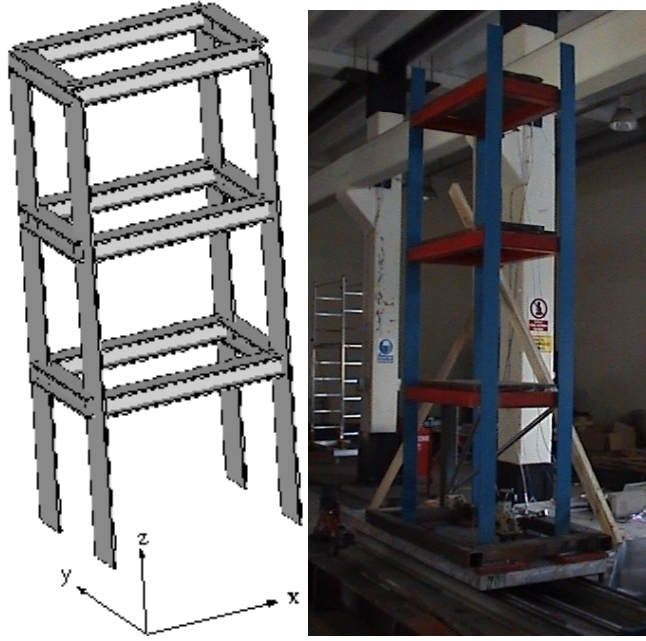
Aktif kontrol sistemlerine göre dış enerji ihtiyacı çok daha az olan yarı aktif kontrol sistemleri önemli gelişmelerden biridir. Sismik hareket esnasında aktif sistemlerin ana güç kaynakları devre dışı olabileceken, yarı aktif sistemlerdeki piller çalışmaya devam edeceklerdir. Bu konudaki ilk çalışmalar göstermiştir ki, yarı aktif sistemler pasif sistemlerden ve tamamen aktif sistemlerden daha iyi performans gösterebilmektedir. Bu sistemler izolatörlü yapılarda da izolatörlerin yüksek deplasmanlarını sönmek için kullanılmaktadır. Yarı aktif sönmeyiciler, piller vasıtası ile oluşturulabilen elektrik veya manyetik alanlar yardımı ile ER veya MR sıvıların mekanik özelliklerinin kontrolü prensibi ile çalışmaktadırlar.

Bu bölümde yapıların deprem ve rüzgar gibi dinamik etkilere karşı korunması için dünyadaki en son gelişmeler kısaca anlatılmıştır. Tanıtımı yapılan bu sistemlerin betonarme yapılara uygulanmasında bağlantı detaylarında bazı güçlükler olmakla birlikte çelik yapılara uygulanmaları çok daha kolaydır. Özellikle ABD ve Japonya'da yaygın bir uygulama alanı bulan bu teknolojilerin büyük bir bölümü aktif deprem kuşağı içinde bulunan ülkemizde de kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bundan 10 sene önce pasif sismik izolatörlerin ülkemizde uygulanmasına ihtimal vermeyenler aynı şeyi yaklaşık 15-20 yıl sonra yarı aktif ve aktif sistemlerde yaşamaları kesin gibi görünmektedir. Dolayısıyla birebir uygulamayı beklemek yerine gerekli bilgi birikimini öncelikle üniversitelerde sağlamaya çalışmak ve buna paralel olarak da bu bilgiyi mühendislerimize iletmek gerekmektedir. Üniversitemizde bu konularda kısıtlı da olsa son yıllarda yüksek lisans ve doktora seviyesindeki çalışmalarda belirgin bir artış gözlenmektedir. Diğer bir eksiklik bu sistemlerin ülkemizdeki yapılara uygulanması esnasında gerekli olacak yönetmeliklerin olmamasıdır. Özel izne dayalı az sayıdaki uygulamalarda ise yabancı yönetmelikler kullanılmaktadır. Patent alınıp piyasaya sürülen bu tür ürünlerin sayısı her geçen gün artmakta ve buna bağlı olarak son yıllarda yurtdışından gelen büyük üretici firmaların seminerler ve tanıtımları olmaktadır. Türkiye'nin onlar için iyi bir pazar olduğu açıktır. Bunlardan hangilerinin genel kabul göreceğini zaman ve uygulamalar gösterecektir. Dolayısıyla bu ürünlere standartlar getiren ülke şartlarını ve mevcut yapı stoğu özelliklerini dikkate alan yerel yönetmeliklerin ilgili resmi kurumlar tarafından biran önce hazırlanması gerekmektedir. Mevcut uygulamalarda kullanılan bu elemanların çoğunluğu, yurtdışından getirildiğinden hem malzeme maliyetleri hem de dışarıdan alınan teknik destekten dolayı çok pahalıya mâl olmaktadır. Uygulama yaygınlaştığında yabancı firmaların ülkemizde üretim yapmaları söz konusu olabilecek ve projelendirme de yerli mühendisler tarafından yapıldığında maliyetler azalacaktır. Yeni yerli malzemelerin üretilmesi için disiplinler arası projeler desteklenmelidir. Özetlemek gerekirse ülkemiz şartlarında sismik izolasyon, aktif, yarı aktif ve pasif yapısal kontrol sistemlerinin uygulama/gelişim süreci değerlendirilmeli bu sürecin sağlıklı gelişimi için gerekli standartlar oluşturulmalı, yerli üretim için ARGE faaliyetleri desteklenmeli ve bilginin elde edilmesi ve dağıtılması sağlanmalıdır.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1. Model Bina

Projenin amacı olan kontrollü amortisör uygulaması için Şekil 2'de görülen üç katlı çelik bir model binanın imalatına karar verilmiştir. Kat yüksekliği 80 cm olup, yanal rijitliği dört kolon tarafından sağlanacaktır. Kat kirişleri HE100B profilden imal edilecektir ve kolon ebatlarının seçiminde birinci periyodun 0.5 saniye civarında olması göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 2: Model bina görüntüsü

Periyot sınırlamasının yanısıra, deprem simülatörün oluşturabileceği en büyük kuvveti (10.000 N) hesaba katarak, kat kütleleri birkaç simülasyon sonucunda 200 kg ile sabitlenmiştir. Kolon kesitleri ise 1^{cm} x 10^{cm} olarak hesaplanmıştır.

Oluşturulan model binanın birinci periyodu 0.498, ikincisi 0.177, ve üçüncüsü 0.122 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu periyotlar, araştırmacıların bağımsız olarak yazmış oldukları yazılımları ve iki farklı program (Calculix ve SAP2000) ile uyum içerisindeyler. Yukarıda bahsedilen depremlerin etkisi altında model bina ile deprem simülatörü arasındaki taban kesme kuvvetinin zamana bağlı grafikleri Şekil 7, 8 ve 14'de gösterilmektedir. Grafiklerin elde edilmesinde yapı sönümlenmesi ihmal edilmiş ve kiriş rijitliklerinin kolon rijitliklerine oranı çok yüksek olduğundan (oran=540), düğüm noktalarında dönme olmayacağı varsayılarak, birinci katın kolonlarının eğilme rijitliği Denklem 1'deki gibi hesaplanmıştır.

$$k_{kat} = 4 * \left(\frac{12 E I}{L^3} \right) \quad (1)$$
$$k_{kat} = 156250 \text{ N/m}$$

Burada, E elastisite modülü ($E=2 \cdot 10^{11}$ N/m²), I hareket yönündeki kolon atalet momentine ($I= 8.333 \cdot 10^{-9}$ m⁴) ve L de kolonun net açıklığına ($L=0.80$ m) karşılık gelmektedir. Her katta dört kolon olduğundan dolayı kolon rijitliği dört ile çarpılmaktadır. Simülatör ile bina arasındaki kesme kuvvetin hesaplanması için Denklem 2 kullanılmaktadır.

$$V_b(t) = k_{kat} * u_1(t) \quad (2)$$

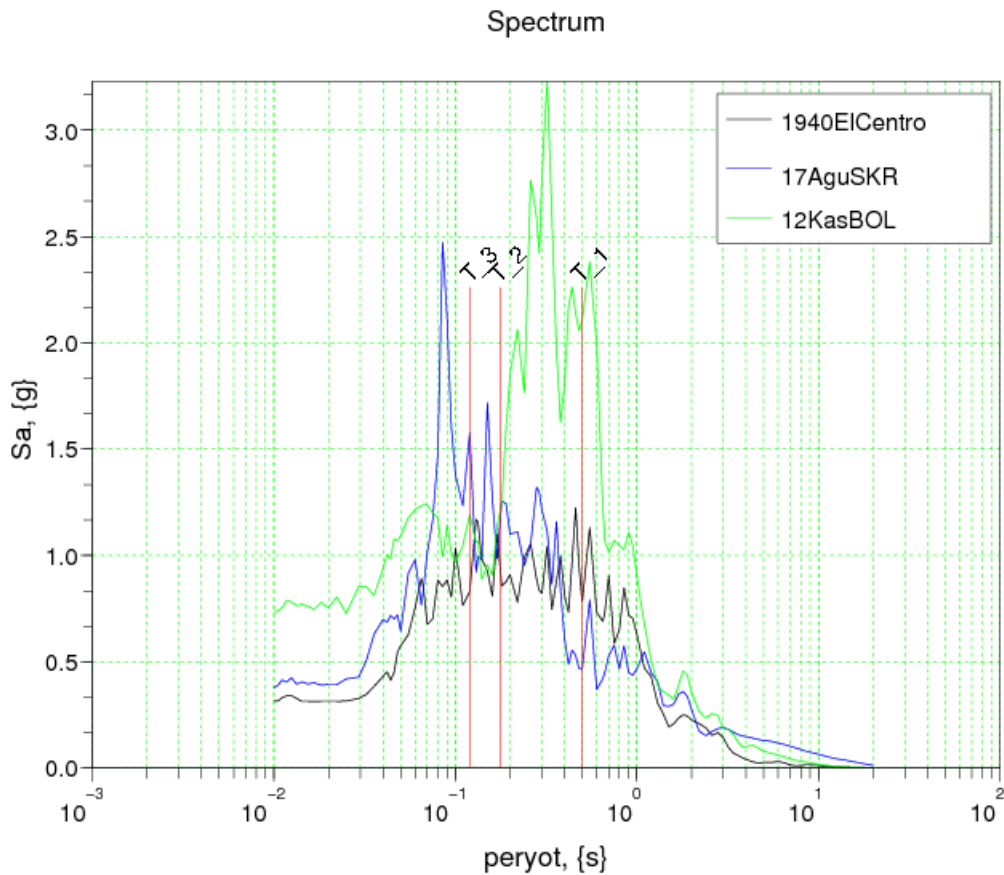
Burada $V_b(t)$ kesme kuvvetidir ve $u_1(t)$ birinci katın deplasmanıdır.

3.2. Kullanılacak Depremler

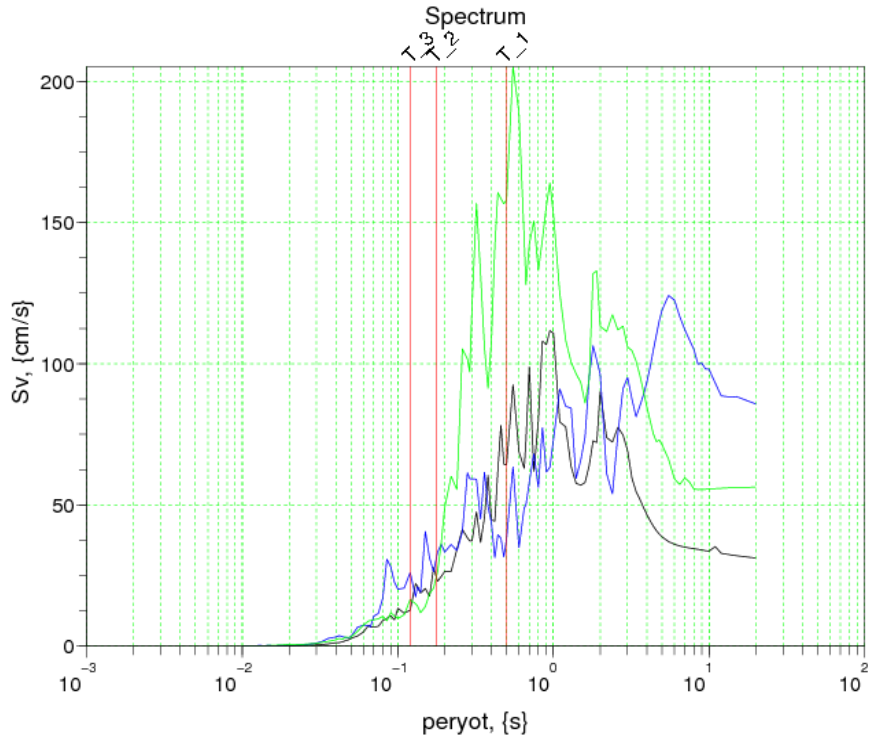
Model binanın sayısal simülasyonlarında aşağıda belirtilen depremlerin ivme kayıtları kullanılmıştır.

- a) 1940 El Centro depremi, Kuzey-Güney istikameti
- b) 12 Kasım 1999 Düzce depremi (Bolu istasyonu), Kuzey-Güney istikameti
- c) 17 Ağustos 1999 Kocaeli (Sakarya istasyonu), Doğu-Batı istikameti

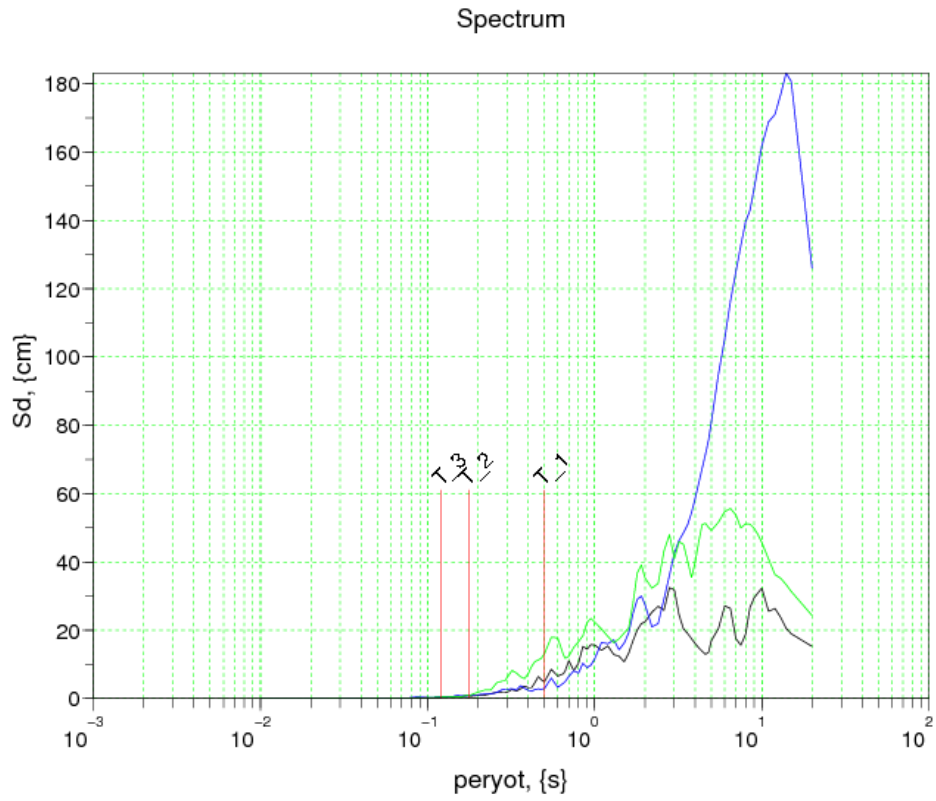
Üç depremin %2 sönülmeye sahip yapılar için davranış spektrumları Şekil 5, 4 ve 6'de gösterilmektedir. Şekil üzerinde T_1 , T_2 ve T_3 ile işaretlenen dikey çizgiler bina modelin birinci, ikinci ve üçüncü periyotlarına karşılık gelmektedir.



Şekil 3: Simülasyonda kullanılacak depremlerin ivme spektrum eğrileri



Şekil 4: Simülasyonda kullanılacak depremlerin hız spektrum eğrileri



Şekil 5: Simülasyonda kullanılacak depremlerin deplasman spektrum eğrileri

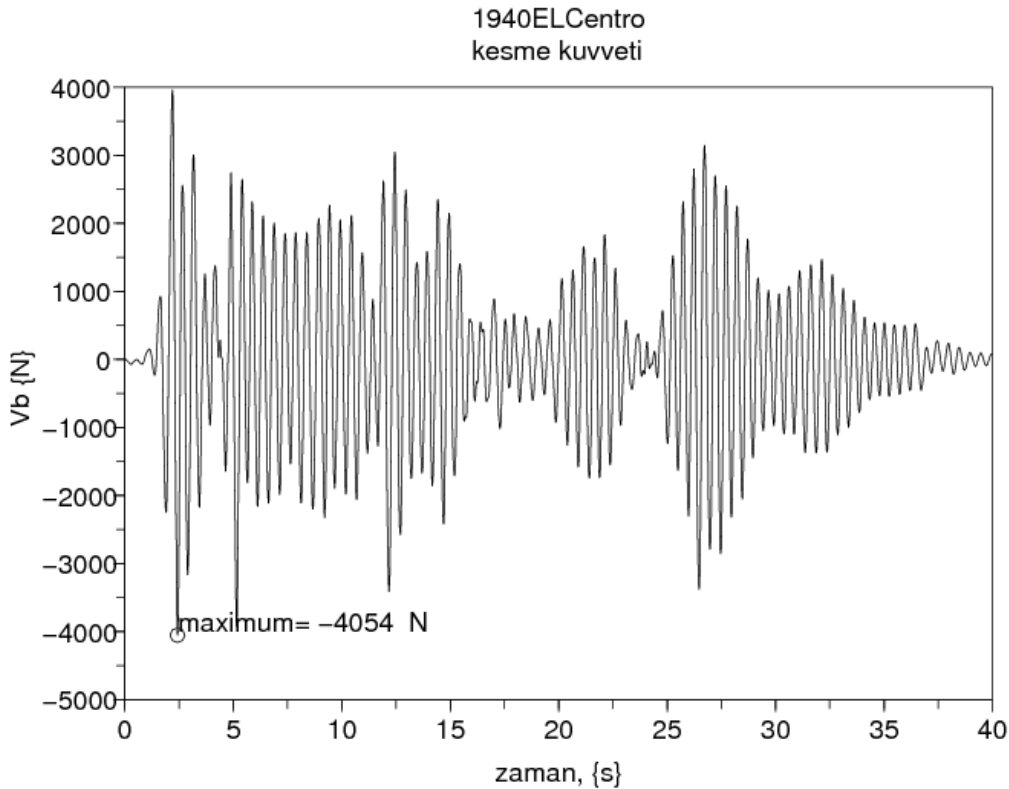
Spektrum eğrilerine bakılacak olursa, 1940 El Centro ve 17 Ağustos Sakarya depremlerinin bina davranışına olan etkilerinin aynı ölçekte olacağı görülmektedir. 12 Kasım Bolu depreminin spektrumuna göre ise, özellikle birinci mod davranışlarının iki-üç kat daha büyük olduğu görülmektedir.

Herbir deprem için taban kesme kuvveti eğrisi Şekil 7,8 ve 14'de görülmektedir. Üç deprem için V_b 'nin ve u_1 'in en büyük değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

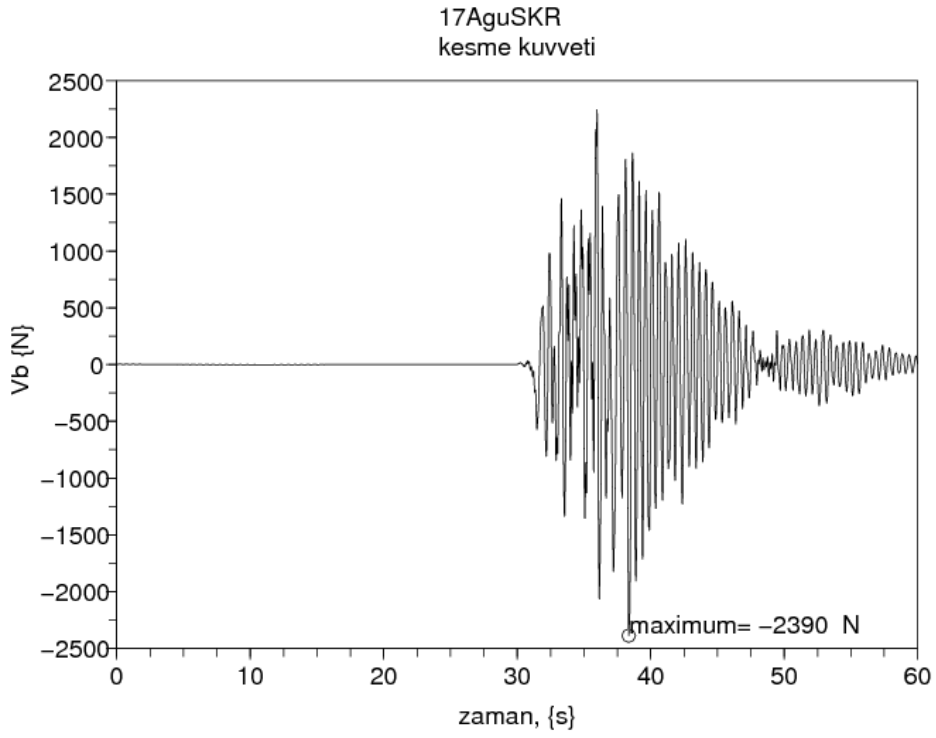
Tablo 2: Kullanılan depremlerin oluşturduğu en büyük kesme kuvvetleri ve deplasmanlar

	1940ElCentro	12KasBOL	17AguSKR
$\max(V_b) \{N.\}$	4054	11276	2390
$\max(u_1) \{m\}$	0.026	0.072	0.015

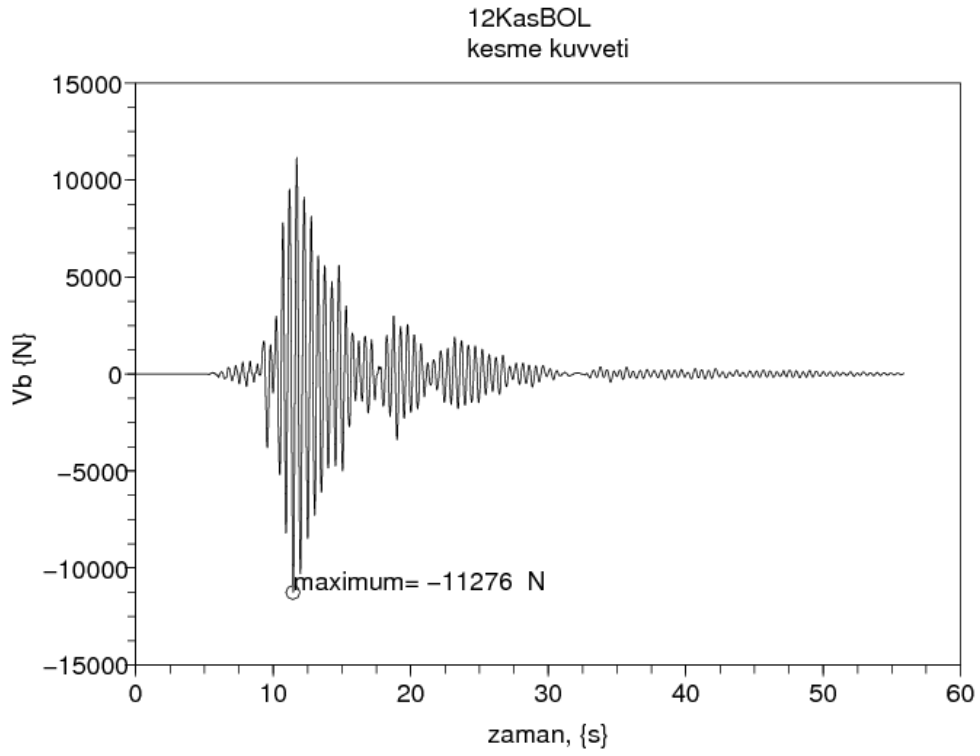
En büyük davranış değerlerine bakıldığında, 1940 El Centro ve 12 Kasım Bolu depremlerin simülör kapasitesini (10.000 N) aşmadıkları görülmektedir. 17 Ağustos Sakarya depremi ise sınıra yakındır ve gerekirse laboratuvaradaki simülasyon sırasında deprem verisi küçültülebilir.



Şekil 6: El Centro depremi etkisi altında model binanın taban kesme kuvveti değişimi



Şekil 7: 17 Ağustos Sakarya Depremi etkisi altında model binanın taban kesme kuvveti değişimi



Şekil 8: 12 Kasım Bolu depremi etkisi altında model binanın taban kesme kuvveti değişimi

Oluşturulmuş olan üç katlı bina modelinin rijitlik, sönüm ve kütle matrisleri Denklem 3'de gösterilmektedir. Birimler, kilogram, metre, saniye ve kuvvetler Newton cinsindedir.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 156159.86 & -78125. & 90.074889 \\ -78125.0 & 156069.57 & -78034.72 \\ 90.074889 & -78034.72 & 77944.711 \end{bmatrix} \text{ N/m} \quad (3-a)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 166.08511 & -64.69936 & 0.0746076 \\ -64.69936 & 166.01033 & -64.62413 \\ 0.0746076 & -64.62413 & 100.14884 \end{bmatrix} \text{ Ns/m} \quad (3-b)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 97.156321 & 0.8022857 & -0.000893 \\ 0.8022857 & 97.157215 & 0.8025936 \\ -0.000893 & 0.8025936 & 94.837097 \end{bmatrix} \text{ kg} \quad (3-c)$$

Bu matrisler bina modelin yarısını temsil etmektedirler. Tek yönlü deprem hareketi verileceğinden binanın sadece bir çerçevesini incelemek yeterli olacaktır. Buna bağlı olarak kütle matrisi de yapının yarısına karşı gelen kütle matrisini göstermektedir.

Analizde sekiz adet düğüm noktası kullanılmıştır. Herbir düğüm noktasının bir yatay ötelenme ve bir dönme serbestlik dereceleri vardır. Zemine bağlı olan düğüm noktalarının hareketi sıfırlanmıştır. Katlarda rijit diyafram kabulü yapılmıştır. Son olarak, dönme serbestlik dereceleri statik indirgeme yöntemiyle indirgenmiştir ve üç serbestlik dereceli bir sistem modeli ortaya çıkmıştır.

Projenin başlangıç aşamalarında yapılan sayısal analizlerde yapının ilk iki moduna karşı gelen sönüm oranı %2 olarak kabul edilmiş ve buna bağlı olarak sönüm matrisi Rayleigh sönümü olarak hesaplanmıştır. Projenin son dönemlerinde yapılan deneyler sonucunda model binanın gerçek sönüm oranları deneysel olarak bulunmuş ve karşılaştırılmalarında kullanılmıştır.

3.3. Modelin Stabilité Kontrolü

Bu bölümde, seçilen yapı modelinin burkulma güvenliği kontrol edilmiştir. Model yapının alt kat kolonları için basit bir stabilite kontrolü yapılmıştır. Bu kolonlarda P_{kritik} hesabını yapmak amacıyla Şekil 9'daki gibi tek açıklıklı bir çerçeve modeli düşünülmüştür. Burada, P ile gösterilen kuvvetler üst katlardan gelen yüklerdir. Kirişlerin elastik olduğu ve rijit kabul edildiği iki hal için kritik yük hesabı yapılmıştır. Önce yatay ötelenmesi engellenmemiş elastik kat kirişli çerçeve modeli için kritik yük araştırılmıştır.

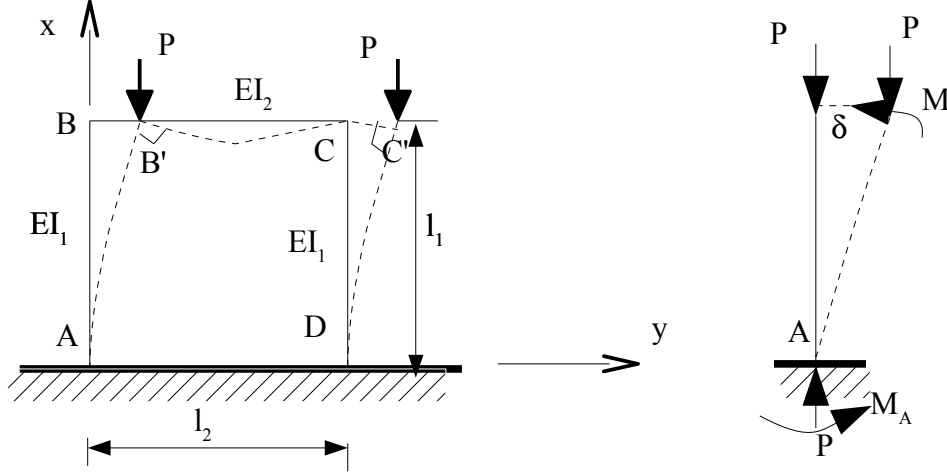
Şekil 9'de yatay ötelenmesi engellenmemiş, kirişlerin elastik olduğu tek katlı çerçeve modeli görülmektedir. Şekilde görülen koordinatlara göre yatay ötelenen AB kolonunda mevcut hareketin oluşturduğu elastik eğrinin diferansiyel denklemi,

$$EI_1 y'' = -M \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$M = P y - M_A \quad (5)$$

şeklindedir.



Şekil 9: Tek katlı çerçeve modeli

Denklem 4'de yerine yazılıp düzenlenirse,

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + k^2 y = \frac{M_A}{EI_1} \quad (6)$$

şeklinde AB kolonun yatay yerdeğiştirme eğrisinin diferansiyel denklemi bulunur. Burada

$$k^2 = \frac{P}{EI_1} \quad (7)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin çözümü, genel ve özel çözümün toplamı olarak,

$$y(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx) + \frac{M_A}{P} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ankastre mesnetteki sınır şartları uygulandığında,

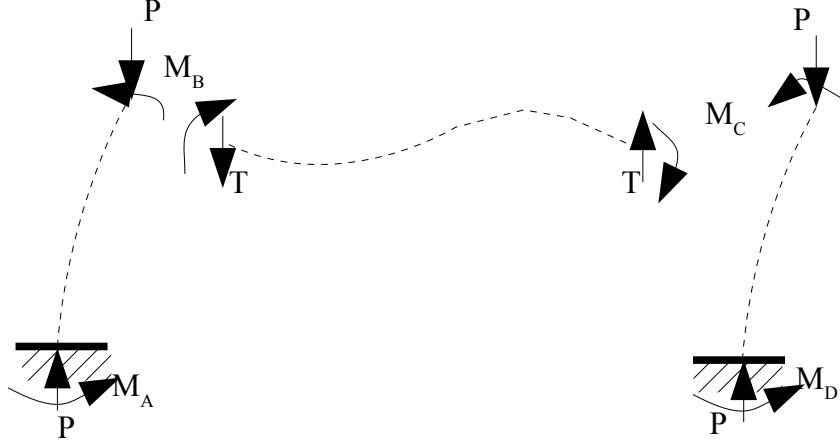
$$\begin{aligned} y(0) &= 0 \quad \text{için} \quad B = -\frac{M_A}{P} \\ y'(0) &= 0 \quad \text{için} \quad A = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

şeklinde A ve B katsayıları bulunabilir. Bunlar Denklem 8'te yerine konduğunda elastik eğri denklemi aşağıdaki formda olur.

$$y(x) = \frac{M_A}{P} (1 - \cos(kx)) \quad (10)$$

Kolon ucundaki yerdeğiştirmenin δ olduğu kabul edilirse, uç noktası için aşağıdaki yazılabilir.

$$y(l_1) = \delta = \frac{M_A}{P} (1 - \cos(k l_1)) \quad (11)$$



Şekil 10: Ötelenmiş tek katlı model çerçevede iç kuvvetler

Denklem 5'de $M=M_B$ ve $y=\delta$ yazılırsa,

$$M_B = \delta P - M_A \quad (12)$$

şeklinde bir denklem elde edilir. Denklem 11, Denklem 12'de yerine yazılırsa aşağıdaki forma ulaşılır.

$$M_A \cos(k l_1) + M_B = 0 \quad (13)$$

B noktasındaki momentin, açı metoduna göre B ve C noktalarındaki dönmelere bağlı olarak ifadesi

$$M_B = \frac{EI_2}{l_2} (4\theta_B + 2\theta_C) \quad (14)$$

bilinmektedir. Simetriden $\theta_B = \theta_C$ olduğu bilindiğine göre, Denklem 14 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$M_B = \frac{6EI_2}{l_2} \theta_B \quad (15)$$

Denklem 10'nin x'e göre türevi alınıp $x=l_1$ ve Denklem 7'den P çekilerek yerine konursa,

$$\dot{y}(l_1) = \theta_C = \theta_B = \frac{M_A}{k EI_1} \sin(k l_1) \quad (16)$$

şeklinde C ve B noktalarındaki dönme ifadesi bulunur. Denklem 16, Denklem 15'de yerine koyulursa,

$$M_B = \frac{6EI_2}{l_2} \frac{M_A \sin(kl_1)}{kEI_1} \quad (17)$$

Denklem 13 ve Denklem 17 matris formunda yazılırsa,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \cos(kl_1) & 1 \\ \frac{6EI_2}{l_2} \frac{\sin(kl_1)}{kEI_1} & -1 \end{bmatrix}}_{det=0} \begin{Bmatrix} M_A \\ M_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

şeklinde olur. Bu denklemdeki katsayılar matrisinin determinantının sıfıra eşitlenmesi sonucunda aşağıdaki ilişki bulunur.

$$\frac{\tan(kl_1)}{kl_1} = -\frac{I_1 l_2}{6I_2 l_1} \quad (19)$$

Model için seçilen kirişler ve kolonlar için bazı kesit özellikleri aşağıdaki gibi verilmiştir (Tablo 3)

Tablo 3: Kolon ve kiriş ebadları

	Kolonlar	Kirişler
Atalet momenti	0,8333 cm ²	450 cm ²
Uzunluk	80 cm	100 cm

Bu değerleri Denklem 19'da yerine koyarsak,

$$\frac{\tan(kl_1)}{kl_1} = -\frac{0.83333 \times 100}{6 \times 450 \times 80} = -3.8580 \times 10^{-4} \quad (20)$$

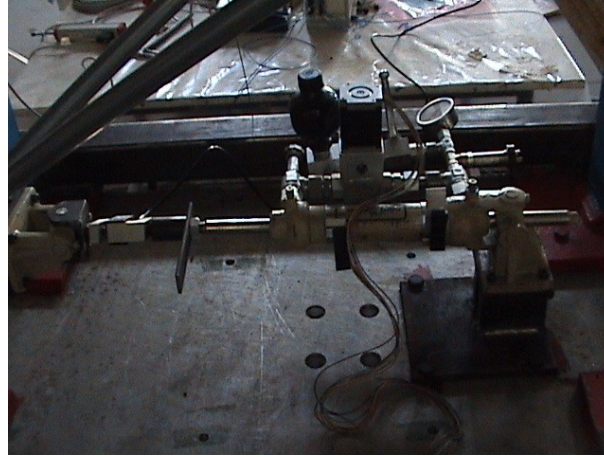
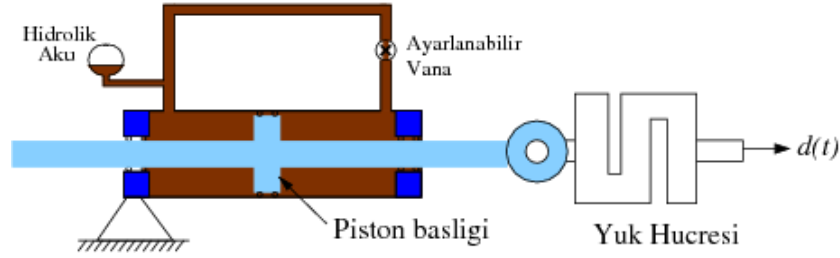
bulunur. Bu denklem çözülürse $kl_1 = 3.14038$ olarak bulunur. Burada k için Denklem (7) kullanılırsa ve P çekilirse $P_{kritik} = 25682 N$ olarak bulunur. Bu sonucu doğrulamak için, kritik P yükü kirişlerin rijit olduğu durumda tabanda ankastre mesnetli bir kayma çerçevesinde aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_{kritik} = \frac{\pi^2 EI}{l_c^2} = \frac{\pi^2 2.0 \times 10^{11} \times 0.833333 \times 10^{-8}}{0.8^2} = 25702 N \quad (21)$$

Mevcut model SAP 2000 yapı analiz programı ile de modellenmiş ve tabandaki kolonlarda mevcut ağırlıklar ve El Centro deprem etkisinde maksimum 5132 N, Bolu depreminde 9271 N, Sakarya depreminde 3674 N eksenel kuvvet oluşmuştur. Yukarıda yapılan sayısal simülasyonlara göre gelecek olan yükler kritik yükü aşmamaktadır.

3.4. Sönümlemesi Ayarlanabilir Amortisör

Yarı aktif olarak kontrol edilecek yapıya eklenecek olan amortisör bir çift yönlü dümen silindir pistonu modifikasyonu ile imal edilmiştir. Şekil 11'de amortisör kesitinin çizimi ve fotoğrafı gösterilmektedir. Fabrikasyon olarak imal edilmiş olan pistonu bir deşarj hattı eklenerek ve bu deşarj hattı üzerine bir ayarlanabilir küresel vana takılarak bu modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Vananın üzerine yerleştirilen bir step motor ile de vana kontrol edilecektir. Ayrıca piston başlığına monte edilen bir yük hücresiyle amortisörde oluşan kuvvet de ölçülebilecektir. Piston başlığının her iki tarafında hidrolik sıvı ile temas eden dik yüzey alanı birbirine eşittir (Bunun eşit olmama durumunda büyükten küçüğe doğru istenmeyen bir kuvvet oluşur). Hidrolik sıvı basıncının sıfırın altına inmesi de, istenmeyen bir durumdur, çünkü doğrusal davranışı olumsuz yönde etkileyecektir. Bunu önlemek için, pistonun hızlı hareket etmesi sırasında piston başlığının bir tarafında vakum oluşmaması için hidrolik akü ilave edilmiştir. Bu akü sayesinde sistemin hidrolik basıncı bir miktar yükseltilmiştir. Vana açık olduğunda piston rahat hareket eder, kısıldığında ise hareket zorlaşır. Vananın konumu ile amortisörün oluşturduğu sönümleme kuvvetini ayarlamak mümkündür.



Şekil 11: Ayarlanabilen amortisör şeması ve fotoğrafı

Dümen silindirinin ayarlanabilir vanası kapalı konumdayken, yapısı itibarıyla içindeki mil hareket edemez. İç basıncı ve dolayısıyla pistonun karşı geldiği kuvvet kontrolsüz olarak büyür. Amortisör kuvvetini ölçen ve seri olarak montajı yapılan yük hücresinin kapasitesi sınırlı olduğundan, hasar görmesi olasıdır. Bu olumsuz durum aktif olarak kontrol edilmektedir.

Amortisör imalatında bazı noktalara dikkat edilmesi gerekmektedir. Amortisör tasarım aşamasında tecrübe edilen bazı konular aşağıdaki gibi sıralanabilir:

a)Piston çapı büyüdükçe, sürtünmeden ileri gelen direnç artar. En son kullanılan amortisörde minimum kuvvet 160 N civarındadır.

b)Deşarj hattının çapı küçüldükçe amortisörün harekete karşı direnci artar.

c)Deşarj hattının uzunluğu arttıkça amortisörün harekete karşı direnci artar.

d)Amortisörün iç basıncı yükseldikçe, keçeler sıkışmakta ve sonuç olarak harekete karşı direnç artmaktadır. En son karar verilen iç basınç 1-2 bar civarında olması vananın açılıp kapanması açısından tavsiye edilmektedir.

e)Hidrolik akü kullanıldığında, akünün bulunduğu taraftaki basınç ani değişim göstermemektedir. Bundan dolayı harekete karşı ilave kuvvet oluşmaz. Çözüm olarak çek-valfli akü kullanılabilir.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda;

1)daha küçük piston çapı yaptırılmamış, 40mm'lik çap ile yetinilmiştir,

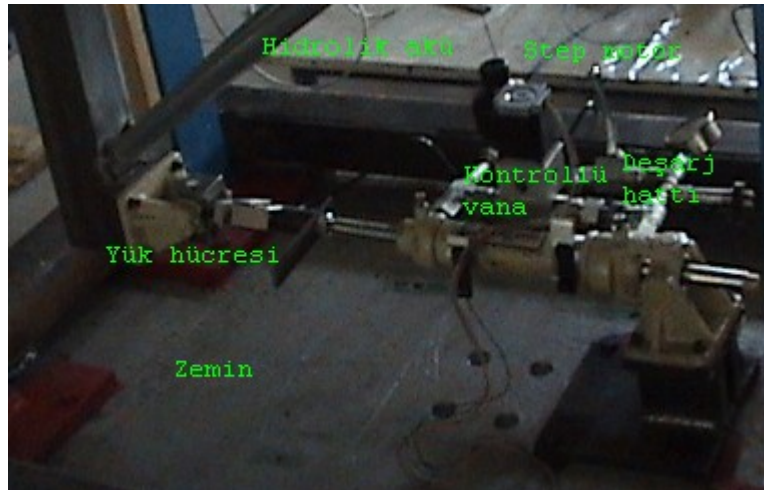
2)paralel deşarj hattı büyütülerek, 3/4 inç'lik iç çap ile yaptırılmıştır,

3)yükselen basınçtan dolayı keçelerin sıkışmasını azaltmak amacıyla piston başlığındaki keçe çıkartılmış ve buna bağlı olarak piston başlığı ile iç yüzey arasında 0.35mm'lik boşluk oluşmuştur. Ancak, bu boşluktan dolayı vananın kontrol kabiliyeti çok azalmış ve sonuç olarak keçeler tekrar yerlerine yerleştirilmiştir.

4)Hassas ayarlı, iğne uçlu vana kapatıldığında iç basınç 100 bar'a kadar çıkmış ve bundan dolayı keçeler sıkışmış, amortisörün harekete karşı direnci çok artmıştır. Basınç artışının sebebi ise olağandır, çünkü kapalı bir hidrolik sistemine bir kütle (iğne ucu) ilave edilmiştir. Hacim değiştiğinden dolayı, hidrolik yağ basıncı artmıştır. Bunun üzerine iğne uçlu vanadan vaz geçilmiş ve küresel vana taktırılmıştır.

3.4.1. Amortisör Modeli

Yaptırılmış olan en son amortisör Şekil 12'da gösterilmiştir. Ölçüm gerçekleştirilirken, üst tarafta bulunan vana üzerindeki step motor ile ayarlanıp açısı değiştirilerek, deprem simülatörü ile ayarlanan hızlarla harekete geçirilmiş ve hareket esnasında yuk hücresi sinyalleri gerçek zamanlı 0,0025 saniye aralığında okunmuştur.



Şekil 12: Davranış ölçümü yapılan amortisörün bağlantısı

Amortisör kuvvetinin hıza bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Elde bulunan amortisörün hızına bağlı olarak doğrusal olmayan kuvvet ilişkisi olacağı düşünülmektedir. Bu amaçla deprem simülatorüne Denklem 22(a-b) ile ifade edilen hareket tatbik edilecek ve amortisörün oluşturduğu kuvvet kayıt edilecektir.

$$\begin{aligned} d(t) &= g \cos(2\pi f t) \\ \dot{d}(t) &= -2\pi f g \sin(2\pi f t) \end{aligned} \quad (22-a)$$

$$\begin{aligned} d(t) &= g \cos(2\pi f t) \\ \dot{d}(t) &= -2\pi f g \sin(2\pi f t) \end{aligned} \quad (22-b)$$

Burada, $d(t)$ deplasman, $\dot{d}(t)$ hız, g deplasman genliği, ve f ise amortisör hareketinin frekansını belirtmektedir. Kullanılacak genlik ve frekanslara göre oluşacak hareketin en büyük hızı Tablo 4'de gösterilmektedir. İlk etapta 0.10 m/s nin altında kalan deneyler yapılacaktır. Amortisör modeli bu düşük hızlar için oluşturulduktan sonra daha yüksek hızlara geçilmesi planlanmaktadır.

Tablo 4: Sinüs dalgalı bir hareketin $g=0.02$ m genlik için frekansına bağlı olarak en büyük hız değerleri

Frekans (Hz)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	1,5	2
Hız (m/s)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09	0,13	0,19	0,25

Binanın deprem etkisi altındaki davranışının kontrolünü sağlarken, binanın kat hızları ölçülmüş ve uygulanması gereken kontrol kuvveti hesaplanmış olacaktır. Amortisör modelinin vana açısını çıktı olarak vermesi gerekir. Amortisör modelinin ortaya çıkarılması için amortisör üzerindeki vananın farklı açıları için simülator üzerinde deneyler yapılmış ve bu deney sonuçları kullanılarak, genetik algoritma vasıtasıyla kuvvet ve hız arasındaki ilişkinin matematik modeli ortaya çıkarılmıştır.

Ölçülmüş olan kuvvet ilişkisine bakıldığında, harekete karşı olan direnç kuvveti Denklem 23 ile ifade edilmiştir.

$$F_{ga} = F_0 + b_1 \frac{1}{(\alpha_0 - \alpha)^{b_2}} v^{b_3} \quad (23)$$

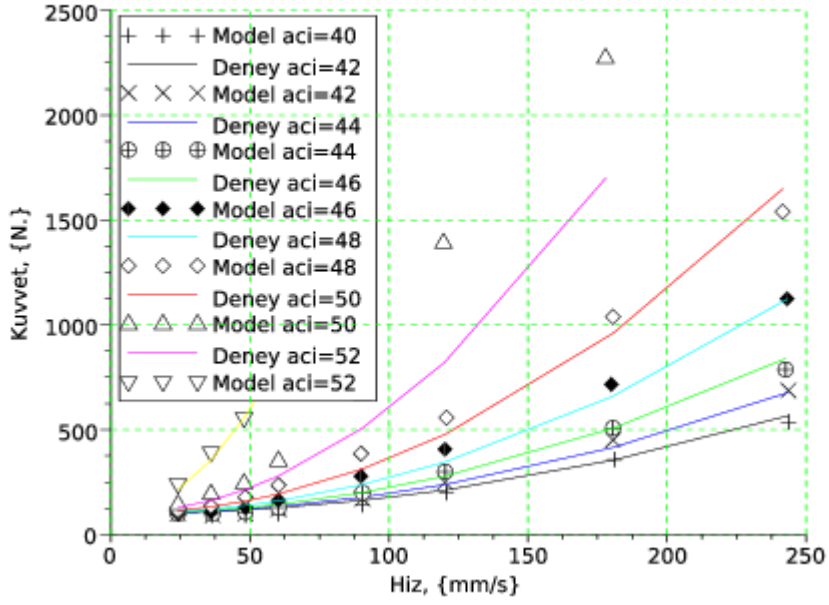
Burada F_{ga} genetik algoritma ile bulunacak olan amortisör kuvvetidir. F_0 amortisörün sürtünme kuvvetidir. Gelecek olan kuvvet F_0 'i geçtikten sonra amortisör pistonu harekete başlayacaktır. Denklem 23'de verilen v amortisörün iki ucu arasındaki hız farkını gösterir ve birimi m/s'dir. α amortisör vanasının derece cinsinden açısıdır. Sıfır olma durumu vananın tamamen açık olduğu durumdur. α_0 53° değerindedir. Tamamen kapalı olduğu durumda açı doksan derecedir. Fakat matematik olarak da görüleceği gibi $\alpha \geq 53^\circ$ koşulunda bir tanımsızlık ortaya çıkmaktadır. Fiziksel olarak bu durum amortisörde çok büyük kuvvetlerin ortaya çıkacağı anlamına gelir. Yani amortisör sadece bir piston gibi çalışmak ister. α sol tarafa alındığında Denklem 24 aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\alpha = \alpha_0 - \sqrt[2]{b_1 \frac{v^{b_3}}{F_{ga} - F_0}} \quad (24)$$

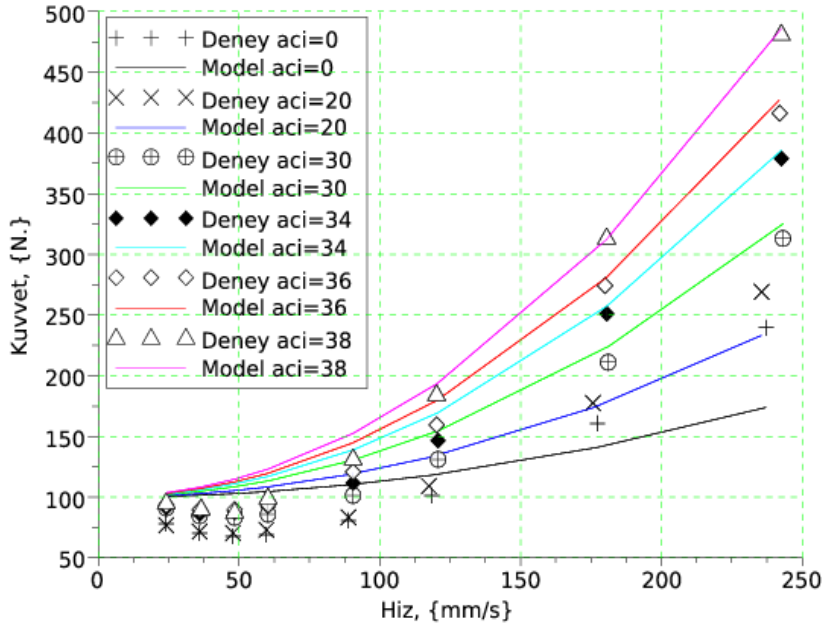
Genetik algoritmayla hesaplanan ve gerçek açıların değerleri arasındaki hatayı en aza indiren b_1 , b_2 ve b_3 sabitleri bulunmuştur. Bunların belirlenmesiyle amortisörün kuvvet-hız ilişkisi ortaya çıkacaktır. b_1 , b_2 ve b_3 değerlerini değiştirerek açının değeri Denklem 24'e göre hesaplanır ve gerçek değeri arasındaki hata Denklem 25 ile

$$\text{hata} = \sum_i \|\alpha_i\|_1 - \left\| \alpha_0 - \sqrt[2]{b_1 \frac{v^{b_3}}{F_{ga} - F_0}} \right\|_1 \quad (25)$$

bulunur. Burada α_i ile ifade edilen deneyde kullanılan vana açıları, i farklı vana açıklığı sayısıdır. En düşük hatayı veren sabitler GA çözümüdür. Burada $\|\cdot\|_1$ Frobenius normu olup, herhangi bir a değişkeni için $\|a\|_1 = \sqrt{\sum \text{diag}(a^T a)}$ şeklinde hesaplanır.



Şekil 13: Amortisör kuvvet ölçümleri (açı=40-52 derece arası)



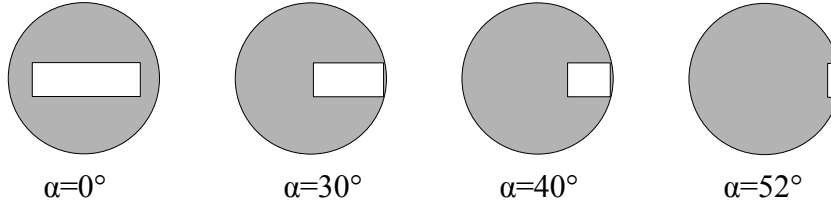
Şekil 14: Amortisör kuvvet ölçümleri (açı=0-38 derece arası)

Şekil 14 ve 13'de deprem simülatorüne bağlanan amortisörün farklı açılar için yapılan deneyler sonucunda kuvvet-hız ilişkisi ve bu deney sonuçlarına karşı genetik algoritma ile hesaplanan yaklaşık doğrular gösterilmiştir. Şekil 14 ve 13'de GA ile oluşturulan denklemin ölçülmüş veri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buradaki vana açılarının yaklaşık enkesit görünümü Şekil 15'de gösterildiği gibidir.

Yapılan deneyler ve analizler sonucunda tasarlanan amortisörün kuvvet-hız ilişkisi aşağıdaki amprik formül ile ifade edilmiştir (Denklem 26).

$$F = 100 + 1227.3 \frac{1}{(\alpha_0 - \alpha)^{1.2727}} v^{2.021} \quad (26)$$

Deprem simülasyonu sırasında, uygulanacak olan kontrol kuvveti ve amortisör uçları arasındaki hız farkı hesaplanmaktadır. Bu iki değişkene bağlı olarak amortisör vanasının açısı ayarlanmalıdır. Bilgisayar bu açığı hesaplayacak ve bunun doğrultusunda amortisör vanasına bağlı olan servo motoru harekete geçirecektir.



Şekil 15: Küresel vananın farklı açılar için en kesit görünümü

Oluşan kuvvetin hıza göre ilişkisini bulmak açısından, kısa bir işlem sonucunda, Denklem 26,

$$F - 100 = c v^{2.021} \quad (27)$$

olarak daha kısa yazılabilir. Hızın üzerindeki katsayı (2.021) linear olmayan bir kuvvet-hız ilişkisini gösterir. Burada amortisörün sönüm katsayısı,

$$c = 1227.3 \frac{1}{(\alpha_0 - \alpha)^{1.2727}} \quad (28)$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu ifadeye göre amortisör sabitinin minimum değeri $7.8426 N \cdot \left(\frac{s}{m}\right)^{2.021}$, maksimum değeri $1287 N \cdot \left(\frac{s}{m}\right)^{2.021}$ 'e kadar çıkmaktadır.

3.5. Amortisörün Sönüm Katsayısının Değişiminin Deprem Etkisi Altındaki Yapı Davranışına Etkisi

Üç katlı model yapının dinamik özellikleri ve farklı depremler (El Centro, Bolu ve Sakarya) etkisi altında maksimum deplasmanları ve taban kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu bölümde model yapıya eklenecek olan değişken sönüm katsayısına sahip sönümleyici pasif bir sönümleyici olarak düşünülmüş, sönüm katsayısının her değişimi için toplam deprem zamanındaki maksimum davranış değerlerini bulmak için sayısal simülasyonlar yapılmıştır.

Öncelikle yarı aktif olarak kontrol edilecek yapıda, sönümleyicinin sönüm katsayısı adım adım artırılarak her adımda yukarıda bahsedilen depremlerin etkisi altında yapının dinamik davranış değerleri hesaplanmıştır. Kullanılan depremler altında, değiştirilen her bir sönüm

katsayısına göre, yapıda meydana gelen maksimum deplasmanlar, maksimum görelî kat deplasmanları, maksimum görelî hızlar, maksimum kat hızları, maksimum kat ivmeleri ve maksimum mutlak kat ivmeleri hesaplanmıştır. Bu sayısal hesaplamaların amacı, seçilecek olan sönümleyicinin sönüm katsayısının pasif olarak değişiminin model yapıdaki maksimum davranış değerlerine olan etkisinin ne olduğunu öğrenmektir.

3.5.1. Sönümleyicili Yapının Mekanik Modeli

Üç katlı yapının sayısal hesaplamaları için mekanik modeli Şekil 16'deki gibi kurulmuştur. Eklenen sönümleyicinin olmadığı durumda, yer hareketi etkisi altında yapının hareket denklemleri;

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad (29)$$

şeklinde yazılır. Burada \mathbf{u} yer değiştirme vektörü, \ddot{u}_g yer hareketinin yatay ivmesi, \mathbf{M} kütle matrisi, \mathbf{C} yapısal sönüm matrisi, \mathbf{K} rijitlik matrisi ve $\mathbf{r}=\{1,1,1\}$ olan etki vektörüdür. Yapısal sönüm matrisi,

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (30)$$

Rayleigh sönümü olarak seçilmiştir. Yapı deneyleri yapılmadan önce ilk iki mod için sönüm oranlarının $\zeta = \zeta_1 = \zeta_2 = 0.02$ şeklinde eşit olduğu varsayılarak;

$$\alpha = \zeta \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad \text{ve} \quad \beta = \zeta \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (31)$$

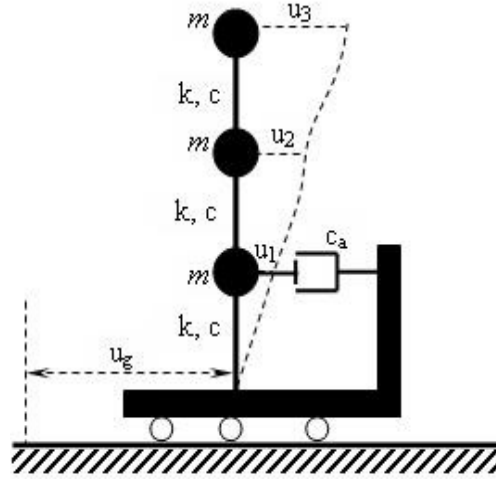
şeklinde α ve β katsayıları hesaplanır. Burada ω_1 ve ω_2 yapının birinci ve ikinci sönümsüz doğal titreşim frekanslarıdır. Yapının birinci katına pasif bir sönümleyici eklendiği düşünülürse Denklem 29 aşığıdaki forma gelir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_a)\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad (32)$$

Burada \mathbf{C}_a yapıya eklenecek sönümleyicilerin katsayılarını ihtiva eden sönüm matrisidir. Model yapı için \mathbf{C}_a eklenen sönüm matrisi

$$\begin{bmatrix} C_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

formundadır.

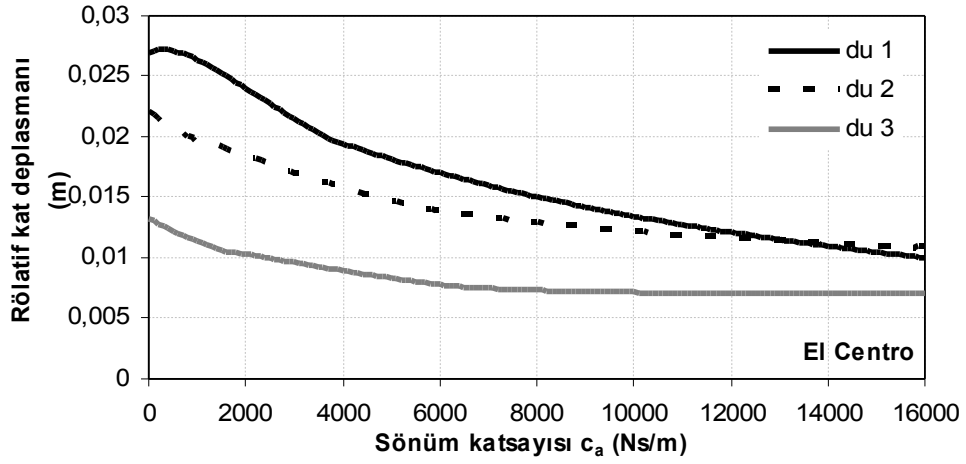


Şekil 16: Üç serbestlik dereceli yapının mekanik modeli

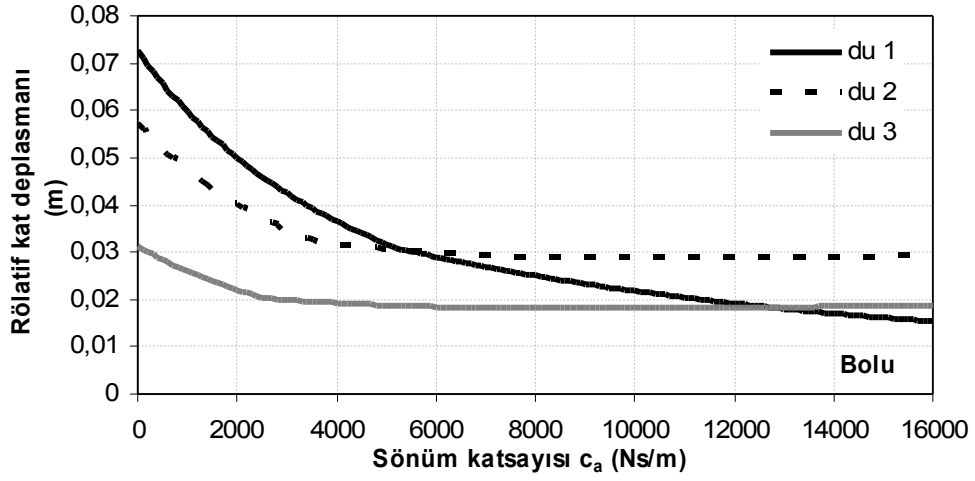
Eklenen sönümleyicinin deprem etkisi altında davranışının nasıl değiştiğini anlamak için, model yapıda C_a sönüm katsayısı sıfırdan başlayarak küçük artımlar ile değiştirilmiştir. Deprem kuvveti olarak El Centro, Bolu ve Sakarya depremleri kullanılmıştır.

Şekil 17'de katların en büyük görel katlar arası yer değiştirmelerinin C_a sönüm katsayısı ile değişimi çizilmiştir. Burada katlar arası yer değiştirmeleri ile $du = u_{i+1} - u_i$, $\{i=0,1,2\}$ ifade edilmektedir. Sayısal benzetimler üç farklı deprem kaydı ile yapılmıştır. Deformasyonlar açısından özellikle katlar arası deplasmanların birbirine yaklaşması istenen bir durumdur. Üç grafikten görüldüğü gibi farklı depremlerde farklı sönüm katsayısı, C_a değerlerinde görel kat deplasmanlarında çakışma gözlenmiştir.

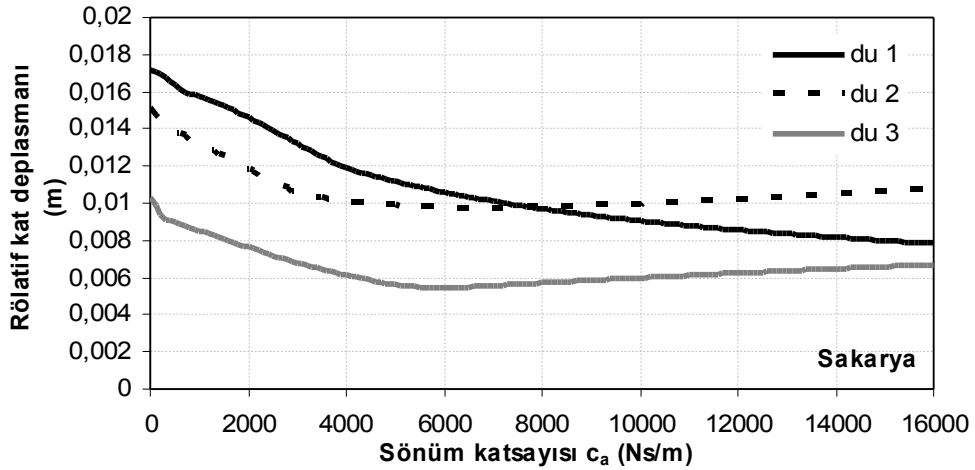
Şekil 18'de katların en büyük görel hızlarının C_a sönüm katsayısı ile değişimi verilmiştir. Katlar arası maksimum hız değerleri $dv = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i$, $\{i=0,1,2\}$ şeklindedir. Özellikle birinci katın görel hızının her üç deprem durumunda da sönüm katsayısının artmasıyla en fazla düştüğü görülmektedir. Bu durum, sönümleyicinin birinci kata eklenmesinin sonucudur.



a) 1940 Imperial Valley Depremi (El Centro İstasyonu)

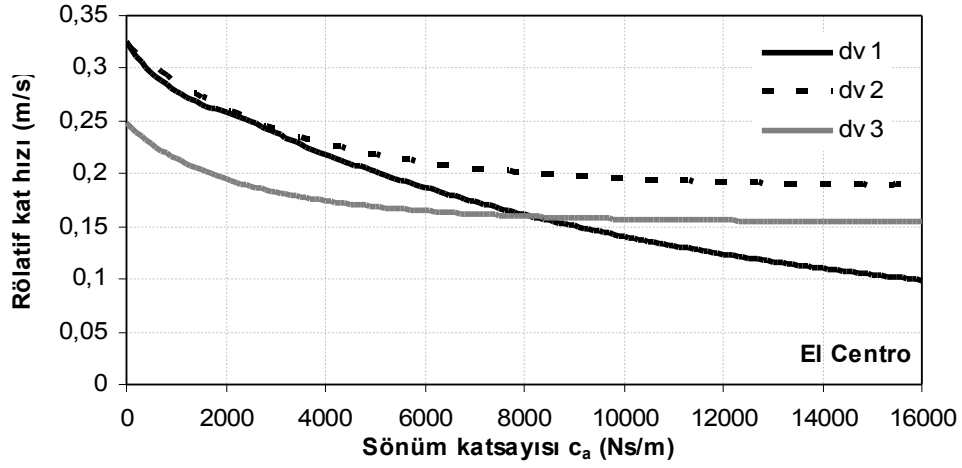


b) 12 Kasım Düzce Depremi (Bolu İstasyonu)

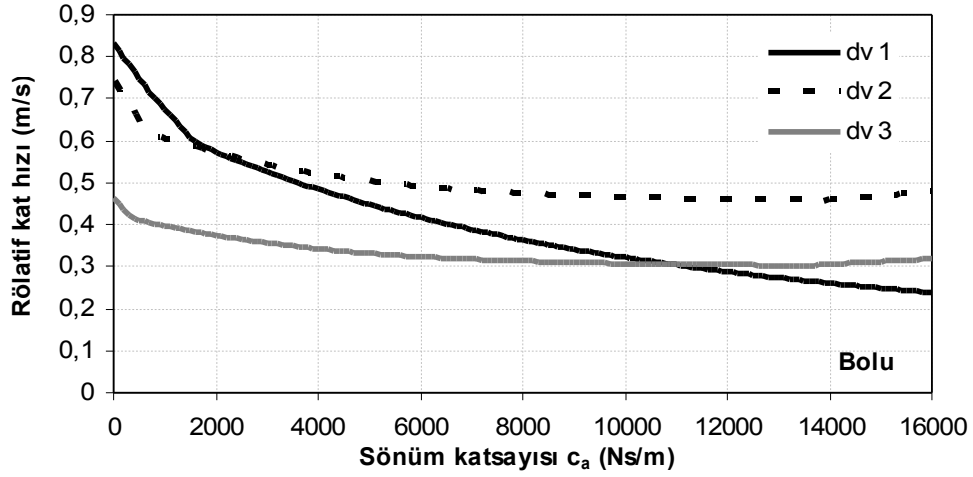


c) 17 Ağustos Kocaeli Depremi (Sakarya İstasyonu)

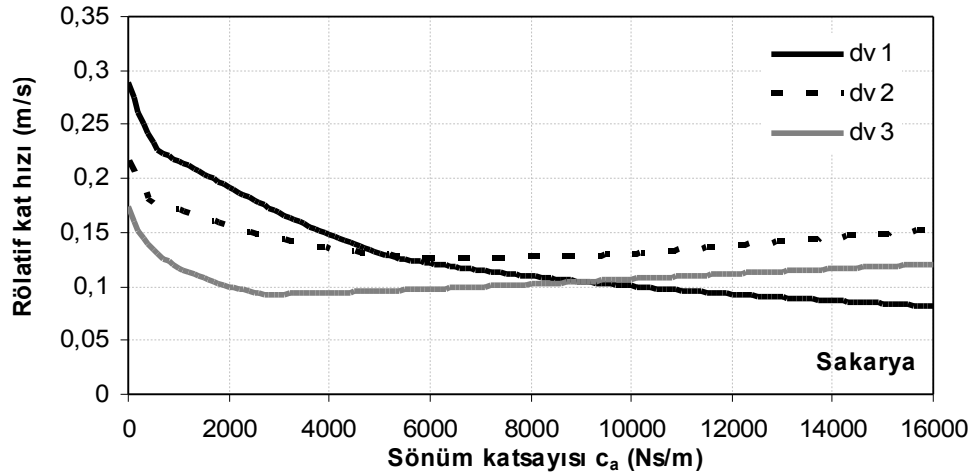
Şekil 17: Maximum görelî kat deplasmanlarının C_a ile değişimi



a) 1940 Imperial Valley Depremi (El Centro İstasyonu)



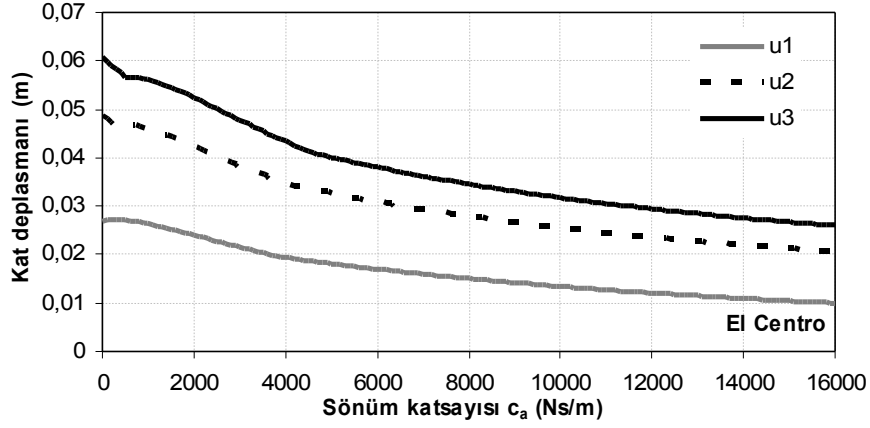
b) 12 Kasım Düzce Depremi (Bolu İstasyonu)



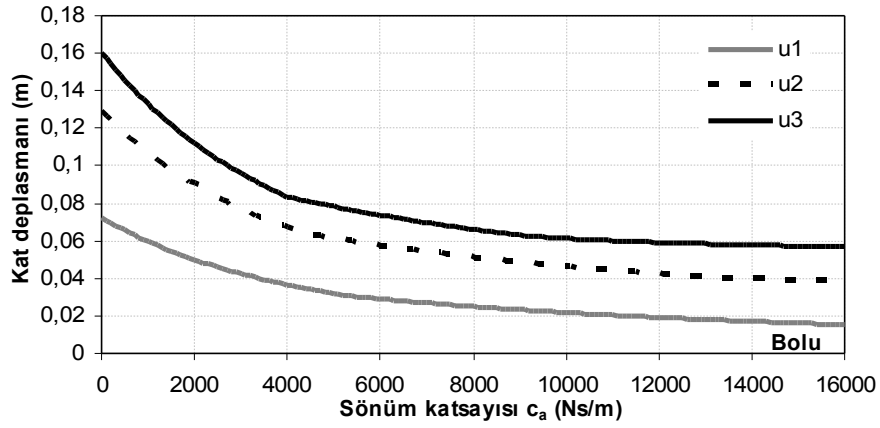
c) 17 Ağustos Kocaeli Depremi (Sakarya İstasyonu)

Şekil 18: Maximum görelî kat hızlarının C_a ile değişimi

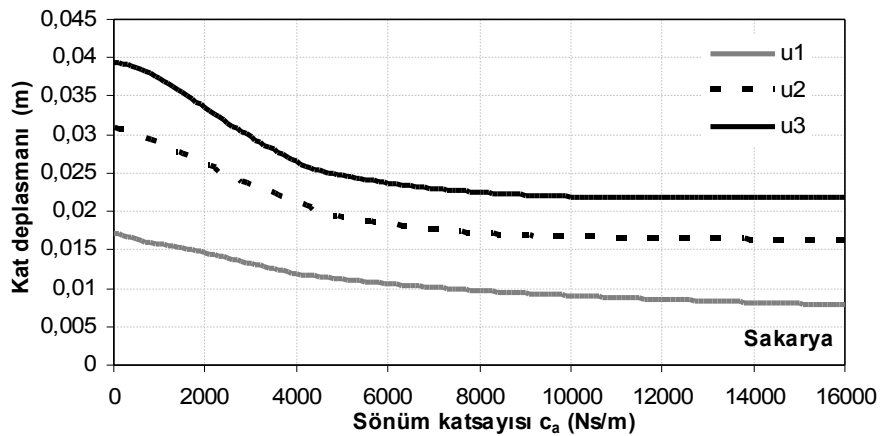
Şekil 19 sönüm katsayısı C_a ile katların maksimum deplasmanlarının değişimini göstermektedir. Her üç grafikten de görüldüğü gibi, sönüm katsayısının artması ile maksimum deplasmanlar bütün depremlerde azalmaktadır. Benzer durum Şekil 20'da çizilen hız değişimleri içinde görülmektedir.



a) 1940 Imperial Valley Depremi (El Centro İstasyonu)

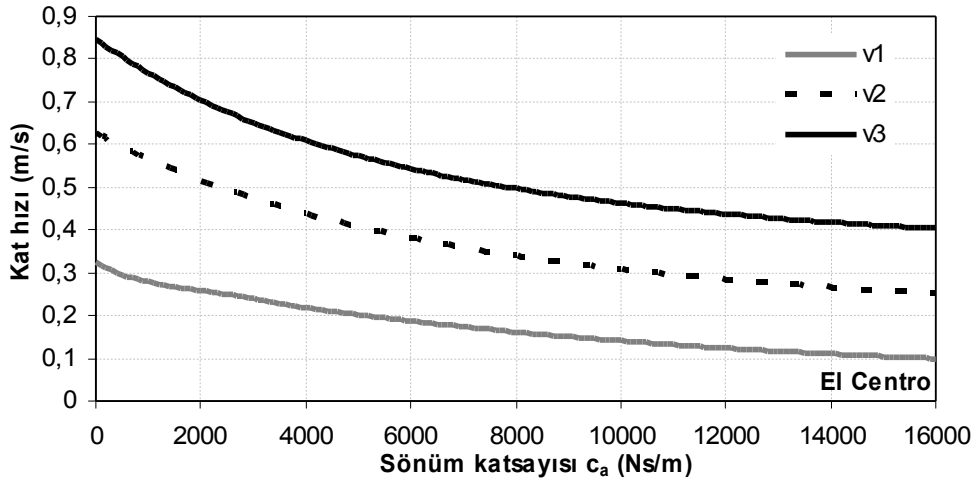


b) 12 Kasım Düzce Depremi (Bolu İstasyonu)

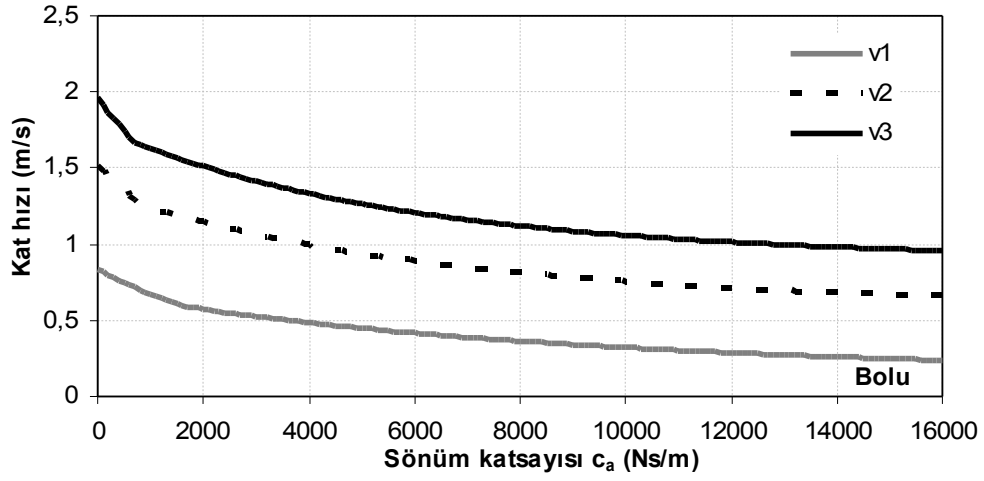


c) 17 Ağustos Kocaeli Depremi (Sakarya İstasyonu)

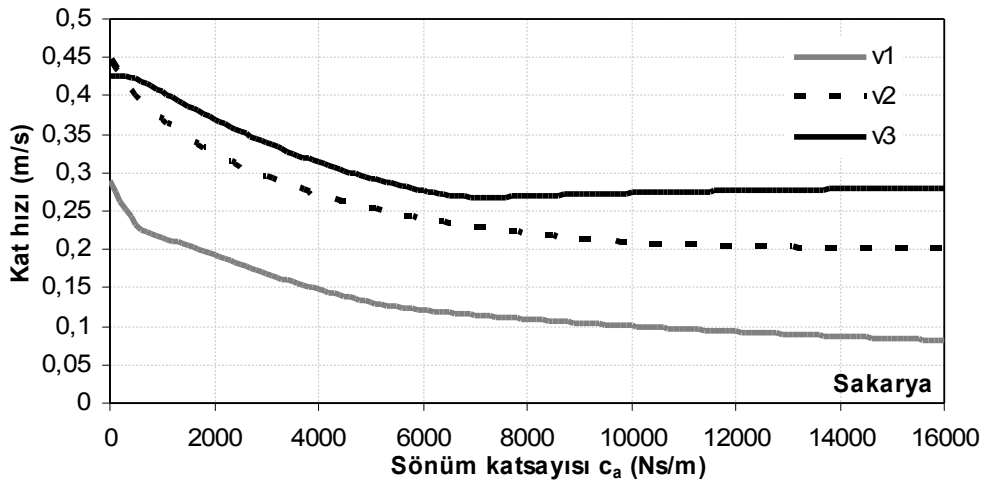
Şekil 19: Maximum kat deplasmanlarının C_a ile değişimi



a) 1940 Imperial Valley Depremi (El Centro İstasyonu)



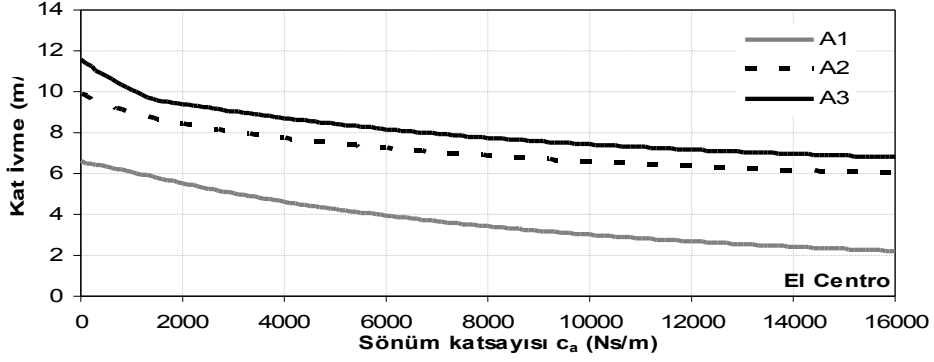
b) 12 Kasım Düzce Depremi (Bolu İstasyonu)



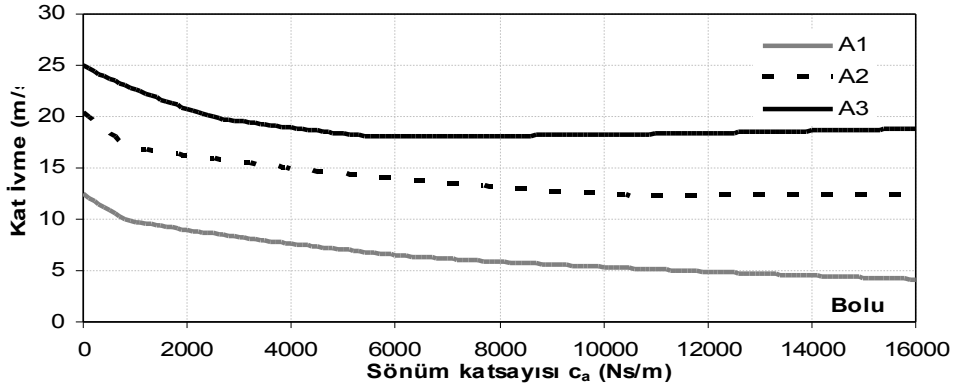
c) 17 Ağustos Kocaeli Depremi (Sakarya İstasyonu)

Şekil 20: Maximum kat hızlarının C_a ile değişimi

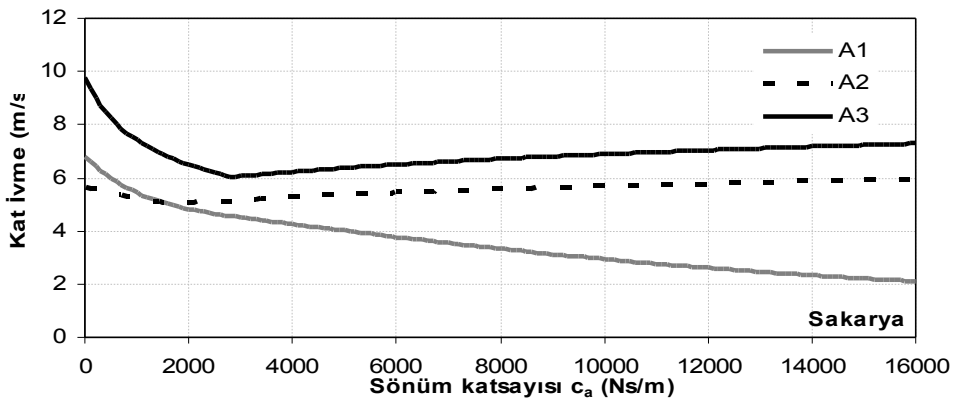
Şekil 21'de kat ivmelerinin, şekil 22'de mutlak kat ivmelerinin sönüm katsayısının değişimi ile nasıl değiştiği gözlenmektedir. Şekil 21(a)'da El Centro deprem etkisi altında üç katın da kat ivmeleri, sönüm katsayısının artması ile düşmektedir. Şekil 21(b)'de birinci ve ikinci katın ivmeleri düşerken, üçüncü katın ivmesinde, sönüm katsayısının 8000 Ns/m değerlerinden sonra biraz arttığı gözlenmiştir. Şekil 21(c)'de birinci katın ivmesi sürekli düşüş içinde iken, ikinci ve üçüncü katın ivmelerindeki düşüş sönüm katsayısının 3000 Ns/m değerlerinden sonra yerini artışa bırakmıştır. Benzer bir durum Şekil 22'de çizilen mutlak kat ivmeleri için de geçerlidir.



a) 1940 Imperial Valley Depremi (El Centro İstasyonu)

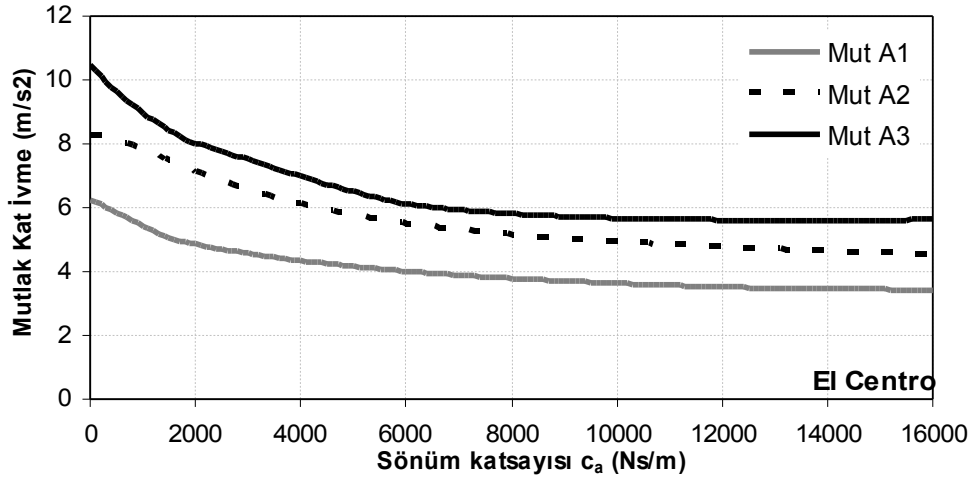


b) 12 Kasım Düzce Depremi (Bolu İstasyonu)

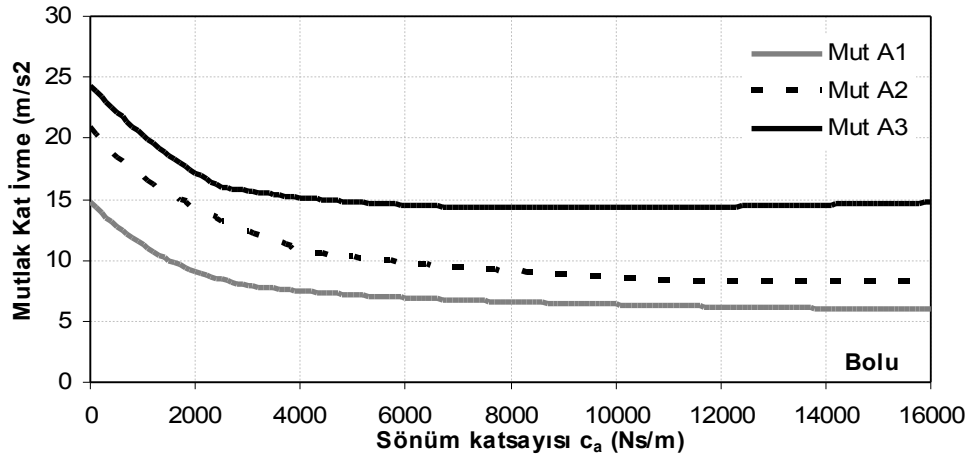


c) 17 Ağustos Kocaeli Depremi (Sakarya İstasyonu)

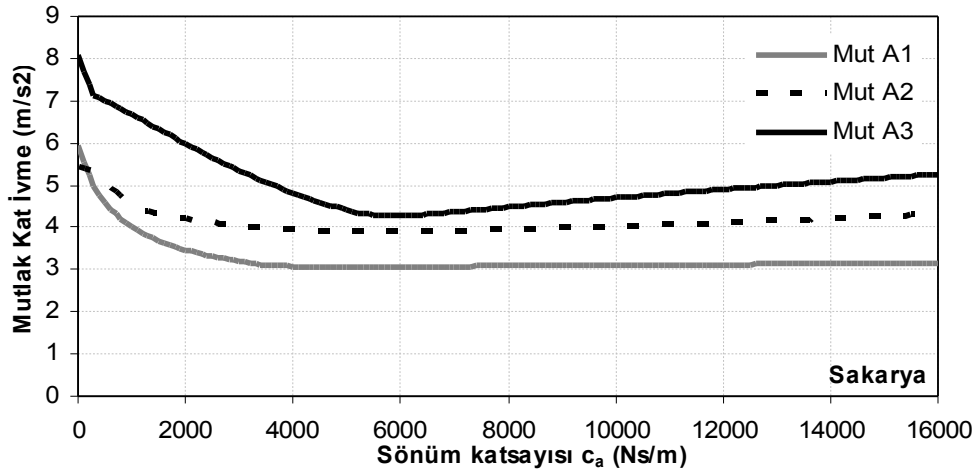
Şekil 21: Maximum kat ivmelerinin C_a ile değişimi



a) 1940 Imperial Valley Depremi (El Centro İstasyonu)



b) 12 Kasım Düzce Depremi (Bolu İstasyonu)



c) 17 Ağustos Kocaeli Depremi (Sakarya İstasyonu)

Şekil 22: Maximum mutlak kat ivmelerinin C_a ile değişimi

Yapıya eklenen sönümleyicinin her adımda pasif sönümleyici olduğu düşünölmüş ve her biri sönüm katsayısı durumunda zaman tanım alanında hesap yapılmış ve davranışın maksimum değerleri bulunmuştur.

Görelı deplasmanlar, görelı hızlar ve ivme değerlerinin sönüm katsayısı ile değişimini gösteren yukarıdaki grafiklerde, farklı depremlerde farklı davranışlar gözlenmiştir. Bu sonuç sönüm katsayısının değişen deprem kuvveti ile değişmesi gereğini ortaya koymaktadır.

Şekil 17'deki maksimum değerler ile Şekil 18'deki görelı kat deplasmanların maksimumları karşılaştırıldığında, deplasman bazlı aktif kontrol sonuçlarının sabit sönümlemeli amortisör sonuçlarının altında oldukları görölmektedir. Mutlak ivmeler karşılaştırıldığında (Şekil 17 ve 22) ise önemli derecede bir fark görölmemektedir.

3.6. Amortisörün Optimum Yerleşiminin Belirlenmesi

Proje kapsamında tasarlanan üç katlı model yapıda yarı aktif sönümleyicilerin yerini bulmak için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapıya eklenecek olan sönümleyicilerin sönüm katsayısını ayarlayan vana açıklığının sabit olduğu durum göz önüne alınmıştır. Toplam sönüm miktarının, yapının birinci modunun dikkate alınmasıyla yapıda optimum dağılımı bulunmuştur. Ayrıca karşılaştırmak amacı ile sadece ikinci modu dikkate alan bir optimum tasarım daha yapılmıştır. Optimum dağılım ile bahsedilmek istenen, elde mevcut olan sönüm katsayısı miktarının hangi katlara ne miktarda yerleştirileceğidir. Bu aşamada sönümleyicilerin pasif bir sönümleyici gibi olduğu varsayılmıştır. Yapıya uygulanacak olan sönümleyicilerin hangi kat seviyelerinde ve ne kadar sönüm kapasitesine sahip oldukları bir pasif sönümleyici gibi kabul edilip bulunduktan sonraki aşamalarda aktif kontrol teorisi ile kontrol kuvvetleri hesaplanarak yarı aktif kontrole geçiş yapılacaktır. Bu bölümde sadece pasif kontrol elemanları olarak düşünölen amortisörlerin optimum yer ve miktarları bulunacaktır.

Yapıların özellikle deprem ve rüzgâr gibi dış etkilere karşı pasif, aktif ve yarı aktif kontrolünün dünyadaki uygulamaları son 20 yılda oldukça artmıştır. Titreşim izolasyon metotlarının çok faydalı olduğu artık açıkça bilinmekte ve uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Yapılarda titreşim izolasyonunda kullanılan izolatörler ve sönüm elemanları hem eski yapıların rehabilitasyonunda hem de yeni yapılarda kullanılabilir. Sönüm elemanları yapısal davranışı iyileştirdikleri aşıkârdır. Bu aşamadan sonra, davranışta en iyi iyileştirmeyi bulmak amacı ile bu elemanların yapı içerisinde nereye, ne miktarda dağıtımını üzerine son yıllarda ilgi artmıştır.

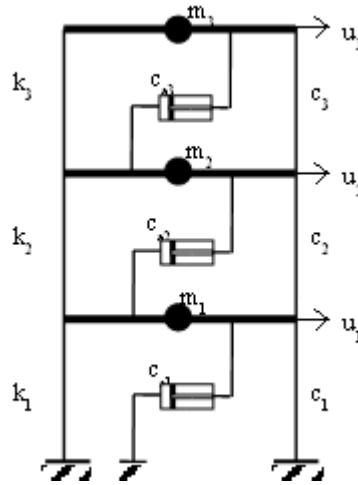
Gürgoze ve Müller, bir sönümleyicinin optimum yerleşimini bulmak için nümerik bir metot göstermişlerdir (GÜRGÖZE, 1992). Hahn ve Sathivageeswara, kayma yapılarının deprem davranışlarında sönümleyici dağılımının etkilerini çalışmış ve üniform kat rijitlikli bir yapı için sönümleyicilerin yapıdaki kat sayısının yarısına, alttan itibaren eklenmesinin yeterli olduğunu bulmuşlardır (HANH, 1992). Zhang ve Soong, özel rijitlikli bir yapının viskoz sönümleyicilerinin optimum konfigürasyonunu bulmak için geliştirilen bir tasarım metodunu göstermişlerdir (ZHANG, 1992). Buna göre, ek bir sönümleyici maksimum görelı kat deplasmanın olduğu kata yerleştirilmesi gerekiyordu, bu basit ve ilkti. Tsuji ve Nakamura, spektrumları uyumlu depremlerin bir kümesi için, hem optimum sönümleyici dağılımını hem de optimal kat rijitlik dağılımını bulan bir algoritmayı amaçlamışlardır (TSUJI, 1996). Masri, keyfi deterministik ve stokastik etkiler için amaçlanan titreşim parametreleri ile titreşimin

düşürölmesi için etkili ve basit bir optimum kontrol yöntemi göstermiştir (MASRI, 1981). Mahendra P. Singh ve Luis M. Moreschi, lineer sönümleyicilerin (viskoz veya visko-elastik) optimal tasarımı için gradyan temelli bir yaklaşım sunmuşlardır (MAHENDRA, 2001). De Silva tarafından, elastik sistemlerin titreşim kontrolünde ayırık pasif sönümleyicilerin optimum tasarımı için bir gradyan algoritması verilmiştir (DE SILVA, 1981). Cao ve Mlejnek, visko-elastik olarak sönümlü yapılarda sönümün tasarımı için bir sonlu elemanlar perturbasyon metodu geliştirmişlerdir (CAO, 1995). Izuru Takewaki tarafından, yapının dinamik davranışını minimize eden optimum sönümleyicilerin yerlerini bulmak için sistematik bir yöntem gösterilmiştir (TAKEWAKI, 2000). Aydın ve diğ. transfer fonksiyonları temelinde optimum sönümleyici dağılımı için Takewaki tarafından verilen yöntemi modifiye ederek yeni bir bir metod amaçlamışlardır (AYDIN, 2007).

Bu bölümde transfer fonksiyonları kullanılarak birinci ve ikinci mod dikkate alınarak yapıya eklenecek olan sönümleyicilerin en uygun olarak, hangi katlara yerleştirileceği problemi incelenecektir. Takewaki tarafından geliştirilen optimum sönümleyici yerleşimi metodu kullanılacaktır (TAKEWAKI, 2000).

3.6.1. Problemin Formölasyonu

Üç katlı Şekil 23'deki gibi bir kayma çerçevesi düşünölsün. Genelleştirilmiş koordinat sistemindeki yer değiştirme vektörü olarak $u(t)$ tanımlanırken, kütlelerin katlarda toplandığı kabul edilsin. M yapının kütle matrisi, K rijitlik matrisi, C ise yapısal sönüm matrisi olarak gösterilsin. Yapısal sönüm matrisi $C = \alpha M + \beta K$ şeklinde rijitlik ve kütle ile orantılı olarak seçilsin. Yapıda j . kat'a eklenecek sönümleyicinin sönüm katsayısı c_{aj} ile gösterilirken, eklenen sönümleyicilerin sönüm matrisi C_a ile belirtilsin.



Şekil 23: Sönümleyicili yapının modeli

Eklenecek olan sönümleyicilerin olmadığı durumda, tek yönlü deprem etkisi altında zamana bağlı hareketin diferansiyel denklemleri,

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -Mr\ddot{u}_g(t) \quad (34)$$

şeklinde yazılabilir. Yer ivmesi $\ddot{u}_g(t)$, ivme ve hız vektörleri $\ddot{\mathbf{u}}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$; yer değiştirme vektörü $\mathbf{u}(t)$, \mathbf{r} elemanları bir olan etki vektörüdür. Zaman tanım alanından frekans tanım alanına Fourier dönüşümü ile geçilirse, Denklem 34,

$$(\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M})\mathbf{U}(\omega) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{U}_g(\omega) \quad (35)$$

formuna dönüştürülebilir. $\mathbf{U}(\omega)$ ve $\ddot{U}_g(\omega)$; $\mathbf{u}(t)$ ve $\ddot{u}_g(t)$ 'nin fourier transformları, ω doğal titreşim frekansı, $i = \sqrt{-1}$ ifadelerini belirtmektedir. Sönümleyiciler eklendiğinde Denklem 35,

$$(\mathbf{K} + i\omega(\mathbf{C} + \mathbf{C}_a) - \omega^2\mathbf{M})\mathbf{U}_a(\omega) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{U}_g(\omega) \quad (36)$$

şeklinde yazılabilir. \mathbf{C}_a eklenen sönümleyicilere ait bilinmeyen sönüm matrisidir. Yeni bir fonksiyon;

$$\mathbf{Y}(\omega) = \frac{\mathbf{U}_a(\omega)}{\ddot{U}_g(\omega)} \quad (37)$$

şeklinde tanımlanırsa, Denklem 36 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{A}\mathbf{Y} = -\mathbf{M}\mathbf{r} \quad (38)$$

\mathbf{Y} transfer fonksiyonuna karşı gelen kat deplasmanları vektörünü gösterirken, \mathbf{A} ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{A} = (\mathbf{K} + i\omega(\mathbf{C} + \mathbf{C}_a) - \omega^2\mathbf{M}) \quad (39)$$

Burada, \mathbf{K} , \mathbf{C} , \mathbf{M} ve $\omega = \omega_n$ olarak bilinmektedir. Tasarım değişkenleri \mathbf{C}_a ile verilen matrisin içindeki c_{ai} sönüm katsayılarıdır. Denklem 38'den \mathbf{Y} transfer fonksiyonu deplasman vektörü çekilirse,

$$\mathbf{Y} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r} \quad (40)$$

şeklinde bulunur.

3.6.2. Optimizasyon Problemi

Optimum sönümleyici probleminin amacı, yapının tepe deplasmanını minimize etmektir. Dolayısı ile amaç fonksiyonu olarak tepe deplasmanı transfer fonksiyonu olarak seçilmiştir. Sönümleyicilerin toplamında bir aktif ve her bir sönümleyicide tasarım değişkeni sayısı kadar pasif kısıtlama mevcut olduğu düşünülürse, amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$J = |Y_n(c_a)| \quad \text{Min} \quad (41)$$

Y_n , en üst katın yatay deplasmanının transfer fonksiyonu değeridir. Eklenen sönümleyicilerin toplamında yapılan aktif ve pasif kısıtlamalar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum_{j=1}^n c_{aj} = \bar{C} \quad (42)$$

$$0 \leq c_{aj} \leq \bar{c}_{aj} \quad (j=1, \dots, n) \quad (43)$$

\bar{C} ve \bar{c}_{aj} , sönümleyicilerin toplamında yapılan bir aktif kısıtlama ve her biri için bilinen üst ve alt sınır değerlerinin gösterildiği pasif kısıtlamalardır. Lagrange çarpanları metodu kullanılarak çözülecek olan problemde, Lagrangian (L) fonksiyoneli yazılırsa,

$$L(c_{aj}, \lambda, \mu, \nu) = J + \lambda(\sum_{j=1}^n c_{aj} - \bar{C}) + (\sum_{j=1}^n \mu_j(0 - c_{aj})) + (\sum_{j=1}^n \nu_j(c_{aj} - \bar{c}_{aj})) \quad (44)$$

şeklinde olmaktadır. Burada λ , $\mu=\{\mu_j\}$ ve $\nu=\{\nu_j\}$ Lagrange çarpanlarıdır.

3.6.3. Optimallik Kriterleri

Amaç fonksiyonunu minimize etmek için sönüm katsayılarının alt ve üst kısıtlamaları olmaksızın $L(\mu=0, \nu=0)$ Lagrangian Fonksiyonelinin, c_{aj} ($j=1, \dots, n$) ve λ 'ya göre türevleri alınır,

$$J_{,j} + \lambda = 0 \quad (j=1, \dots, n) \quad 0 < c_{aj} < \bar{c}_{aj} \quad (45)$$

$$\sum_{j=1}^n c_{aj} - \bar{C} = 0 \quad (46)$$

denklemleri bulunur. Burada $()_{,j}$ c_{aj} 'ye göre kısmi türevleri göstermektedir. Dikkat edilmesi gereken bir şey var ki, o da eklenen sönümleyicilerin sönüm katsayıları negatif olamamasıdır. Bunun fiziksel bir anlamı yoktur. Eğer sönüm katsayılarının alt ve üst kısıtlamaları aktif ise, Denklem 45 aşağıdaki gibi modifiye edilmelidir.

$$J_{,j} + \lambda \geq 0 \quad c_{aj} = 0 \quad (47)$$

$$J_{,j} + \lambda \leq 0 \quad c_{aj} = \bar{c}_{aj} \quad (48)$$

Lineer olmayan bu denklem takımı "steepest direction search algorithm" metodu kullanılarak sayısal olarak çözülecektir (TAKEWAKI, 2000).

3.6.4. Çözüm Algoritması

Kullanılan yöntemde $c_{aj}=0$ ($j=1, \dots, n$) kabul edilerek bir başlangıç tasarımı yapılsın. Eklenen sönümleyicilerin sönüm katsayıları adım adım artırılın ve her adımda hangi yönde artırılacağı bulunsun. Δc_{aj} ve ΔC ; j. kattaki sönümleyicinin katsayısında ve sönüm katsayılarının toplamındaki artış olsun. ΔC verilsin ve $\{\Delta c_{aj}\}$ 'lerin miktarları ve yerleri hesaplınsın. Bu algoritmayı kurmak için amaç fonksiyonunun tasarım değişkenlerine göre birinci ve ikinci dereceden duyarlılıklarının bulunması gerekir.

Denklem 38'in, tasarım değişkeni c_{aj} 'ye göre türevi alınır,

$$A_{,j} Y + A Y_{,j} = 0 \quad (49)$$

şeklinde olur. A tersi alınabilen bir matristir. $Y_{,j}$ terimi Denklem 49'dan çekilirse,

$$Y_j = -A^{-1}A_j Y \quad (50)$$

haline gelir. Burada Y_i ,

$$Y_i = Re[Y_i] + iIm[Y_i] \quad i=1, \dots, n \text{ (Kat sayısı)} \quad (51)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 51'de $Re[Y_i]$ ve $Im[Y_i]$, gerçel ve sanal parçaları gösterir. Y_i 'nin birinci dereceden duyarlılığı da benzer formda aşağıdaki gibi yazılır.

$$Y_{i,j} = (Re[Y_i])_{,j} + i(Im[Y_i])_{,j} \quad (52)$$

Y_i 'nin mutlak değeri ,

$$|Y_i| = \sqrt{(Re[Y_i])^2 + (Im[Y_i])^2} \quad (53)$$

şeklindedir. $|Y_i|$ 'nin birinci dereceden duyarlılığı,

$$|Y_i|_{,j} = \frac{1}{|Y_i|} \{ Re[Y_i](Re[Y_i])_{,j} + Im[Y_i](Im[Y_i])_{,j} \} \quad (54)$$

şekilde yazılabilir. Buradaki $(Re[Y_i])_{,j}$ ve $(Im[Y_i])_{,j}$ Denklem 50 ve 52'den hesaplanır. Denklem 54'in ikinci bir tasarım değişkenine göre türevi alınırsa,

$$|Y_i|_{,jl} = \frac{1}{|Y_i|^2} (|Y_i| \{ (Re[Y_i])_{,l} (Re[Y_i])_{,j} + Re[Y_i] (Re[Y_i])_{,jl} + (Im[Y_i])_{,l} (Im[Y_i])_{,j} + Im[Y_i] (Im[Y_i])_{,jl} \} - |Y_i|_{,l} \{ Re[Y_i] (Re[Y_i])_{,j} + Im[Y_i] (Im[Y_i])_{,j} \}) \quad (55)$$

şeklinde olur. Amaç fonksiyonunun ikinci derece duyarlılığını gösteren bu formülde $(Re[Y_i])_{,jl}$ ve $(Im[Y_i])_{,jl}$ değerleri aşağıdaki gösterildiği gibi Y 'nin ikinci türevlerinden bulunur. Denklem 50'nin l 'ye göre bir defa daha türevi alınırsa,

$$Y_{,jl} = A^{-1}A_{,l}A^{-1}A_j Y + A^{-1}A_j Y_{,l} \quad (56)$$

formuna gelir. Bu denklem türetilirken $A_j^{-1} = A^{-1}A_j A^{-1}$ ilişkisi kullanılmıştır. Görülüyor ki A matrisi c_{ai} 'nin lineer fonksiyonudur. Denklem 50, Denklem 56'da yerine konursa,

$$Y_{,jl} = A^{-1}A_{,l}A^{-1}A_j Y + A^{-1}A_j A^{-1}A_{,l} Y = A^{-1}(A_{,l}A^{-1}A_j + A_j A^{-1}A_{,l}) Y \quad (57)$$

şeklinde olur.

Çözüm Algoritması ($c_{ai} < \bar{c}_{ai}$ hali için):

Adım 0. Başlangıçta eklenen sönümleyicilerin sönüm katsayılarını sıfır al. $c_{ai}=0 \quad i=1, \dots, n$

$\Delta C = \frac{C}{m}$ 'yi farz et (burada m kabul edilen tasarım adım sayısıdır).

Adım 1. $|J|_{,i}$ değerlerini hesapla (Denklem 54'ü kullan).

Adım 2. $-|J|_{,k} = \text{Max}(-|J|_{,i})$ denklemini gerçekleştiren k indisini bul.

Adım 3. $|J|$ değerini $|J| + |J|_{,k} \Delta c_{ak}$ ile yenile.

Adım 4. $|J|_{,i}$ değerini $|J|_{,i} + |J|_{,ik} \Delta c_{ak}$ ile yenile (Denklem 55'i kullan).

Adım 5. Eğer $-|J|_{,k} = \max_{j,j \neq k} (-|J|_{,j})$ durumunu doğrulayan bir j indeksi var ise buna karşı gelen $\Delta \bar{c}_{ak}$ 'yı hesapla ve $|J|_{,i}$ değerini $|J|_{,i} + |J|_{,ik} \Delta \bar{c}_{ak}$ ile yenile (Denklem 55'i kullan).

Adım 6. 2. ve 5. adımlar arasını $\sum_{i=1}^n c_{ai} = \bar{C}$ kısıtlaması gerçekleşene kadar tekrar et.

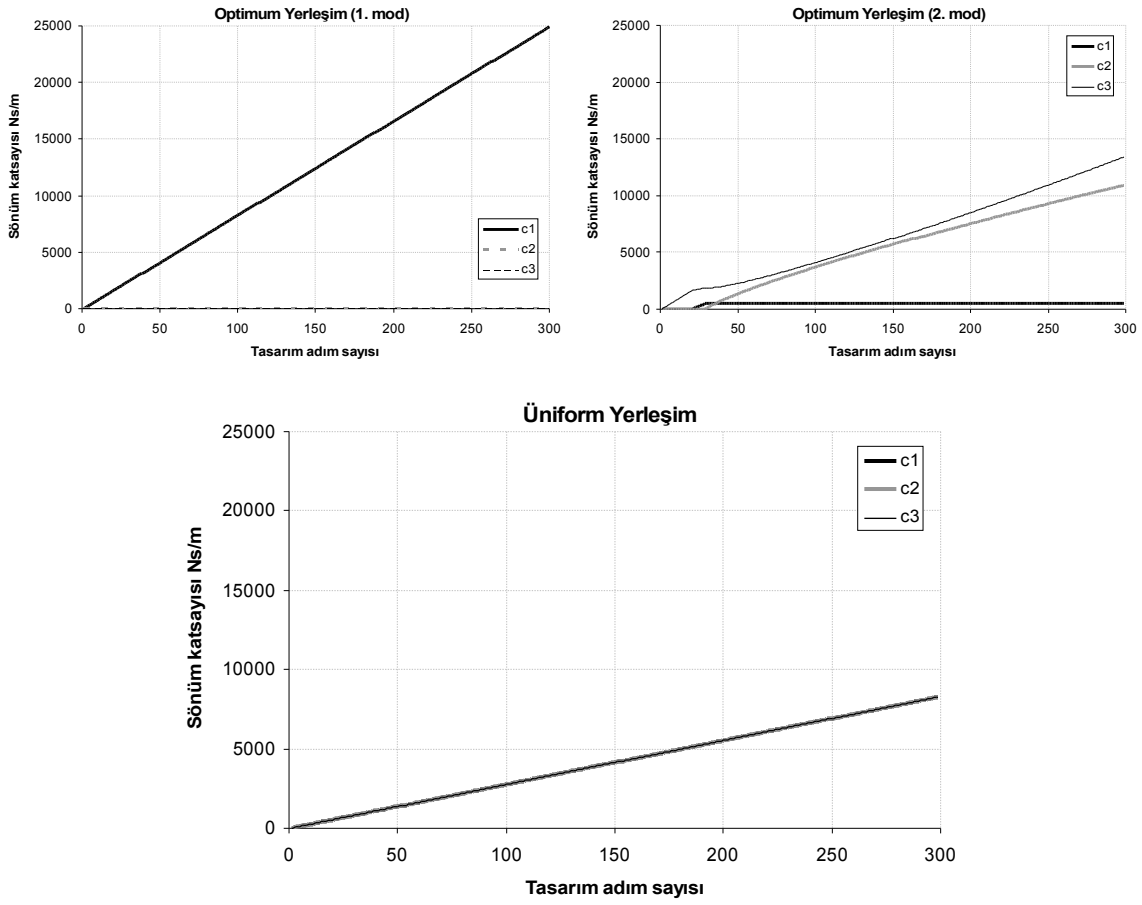
Adım 2 ve 3 de kısıtlama $\sum_{i=1}^n \Delta c_{ai} = \bar{\Delta C}$ altında, düşürülen amaç fonksiyonu bulunur ve o yönde yenilenir. Takewaki tarafından verilen bu algoritmaya Steepest Direction Search Algoritması denir. Matematiksel programlamada iyi bilinen Steepest Descent Metod'a benzetilebilir. Bununla birlikte, geleneksel Steepest Descent Metod gradyan vektörlerini kullanır. Optimallik kriterlerini kullanmaz. Eğer algoritmada katlı indeks var ise (k_1, \dots, k_m), adım 2 ve 3'de $|J|$ ve $|J|_{,j}$ aşağıdaki gibi yenilenmelidir.

$$\begin{aligned} |J| &\rightarrow |J| + \sum_{i=k_1}^{k_m} |J|_{,i} \Delta c_{ai} \\ |J|_{,j} &\rightarrow |J|_{,j} + \sum_{i=k_1}^{k_m} |J|_{,ji} \Delta c_{ai} \end{aligned} \quad (58)$$

3.6.5. Optimizasyon Metodunun Model Yapıya Uygulanması

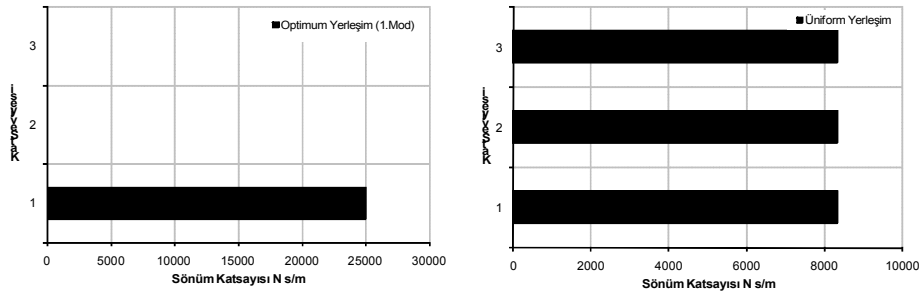
Şekil 23' de görülen 3 katlı üç serbestlik dereceli kayma çerçevesi model yapı olarak seçilmişti. Bütün elemanlarda Elastisite Modülü, $2.0 \cdot 10^{11}$ N/m², her katın kütlesi 200 kg olarak alınmıştır. Kütleler kat seviyelerine toplanmıştır. Sistemin birinci doğal frekansı $\omega_1=12.4393$ rad/s ve ikinci doğal frekansı $\omega_2=34.8541$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Yapı sisteminin ilk iki modu için sönüm oranı $\xi=0.02$ olarak kabul edilmiştir. Eklenen sönümleyicilerin toplamı $\bar{C} = 25000 \frac{Ns}{m}$ olarak seçilmiş, tasarım adım sayısı 300 seçildiği için $\Delta C = \frac{\bar{C}}{300}$ olarak alınmıştır. Üç katlı model yapının kütle, rijitlik, yapısal ve eklenen sönüm matrisleri aşağıdaki gibidir. C_a matrisi tasarım değişkenleri olan eklenen sönümleyicilerin lineer bir fonksiyonudur.

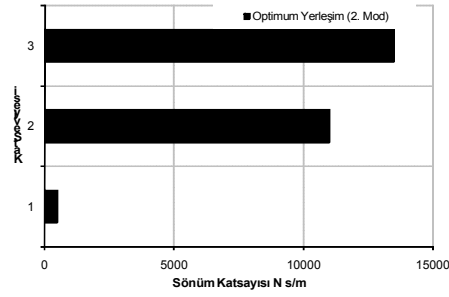
$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \end{bmatrix} kg \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} 312500 & -156250 & 0 \\ -156250 & 312500 & -156250 \\ 0 & -156250 & 156250 \end{bmatrix} N/m \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 337.647 & -132.154 & 0 \\ -132.154 & 337.647 & -132.154 \\ 0 & -132.154 & 205.493 \end{bmatrix} Ns/m \\ \mathbf{C}_a &= \begin{bmatrix} c_{a1} + c_{a2} & -c_{a2} & 0 \\ -c_{a2} & c_{a2} + c_{a3} & -c_{a3} \\ 0 & -c_{a3} & c_{a3} \end{bmatrix} Ns/m \end{aligned}$$



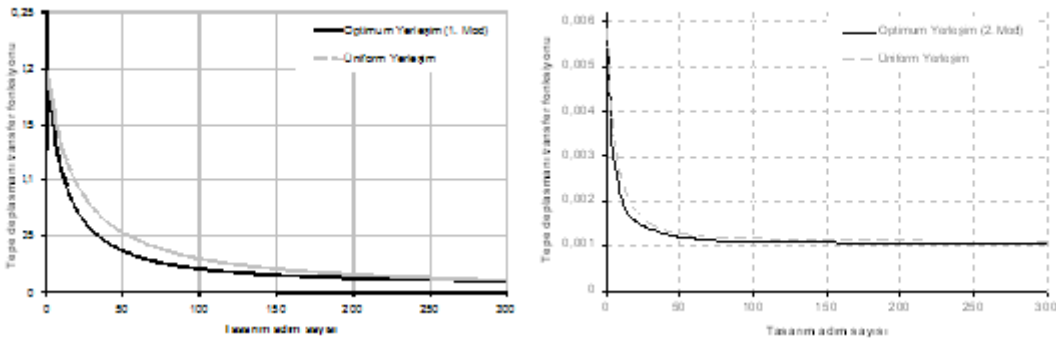
Şekil 24: Tasarım adımlarında sönüm katsayısının değişimi

Bahsi geçen optimum sönümleyici metodu kullanılarak, yapının birinci ve ikinci modu için iki farklı optimum tasarım bulunmuştur. Ayrıca, karşılaştırmak amacıyla eldeki mevcut sönüm miktarının üniform olarak bütün katlara dağıtılması ile oluşturulan Şekil 25'de de görülen üniform sönümleyici tasarımı yapılmıştır. Optimum ve üniform tasarımlarda, tasarım adımlarında sönüm katsayısının nasıl değiştiği, Şekil 24'de görülmektedir. Optimallik kriterlerinin sağlandığı tasarım adımlarının sonunda, Şekil 25'de görülen optimum tasarımlar bulunmuştur. Birinci moda göre bulunan optimum tasarımda eldeki toplam sönüm miktarının sadece birinci kata yerleştirilmesinin tepe deplasmanının minimizasyonu açısından en uygun tasarım olduğu tespit edilmiştir. İkinci moda göre bulunan optimum sönüm katsayısı dağılımı, alt kattan üst katlara doğru artan şekilde bulunmuştur. Birinci moda göre yapılan optimum tasarım bu durumu desteklemektedir.



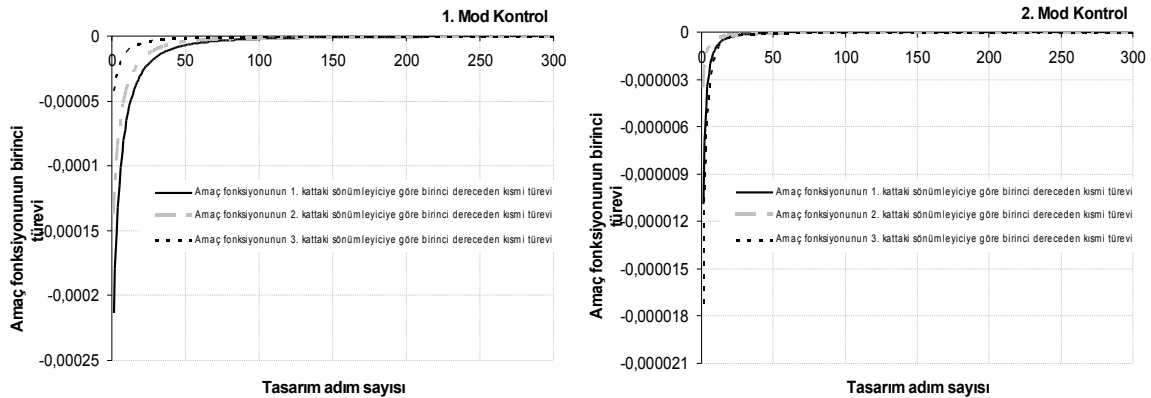


Şekil 25: Sönüm katsayısının optimum ve üniform yerleşimleri



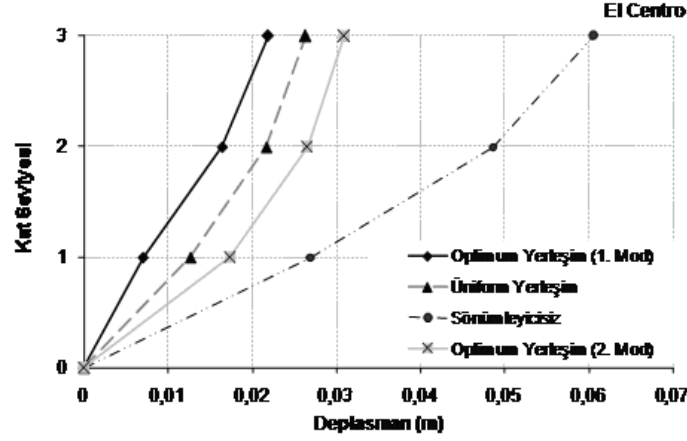
Şekil 26: Tasarım adımlarında amaç fonksiyonunun değişimi

Şekil 26 tasarım aşamalarında amaç fonksiyonu olan tepe deplasmanı transfer fonksiyonu değerinin, bir ve ikinci modlar için optimum ve üniform tasarımlarda nasıl değiştiğini göstermektedir. Tasarım sonunda optimum tasarımın üniform tasarımlardan tepe deplasmanının transfer fonksiyonu değerine göre, az bir fark ile daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir. Optimum ve üniform tasarımlar yapısal davranışı düşürmedeki etkinlikleri açısından birbirlerine oldukça yaklaşırsalar dahi, optimum tasarım az da olsa daha iyi bir performans gösterirken, sadece birinci kata sönümleyici eklenmesi sebebi ile pratik uygulamalar açısından da daha az işçilik ve maliyete sebep olacaktır.



Şekil 27: Tasarım adımlarında amaç fonksiyonunun değişimi

Şekil Error: Reference source not found'de birinci mod ve ikinci mod etkisinde ayrı ayrı yapılan optimizasyon adımlarında tepe deplasmanı transfer fonksiyonu olan amaç fonksiyonunun nasıl değiştiği görülmektedir. Denklem (45), Denklem (46) ve Denklem (47) ile verilen optimalite kriterlerinin gerçekleştiği görülmektedir. Çözülen problemde katlara yerleştirilecek olan sönümleyicilerin sönüm katsayılarında bir üst sınır alınmadığından, Denklem (48) ile verilen optimalite kriteri kullanılmamıştır.



Şekil 28: Sönümleyicili ve sönümleyicisiz yapıdaki tasarımlar için El Centro K-G deprem ivme kaydı kullanılarak bulunan maksimum kat deplasmanları

Birinci ve ikinci modlar dikkate alınarak bulunan optimum tasarımlar ve üniform tasarım zaman alanında hesap ile test etmek için El Centro deprem ivme kaydı kullanılarak zaman alanında hesap yapılmış ve maksimum kat deplasmanları Şekil 28'de çizilmiştir. Optimum tasarım El Centro depremi altında diğerlerine göre oldukça iyi performans göstermiştir.

Sönümleyicilerin toplamının, gerek tepe deplasmanı davranışı gerekse maliyet ve uygulama kolaylığı açısından birinci kata yerleştirilmesi en uygun seçim olacaktır. Yukarıda çözülen optimizasyon problemi bu düşünceyi doğrulamaktadır.

3.7. Kontrol Yasasının Oluşturulması ve Sayısal Analiz

Binanın hareket denklemini, zemin sarsıntısı ve birinci kata etkiyen kontrol kuvveti ile ifade ettiğimizde aşağıdaki denklem ortaya çıkmaktadır.

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = -M \Gamma_d \ddot{x}_g + \Gamma u \quad (59)$$

Burada, x yer hareketine göre deplasman vektörüdür, u birinci kata uygulanan kontrol kuvveti, ve \ddot{x}_g yer sarsıntısının ivmesidir. $\Gamma_d = [1 \ 1 \ 1]^T$ yer sarsıntısının bütün katlara etkidiğini belirtmektedir. Kontrol kuvveti ise sadece birinci kata etkimektedir. Bundan dolayı da $\Gamma = [1 \ 0 \ 0]^T$.

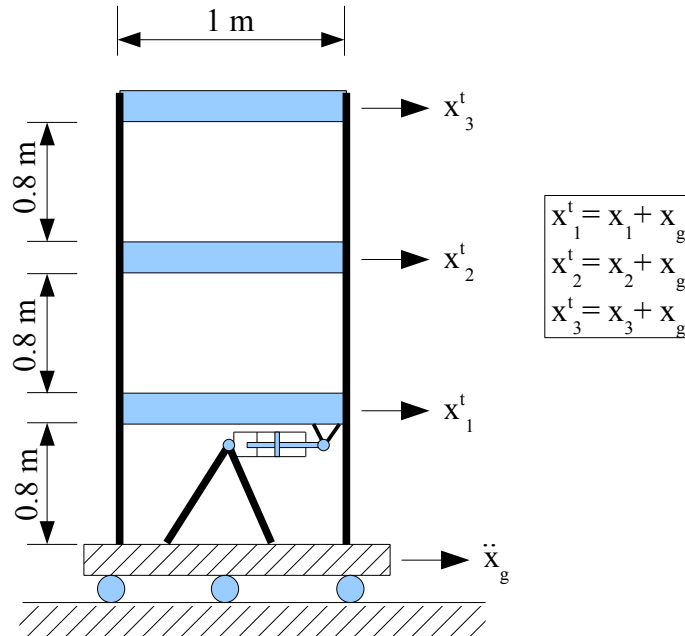
Denklem 59 ikinci mertebeden bir diferansiyel denklemdir. Kontrol yasasını hesaplayabilmek için öncelikle bu denklemi birinci mertebeye indirgenmesi gerekmektedir. Deplasman ve hız serbestlik dereceleri tek bir vektörde toplandıklarında, $q = [x \ \dot{x}]^T$, hareket denklemi durum uzayı formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\dot{q} = Aq + B_1 \ddot{x}_g + B_2 u \quad (60)$$

Yeni oluşturulan A , B_1 , ve B_2 matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix}_{6 \times 6}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ -\mathbf{I}_d \end{bmatrix}_{6 \times 1}, \quad \text{ve} \quad B_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{I} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (61)$$

Denklem 59'deki diferansiyel denklem bir mertebe indirgenmiş olmasına karşın, bilinmeyen sayısı 3 iken 6'ya çıkmıştır.



Şekil 29: Üç katlı bina modeli ile birinci kata yerleştirilen amortisör

Kontrol yasasını oluştururken, yapının hangi davranışının kontrol edilmesi gerektiğine karar verilmesi gerekir. Yapının bu davranışı z ile ifade edilirse, *Doğrusal Karesel Düzenleyici* (LQR) kontrol tasarımı ile z 'nin karesinin zamana göre integrali minimize edilmektedir.

$$\int_0^{\infty} z^* z dt \quad (62)$$

Burada dikkat edilecek bir husus vardır: z değişkeninde, kontrol sinyalinin, u , dahil olması gerekmektedir ve bu doğrultuda aşağıdaki gibi durum vektörüne ve kontrol sinyaline bağlı olarak yazılabilir.

$$z = C_1 q + D_{12} u \quad (63)$$

Denklem 63, Denklem 62'e yerleştirildiğinde aşağıdaki denklem ortaya çıkmaktadır.

$$\int_0^{\infty} \begin{Bmatrix} q^* & u^* \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} C_1^* \\ D_{12}^* \end{bmatrix} [C_1 D_{12}] \begin{Bmatrix} q \\ u \end{Bmatrix} dt = \int_0^{\infty} \begin{Bmatrix} q^* & u^* \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} Q & S \\ S^* & R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ u \end{Bmatrix} dt \quad (64)$$

Ortaya çıkan Q matrisi durum vektörünün, R matrisi ise kontrol sinyalinin ağırlık matrisidir. S matrisi ise durum vektörü ile kontrol sinyali arasındaki ilişkinin ağırlık matrisidir¹.

C_1 , ve D_{12} matrislerin yardımı ile yapının herhangi bir veya daha fazla davranış parametresinin ve yapıya etkiyecek olan kontrol kuvvetlerinin şiddetleri kontrol edilebilir.

Yapısal olarak, kiriş ve kolonlara etkiyecek olan kuvvetlerin çok artmaması istenir. Benzer bir kıstas ise, katlar arasındaki görelî yer değiştirmeleri küçük tutmak olabilir (deplasman kontrolü). Yapı içindeki eşyaların deprem etkisinden etkilenmemelerini sağlamak da ayrı bir kıstas olabilir (toplam ivme kontrolü). Bu kontrol uygulaması daha çok müze veya sarsıntıya hassasiyet gösteren cihazların bulunduğu yapılarda önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda deplasman ve ivme kontrol seçeneklerini ayrı ayrı incelemekte fayda vardır.

3.7.1. Deplasman Kontrolü

Sadece birinci kata etkiyen tek bir kontrol kuvveti ile görelî kat deplasmanlarını küçültürken, toplam performansdan taviz verilir. Birinci katın görelî deplasmanı sıfır olacak şekilde bir kontrol yasası oluşturmak mümkündür. Ancak, bu durumda birinci kat zemine oturuyormuşçasına, diğer iki kat serbestçe salınım yapacaklardır. Aslında üç katlı olan bina, sadece iki katlıymış gibi depremden etkilenecektir. Buna karşılık, her üç katı da dengeli kontrol etmeye çalışırken, tüm katlarda bir miktar görelî deplasman beklenmektedir.

Bütün katların görelî deplasmanları birbiriyle dengeli olacak şekilde bir kontrol yasasının hesaplanması için Denklem 65 oluşturulmuştur. Binanın durum vektörü çözümlenmiş olduğu takdirde, her üç katın görelî deplasmanı aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{C_1} \underbrace{\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix}}_q \quad (65)$$

Denklem 65'da C_1 ile işaretlenen matris, Denklem 63'de kullanılmaktadır ve görelî deplasmanların tanımı için Denklem 63'deki D_{12} matrisine ihtiyaç yoktur. Ancak, kontrol

¹ * matrisin karmaşık eşleniğini ifade etmektedir.

sinyali için bir ağırlık tanımlanmalıdır. Bu uygulama için bütün katlara 5×10^{-6} kontrol sinyali etkiyecek şekilde D_{12} matrisi oluşturulmuştur. C_1 ve D_{12} değişkenlerine karar verdikten sonra, Denklem 66'daki Riccati denklemi X için çözülür (MEIROWITCH, 1989),

$$(A - B_2 R^{-1} S^*)^* X + X (A - B_2 R^{-1} S^*) - X B_2 R^{-1} B_2^* X - S R^{-1} S^* = -Q \quad (66)$$

ve z için optimum geri besleme bağıntısı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

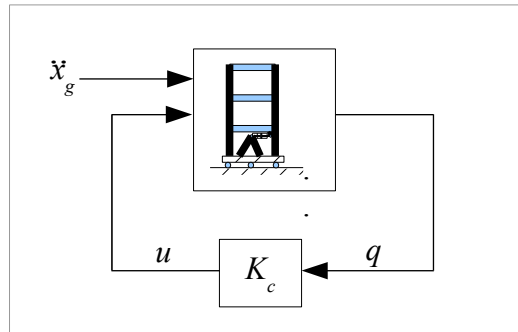
$$K_c = -R^{-1} (B_2^* X + S^*) \quad (67)$$

$$K_c = \{-120059 \quad 86592 \quad -61268 \quad -4717 \quad -1709 \quad -491\}$$

Kontrol sinyali, u , Denklem 64'da hesaplanan K_c ile durum vektörünün, q , çarpımından bulunur.

$$u = K_c q \quad (68)$$

Kontrol mekanizmasının işleyişinin tarifi için Şekil 30'deki şema gösterilmektedir. Üç katlı bina modelini bir sistem kutusu (Denklem 60) niteliğinde düşünmekte yarar vardır. Bu sisteme deprem verisi ve kontrol sinyali girmektedir. Kontrol kuvveti ise kontrol sistem kutusundan (Denklem 68) çıkmaktadır. Sistem kutusuna da bina modelinden durum vektörü girmektedir.



Şekil 30: Üç katlı bina modeli ile birinci kata yerleştirilen amortisör

İlk kontrol aşaması için durum vektörünün (kat deplasmanları ile hızları) tam ve doğru olarak ölçülebildiği varsayılmaktadır. Bu doğrultuda, kontrollü bina modeli için hareketin denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{q}^o = (A + B_2 K_c) q^o + B_1 \ddot{x}_g \quad (69)$$

q^o değişkeni, kontrollü binanın durum vektörüdür (optimize edilmiş olan bina davranışıdır).

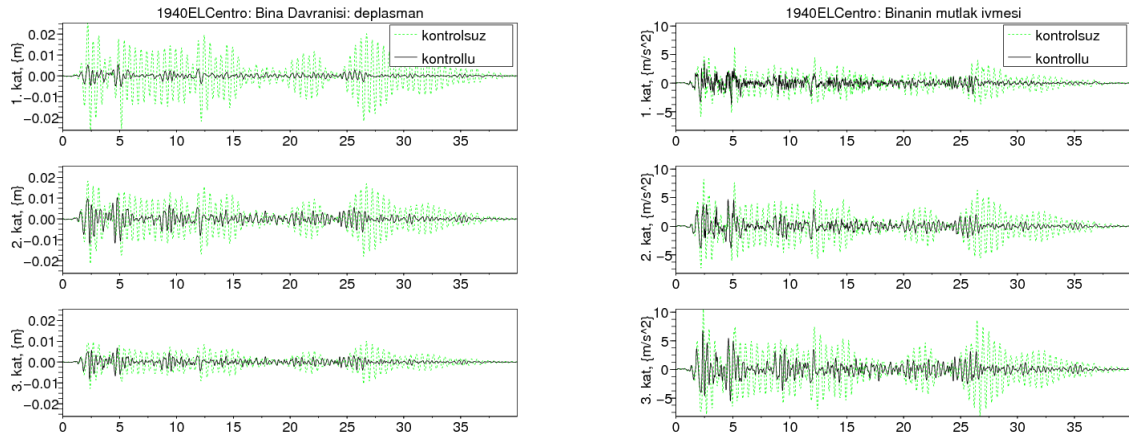
Deprem kaydının ivme değerleri Denklem 69'e girdi olarak verilip, diferansiyel denklemin çözümü sonucunda binanın durum vektörü çözümlenmektedir. Seçilmiş olan üç deprem kaydı ile Denklem 69'un simülasyonu yapıldığında, Şekil 31(a), 32(a), ve 33(a)' da gösterilen görelî kat deplasmanları elde edilmektedir. Kontrol edilen binanın davranışının kontrolsüz bina davranışına kıyasla çok daha küçük olduğu gözlenmektedir. Amortisörler üzerine

etkiyecek olan kontrol kuvvetinin zamana göre davranışı $f = K_c q^o$ şeklinde hesaplanmıştır. Herbir deprem verisi için bu kuvvetin en büyük değeri bulunup, Tablo 5'de gösterilmektedir.

Tablo 5: Deplasman kontrolü: En büyük kontrol kuvvetleri

	1940ELCentro	12KasBOL	17AguSKR
max. $f \{N\}$	853	2319	808

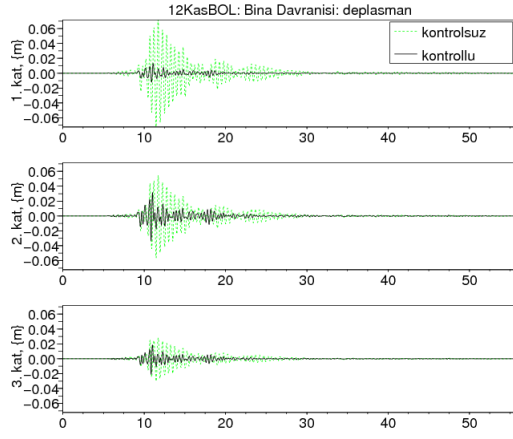
Tablo 5'deki verilere göre amortisörün üretebilmesi gereken en büyük kuvvet 2319 N'dur. Ancak, model hatası ve kontrol uygulamasında oluşacak olan gürültü gibi istenmeyen nedenlerden ötürü, amortisör kuvveti daha az, ya da daha büyük olabilir. Özellikle, büyük olması durumu için, hem amortisörün hem de yük hücresinin arızalanmaması için gerekli önlem alınacaktır. Yük hücresi ile ölçülen amortisör kuvveti üst sınırı aştığında deşarj hattındaki vana gevşetilecektir. Üst sınır ise amortisör deneyleri ile tayin edilecektir.



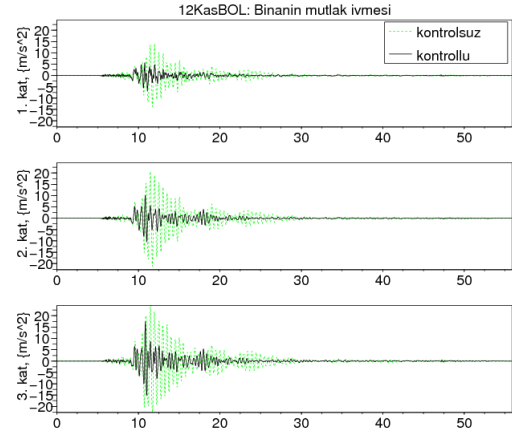
a) görel kat deplasmanları

b) mutlak kat ivmeleri

Şekil 31: Deplasman Kontrolü: 1940 Imperial Valley (El Centro İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları

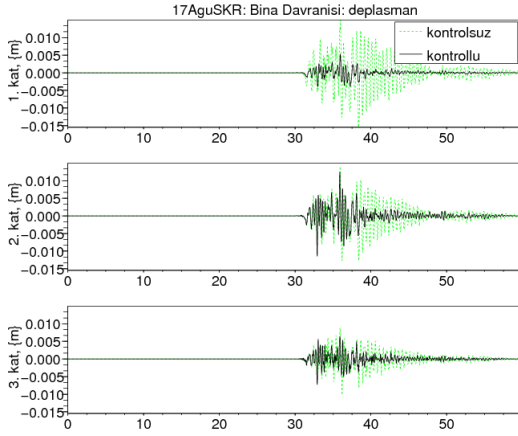


a) görelî kat deplasmanları

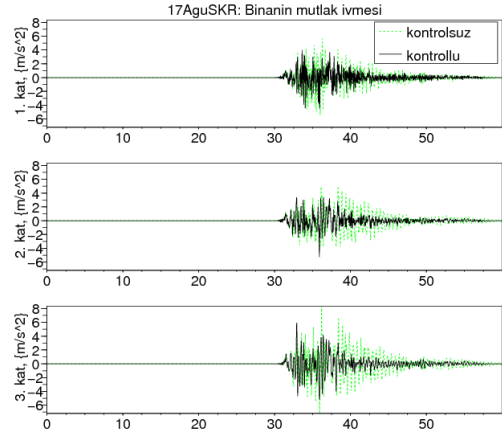


b) mutlak kat ivmeleri

Şekil 32: Deplasman Kontrolü: 12 Kasım 1999 Düzce (Bolu İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları



a) görelî kat deplasmanları



b) mutlak kat ivmeleri

Şekil 33: Deplasman Kontrolü: 17 Ağustos 1999 Kocaeli (Sakarya İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları

3.7.2. İvme Kontrolü

Üç katın ivmelerini küçültmek mümkün olsa da, buna karşılık birinci katın görelî deplasmanı yüksek olacaktır. Birinci katta mutlak deplasman oluşmadıkça, üst katlara herhangi bir atalet kuvveti etkimeyecektir ve dolayısıyla hareket de oluşmayacaktır. Diğer bir ifade ile, birinci kat uzaydaki bir noktaya göre hareket etmediği takdirde ivmelenmesi de söz konusu değildir. Bunun gerçekleşmesi için birinci katın görelî deplasmanı, deprem deplasmanının tersi yönünde olması gerekir. Bütün hareket birinci katın kolonlarında oluşursa, üst katlara herhangi bir atalet kuvveti aktarılmayacaktır. Ancak, ekonomik bir kontrol tasarımından söz

edildiğinde oluşturulabilecek kontrol kuvveti sınırlı olacaktır ve dolayısıyla bütün katların mutlak ivmelerinin sıfır olma durumu olanaksızdır.

Kat ivmelerinin elde edilmesi için Denklem 59'daki hareket denklemi kullanılabilir. Binanın görel ivmesi, \ddot{x} , sol tarafta yalnız bırakıldığında aşağıdaki ifade elde edilmektedir.

$$\ddot{x} = -(M^{-1}K)x - (M^{-1}C)\dot{x} - \Gamma_d \ddot{x}_g + (M^{-1}\Gamma)u \quad (70)$$

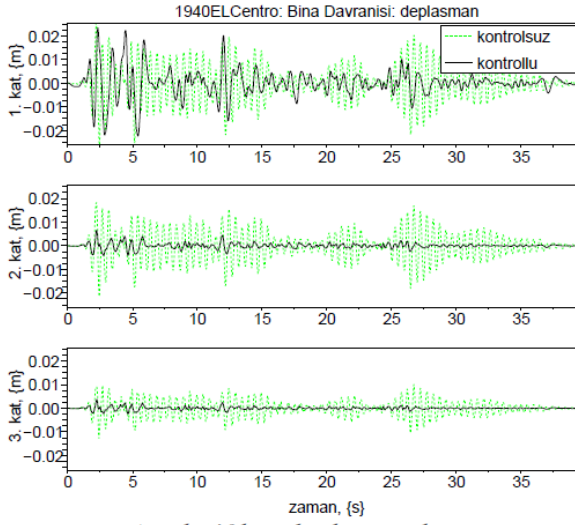
Elde edilen kat ivmeleri zemine göre görel değerlerdir. Buna yer sarsıntısının ivmesi, \ddot{x}_g , ilave edildiğinde mutlak (toplam) ivme değeri aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\begin{aligned} \ddot{x}^t &= \ddot{x} + \Gamma_d \ddot{x}_g \\ &= -M^{-1}Kx - M^{-1}C\dot{x} + M^{-1}\Gamma u \\ &= \underbrace{\begin{bmatrix} -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}}_{C_1} q + \underbrace{\begin{bmatrix} M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}}_{D_{12}} u \end{aligned} \quad (71)$$

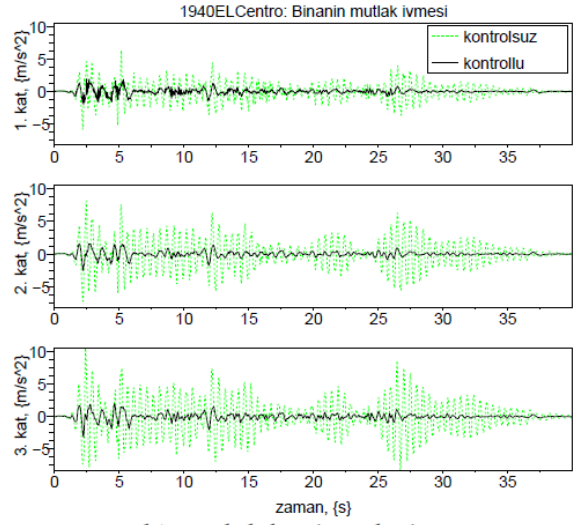
Binanın durum vektörü ve kontrol sinyali hesaplanmış olduğu taktirde, Denklem 70 ile katların mutlak ivme değerleri hesaplanabilmektedir. C_1 ve D_{12} matrisleri ile kontrol edilecek olan davranışı, z , oluştururken, her bir katın ivmesinin farklı bir ağırlık ile çarpılmasında yarar vardır. Bu şekilde katlara verilen *kontrol önemi* dengelenebilmektedir. Bunu daha da genişleterek C_1 'e ayrı ve D_{12} 'ye ayrı çarpanlar oluşturulabilir.

$$z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} C_1 q + \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} D_{12} u \quad (72)$$

Üç katlı binanın ivme kontrolünde, katlar arasındaki davranış farkını dengelemek için, denklem 67'da gösterilen matrisler ağırlık çarpanı olarak seçilmişlerdir. Elde edilen Q , R ve S matrisleri ile Denklem 66 ile ifade edilen Riccati denklemi çözümlenmiştir. Denklem 64 ile (ivme kontrolü kapsamında) geri besleme çarpanı K_c bulunmuştur. Sonunda, benzer şekilde deplasman kontrolünde uygulanan deprem girdileriyle simülasyonlar yapılmıştır ve sonuçları Şekil 34, 35 ve 36'de gösterilmektedir.

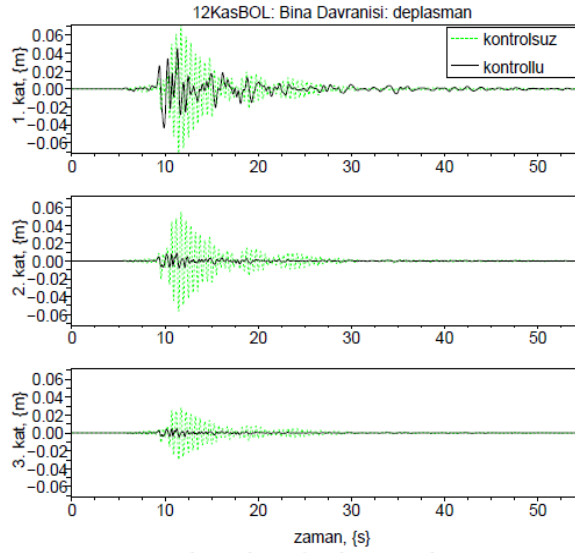


a) rölatif kat deplasmanları

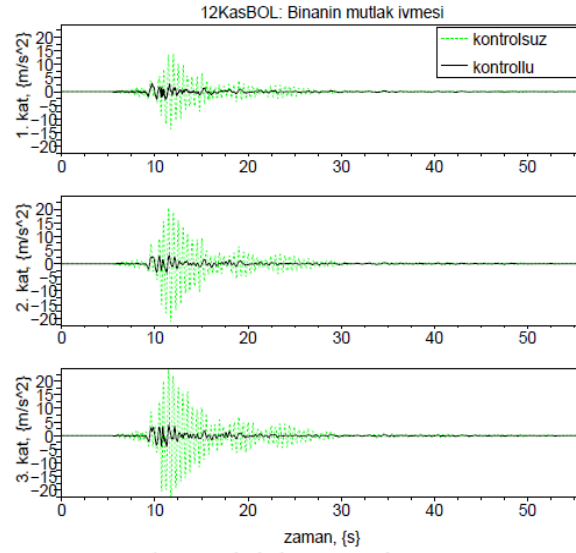


b) mutlak kat ivmeleri

Şekil 34: İvme Kontrolü: 1940 Imperial Valley (El Centro İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları

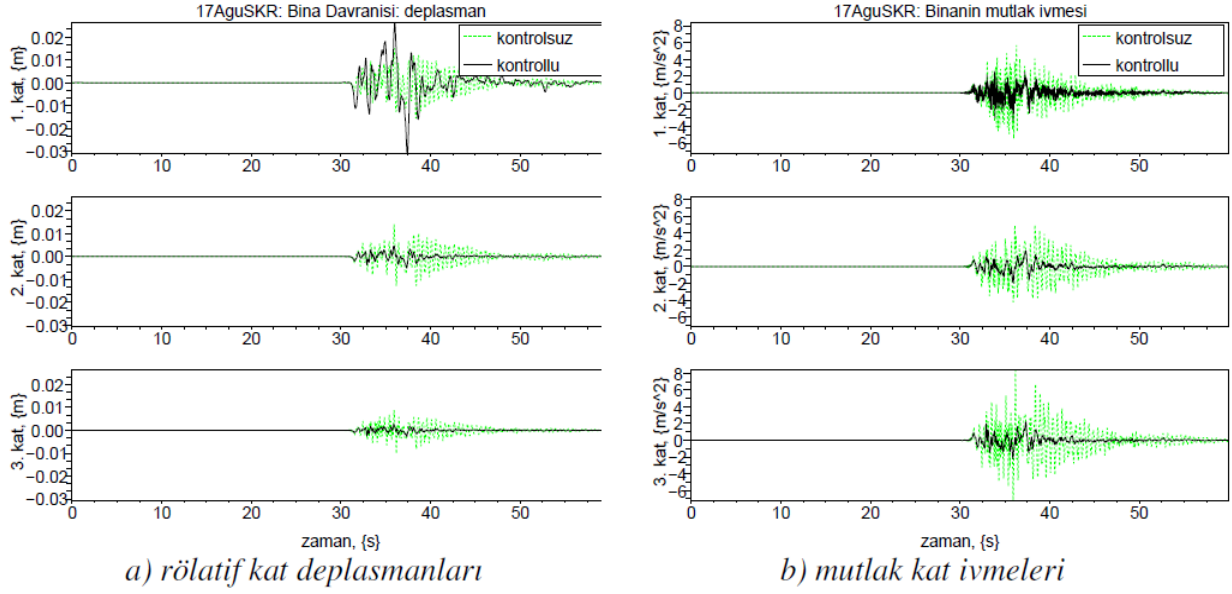


a) rölatif kat deplasmanları



b) mutlak kat ivmeleri

Şekil 35: İvme Kontrolü: 12 Kasım 1999 Düzce (Bolu İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları



Şekil 36: İvme Kontrolü: 17 Ağustos 1999 Kocaeli (Sakarya İstasyonu) depremi etkisi altında binanın kontrollü ve kontrolsüz davranışları

Davranışları gösterilen şekillerde görüldüğü gibi, ikinci ve üçüncü katların görece deplasmanları çok küçük, birinci katın görecesi ise büyüktür. Katların mutlak ivmelerinde ise belirgin bir azalma olduğu gözlemlenebilir. Tablo 6'deki verilere göre amortisörün üretebilmesi gereken en büyük kuvvet 3035 N'dur.

Tablo 6: İvme kontrolü: En büyük kontrol kuvvetleri

	1940ELCentro	12KasBOL	17AguSKR
max. $f \{N\}$	1508	3035	1971

Deplasman kontrolü ve ivme kontrolü sonucunda simülasyon sonuçları incelendiğinde, belirgin farklar gözlenmektedir. Deplasman kontrolünde birinci katın görece deplasmanı daha küçüktür ve diğer katlarda da %30'dan fazla azalma görülmektedir. İvme kontrolünde ise katların mutlak ivmelerinde %50'den fazla azalma olduğu anlaşılmaktadır. Katların mutlak ivmeleri düşük olduklarından dolayı mutlak deplasman değerleri de düşüktür. Ancak, beklendiği gibi birinci katın görece deplasmanı küçülmemiştir.

3.7.3. Kalman Filtresi Tasarımı

Geri besleme kontrol uygulamalarında yapının durumu hakkında bilgi gerekir. Bina tipi yapılarda geri beslenmesi gereken bilgiler yapının deplasmanı ve hızlarıdır. Ancak, sadece deplasman ve ivme ölçen algılayıcılar bulunmaktadır, kat hızını doğrudan ölçen algılayıcı bulunmamaktadır. Bu nedenle yapının her katının hız değerlerini elde etmek için özel bir işlem uygulanmıştır. Bu işlem Kalman filtresi olarak bilinir.

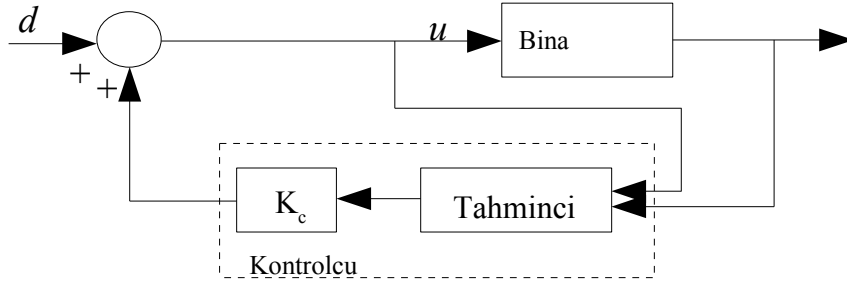
Yapının hareket denklemi birinci dereceden diferansiyel denklem takımı şeklinde yazılırsa

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{d} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u} \quad (73)$$

$$z = C_1 x + D_{11} d + D_{12} u \quad (74)$$

$$y_m = C_2 x + D_{21} d + D_{22} u \quad (75)$$

burada x durum vektörü (binanın kat deplasman ve hızlarından oluşur), z düzenlenmiş (kontrol edilecek olan) değişkenlerin vektörü, y_m ölçülmüş değerler vektörü, d bir boyutlu deprem ivme kayıtlarını ve u kontrol kuvvetini ifade eder. A , B_1 , B_2 , C_1 , D_{11} , D_{12} , C_2 , D_{21} , D_{22} uygun boyutlardaki sistem matrisleridir.



Şekil 37: Temel kontrol algoritması ve elemanları

Kalman filtresi, sensör ölçümleri, y_m , kullanarak bina durum vektörünü, x , optimum olarak tahmin edebilmektedir, x_e . Bu çalışma ile algılayıcı ölçümlerinden elde edilecek veriler katlar arası göreceli deplasmanları ve binaya etkileyen deprem ivmesi olarak tanımlanmış, tahmin edilecek durumlar ise kat deplasman ve hızları olmuştur. Kalman filtresi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (ANTSACLIS, 1997).

$$\dot{x}_e = A x_e + B_1 d + B_2 u + K_e (y_e - y_m) \quad (76)$$

Burada K_e Kalman kazanç matrisini temsil eder, x_e tahmin edilecek durum vektörünü, $y_e = C_2 x_e$ tahmin edilen ölçüm vektörünü ifade eder.

Optimal kontrol uygulamasına göre kontrol kuvveti, u , aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$u = K_c x_e \quad (77)$$

Burada K_c kontrol için geri besleme kazancını temsil eder.

Denklem 74, Denklem 73 içine yerleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\dot{x}_e = A x_e + B_1 d + B_2 (K_c x_e) + K_e (y_e - y_m) \quad (78)$$

$y_e = C_2 x_e$ eşitliği Denklem 75 içine yazılırsa Denklem 76 elde edilir:

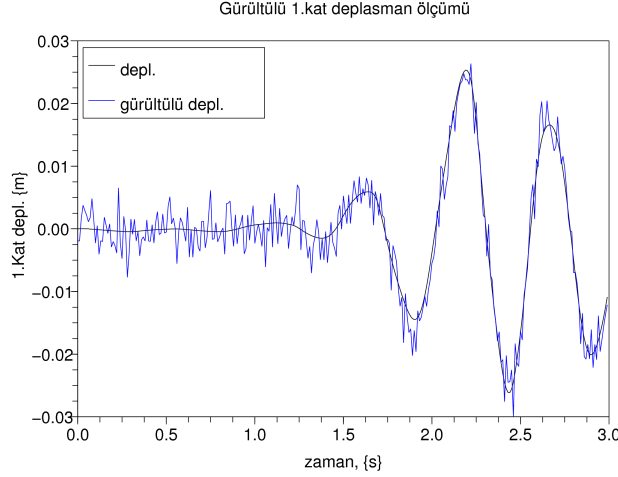
$$\dot{x}_e = A x_e + B_1 d + B_2 (K_c x_e) + K_e (C_2 x_e) - K_e y_m \quad (79)$$

Bütün bu düzenlemelerden sonra kalman filtre denklemini aşağıdaki şeklini alır.

$$\dot{x}_e = (A + B_2 K_c + K_e C_2) x_e + B_1 d - (K_e y_m) \quad (80)$$

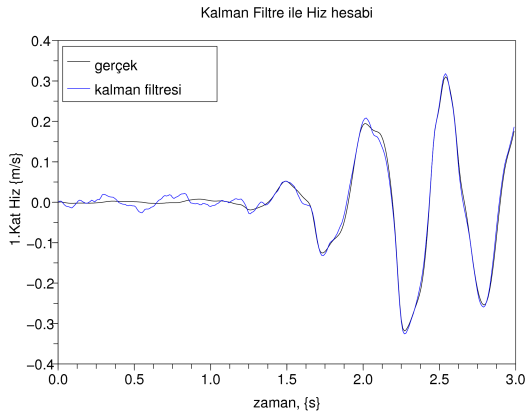
Sonuç olarak deprem girdisi ve bina davranışından bazı değişkenler ölçülebildiğinde Denklem 77 kullanılarak yapının durum vektörü (kat deplasman ve hızları) hesaplanabilir.

Örnek bir uygulama olarak, üç katlı binamızın kat deplasmanları ölçüldüğü ve ölçüm sistemine gürültü de dahil olduğu düşünülmüştür. Şekil 38'de üç saniyelik El Centro depremi etkisi altında, birinci katın gerçek deplasmanı ve yapay olarak tasarlanan gürültülü ölçümü göstermektedir.

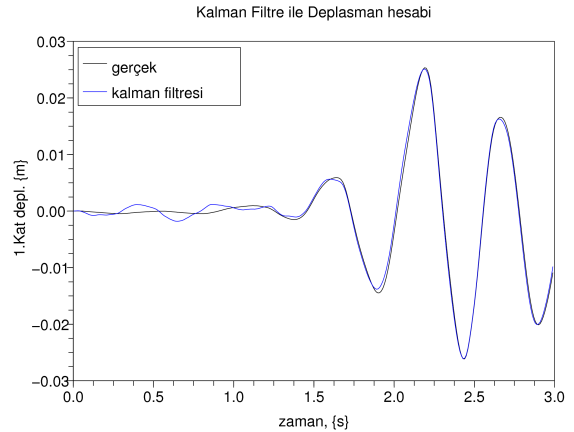


Şekil 38: Gürültülü 1. kat deplasman ölçümü

Benzer şekilde, her ölçüme (3 katın deplasmanı ve zemin kattaki deprem sinyali) genliği oranında gürültü eklenmiş ve Denklem 77'de tasarlanan Kalman filtresi ile istenen kat hızları elde edilmiştir. Hızların hesaplanmış olmasına ilave olarak ölçülen gürültülü deplasmanların yerine Kalman filtresi ile hesaplanan deplasmanlar kullanılabilir, çünkü onlar gürültüden arındırılmıştır (bkz. Şekil 38 ve 37).



Şekil 39: Kalman Filtresi ile 1. kat hızı



Şekil 40: Kalman filtresi ile 1. kat deplasmanı

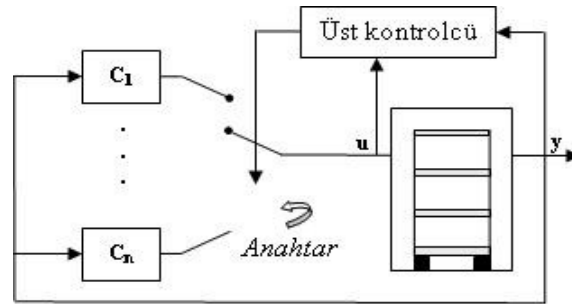
3.8. Yarı-Aktif Sismik Sönümleyicinin Kazanç Programlamalı Kontrolü

Yarı aktif kontrolün, özellikle taban izolasyonlu sistemlerde izolasyon seviyesindeki yüksek deplasmanları engellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde tabana yerleştirilmiş sismik izolasyonlu üç katlı model yapının kazanç programlamalı kontrolüyle ilgilenilmiş ve sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Kontrol sistemi, vana açıklığı değişken bir sönümleyiciden ve bu sönümleyiciye paralel olarak yerleştirilmiş bir taban izolasyon sisteminden oluşmaktadır. Vana açıklığı değiştikçe sistem doğrusal

davranmamaktadır. Her farklı vana açıklığı için ayrı bir doğrusal sistem oluşmaktadır ve herbir alt kontrolcü bu doğrusal alt sistemlere aittir. Tüm sistem birçok alt doğrusal sistemlerden ve onların alt kontrolcülerinden meydana gelmektedir. Sönümleyicinin uygun vana açıklığı, üst kontrol sistemi yardımıyla birçok alt kontrol sistemi arasından seçim yapılarak belirlenmiştir. Kazanç programlamalı kontrol yardımıyla sismik izolatörlerinin aşırı deplasman yapmaları ve hasara uğramaları önlenmeye çalışılmıştır. Sistemin davranışı kaynağa yakın ve uzak karakterde deprem kayıtlarıyla benzetilmiştir. Sonuçlar minimum ve maksimum sönüm değerlerine sahip amortisörün tepkileriyle kıyaslanmıştır. Yapısal tepkilerin büyük olduğu anlarda kontrolcü sayesinde izolatörler korunmuştur. Taban seviyesindeki ötelenme ve hızlar, minimum sönümlü pasif aygıtla kıyasla her iki yer itkisi için de 50% azalmıştır. Bu çalışmadan edinilen önemli bulgulardan biri, taban seviyesindeki yüksek sönümün sismik yalıtımlı binalar için karlı olmadığıdır. Gelecekte olacak bir depremin kaynağının yapıya uzaklığı bilinmeyeceği için taban izolasyonlu sistemlerde bu durum göz önüne alınmalıdır. Sonuç olarak sismik yalıtım uygulanmış yapılarda izolasyon sistemlerini korumak için taban seviyesinde yarı-aktif kontrol edilebilen bir sönümleyici yerleştirilmesi uygun bir çözüm olur.

3.8.1. Kazanç Programlamalı Kontrol

Kazanç programlamalı kontrol, doğrusal olmayan sistemler için uygun olan bir uyarlamalı kontrol tekniğidir. Doğrusal olmayan bir sistem farklı işletme noktalarındaki doğrusal sistemlerin bir birleşimi olarak düşünülebilir. Bu fikrin ışığında amortisörlü üç katlı izolatörlü çerçeve modeli için, küçük vana açıklıklarıyla çalışmak şartıyla, doğrusal sistem yaklaşımı uygulamak yerinde olacaktır. Kazanç programlama tekniği sistemin farklı işletme noktaları için tasarlanmış bir doğrusal kontrolcüler ailesinden oluşur. Sistemin mevcut işletme bölgesi bazı sistem değişkenleri yardımıyla belirlenir. Böylece bahsedilen işletme bölgesi için uygun doğrusal kontrol sistemi uygulanır. Buna benzer bir denetleyici kontrol mimarisi Şekil 41'de verilmiştir. Burada c_k ($k=1,2,\dots,n$) katsayıları farklı vana açıklıkları için belirlenmiş amortisör sönüm katsayılarıdır. Üst kontrolcü, sistemin ihtiyaçlarına göre bu katsayılar arası seçim yapar.



Şekil 41: Denetleyici kontrol

Mevcut çalışmada doğrusal olmayan sistem birçok kararlılık noktasında doğrusallaştırılmıştır ve her noktada belirlenmiş performansı gerçekleştirmek için doğrusal geri beslemeli kontrol tasarlanmıştır. Doğrusal kontrolcüler, parametreleri programlama değişkenlerini izleyerek değiştirilen tek bir kontrolcü gibi birleştirilmiştir. Bir kontrolcüden diğer bir kontrolcüye geçmek için bir algoritma tasarlanmıştır.

3.8.2 Yarı-Aktif Sönümleyicili Taban İzolasyonlu Sistemin Matematik Modeli

Kontrol sistemi, sismik enerjinin bir kısmını sistemden uzaklaştırmak için yapının periyodunu uzatan taban izolatörlerinden ve izolasyon sisteminin yer değiştirmesini kabul edilebilir bir seviyede kısıtlamak için enerji sönümleyici bir aygıtın oluşmaktadır. Model yapı üç katlı ve bir tabanlıdır. Tabanda elastomer taban izolatörleri kullanılmıştır. Sönümleyici taban ile yer arasına rijit bir şekilde yerleştirilmiştir. Yapının tepkisinin doğrusal bölgede kaldığı kabulüyle tüm sistemin hareket denklemi şöyledir:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -\Gamma f_D - M\Lambda \ddot{x}_g \quad (81)$$

Burada **M** tüm sistemin köşegen kütle matrisidir. **C** ve **K** sönüm ve rijitlik matrisleridir. n kat adedi olmak üzere **M**, **C**, **K** matrisleri (n+1) boyutunda kare matrislerdir. f_D sönümleyici tarafından sağlanan kuvvettir. Yer değiştirme vektörü $\mathbf{x}=[x_b \ x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ şeklindedir. x_b tabanın yere göre yer değiştirmesi ve x_j 'ler ($j=1,2,3$) katların yere göre yer değiştirmeleridir. Γ ve Λ sönümleyici kuvvetinin ve yer itkisinin sisteme girişlerini tanımlayan etki vektörlerdir ve (nx1) boyutunda kolon vektörlerdir.

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_{\text{sistem}} + \mathbf{C}_D, \quad \mathbf{C}_D = \begin{bmatrix} c_D & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \Lambda = [\mathbf{1}] \quad (82)$$

Burada $\mathbf{C}_{\text{sistem}}$ üstyapıya ait ve (nxn) boyutundaki sönüm matrisidir. c_D amortisörün sönüm katsayısıdır.

3.8.3. Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR)

Optimal kontrol algoritmasında sistemi bazı fiziksel kısıtları sağlamaya zorlayan ve aynı zamanda seçilmiş bir performans ölçütünü en küçükleyen kontrol parametrelerinin değerleri belirlenir. Doğrusal ve durum geri-beslemeli kontrolcü $u_c = -K_c \bar{x}$ tasarlanır. Sistemin durumları $\bar{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} & \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix}^T$ şeklinde $2*(n+1)$ boyutunda bir vektördür. Burada $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$ değişkenleri, Denklem 81'de kullanılan değişkenlerdir ve üst nokta zamana göre türevi ifade etmektedir. Sistemin durumlarına bağlı en uygun kontrol kuvvetini sağlayabilmek için doğrusal optimal kontrolcü K_c hesaplanır. Gereken amortisör kuvveti u_c , sistemin durumlarıyla kazanç matrisi K_c 'nin çarpılmasıyla elde edilir. Mevcut çalışmada sistemin durumları yere göre kat deplasmanları ve yere göre kat hızlarıdır. Yukarıdaki satırlarda bahsedilen performans ölçütü, aşağıda verilen maliyet fonksiyonu ile ifade edilir:

$$J = \int_0^{\infty} (\bar{\mathbf{x}}^T \mathbf{Q} \bar{\mathbf{x}} + u_c^T \mathbf{R} u_c) dt \quad (83)$$

Burada **Q** ve **R**, sırasıyla, sistemin durumlarının ve kontrolün ağırlık matrisleridir. Optimal kontrol kuvveti $u_c = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{x}}$ formülüyle hesaplanır. Burada **P** cebirsel Riccati denkleminin çözümü olan Riccati matrisidir. **B** matrisi durum-uzayı gösterimindeki girdi matrisidir ve birlerden oluşan (n+1) boyutunda bir kolon vektördür.

Q ve **R** değerleri denenmiş birçok değer arasından en uygun tepki elde edilecek şekilde seçilmiştir. Sönümleyici mevcut zaman adımında sistemin ihtiyaç duyduğu ve hesaplanan kontrol kuvvetini dinamik özellikleri ve fiziksel kısıtlardan dolayı sağlayamamaktadır. Bu yüzden hesaplanan kontrol kuvveti u_c ile sönümleyici tarafından sağlanan f_D kuvvetinin birbirine en yakın olabildiği **Q** ve **R** değerleri seçilmiştir. **R** değeri $0.95 \cdot 10^{-8}$ 'dir. Zemine ait değerlerin ağırlıkları katların ağırlıklarına göre beşin karekökü kadar fazladır. Hızların ağırlıkları yüzde birin karekökü oranında fazladır. Mevcut çalışmada hareket denklemi, yere göre görelî değerler için düzenlenmiştir. Fakat kontrol edilmek istenen değerler katıçı ötelenmeleri ve katıçı hızlarıdır. Burada katıçı olarak ifade edilen değerler, ilgili katın bir alt kata göre tepkisidir. Bu sebepten **Q** matrisine bir dönüşüm uygulanmıştır ve **Q** matrisinin dönüştürülmüş hali aşağıda verilmektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} 6 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1.05 & -0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.05 & 0.06 & -0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.01 & 0.02 & -0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.01 & 0.02 & -0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.01 & 0.01 \end{bmatrix} \quad (84)$$

3.8.4. Değişken Vana Açıklıklı Sönümleyici

Kullanılan sönümleyicinin üretimi için bir piston, iki hücreyi birbirine bağlayan bir kanal ve bu kanala seri bağlı, step motor kontrollü bir vana eklenerek değiştirilmiştir (Şekil 11). Sayısal hesaplamalarda, sönümleyicinin vana açıklığına bağlı olan sönüm değeri 50 Ns/m'lik artışlarla 100 Ns/m ile 5000 Ns/m değerleri arasında değişmektedir. Burada amaç sistemin mevcut durumu için en uygun vana açıklığını belirlemektir. Alt sınır değeri vananın yüzde onluk bir sönüm değerine karşılık gelirken; üst sınır değeri pistonun kapasitesi aşılmayacak şekilde belirlenmiştir. Taban izolasyonlu bina için kritik sönüm değeri yaklaşık olarak 810 Ns/m'dir. Alt ve üst sınırdaki sönüm değerlerini belirlemek için ikinci bir kriter olarak alt sınırın %10 sönüme, üst sınırın aşırı sönümlü bir davranışa karşılık gelmesi seçilmiştir. Böylece sönümleyicinin geniş bir aralıkta çalışması sağlanmıştır. Durumlar arası geçişin uygulanabilir olması için sönüm artış değeri 50 Ns/m gibi küçük bir değer seçilmiştir. Bu sönüm aralığı, kontrolcüye sistemi harmonik veya çok rijit bir davranışa sokabilme olanağı vermektedir. Eniyileme, LQR yöntemiyle en uygun kontrol kuvveti hesaplanarak gerçekleştirilir. Ayrıca, fiziksel şartlardan dolayı, sönümleyicinin sağlayabileceği en yüksek kuvvet değeri 5000 N değeriyle kısıtlanmıştır.

3.8.5. Üst Kontrolcü

Deprem benzetimi sırasında farklı geri besleme kazançlarına geçebilmek için bir üst kontrolcü tasarlanmıştır.

İlgilenilen 4 serbestlik dereceli sistemin farklı vana açıklıklarında farklı sönüm değerlerine sahip olacağı için her farklı vana açıklığına ait sistem matrisleri yardımıyla K_c kazancı hesaplandı. Denklem 85'de i . zaman adımına ait optimum sönüm katsayısı c_D , i . zaman adımında gereken sönümleyici kuvvetinin sönümleyicinin hızına bölünmesiyle elde edildi.

$$c_{D,i} = \frac{c_{D,i-1} * X_{D,i} - u_{C,i}}{X_{D,i}} \quad (85)$$

Sönümleyiciler sistemden enerji yutabilir. Bu yüzden sönüm kuvveti sadece hızına ters yönlü etkiyebilir. Eğer hesaplanan optimum sönüm sabiti c_D negatif işarete sahipse gereken kuvvet üretilmeyecektir. Bu durumda sönüm sabiti en küçük değeri alır. Eğer hesaplanan optimum sönüm sabiti c_D sönümleyicinin sınırları dışındaysa fiziksel olarak mümkün olan sınırlar içine alınır. Ayrıca en yakın artım değerine yuvarlanır. Sonuç olarak optimum sönüm değeri elde edilmiş olur ve sönümleyicinin kuvveti yeni optimum sönüm sabiti c_D değeri için hesaplanır.

$$c_{D,i} = \begin{cases} c_{\min}, & c_{D,i} < c_{\min} \\ c_{D,i}, & c_{\min} < c_{D,i} < c_{\max} \\ c_{\max}, & c_{\max} < c_{D,i} \end{cases} \quad (86)$$

Burada $c_{D,i}$ yarı-aktif kontrollü sönümleyicinin i . zaman adımındaki sönüm katsayısıdır. c_{\min} ve c_{\max} iki pasif sönümleyicinin sönüm katsayılarıdır.

Ayrıca sıfır ile bölme hatasını önlemek için sayısal bir önlem alınmıştır. Optimum sönüm sabiti c_D 'nin hesaplanması sırasında en küçük mutlak sönümleyici hızı 1 mm/s ile kısıtlanmıştır. En kötü durum bile çok küçük kuvvetlere sebep olacağı için bu kabulün yapının tepkisi için zararlı ya da yanıtıcı bir etkisi yoktur.

Üst kontrolcü ayrıca optimum kontrol kuvvetlerinin ne zaman uygulanması gerektiğini de belirler. Başlangıçta, sönümleyici en düşük direncindeyken, kontrolcü devrede değildir. Sönümleyicinin yerdeğiştirmesi tehlikeli değerler aldığı anda kontrolcü sönümleyiciye optimum sönüm sabitini uygular. Bu çalışma kapsamında sönümleyici yer değiştirmesinin 3 cm ve üstü olması 'tehlikeli' olarak tanımlanmıştır. Sönümleyici bir kere bu değeri aştığında kontrolcü devreye girer ve taban yer değiştirmesi 3 cm'den küçük bir maksimum ya da minimum noktasına ulaşana kadar devrede kalır.

Yerdeğiştirme uç noktalarında hız en düşük seviyede olacağından sönümlenebilen enerji düşük olacaktır. Böyle bir durumda sistem, sıfır noktasından büyük bir hızla geçebilir. Ancak kontrolcü devrede olmadığından bu sönümleme kapasitesinden yararlanılamayacaktır. Bu sebepten mevcut çalışmada kontrol başladıktan sonra belirlenmiş değer altına inildiğinde kontrol devam etmektedir. Minimum sönümlemeye geçiş ancak bir uç noktasının belirli değer altına olmasıyla gerçekleşir. Bu şekilde kontrolcü daha verimli kullanılarak daha çok enerji sönümlemesi sağlanmıştır.

3.8.6. Model Bina ve Sismik Zemin İzolasyonu

Model bina, sismik izolasyonun monte edileceği zemin katından ve üç kattan oluşan üstyapıdan oluşmaktadır. Sönümleyici, yer ile zemin kat arasına rijit bir şekilde bağlanmıştır. Tüm sistemin hareket denklemi genel haliyle Denklem 81'de verilmiştir. Üstyapının kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri sırasıyla:

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} 150 & -50 & 0 \\ -50 & 100 & -50 \\ 0 & -50 & 50 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_s = 10^4 \begin{bmatrix} 18.3 & -8.8 & 0 \\ -8.8 & 17.6 & -8.8 \\ 0 & -8.8 & 8.8 \end{bmatrix} \quad (87)$$

şeklinde verilmiştir. Burada birimler, sırasıyla, kg, Ns/m ve N/m'dir.

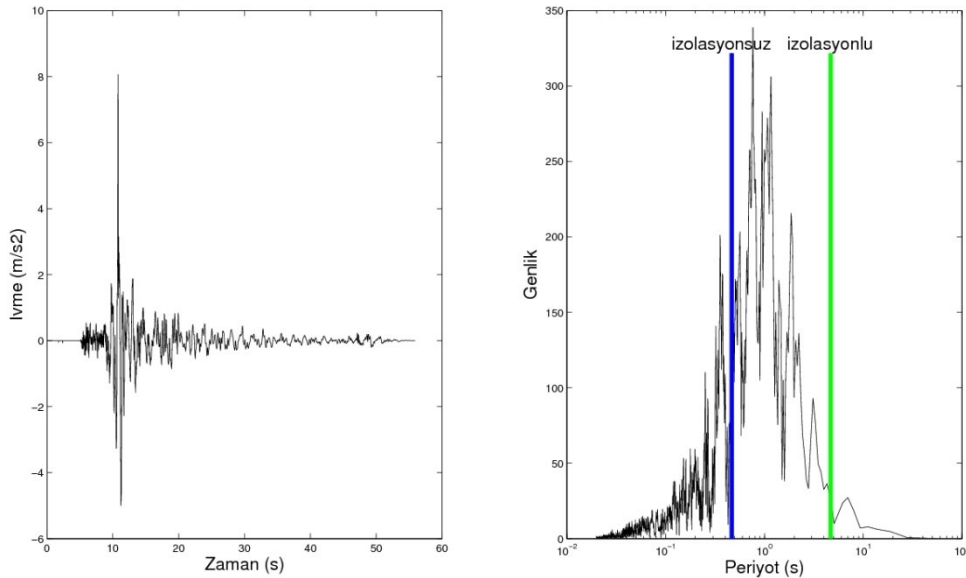
Tabanın kütlesi kat kütlelerinin 1.5 katı seçilmiştir. Taban sisteminin %4 sönüme sahip olduğu düşünülmüştür ve taban periyodu üstyapının hakim periyodunun 10 katı seçilmiştir (4.66 s). Rijitlik ve sönüm faktörleri üst katları rijit kabul edilerek şu şekilde hesaplanmıştır:

$$k_b = (3m + m_b)\omega_b^2, \quad c_b = 2\xi_b(3m + m_b)\omega_b \quad (88)$$

Burada m ve m_b katların ve tabanın kütleleridir. ω_b tabanın frekansıdır. ξ_b tabanın sönümüdür. Elastomer rijitliği yaklaşık olarak 817 N/m'dir (kıyaslamak amacıyla, birinci kat rijitliği 95000 N/m'dir). Pasif taban izolatörü ve değişken vana açıklıklı sönümleyiciden oluşan karma bir kontrol sistemi tasarlanmıştır.

3.8.7. Sayısal Benzetimler

1999 Düzce depreminin Bolu istasyonu kaydının Doğu-Batı bileşenine ait zaman ve frekans verileri Şekil 42'de verilmiştir.



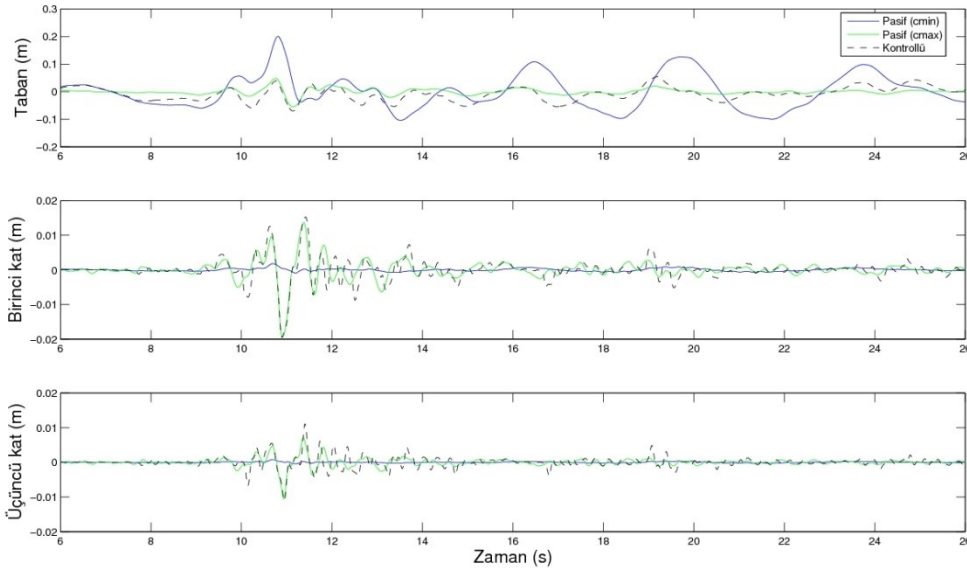
Şekil 42: 1999 Düzce depreminin Bolu istasyonu kaydının Doğu-Batı bileşeni

Taban izolasyonunun olmadığı durumda üstyapının sönümlü periyotları 0.47, 0.17, 0.12 saniyedir. Taban izolatörünün eklenmesiyle sönümlü periyotlar, titreşimin birinci modunu yumuşatarak, 4.72, 0.30, 0.15, 0.12 saniye değerlerini almıştır. İzolatör periyodu için yapıyı ivme spektrumunda sağa itecek şekilde bir değer seçilmiştir. Şekil 42'de görüleceği gibi mevcut araştırmada yapı, izolatör periyodu yardımıyla düşük genlikli bölgeye itilmiştir.

Böylece yapı ve sönümleyici depremin zararlı etkilerinden korunmuştur. Şekil 42'de sismik izolasyonsuz ve izolasyonlu binanın ana periyotları sırasıyla mavi ve yeşil çizgilerle belirtilmiştir. İzolasyonlu binada minimum sönüm değerine sahip pasif sönümleyicinin olduğu kabul edilmiştir. Aletin sönüm değeri arttıkça bina yapı periyodun sıfır olduğu bölgeye yaklaşacaktır.

Mevcut çalışma kapsamında optimal olarak yarı-aktif kontrol edilen sönümleyicili yapının yerdeğiştirme, hız ve ivme tepkileri iki amortisörün tepkileriyle kıyaslanmıştır (Şekil 43-45). Amortisörler minimum ve maksimum sabit sönüm katsayılarına sahiptirler. Bu amaçla üç sönümleyicinin ayrı ayrı monte edildiği sistemlerin tepkileri hesaplanmıştır ve tabanın, birinci ve üçüncü katların katiçi ötelenmeleri Şekil 43'de verilmiştir. Tüm grafiklerde katlara ait (katiçi) olarak verilen ötelenme ve hız değerleri ilgili katın bir alt kata göre tepkisidir. Mavi ve yeşil çizgiler, en küçük ve en büyük sabit sönüm katsayılarına sahip iki adet farklı amortisöre aittir. Kesikli çizgi, yarı-aktif olarak kontrol edilen sönümleyici için kullanılmıştır. Tepkiler 6-26 saniye aralığı için verilmiştir. Bekleneceği gibi minimum sönümlü sistem taban seviyesinde yüksek miktarlarda ötelenme ve hız tepkileri sergilemiştir. En yüksek değerleri, kontrol edilen ve maksimum sönümlü aygıtların tepkilerinin yaklaşık olarak dört katı kadardır.

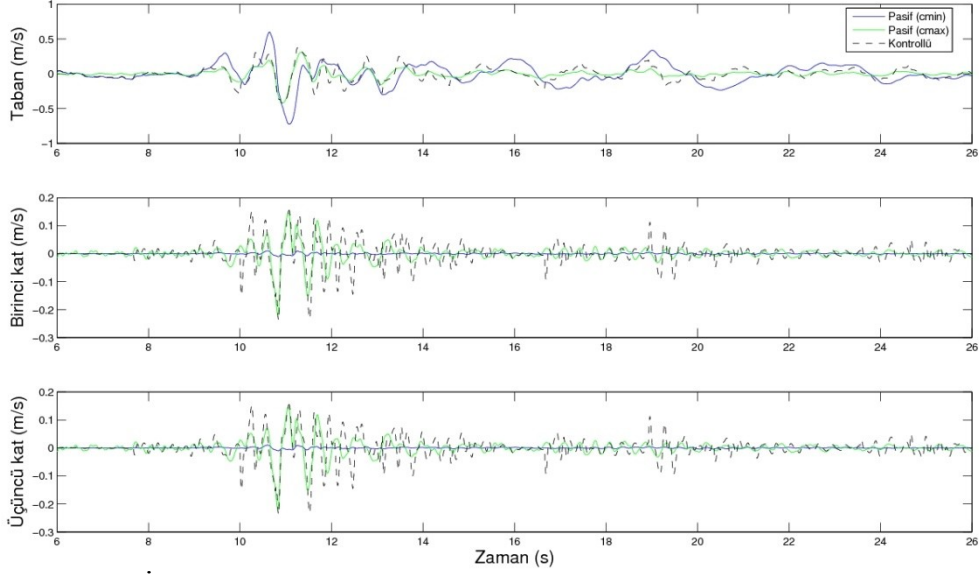
Grafiklerden de görüleceği gibi optimal olarak kontrol edilen sönümleyici minimum ve maksimum sönümlü sistemlerin davranışları arasında bir tepki vermektedir. Kontrolcü, 6-26 saniye aralığı dışında genelde minimum sönüm katsayısı değerini seçmiştir. Tepkilerin arttığı 6-26 saniye aralığında minimum ve maksimum sönüm değerleri arasında yumuşak geçişler sergilemiştir. Bu yumuşak geçişler sönümleyici tarafından uygulanabilir. Fakat kontrolcü, sönümleyiciji c_{min} 'den c_{max} 'a ani geçişler için zorlarsa sönümleyici bu görevi yapamayacaktır.



Şekil 43: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat ötelenmeleri

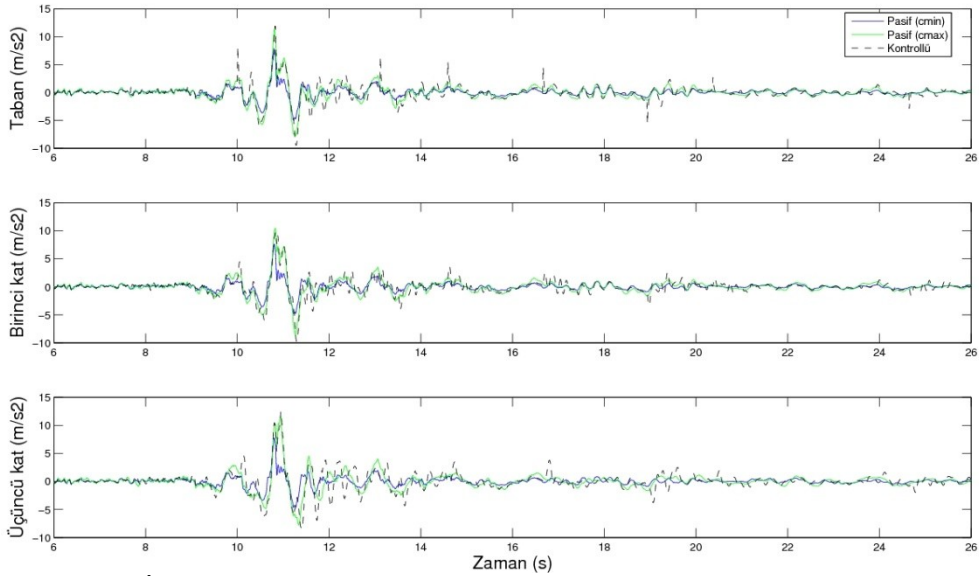
Sayısal hesaplamalarda sönüm kuvveti bir önceki adımdaki sönüm sabitiyle sönümleyicinin hızının (taban hızı) çarpımı şeklinde hesaplanıyor. Mevcut zaman adımıdaki hız genelde sönüm sabitinin belirlendiği adımdaki hızdan farklı oluyor. Bundan dolayı optimum kontrol kuvvetiyle elde edilen sönüm kuvveti arasında bir fark olması beklenen bir durumdur. Elbette ki bu durum kontrolcüye ait Q ve R değerlerinin seçimiyle ilgilidir. Fakat kullanılan Q ve R değerleri deneneler arasında en uygunlarıdır.

İki pasif ve bir yarı-aktif kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların katıçı hızları Şekil 44'de verilmiştir.



Şekil 44: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat hızları

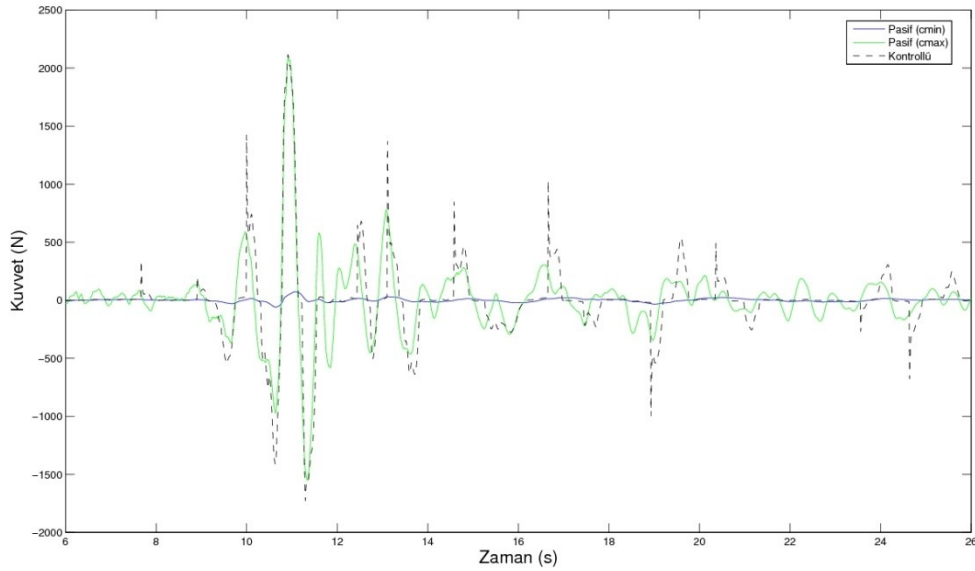
Üç sönümleyiciye ait taban, birinci ve üçüncü kat mutlak ivmeleri Şekil 45'da verilmiştir.



Şekil 45: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat mutlak ivmeleri

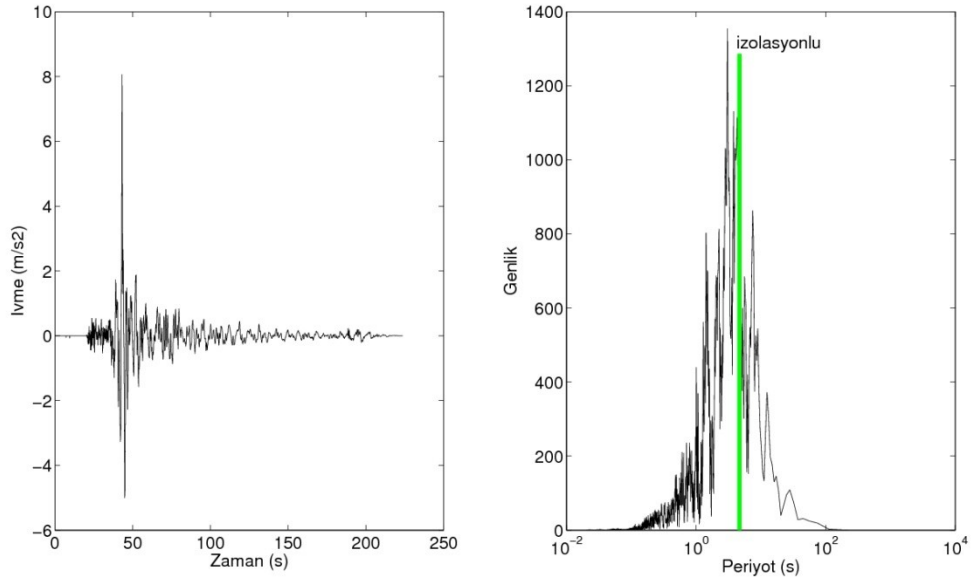
Grafiklerden de görüleceği gibi optimal olarak kontrol edilen sönümleyici yer değiştirmeleri, hızları ve mutlak ivmeleri azaltmada etkin bir rol oynamıştır. Kontrollü sönümleyicinin taban seviyesinde sergilediği bir kaç agresif zıplama dışında, üç sönümleyicinin de mutlak ivme tepkileri memnuniyet vericidir. Sönümleyici kuvvetleri Şekil 46'de verilmiştir. Önceki satırlarda bahsedilen istenmeyen zıplamalar, tek noktalardan oluştuğu için sönümleyici bu agresif zıplamaları gerçekleştiremeyecektir.

Şekil 43'e göre kontrollü davranışın taban ötelenmesi minimum sönümlü aygıt monte edilmiş yapının tepkisinden daha küçüktür. Ayrıca kontrollü davranışın birinci kat ötelenmesi maksimum sönümlü aygıtlı yapının tepkisinden daha küçüktür. Yani kontrollü sönümleyici taban seviyesinde izolatörü büyük deplasmanlardan korurken üstyapı seviyesinde artması beklenen yer değiştirmeleri azaltmıştır. Bu sebeplerden sonuçlar göstermektedir ki kontrollü sistem arzu edilen sonuçlar sergilemiştir.



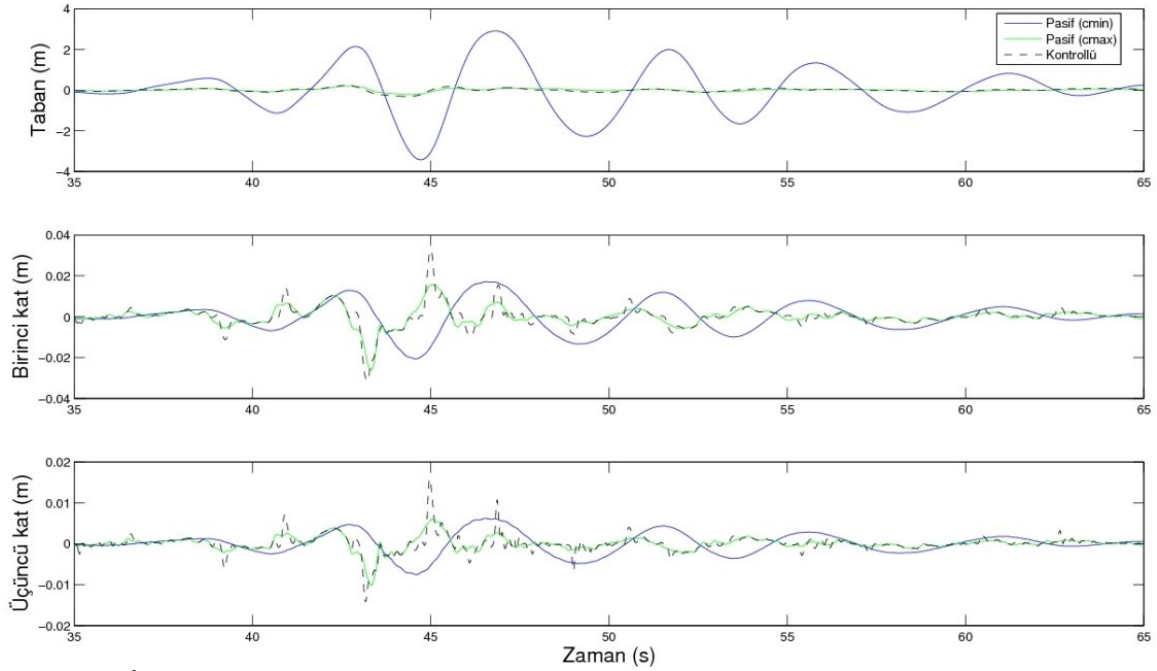
Şekil 46: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için sönümleyici kuvvetleri

Kontrolcünün kaynağa yakın depremler için nasıl davranacağını araştırmak amacıyla Şekil 42'de verilen sismik veri frekans uzayında sağa doğru (düşük frekanslı bileşenlerin olduğu bölgeye) ötelenmiştir. Değiştirilmiş yer ivmesi Şekil 47'de görülebilir. Taban izolasyonlu sistemin ana periyodu frekans uzayında kalın yeşil çizgiyle işaretlenmiştir. Bu durumda izolasyonlu yapı ana periyodu sebebiyle yer hareketinden en fazla şekilde etkilenecektir. Tasarlanan kontrolcünün yer hareketiyle yapının frekanslarının çakışması durumunda nasıl bir davranış sergileyeceğini görmek amacıyla kullanılan Q ve R değerleri sabit tutulmuştur.



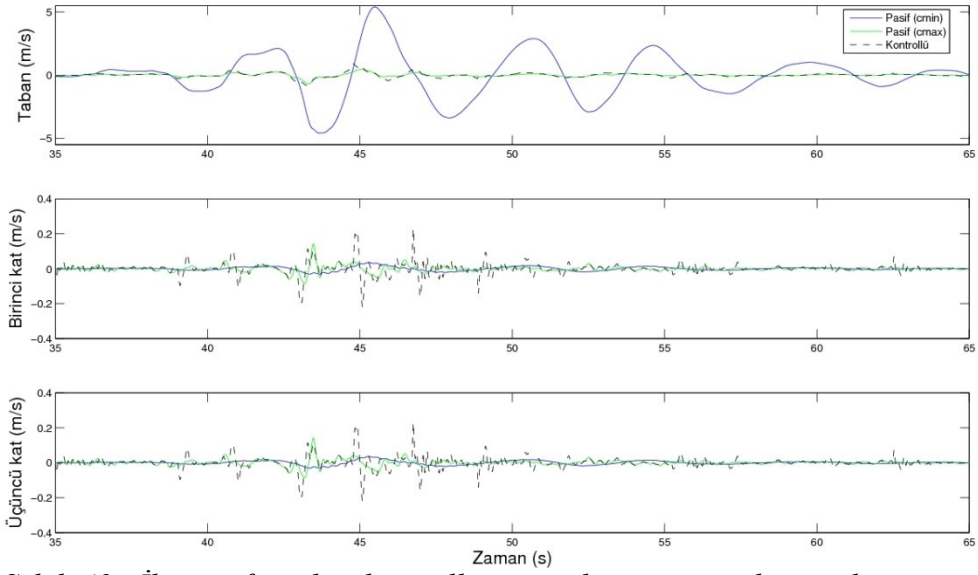
Şekil 47: Değiştirilmiş 1999 Düzce depreminin Bolu istasyonu kaydının Doğu-Batı bileşeni

Değiştirilmiş yer hareketi için katıçi ötelenmeleri Şekil 48'da verilmiştir. Yüksek yerdeğiştirmeler ve hızlar kaynağa yakın depremler için beklenen sonuçlardır. Bu durum hesaplanan tepkilerde de gözlemlenmektedir.

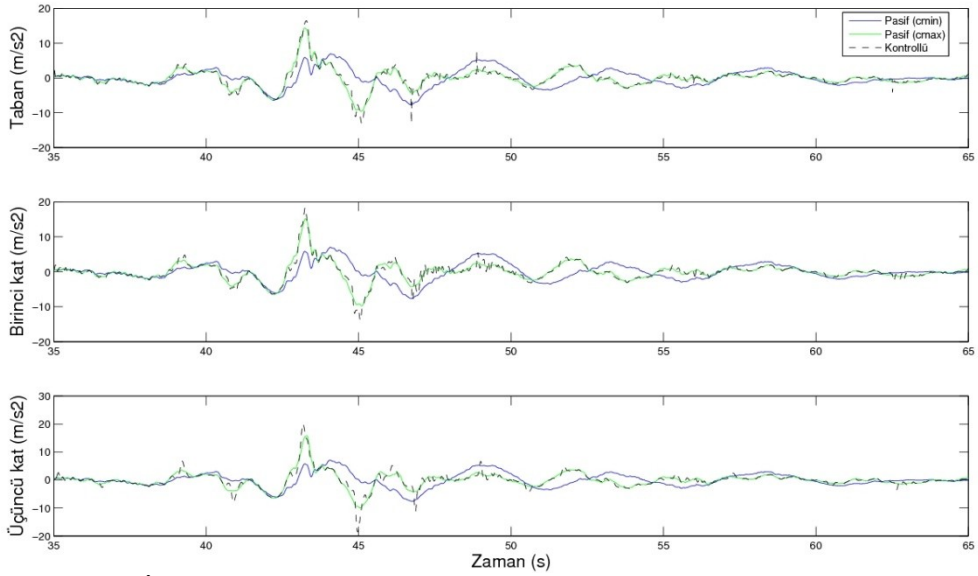


Şekil 48: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat ötelenmeleri (değiştirilmiş deprem için)

Tabanın, birinci ve üçüncü katların kat hızları ve mutlak ivmeleri sırasıyla Şekil 49 ve 50'de verilmiştir. Burada minimum sönümlü pasif sistemin sönüm değeri düşük olduğu için taban seviyesinde çok fazla yer değiştirme yapması beklenen ve önlenmek istenen bir durumdur.

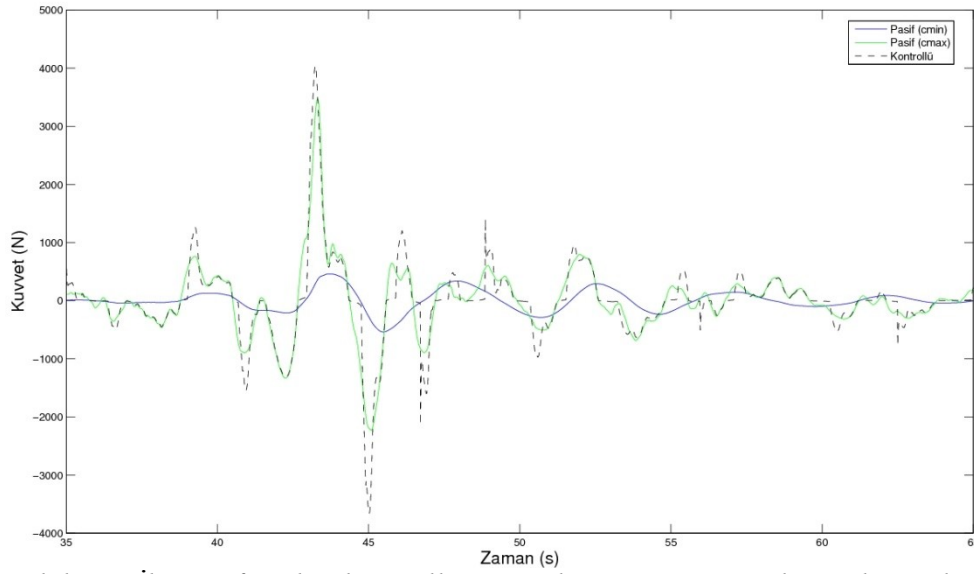


Şekil 49: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat hızları (değiştirilmiş deprem için)



Şekil 50: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için tabanın, birinci ve üçüncü katların kat mutlak ivmeleri (değiştirilmiş deprem için)

Sönümleyici kuvvetlerinin verildiği Şekil 51’de görüldüğü gibi değiştirilmiş yer hareketi durumunda kontrollü sönümleyici, alt ve üst sönüm sınırları arasında yumuşak geçişler yapmaktadır. Kontrollü sistem, maksimum sönümlü aygıtlı olan sisteme yakın bir davranış sergilemektedir. Gerçek yer hareketi uygulanmış durumda olduğu gibi kontrollü davranışta bazı arzu edilmeyen agresif zıplamalar burada da mevcuttur. Fakat sönümleyici bu agresif zıplamaları gerçekleştiremeyecektir.



Şekil 51: İki pasif ve bir kontrollü sönümleyici için sönümleyici kuvvetleri (değiştirilmiş deprem için)

Çalışmanın sonuçlarına göre karma kontrol sistemleri, yer hareketiyle sistemin frekanslarının çakışması durumunda dahi yapısal zararları önlemekte ya da önemli ölçüde indirgemekte başarılı olmaktadır.

Çalışmanın bu aşamasında karma bir kontrol sistemi için sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Yer hareketiyle yapıya gelen sismik enerjinin bir kısmını sistemden uzaklaştırmak için yapının periyodunu uzatan taban izolatörleri uygulanmıştır. Sismik yalıtım sisteminin yerdeğiştirmesini kabul edilebilir bir seviyede kısıtlamak için enerji sönümleyici bir aygıt eklenmiştir. Sönümleyicinin sönüm değerleri optimum kontrol ile belirlenmiştir. Sönümleyici, taban izolasyon sistemini çok büyük yerdeğiştirmelerden korurken üstyapının tepkilerini minimum sönümlü aygıtlı duruma göre az bir miktar arttırmıştır. Üstyapı için en iyi uygulama, taban seviyesinde minimum sönümlü bir aygıt olması ya da sönümleyici yerleştirilmemesidir. Böyle bir durumda taban izolasyonu çok büyük deplasmanlar yaparak zarar görecektir ve değiştirilecektir. Fakat taban yalıtım sistemini de korumak amaçlanırsa en yüksek sönümlü aygıtı taban seviyesine yerleştirmek uygun olacaktır. Tasarlanan kontrolcünün, frekans çakışması (rezonans) durumunda dahi, alt ve üstyapıların ihtiyaçları arasında bir denge sağladığı gözlemlenmiştir.

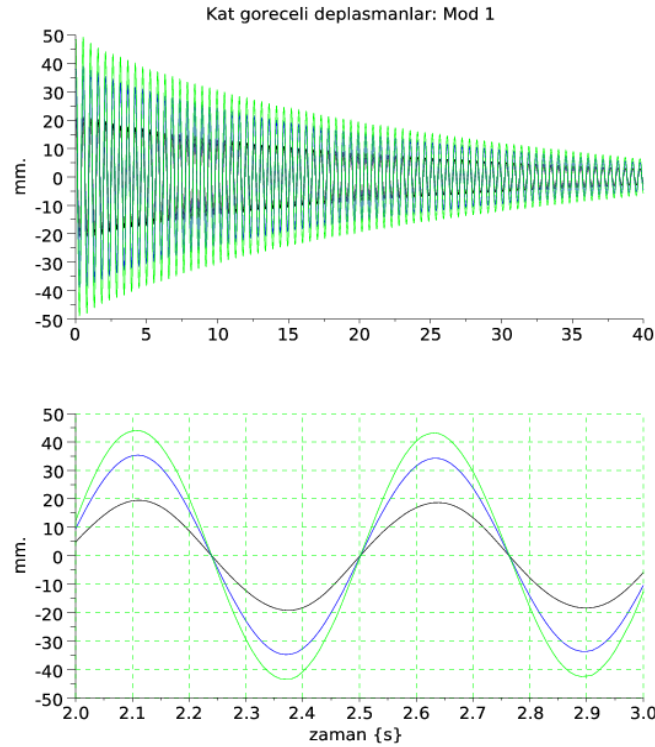
3.9. Yapı Davranış Deneyleri

3.9.1. Model Yapının Serbest Titreşim Karakteristiklerinin Ölçümü

Model yapının gerçek davranışı deneyler ile belirlenmeden önce bir çok sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Daha sonra teorik hesaplamalar ile bulunan sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Deprem simülatöründeki gürültü problemi aşıldıktan sonra, ilk önce yapının sönümleyici takılmadan ilk üç serbest titreşim periyodu ve bunlara karşı gelen sönüm oranları deney yolu ile tespit edilmiştir. Teorik ve deney sonuçları Tablo 7'de görülmektedir.

Tablo 7: Model yapının serbest titreşim karakteristiklerinin karşılaştırılması (teorik ve deneysel)

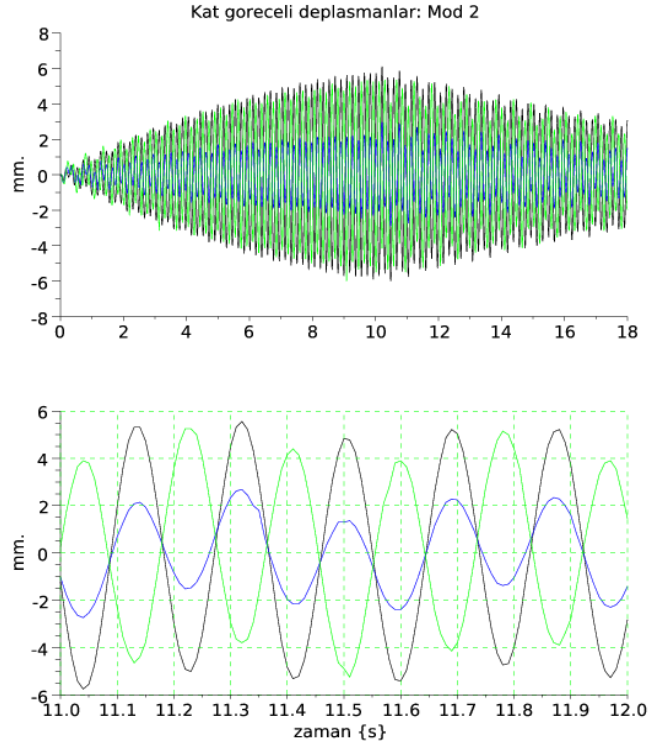
	Serbest titreşim periyodu (s)			Sönüm oranı (%)		
	T_1	T_2	T_3	ξ_1	ξ_2	ξ_3
Teorik	0,498	0,177	0,122	-	-	-
Deneysel	0,525	0,186	0,125	0,0058	0,2500	0,5700



Şekil 52: Yapının serbest titreşimi (1. mod davranışı, deneysel)

Model yapıya uygulanan bir başlangıç hareketi sonrasında yapının her üç katındaki yerdeğişmelerin zamana bağlı değişimleri Şekil 52'de gösterilmektedir. Tablo 7'de verilen yapının birinci doğal periyodu Şekil 52'deki deney sonucunda da açıkça görülmektedir.

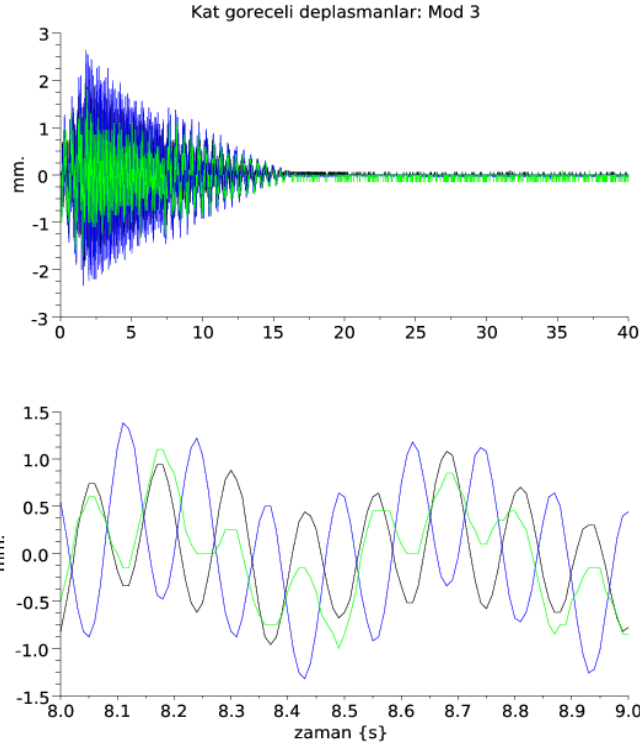
Yapının birinci periyodunun teorik ve deneysel yol ile bulunan sonuçlarının oldukça yakın çıkması kurulan teorik modelin gerçek model ile oldukça uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak teorik olarak hesaplanan ikinci moduna karşı gelen frekans değerine yakın, genliği 3mm olan sinüzoidal bir yük ($\omega=33.66$ rad/s) ile deprem simülatörü kullanılarak 10 saniye boyunca yapı sarsılmış ve kat yerdeğişmeleri ölçülmüştür. Şekil 53'den de görüleceği gibi ilk 10 saniyeden sonraki yapı davranışı incelendiğinde yapının ikinci mod davranışı görülecektir.



Şekil 53: Yapının serbest titreşimi (2. mod davranışı, deneysel)

İlk iki periyodu hesaplanan yapının üçüncü periyodu, deprem simülâtörü vasıtasıyla, ikinci periyodun hesaplandığı gibi yapının teorik olarak hesaplanan üçüncü moduna karşı gelen frekansa yakın olan bir frekans değerine sahip ve genliği 1mm olan sinüzoidal ($\omega=50$ rad/s) bir yük ile 2 saniye boyunca sarsılmış ve daha sonra serbest titreşime bırakılmıştır. Deplasman ölçen potansiyometreler vasıtasıyla yapılan ölçümler sonucunda Şekil 54'deki yerdeğiştirme davranışı kayıt edilmiştir. Buradan ölçülen yapının 3. periyodu da teorik olarak hesaplanan periyot ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

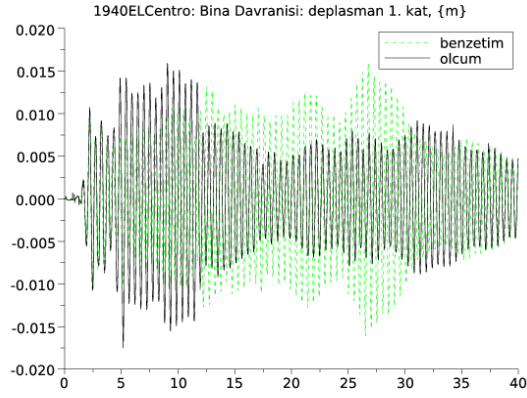
Ayrıca her üç modun davranışları ölçüldükten sonra yapının bu modları için sönüm oranı Logaritmik azalım metodu ile hesaplanmış ve Tablo 7'deki değerler bulunmuştur.



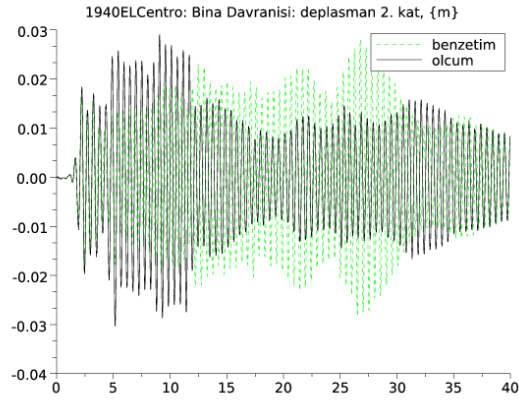
Şekil 54: Yapının serbest titreşimi (3. mod davranışı, deneysel)

3.9.2. Model Yapının Deprem Davranışının Ölçülmesi

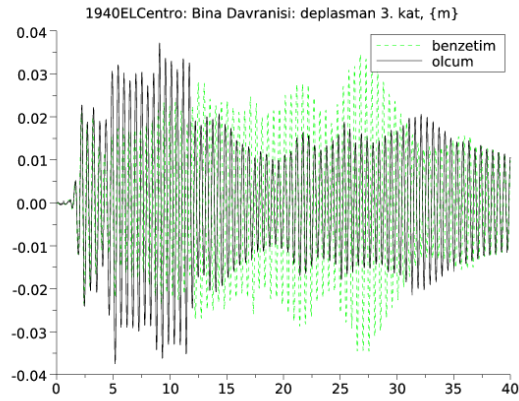
Yapıya sönümleyici eklemeyen önce 1940 El Centro depremi etkisi altında yapının katlarının yer değiştirmeleri sayısal olarak ve deneysel olarak ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 55, 56 ve 57'de çizilmiştir. İlk 10 saniyede ölçüm sonuçların benzetim sonuçlarından daha büyük olduğu görülür iken, daha sonra sayısal benzetim değerlerinin deneysel olarak ölçülen değerlerden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Sayısal benzetimlerde yapının modal ölçümlerinde bulunmuş olan sönüm oranları kullanılarak yapısal sönüm matrisi hesaplanmıştır. Ayrıca bu bölümdeki analizlerde ve deney verilerinde El Centro depreminin ivmeleri 0.35 ile çarpılarak modifiye edilmiştir. Bunun sebebi gerçek dataların kullanıldığı ilk deneylerde potansiyometrelerin yapıdaki yüksek deplasmanlardan dolayı yerlerinden çıkması ve ölçümlerin başarısızlığa uğramasıdır. Bundan dolayı deprem verisi gerçek değerlerin belirli bir azalım katsayısı ile çarpılarak azaltılmıştır. Bu işlem 0.10 katından başlayıp kademeli olarak 0.35 katına kadar deneme yapılmıştır. Deprem verilerini azaltma katsayısı 0.35'den daha fazla alındığında yapıda yüksek deplasmanlar meydana gelebilmekte ve ölçüm cihazlarının kapasiteleri aşılmaktadır. Burada sadece El Centro deprem verisinin 0.35 katının kullanıldığı deney sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 55: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının 1. katının yer değiştirmesinin zamanla değişimi

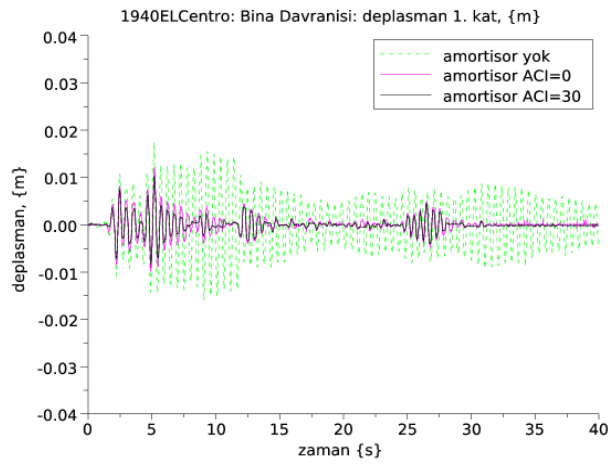


Şekil 56: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının 2. katının yer değiştirmesinin zamanla değişimi

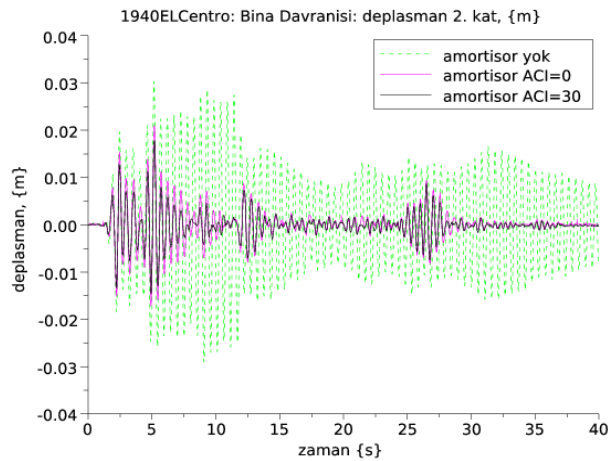


Şekil 57: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının 3. katının yer değiştirmesinin zamanla değişimi

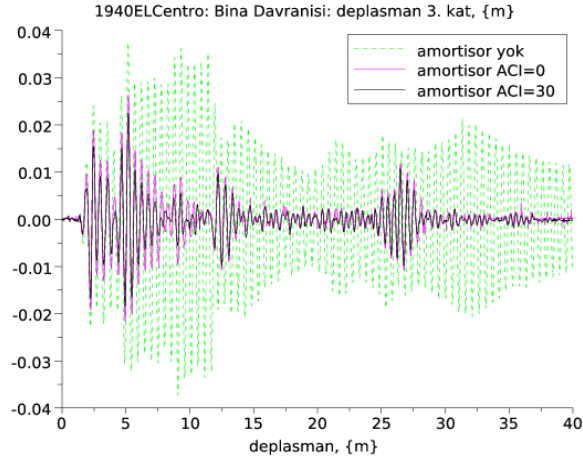
1940 El Centro deprem ivme kayıdı (%35'ne küçültülmüştür) veri olarak deprem simülatörüne gönderilerek yapılan deneyler sonucunda, katlardaki deplasmanlar amortisörün olmadığı ve amortisörün var olduğu durumlarda, Şekil 58, 59 ve 60'da görüldüğü gibi ölçülmüştür. Amortisörsüz olarak yapılan deneylerden sonra, amortisörün üzerindeki vananın üzerine monte edilmiş olan step motor bilgisayardan kontrol edilerek açısı önce sıfır dereceye, daha sonra 30 dereceye getirilerek deneyler tekrar edilmiştir. Amortisörün üzerindeki vananın açısının değişiminin amortisörün sönümleme kabiliyetini artırdığının görmek amacı ile yapılmış olan bu deneyler sonucunda, amortisör minimum sönümleme durumunda dahi yapıya oldukça iyi bir sönümleme kabiliyeti kazandırırken, açının artırılması ile sönüm kapasitesi daha da artırılmaktadır.



Şekil 58: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının amortisörlü ve amortisörsüz 1 kat deplasman davranışları (DeneySEL)



Şekil 59: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının amortisörlü ve amortisörsüz 2 kat deplasman davranışları (DeneySEL)



Şekil 60: 1940 El Centro deprem ivmesi altında yapının amortisörlü ve amortisörsüz 3 kat deplasman davranışları (DeneySEL)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Mevcut çalışmada teorik olarak yapılan hesaplamalar deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Özellikle yapının serbest titreşim karakteristikleri deney ve teori açısından oldukça uyumludur. Tasarlanan ve imal ettirilen amortisör üzerinde yapılan deneyler sonucunda amortisörün yarı-aktif olarak kontrol edilebildiği, diğer bir deyişle, sönüm katsayısının küçük zaman adımlarında değiştirilebildiği gözlemlenmiştir. Amortisör üzerindeki deşarj hattını kontrol eden vananın açısının 0-53 derece aralığında değişmesi halinde amortisörün sönümlenme özelliği minimum ve maksimum değerler arasında değişmektedir. Kurulan bu amortisörün hız-kuvvet ilişkisi amprik bir denklem ile ortaya konulmuştur. Bu ilişki doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. Amortisörün sönümlenme özelliğinin minimumda olmasının bile yapısal davranış üzerinde çok ciddi katkıları olduğu yapılan deneylerde görülmüştür. Amortisörün sönüm özelliğinin en fazla olduğu, diğer bir deyişle, vana açısının 53 dereceden daha büyük olduğu durumlarda bir piston gibi çalıştığı birinci katı rijitleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu durum amortisörün yerleştirildiği birinci kat deplasmanının oldukça azaltmakta ve yapının genel deplasman davranışını açısından vananın küçük açılara göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Dolayısıyla amortisörün sönümünün en üst seviyede olması ve sabit kalması en iyi durum gibi görülmektedir.

Aktif kontrol teorisi kullanılarak ortaya koyulan kontrol kanunlarıyla yapının yarı-aktif kontrol edilmesi mümkündür. Tasarlanan amortisör farklı açılarda yapının toplam sönümü üzerinde ciddi değişikliklere sebep olmaktadır. Yapı modeli üzerinde aktif kontrol deneyleri yapılmadığı için yarı aktif kontrolün aktif kontrole olan üstünlüğü ortaya koyulamamıştır. Pasif olarak (sabit vana açıklığı) kontrol edilen yapının yarı-aktif kontrole göre deplasmanlar açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yarı-aktif kontrolün yapılan sayısal simülasyonlarda, özellikle, sismik izolasyonlu sistemlerde temel seviyesindeki yer değiştirmelerin sınırlandırılması açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma kapsamında izolatörlü sistem deneyleri planlanmamıştır.

Araştırma sürecinin büyük bölümünde, birçok kez, deprem simülatöründe elektriksel gürültü problemi yaşanmıştır. Daha sonra sistemi kontrol eden masaüstü bilgisayar kaldırılarak kontrol paralel portu bulunan bir dizüstü bilgisayar ile yapılmıştır. Bu durum kontrol sistemindeki gürültü problemini, bina üzerine yapılan yeni topraklama ölçüm sistemi üzerindeki gürültü problemini çözmüştür.

Kontrol sisteminde bulunan algılayıcıların (yük hücresi, ivme sensörleri, potansiyometreler) sürücüleri, elektronik kontrol panelleri, veri toplama ve veri gönderme sistemleri (AD ve DA çeviriciler), C dilinde ve gerçek zamanlı Linux işletim sisteminde kontrol yazılımları proje yürütücüsü tarafından oluşturulmuştur.

Amortisörün üretimi sırasında imalatçılarla ilgili problemler

1. Ürün, üreticiye tarafımızdan verilmiş çizim ile çok farklı olmuştur.
2. Büyük çaplı amortisör imalatı yapan firmalardan teklif istenmesine rağmen teklif vermemişlerdir.
3. Özel çalışan bir usta ile yapılan anlaşma sonucunda verilen amortisör çizimi aynen uygulanmış olmasına karşın kullanılan malzeme amortisör yapımı için uygun nitelikte olmamıştır. Amortisörün haznesinin iç çeperi ve milin yüzeyi honlanmış bir yüzeye sahip olması gerekirdi.

4. Bir hidrolik-pnömatik şirketinin makine mühendisi olan yöneticisi yapılan görüşme sonucunda fiyat teklifi yüksek olmasına rağmen amortisör çizimi kapsamında amortisörü üretmesi için onay verildi. Üretilen amortisör, istenilen amortisöre benzeyen, fakat sadece kuvvet ölçümüne yarayan hareketsiz bir sistem olmuştur.
5. Seri imalatla üretilen ve yatlarda kullanılan bir dümen silindiri modifiye edilerek ayarlı amortisör haline getirilmiştir. Bu ürünün bağlantıları (boru çapları, vana tipi ve hidrolik akü) farklı tiplerde oluşturularak model deneyi için uygun hale getirilmiştir.
6. Çalışmanın ilk aşamalarında başarıyla ürettirelebilen küresel vanalı amortisörün model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ancak ayar için vananın küresi içindeki yuvarlak delik büyük gelmiştir. Deneme için küre içindeki deliğe metal parçalar tutturularak kürenin boşluğu üçgen kesitine benzetilmiş ve bu şekilde vananın açısı ile amortisör açısı arasında daha hassas bir ilişki kurulabilmiştir. Buna istinaden üçgen kesitli vana kürelerine sahip dört adet amortisör ürettirilmiştir. (dümen silindiri baz alınarak).
7. Yeni ürün üzerinde yapılan model tanımlama deneyinde vana açıklığının çok küçük kaldığı anlaşılmıştır. Başta üretilen üçgen kesitli delik, herbir kenarı 10 mm boyutunda olan eşkenar üçgen haline getirilmiş ve bu da yeterli olmayıp kesit Şekil 15' de gösterilen dikdörtgen haline ulaştırılmıştır. Bu kesit amortisörün son halini oluşturmaktadır.

Kaynaklar

- ALDEMİR, U., Predictive Suboptimal Semiactive Control of Earthquake Response, *Structural Control and Health Monitoring*, 17, 654-674, (2009).
- ANTSAKLIS, P.J., Michel, A.N., *Linear Systems*, McGraw Hill, (1997). Pp:?
- AYDIN, E., Boduroglu, M.H., Guney, D., Optimal Damper Distribution For Seismic Rehabilitation of Planar Building Structures, *Engineering Structures*, Elsevier, 29(2), 176-185, (2007).
- CAO, X., Mlejnek, H.P., Computational Prediction and Redesign for Visco-elastically Damped Structures, *Computer Methods Applied Mech. Eng.*, 125, 1-16, (1995).
- DE SILVA, C.W., An algorithm for The Optimum Design of Passive Vibration Controllers for Flexible Systems, *J. Sound Vib.*, 75 (4), 495-502, (1981).
- DYKE, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. , Carlson, J.D., Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers, *Proc. IFAC World Cong. Vol L*, Int Fed of Automatic Control, 145-150, (1996).
- FENG, Q. ve Shinozuka, M., Use of a Variable Damper for Hybrid Control of Bridge Response under Earthquake, *Proc. U.S Nat. Workshop on Struct. Control Res. USG Publ.*, No CE 9013, (1990).
- HROVAT, D., Barak, P. , Rabins, M., Semi-Active Versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control, *J. Engrg. Mech.*, 109, 3, 691-705, (1983).
- GÜRGÖZE, M., Müller, P. C., Optimum Position of Dampers in Multi Body Systems, *Journal of Sound and Vibration*, 158(3), 517-530, (1992).
- HAHN, G.D., Sathivageeswara, K. R., Effects of Added-Damper Distribution on The Seismic Response of Building, *Comp. Struct.* 43(5), 941-950, (1992).
- KAWASHIMA, K., Unjoh S. , Shimizu, K., Experiments on Dynamics Characteristics of Variable Damper, *Proc. Japan Nat. Symp. on Struct. Response Control*, 121, (1992).
- KURATA, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N. , Kurino, H., Shaking Table Experiments of Active Variable Damping System, *Proc. First World Conf. on Struct. Control TP2*, 108-127, (1994).
- LIANG, Z., Tong, M. , Lee, G.C., Real Time Structural Parameter Modification (RSPM): Development of Inner Vated Structures, *Tech. Rep. NCEER-95-0012 Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res.*, Buffalo, N.Y., (1995).
- MAHENDRA, P., Singh, Moreschi, L.M, Optimum Seismic Response Control With Dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 553-572 (2001).
- MASRI, S.F., Bekey, G. A., Caughey, T.K., Optimum Pulse Control of Flexible Structure, *J. Applied Mechanich*, ASME, 48, 619-626 (1981).
- MEIROWITCH, L., *Dynamics and Control of Structures*, John Wiley & Sons, (1989). Pp:?

- MIZUNO, T., Kobori, T., Hirai, J., Matsunaga, Y. , Niva, N., Development of Adjustable Hydraulic Dampers for Seismic Response Control of Large Structure, *Proc. ASME PVP Conf.*, 229, 163-170, (1992).
- PATTEN, W.N., He, Q., Kuo, C.C., Wu, H.C., Liu, L., Sack, R.L., Seismic Structural Control via Hydraulic Semi-Active Vibration Dampers, *Proc. First World Conf. on Struct Control FA2*, 83-89, (1994).
- PATTEN, W.N., Sun, J., Li, G., Kuehn, J., , Song, G., Field Test of an Intelligent Stiffener for Bridges at the I-35 Walnut Creek Bridge, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 109-126, (1999).
- RIBAKOV, Y., Gluck, J. Selective Controlled Base Isolation System with Magnetorheological Dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 1301-1324, (2002).
- SHINZOKU, M., Constantinou, M.C., , Ghanem, R., Passive and Active Fluid Dampers in Structural Applications, *Proc., US/China/Japan Workshop on Struct. Control*, 507-516, (1992).
- SACK, R.L. ve Patten W., Semi-active Hydraulic Structural Control, *Proc. Int. Workshop on Struct. Control* , editörler: GW. Housner ve S. R. Masri, 417-431, (1993).
- SACK, R.L., Kuo, C.C., Wu, H.C., Liu, L., , Patten W.N., Seismic Motion Control via Semi-Active Hydraulic Actuators, *Proc. U.S. Fifth Nat. Conf. on Earthquake Engineering*, (1994).
- SYMANS, M.D., Constantinou, M.C., Taylor, D.P. , Garnjost, K.D., Semi-Active Fluid Viscous Dampers for Seismic Response Control, *Proc. First World Conf. on Struct. Control FA4*, 3-12, (1994).
- SYMANS, M.D., Constantinou, M.C., Experimental Study of Seismic Response of Structures with Semi-Active Damping Control Systems, *Struct. Congr. XIV.*, (1996).
- SYMANS, M.D., Kelly, S.W., Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-active Seismic Isolation Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 37-60, (1999).
- SYMANS, M.D., Constantinou, M.C., Semi-active Control Systems for Seismic Protection of Structures: a State-of-the-Art-Review, *Engineering Structures*, 21, 469-487, (1999).
- SYMANS, M.D. , Constantinou, M.C., Seismic Testing of a Building Structure with a Semi-active Fluid Damper Control System, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 759-777, (1997).
- SPENCER, Jr., B.F. , Nagarajaiah, S., State of the Art of Structural Control, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129, 7, 845-856, (2003).
- TAKEWAKI, I., Optimum Damper Placement for Planar Building Frames Using Transfer Functions, *Struct. Mult.- Disp. Optim.*, 20, 280-287, (2000).
- TSUJI, M., Nakamura, T., Optimum Viscous Dampers for Stiffness Design of Shear Buildings, *Struct. Des. Of Tall Buildings*, 5, 217-234 ,(1996).

TURAN, G., Hybrid Control of a 3-D Structure by using Semi-Active Dampers. *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Trabzon, (2010).

WONGPRASERT, N., Symans, M.D., Experimental Evaluation of Adaptive Elastomeric Base-Isolated Structures Using Variable-Orifice Fluid Dampers, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131, 6, 867-877, (2005).

ZHANG, R.H., Soong, T.T., Seismic Design of Visco –Elastic Dampers for Structural Applications, *Structure Engineering ASCE* 118(5), 1375-1392, (1992).

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje No: 107M353
Proje Başlığı: Değişken sönümlenme katsayılı amortisörlerin deprem simülasyonu ile üç katlı bir yapıya olan etkisinin değerlendirilmesi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yrd.Doç.Dr. Gürsoy TURAN Yrd.Doç.Dr. Ersin AYDIN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İnşaat Mühendisliği Bölümü İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü 35430 Urla, İzmir
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: TÜBİTAK
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.12.2007 - 01.12.2010
Özet <p>Bu çalışmada deprem etkisi altında üç katlı bir model yapının yarı aktif olarak kontrollü dinamik davranışı deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. İlk olarak tek yönlü deprem simülatörü üzerine boyutları normal ölçülere göre indirgenmiş üç katlı çelik yapı inşa edilmiştir. Seçilen model yapının dinamik karakteristikleri önce teorik olarak belirlenmiş daha sonra deneyler ile bulunarak, sonuçların uyumluluğu gözlenmiştir. Yapıyı yarı aktif olarak kontrol edecek olan amortisör, yatlarda kullanılan bir dümen pistonu modifiye edilerek ve bir deşarz hattı eklenerek imal ettirilmiştir. Eklenen deşarz hattına yerleştirilen bir vana ve bu vananın üstüne vanayı kontrol edecek bir step motor monte edilmiştir. Tasarlanan amortisör yarı aktif bir sönümleyici olarak yapının birinci katı ile zemin arasına yerleştirilmiştir. Bu işlemden önce tasarlanan sönüm elemanının matematik modelinin kurulması için amortisör deneyleri yapılmış ve matematik model ortaya çıkarılmıştır. Kontrol işlemi, deşarz hattı üzerindeki vananın açıklığının değiştirilmesi ve bu değişime göre sönümleyici amortisörün sönüm katsayısının değişimi ile gerçekleştirilmiştir. Model yapının deprem etkisi altındaki davranışı amortisörsüz ve amortisörlü olarak deneyler ile test edilmiştir. Ayrıca, amortisörün sönüm özelliği sabit tutularak da deneyler yapılmış ve sonuçlar teorik hesap değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler ve sayısal analizler göstermiştir ki, yarı aktif kontrol edilen amortisör model yapının deprem davranışını oldukça iyileştirmektedir.</p>
Anahtar Kelimeler: Değişken sönümlenmeli amortisör, yapı kontrolü, yapı davranış benzetmesi, deprem davranışı, sönümleyiciler
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet Gerekli Değil <small>Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.</small>
Projeden Yapılan Yayınlar: TURAN, G., Hybrid Control of a 3-D Structure by using Semi-Active Dampers, <i>9th International Congress on Advances in Civil Engineering</i> , Trabzon, (2010). KINAY, G., Turan, G., Aydın, E., Gain Scheduling Control of a Variable Orifice Damper Applied to a Three Story Building Subjected to Earthquake Excitation, <i>5th World Conference on Structural Control and Monitoring</i> , Tokyo-Japonya, (2010). KINAY, G., Turan, G., Aydın, E., Yarı-aktif Sismik Sönümleyicinin Kazanç Programlamalı Kontrolü, <i>GUMMF</i> , Gazi Üniversitesi, Ankara, (2010).(GÖNDERİLDİ.)