

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında sabır, hoşgörü, maddi ve manevi desteğini bir an olsun esirgemeyen, en zor zamanlarımda yoluma hep ışık olan ve yardım elini uzatan, kendime örnek edindiğim ve hayatım boyunca saygıyla hatırlayacağım kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Komite üyelerim olarak çalışmamı başından itibaren takip eden ve doktora çalışmamın bu seviyelere gelmesinde emekleri olan Sayın Prof. Dr. Atakan AKSOY ve Prof. Dr. Hakan ERSOY'a ayrıca teşekkür ederim.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların büyük bir kısmı Karayolları Genel Müdürlüğü zemin mekaniği laboratuvarında yapılmıştır. Laboratuvar imkânlarını kullanmamızı sağlayan Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Daire Başkanı sayın Sina KIZIROĞLU ve deneysel çalışmalar sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyerek kıymetli vaktini ayıran KGM zemin mekaniği laboratuvar şefi sayın İrşad ÖZKAYNAK'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmada yapılan SBS ile Bitüm modifikasyonu, KTÜ Of Teknoloji Fakültesinde yapılmıştır. Modifikasyon çalışmaları süresince değerli vakitlerini ayırıp, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan değerli hocam sayın Doç. Dr. Erol İSKENDER'e ayrıca teşekkür ederim.

Yaptığım deneysel çalışmalarda bana kesintisiz destekleri için KTÜ Ulaştırma Laboratuvarı Yöneticisi Sayın Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR ve laboratuvar sorumlusu Hasan TAHSİN SELİM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Uzakta olmalarına rağmen tüm hayatım boyunca beni destekleyen, sevgileriyle yanımda olan ve beni motive eden değerli aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana yardım eden ve katkılarıyla beni destekleyen değerli arkadaşlarım, başta Ataallah SADEGHI MOVAHHED, Dr. Ahmet KUVAT, Aslan NAYEB ve Seda ÖZTÜRK olmak üzere tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Saeid ZARDARI

Trabzon, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Modifiye Bitüm Katkılı Geoteknik Sismik İzolasyon (GSİ) Malzemesi Araştırılması ve Yapı Davranışına Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/09/2020

Saeid ZARDARI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Dinamik Yük.....	2
1.3. Sismik İzolasyon Sistemleri.....	3
1.3.1. Sismik İzolasyon Tasarım Felsefesi.....	4
1.3.2. Sismik İzolasyon Teorisinin Temeli.....	6
1.3.3. Pasif İzolatörün Ana Bileşenleri.....	6
1.3.3.1. Esneklik.....	7
1.3.3.2. Enerji Sönümlemesi.....	8
1.3.3.3. Düşük Yanal Yüklere Karşı Rijitlik.....	9
1.3.4. Uygun Koşullar.....	9
1.3.5. Sismik İzolatörün Davranışı.....	9
1.3.5.1. Lineer İzolasyon Sistemi.....	9
1.3.5.2. Lineer Olmayan İzolasyon Sistemi.....	11
1.3.6. Yaygın İzolatörler.....	13
1.3.6.1. Pasif Kauçuk İzolatörler.....	13
1.3.6.1.1. Düşük Sönümlü Doğal veya Sentetik Kauçuk İzolatörler.....	13
1.3.6.1.1.1. İzolatörün Yatay Rijitliği.....	14
1.3.6.1.1.2. İzolatörün Düşey Rijitliği.....	15
1.3.6.1.1.3. Avantajlar ve Dezavantajlar.....	16
1.3.6.1.2. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Sistemi (LRB).....	17

1.3.6.1.2.1. İzolatörde Kurşun Davranışı	18
1.3.6.1.3. Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDRB).....	18
1.3.6.2. Sürtünme Tipi İzolatörler	19
1.3.6.2.1. Saf Sürtünme İzolasyon Sistemi (P-F)	20
1.3.6.2.2. Sürtünme Sarkaç Sistemi (FPS)	20
1.3.6.3 Geoteknik Sismik İzolasyon (GSİ).....	22
1.4. İzolasyon Sisteminin Dinamik Modellenmesi	23
1.5. GSİ Literatür Araştırması.....	24
1.5.1. Sürtünme Tipi Geoteknik Sismik İzolasyon	24
1.5.1.1 Sentetik Astarla Temel İzolasyonu.....	24
1.5.1.2 Sentetik Astarla Zemin İzolasyonu	25
1.5.2. Sönümleme Tipi Geoteknik Sismik İzolasyon.....	27
1.6. Agrega-Bitüm Karışımının Sismik İzolasyon Amaçlı Kullanımı ve Yapılan Çalışmalar	31
1.7. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	35
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	37
2.1. Giriş.....	37
2.2. Deneysel Çalışmalar.....	38
2.2.1. Materyaller	38
2.2.1.1 Granüler Zemin	38
2.2.1.2. Bitüm.....	40
2.2.1.3. Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Kopolimerleri	41
2.2.1.4. Karbon Lifi (CFRP).....	43
2.2.2. Bitüm Modifikasyonu.....	44
2.2.2.1. SBS Polimeri ile Bitüm Modifikasyonu.....	44
2.2.2.2. Karbon Lifi ile Bitüm Modifikasyonu.....	46
2.2.3. Numunelerin Hazırlanması.....	48
2.2.4. Çevrimsel Direkt Basit Kesme Deneyi	52
2.3. Nümerik Çalışmalar	59
2.3.1 Dinamik Yükleme İçin İzolasyon Sistemin Davranışı	59
2.3.2. Yapının Üç Boyutlu Modeli	61
2.3.3 Doğrusal Elastik Olmayan Zaman Tanım Analizi	64
2.3.4. Viskoelastik Malzeme Tanımlaması ve Doğrulaması.....	67

2.3.4.1.	Viskoelastik Malzeme	67
2.3.4.2.	Agrega-Bitüm Karışımının Viskoelastik Davranışı	68
2.3.4.3.	Agrega-Bitüm Karışımının Mekanik Modellemesi.....	69
2.3.4.4.	Viskoelastik Malzemenin Çevrimsel Yük Altındaki Davranışı	69
2.3.4.5.	İzolasyon Malzemesinin Modellemesi	71
3.	BULGULAR VE TARTIŞMALAR	73
3.1.	Giriş	73
3.1.1.	Sönüm Oranı ve Kayma Modülü.....	73
3.2.	Deneysel Bulgular	75
3.2.1.	Çevrimsel Basit Kesme Deney Sonuçları	75
3.2.2.	İzolatör Malzemesi Olarak Saf Bitüm ile Elde Edilmiş Malzemeye Ait Sonuçlar	76
3.2.2.1.	Bitüm İçeriğinin Dinamik Özelliklere Etkisi	77
3.2.2.2.	Düşey Basıncın Dinamik Özelliklere Etkisi.....	78
3.2.2.3.	CSR Aralığının Dinamik Özelliklere Etkisi.....	79
3.2.3.	İzolatör Malzemesi Olarak SBS ile Modifiye Edilmiş Bitüm ile Elde Edilmiş Malzemeye Ait Sonuçlar	81
3.2.3.1.	Bitüm İçeriğinin Dinamik Özelliklere Etkisi	82
3.2.3.2.	Düşey Basıncın Dinamik Özelliklere Etkisi.....	85
3.2.3.3.	SBS Katkı Oranının Dinamik Özelliklere Etkisi.....	86
3.2.3.4.	CSR Aralığının Dinamik Özelliklere Etkisi.....	89
3.2.4.	İzolatör Malzemesi Olarak Karbon Lifi ile Modifiye Edilmiş Bitüm ile Elde Edilmiş Malzemeye Ait Sonuçlar.....	92
3.3.	Nümerik Bulgular	93
3.3.1.	Agrega-Modifiye Bitüm Karışımının Deneysel ve Numerik Modelinin Karşılaştırılması	93
3.3.2.	Ankastre Mesnetli Modelin Sonuçları.....	97
3.3.2.1.	Modal Analizi.....	97
3.3.2.2.	Zaman Tanım Analizi ve Sonuçları.....	98
3.3.3.	İzolasyonlu Modelin Sonuçları	101
3.3.3.1.	Modal Analizi	102
3.3.3.2.	GSİ İzolatörün Boyut Etkisi ve Optimum Boyut Belirlenmesi	103
3.3.3.3.	Zaman Tanım Analizi ve Sonuçları.....	106
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111

5.	KAYNAKLAR.....	114
6.	EKLER.....	123
ÖZGEÇMİŞ		



Doktora Tezi

ÖZET

MODİFİYE BİTÜM KATKILI GEOTEKNİK SİSMİK İZOLASYON (GSİ) MALZEMESİ
ARAŞTIRILMASI VE YAPI DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Saeid ZARDARI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU
2020, 125 Sayfa

Sismik izolasyon sistemi, yapıları sismik etkilere karşı iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu sistemin temel çalışma prensibi, diğer sistemlere kıyasla, yapının deprem yüklerine dayanma kapasitesini arttırmak yerine, deprem nedeniyle yapıya etki eden kuvvetlerini azaltmaktır. Geleneksel izolasyon sistemleri, özel üretim olduklarından ve kurulum için özel personel ve ekipman gerektirdiğinden maliyetli sistemlerdir. Geoteknik sismik izolasyon (GSİ) sistemi, geleneksel sismik izolasyon araçlarına göre daha ucuz olması ve sadece temel inşaat becerilerini gerektirmesi sebebiyle orta katlı ve sıradan binalar için kullanılabilir. Bu çalışmada, binalar için düşük maliyetli ve uygulanması kolay sismik izolasyon malzemesinin geliştirilmesi ve yapı davranışına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, SBS polimerlerle ve karbon liflerle modifiye edilmiş bitümle, agrega-modifiye bitüm karışımları hazırlanmıştır. Bu malzemenin izolatör malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmak için dinamik özellikleri çevrimsel basit kesme deneyi ile incelenmiştir. Numerik çalışma kapsamında, agrega-modifiye bitüm malzemesinin, yapılarda sismik izolatör olarak kullanılması üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizler, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan SAP 2000 programı kullanılarak yapılmıştır. Sayısal analizlerin sonuçları incelendiğinde, tez içerisinde bahsi geçen sismik izolasyon sisteminin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumda, binanın en üst katındaki tepki ivmelerinin yaklaşık %75 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca, binanın katları arası maksimum görelî ötelenmelerinde de %60 oranında azalma görülmüştür. Böylece agrega-modifiye bitüm karışımının etkili bir izolatör malzemesi olarak tanıtılması mümkün olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sismik izolasyon, Geoteknik sismik izolasyon, Çevrimsel basit kesme deneyi, Modifiye bitüm, Sönüm oranı, Kayma modülü, Sonlu elemanlar yöntemi

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MODIFIED BITUMINOUS GEOTECHNICAL SEISMIC ISOLATION
(GSI) MATERIAL AND INVESTIGATION OF ITS EFFECT ON BUILDING BEHAVIOR

Saeid ZARDARI

Karadeniz Technical University
The Graduated School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2020, 125 Pages

Seismic isolation system is a method used to heal structures against seismic effects. The basic working principle of this system is to decrease the forces acting on the structure due to the earthquake instead of increasing the capacity of the structure to withstand earthquake loads. Traditional insulation systems are costly investments as they are custom made and require special personnel and equipment for installation. Geotechnical seismic isolation (GSI) system can be used for mid-rise and ordinary buildings as it is cheaper than traditional seismic isolation tools and requires only basic construction skills. In this study, it is aimed to develop low cost and easy to apply seismic isolation material for buildings and to examine its effect on building behavior. In this direction, aggregate-modified bitumen mixtures prepared with SBS polymers and carbon fibers modified bitumen. In order to investigate the usability of this material as an isolator material, its dynamic properties were examined by cyclic simple shear test. Within the scope of numerical study, the use of aggregate-modified bitumen material as a seismic isolator in buildings was investigated using the three-dimensional finite element method. Analyzes were made using the SAP 2000 program, which provides solutions with finite element method. When the results of the numerical analysis are examined, it is seen that the response accelerations at the top floor of the building decrease approximately 75% when the seismic isolation system mentioned in the thesis is used compare to non-isolated model. In addition, a 60% reduction was observed in the maximum story drift of the building. Thus, it has been possible to introduce the aggregate-modified bitumen mixture as an effective insulator material.

Keywords: Seismic isolation, Geotechnical seismic isolation, Cyclic simple shear test, Modified bitumen, Damping ratio, Shear modulus, Finite elements method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Düşük hızlı bir döner makinenin dinamik yük üretmesi, a) Tipik yük-zaman ilişkisi, b) Sinüsoidal idealizasyon (Das,1993).	2
Şekil 1.2. Kazık çakma nedeniyle zemin ivmesinin düşey bileşeni (Das,1993).....	2
Şekil 1.3. 1979’da Imperial Valley’de meydana gelen depremin ivme kaydı	3
Şekil 1.4. Yapının yer hareketine karşı davranışı, a) Sismik izolatör olmadan, b) Taban sismik izolatör uygulanarak (Wu, 2001)	6
Şekil 1.5. İdeal ivme aralığı (Buckle ve Mayes, 1990).....	7
Şekil 1.6. İdeal yer değiştirme aralığı (Buckle ve Mayes, 1990).....	8
Şekil 1.7. Plastik deformasyonda histerezis kuvveti-yer değiştirme eğrisi (Buckle ve Mayes, 1990)	8
Şekil 1.8. Sönümlü lineer izolatör sistemi, a) Genel şeması, b) İzolatöre ait histerezis eğrisi (Skinner vd., 1993).	10
Şekil 1.9. Bilinear izolatör sistemi, a) Genel şeması, b) Sistemin paralelkenar histerezis eğrisi (Skinner vd., 1993).	11
Şekil 1.10. Düşük sönümlü doğal veya sentetik kauçuk izolatör (Chatzidaki, 2011)...	14
Şekil 1.11. (2R) çaplı silindirik kauçuk izolatör, (D) miktarında kayma deformasyonu ve (Ar) örtüşen yüzey (Naeim ve Kelly, 1999)	15
Şekil 1.12. Düşük sönümlü doğal veya yapay kauçukların şematik diyagramı (Ahmadi, 1995).....	15
Şekil 1.13. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör (LRB)	17
Şekil 1.14. Kauçuk-kurşun izolatörünün şematik diyagramı (Ahmadi, 1995)	17
Şekil 1.15. Yüksek sönümlü doğal kauçuk izolatörün kayma şekil değiştirme-kayma modülü ilişkisi (Naeim ve Kelly, 1999).....	19
Şekil 1.16. Yüksek sönümlü doğal kauçuk izolatörün kayma şekil değiştirme-sönüm oranı ilişkisi (Naeim ve Kelly, 1999).....	19
Şekil 1.17. Saf sürtünme izolasyonun şematik diyagramı (Ahmadi, 1995).....	20
Şekil 1.18. Sürtünme sarkaç izolasyonun	21
Şekil 1.19. Sarsma tablası deneyinden elde edilen bir FPS sisteminin tipik histerezis eğrisi (Naeim ve Kelly, 1999).....	21
Şekil 1.20. İzolatörlerin davranış modelleri (ASCE 7-16, 2017).....	23
Şekil 1.21. Pürüzsüz sentetik astar kullanarak binaların sismik korunması için temel izolasyonu (Yegian ve Kadakal, 2004).....	25

Şekil 1.22.	Pürüzsüz sentetik astar kullanarak binaların sismik korunması için zemin izolasyonu (Yegian ve Kadakal, 2004).....	26
Şekil 1.23.	Zemin izolasyon sistemleri, a) Silindirik şekilli, b) Küvet şekilli	26
Şekil 1.24.	Kauçuk-zemin karışımı (RSM) tabakası kullanılarak önerilen sismik izolasyon yönteminin şematik çizimi (Tsang, 2008)	28
Şekil 1.25.	Saf kum ve kauçuk-zemin karışımlarının kayma modülü azalma eğrileri (Tsang, 2008)	28
Şekil 1.26.	Saf kum ve kauçuk-zemin karışımlarının kayma şekil değiştirme-sönüm oranı ilişkisi (Tsang, 2008).	29
Şekil 1.27.	Sismik izolasyon uygulanmış ve uygulanmamış yapı için, a) Yatay tepki ivme, b) Düşey tepki ivme (Tsang, 2008)	29
Şekil 1.28.	Belirli bir kaya agregası ile doldurulmuş tüm kullanılmış lastiğin yatak olarak kullanılması (Lang ve Sargent, 2005).....	30
Şekil 1.29.	İşlenmiş asfalt-lif sismik taban izolasyon yastığı	33
Şekil 1.30.	BS sistemin ile sismik izolasyon (Chen, 2004)	34
Şekil 1.31.	BS izolasyon uygulamasının detaylı (Chen, 2004).....	34
Şekil 2.1.	Çalışmada kullanılan kum zeminin granülometri eğrisi	39
Şekil 2.2.	Bitüm penetrometre cihazı.....	41
Şekil 2.3.	Kraton D1101AT kodlu Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) kopolimeri	42
Şekil 2.4.	Karbon lifi ile insan saçının boyut olarak kıyaslanması (Liu vd., 2015)....	43
Şekil 2.5.	Çalışmada kullanılan karbon lifinin kesilmiş ve ayrılmış hali	44
Şekil 2.6.	Yüksek hızlı polimer modifiye bitüm mikseri.....	46
Şekil 2.7.	Düşük hızlı mikser	47
Şekil 2.8.	Bitüm modifikasyonunda yüksek oranda lif kullanımının sertleşme etkisi (lifin katkı oranı %1,3 ve uzunluğu 6 mm).....	48
Şekil 2.9.	Çalışmada kullanılan kalıp ve sıkıştırma elemanı	49
Şekil 2.10.	Çalışmada yapılan numuneler.....	51
Şekil 2.11.	İdealize edilmiş sahada sismik yüke maruz kalan zemin elemanı (Kumar, 2015).....	52
Şekil 2.12.	Basit kesme deneyinin şematik görünümü (ASTM D 6528, 2017).....	53
Şekil 2.13.	Çalışmada kullanılan Shear Trac II-DSS Geocomp markalı çevrimsel basit kesme cihazı	54
Şekil 2.14.	Shear-cycle ara yüzü	54

Şekil 2.15.	Çevrimsel basit kesme deneyi aşamaları, a) Numunenin yüksekliğinin ölçülmesi, b) Hücre halkaların dizilmesi, c) Numunenin halka içerisinde yerleştirilmesi, ç) Cihazın deney kutusu, d) Numunenin deney kutusuna yerleştirilmesi, e) Pinlerin çıkarılması, f) Düşey yük uygulama aleti, g) Konsolidasyon yük ölçeri, ğ) Çevrimsel yükün uygulaması ve histerezis eğrileri.....	58
Şekil 2.16.	İki serbestlik dereceli izole edilmiş sistemin parametreleri (Kelly, 1990) .	60
Şekil 2.17.	Tek eksenli titreşim izolasyon sisteminin tipik modelleri (Rivin, 2001)....	61
Şekil 2.18.	Sonlu eleman analizlerinde kullanılan yapı modeli plan görünümü.....	62
Şekil 2.19.	Sonlu eleman analizlerinde kullanılan yapı modeli, a) Kesit görünümü, b) Agreg-modifiye bitüm karışımı izolatör kesiti.....	62
Şekil 2.20.	Model binanın üç boyutlu görünümü.....	63
Şekil 2.21.	Seçilen yer hareketi kayıtlarının ivme spektrumları (üst yapının sönüm oranı %5)	65
Şekil 2.22.	Analizde kullanılan ivme kayıtları, a) Chi-Chi, Taiwan, b) Loma Prieta, c) Imperial Valley	66
Şekil 2.23.	Viskoelastik bir piramidin zamanla sarkması (soldaki saat) (Lakes, 2009)	67
Şekil 2.24.	Lineer viskoelastik malzeme için sabit gerilme hızında deformasyon ve ardından boşaltma için gerilme-şekil değiştirme grafiği (Lakes, 2009)	68
Şekil 2.25.	Kelvin modeli (yay-sönümleyici), (E) yayın rijitliğini ve (C) sönümleyicinin viskozitesini temsil eder (Lakes, 2009).....	69
Şekil 2.26.	Doğrusal viskoelastik bir malzemenin çevrimsel yüklenmesinde kuvvet-yer değiştirme arasındaki ilişki (Xu vd., 2010)	70
Şekil 2.27.	SAP2000 programında agrega-modifiye bitüm karışımının, link elemanı ile modellenmesi	72
Şekil 2.28.	Basit kesme deneyinde uygulanan çevrimsel yükleme.....	72
Şekil 3.1.	Viskoelastik malzeme için çevrimsel yük altında kuvvet-yer değiştirme eğrisi (ASCE 41-13, 2014)	74
Şekil 3.2.	Histerezis eğrisi ile sönüm oranı arasındaki ilişki (Kramer, 1996)	75
Şekil 3.3.	Saf bitüm ile yapılan izolatör malzemeye ait histerezis eğrileri, a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12	76
Şekil 3.4.	Bitüm içeriğinin sönüm oranına etkisi.....	77
Şekil 3.5.	Bitüm içeriğinin dinamik kayma modülüne etkisi.....	78
Şekil 3.6.	Saf bitüm ile yapılan izolatör malzemesi için iki farklı düşey basınçtaki histerezis eğrilerinin karşılaştırılması, a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12	79

Şekil 3.7.	İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait sönüm oranı karşılaştırılması	80
Şekil 3.8.	İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait kayma modülü karşılaştırılması, a) Düşey basınç $\sigma_v=100$ kPa, b) Düşey basınç $\sigma_v=200$ kPa	81
Şekil 3.9.	%5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ile elde edilen numunelere ait histerezis eğrileri, a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12	82
Şekil 3.10.	Bitüm içeriğinin sönüm oranında etkisi, a) SBS %3, b) SBS %5, c) SBS %7	83
Şekil 3.11.	Bitüm içeriğinin dinamik kayma modülünde etkisi, a) SBS %3, b) SBS %5, c) SBS %7.....	84
Şekil 3.12.	%5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ile yapılan izolatör malzemesi için iki farklı düşey basınçtaki histerezis eğrilerinin karşılaştırılması, a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12	86
Şekil 3.13.	Malzemenin üç farklı SBS katkı oranında ve farklı bitüm içeriklerde sönüm oranı değerleri, a) Düşey basınç $\sigma_v=100$ kPa, b) Düşey basınç $\sigma_v=200$ kPa.....	87
Şekil 3.14.	Malzemenin üç farklı SBS katkı oranında ve farklı bitüm içeriklerde kayma modülü değerleri, a) Düşey basınç $\sigma_v=100$ kPa, b) Düşey basınç $\sigma_v=200$ kPa	88
Şekil 3.15.	İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait sönüm oranı karşılaştırılması, a) SBS %3, b) SBS %5, c) SBS %7	90
Şekil 3.16.	İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait kayma modülü karşılaştırılması, a) SBS %3 ve $\sigma_v=100$ kPa, b) SBS %3 ve $\sigma_v=200$ kPa, c) SBS %5 ve $\sigma_v=100$ kPa, d) SBS %5 ve $\sigma_v=200$ kPa, e) SBS %7 ve $\sigma_v=100$ kPa, f) SBS %7 ve $\sigma_v=200$ kPa	91
Şekil 3.17.	Lif uzunluğu ve içeriğinin sönüm oranına etkisi	93
Şekil 3.18.	Lif uzunluğu ve içeriğinin kayma modülüne etkisi	93
Şekil 3.19.	Agrega-modifiye bitüm karışımının deneysel ve numerik histerezis eğrileri, a) Saf bitümlü, b) SBS ile modifiye edilmiş bitümlü, c) Lif ile modifiye edilmiş bitümlü.....	95
Şekil 3.20.	Agrega-modifiye bitüm karışımının deneysel ve numerik zamana bağlı yer değiştirmeler, a) Saf bitümlü, b) SBS ile modifiye edilmiş bitümlü, c) Lif ile modifiye edilmiş bitümlü.....	96
Şekil 3.21.	Ankastre mesnet yapının birinci modu	97
Şekil 3.22.	X yönünde birinci modun şekli.....	98
Şekil 3.23.	Her deprem ivme kaydı için maksimum kat ivmesinin dağılımı.....	99

Şekil 3.24	Her deprem ivme kaydı için binanın en üst katında zamana bağlı olarak tepki ivmeleri, a) No. 778- Loma Prieta, b) No.169- Imperial Valley#06, c) No. 1236- Chi-Chi, Taiwan	100
Şekil 3.25.	Her deprem ivme kaydı için maksimum katlar arası görelî ötelenme	101
Şekil 3.26.	X yönünde birinci modun şekli.....	102
Şekil 3.27.	GSİ izolatörün boyutunun ivmeler üzerindeki etkisi	104
Şekil 3.28.	GSİ izolatörün boyutunun görelî ötelenme üzerindeki etkisi	106
Şekil 3.29.	İzolasyonlu ve izolasyonsuz binanın geometrik merkezindeki maksimum kat ivmesinin dağılımı ve karşılaştırılması, a) Saf bitümlü izolatör, b) SBS’li izolatör, c) Lifli izolatör.....	107
Şekil 3.30.	No. 778 Loma Prieta ivme kaydının zamana bağlı olarak çatı katında oluşturan maksimum tepki ivme değerleri, a) Saf bitümlü izolatör, b) SBS’li izolatör, c) Lifli izolatör	108
Şekil 3.31.	Ankastre mesnetli ve farklı izolatörlerle izole edilmiş modelin katlar arası görelî ötelenmeleri, a) Saf bitümlü izolatör, b) SBS’li izolatör, c) Lifli izolatör	109
Şekil 3.32.	No. 778 Loma Prieta ivme kaydı uygulandığında, kullanılan izolatörlere ait histerezis eğrileri, a) Saf bitümlü izolatör, b) SBS’li izolatör, c) Lifli izolatör	110

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Deneysel çalışmada kullanılan kumun geoteknik özellikleri	39
Tablo 2.2. Deneysel çalışmada kullanılan bitümün karakteristik özellikleri (URL1, 2, 3 ve 4)	40
Tablo 2.3. Bitüm modifikasyonunda kullanılan SBS kopolimerin özellikleri	42
Tablo 2.4. Bitüm modifikasyonunda kullanılan karbon lifin (CFRP) özellikleri	44
Tablo 2.5. Saf bitümle hazırlanan numunelerin isimlendirmeleri	49
Tablo 2.6. SBS polimeri ile modifiye edilmiş bitümle hazırlanan numunelerin isimlendirmeleri	50
Tablo 2.7. Karbon lifi ile modifiye edilmiş bitümle hazırlanan numunelerin isimlendirmeleri	50
Tablo 2.8. Çevrimsel basit kesme deney programı	56
Tablo 2.9. Yapı modelinde kullanılan kolon ve kiriş boyutları	63
Tablo 2.10. Yapı modelinde kullanılan çeliğin özellikleri	63
Tablo 2.11. Döşemelere uygulanan yükler	64
Tablo 2.12. Zaman tanım analizinde kullanılan deprem kayıtları (PEER, 2018)	64
Tablo 3.1. Birinci moda ait periyot ve frekanslar	98
Tablo 3.2. İzolatörlü modellerin birinci moda ait periyot ve frekansları	102
Tablo 3.3. GSİ izolatörün boyutunun görece ötelenme üzerindeki etkisi (birim %) .	105

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: İzolatörün alanı
AC	: Asfalt betonu
A _h	: Bilinear histerezis eğrisinin alanı
APP	: Ataktik Polipropilen
A _r	: Örtüşen yüzey
a _r	: Kauçuk izolatörler için kauçuk tabaka yüzeyi
A _s	: Numunenin alanı
C _b	: Lineer izolatör sönümleme katsayısı
C _c	: Eğrilik katsayısı
CFRP	: Karbon lifi takviyeli polimer
C _s	: Yapının sönümlemesi
CSR	: Çevrimsel gerilme oranı
C _u	: Üniformaluluk katsayısı
D ₁₀	: Efektif çap
D ₃₀	: %30 geçen yüzdesine karşılık dane çapı
D ₆₀	: %60 geçen yüzdesine karşılık dane çapı
E	: Elastisite modülü
E ₁	: Depolama modülü
E ₂	: Kayıp modülü
F ₁	: Histerezis eğrisindeki maksimum yer değiştirmeye denk gelen kuvvet
F ₂	: Histerezis eğrisindeki t=0 saniyeye denk gelen kuvveti
f	: Doğal frekans
F ⁺	: Maksimum yer değiştirmeye denk gelen kuvvet
F ⁻	: Minimum yer değiştirmeye denk gelen kuvvet
F _m	: Histerezis eğrisindeki maksimum kuvvet
FPS	: Sürtünme Sarkaç Sistemi
f _{yk}	: Çeliğin Minimum akma dayanımı
f _{su}	: Çeliğin Minimum kopma dayanımı
G	: Kayma Modülü
G ₁	: İzolatör malzemesinin depolama kayma modülü
G _s	: Özgül ağırlık

GSI	: Geoteknik Sismik İzolasyonu
h	: İzolatörün yüksekliği
HDRB	: Yüksek sönümlü doğal kauçuk izolatörler
HMA	: Sıcak karışım asfalt
h_r	: Kauçuk izolatörler için toplam lastik katmanlarının yüksekliği
I	: Bina önem katsayısı
IPP	: İzotaktik Polipropilen
J	: Elastik uyum
K	: Malzemenin rijitliği
K_b	: Lineer izolatörün rijitliği
K_{b1}	: Başlangıç veya elastik fazı rijitliği
K_{b2}	: Plastik fazı rijitliği
K_s	: Yapının rijitliği
K_z	: Kauçuk izolatörlerde nihai düşey rijitlik
$K_z(v)$: Kauçuk izolatörler için düşey rijitlik
$K_z(\gamma)$: Kauçuk izolatörlerde hacim değişiklikleri olmadan, düşey rijitliği
LRB	: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör
LVE	: Lineer viskoelastik
M	: Yapının toplam kütlesi
m_b	: Taban katının izolasyon sisteminin üzerindeki kütle
NGI	: Norveç geoteknik enstitüsü
PB	: Polibutadien
P-F	: Saf sürtünme İzolasyon Sistemi
PGA	: En büyük yer ivmesi
PMB	: Polimer modifiye bitümler
PS	: Polistiren
$P(t)$: Zamana bağlı olarak değişen yük
S	: Şekillendirilebilirlik faktörü
S_b	: Lineer izolatöre uygulanan maksimum kayma kuvveti
SBS	: Styrene-Butadiene-Styrene Kopolimerleri
SW	: İyi derecelenmiş kum
T	: Periyot
t	: Bağımsız zaman değişkeni

T_b	: Lineer izolatörün doğal periyodu
T_B	: Uygun etkili periyot
T_g	: PS bloklarının cam geçiş sıcaklığı
TPE	: Termoplastik elastomerler
u	: Sistemin yer değiştirmesi
u_0	: Histerezis eğrisindeki maksimum yer değiştirme
U_b	: İzolatörün üzerindeki tabakanın mutlak yer değiştirmesi
U_s	: Üst yapının mutlak yer değiştirmesi
u_{ave}	: Yer değiştirmenin ortalaması
\dot{u}	: Hız (yer değiştirmenin zamana göre birinci türevi olan)
\ddot{u}	: İvme (yer değiştirmenin zamana göre ikinci türevi olan)
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
ΔW	: Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin içindeki alan
W_D	: Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin bir tam çevrim ile çevrelenen alan
X_b	: Lineer izolatörün maksimum yer değiştirmesi
σ_v	: Düşey konsolidasyon basıncı
Δ^+	: Maksimum (pozitif) yer değiştirme
Δ^-	: Minimum (negatif) yer değiştirme
Φ	: İzolatör çapı
ε	: Şekil değiştirme
ε_t	: Zamana bağlı yer değiştirme
ξ	: Sönüm oranı
ξ_B	: Uygun etkili sönümleme katsayısı
ξ_B	: Efektif viskozite sönümleme
ξ_h	: Eşdeğer viskozite sönümleme katsayısı
η	: Viskozite
η_v	: Viskoelastik malzemenin kayıp katsayısı
ρ	: Yoğunluk
τ	: Kayma gerilmesi
ν	: Poisson Oranı
ω	: Açısal frekans
ω_m	: Yapının ankastre mesnetli modal analizindeki açısal frekansı
γ	: Kayma şekil değiştirmesi

1. GENEL BİLGİLER

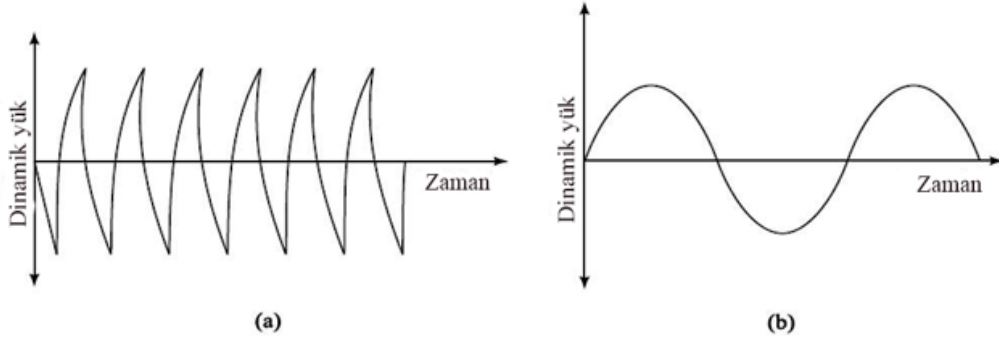
1.1. Giriş

Depremler, neredeyse her yıl tüm dünyada milyonlarca yapıyı etkileyen en yıkıcı doğal afetlerden biridir. Depremlerin ne zaman ve nerede meydana geleceği tahmin edilemediğinden günümüzde var olan koşullarda önlenmesi de mümkün olmamaktadır. Ancak, alınacak önlemler ile depremlerin yıkıcı etkilerini azaltarak can ve mal güvenliğini sağlamak ve olası kayıpları en aza indirmek mümkündür. Dolayısıyla, inşaat mühendisliği bünyesinde gerçekleştirilen projelerin tasarım aşamasında, yapıların depreme karşı dayanıklılıklarının artırılması gözetilerek gerekli güvenlik koşullarının sağlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, depreme dayanıklı yapı tasarımında, yapının taban kesme kuvvetini azaltmak için sismik izolatörlerin kullanılması veya yapının sönümlemesini ve sismik enerjinin sönümlemesini artırmak için yapıda damperlerin kullanılması, depremin yıkıcı etkilerinin önlenmesi için etkin bir yaklaşım olarak kabul görmektedir. İdeal olarak depreme dayanıklı tasarım, depremlerin büyüklüklerine ve konumlarına bakılmaksızın yapının hasarsız olmasını sağlamalıdır. Yapının depreme karşı dayanıklılığının kontrolünün amacı, depremden dolayı yapıya gelen enerjinin yutulması ve böylelikle yapısal elemanların plastik deformasyonlarının, katlar arası görelî ötelenmelerin, toplam yer değiştirmenin, kat ivmelenmeleri ve yapıdaki taban kesme kuvvetinin azalmasının tespit edilmesidir. Yapılarda yaygın enerji dağılımı yöntemleri, binada kullanılan malzemelerin doğrusal olmayan deformasyonuna dayanmaktadır, ancak son zamanlarda yapıya gelen enerjinin sönümlenmesi için pasif, yarı aktif ve aktif yapısal kontrol cihazları da kullanılmaya başlanmıştır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, sismik izolatörlerin, taban kesme kuvvetini, yer değiştirme tepkisini ve yapıların maksimum ivmelerini yeterince azaltabildiğini göstermiştir. Özel üretim ve kurulum süreçlerini içeren çeşitli sismik izolatörler bulunmaktadır. Bu tür uygulamalar, özel teknik personel ve ekipman gerektirmesi ayrıca maliyetli olmasından dolayı, kullanımları henüz çok yaygın olmayıp sadece özel binalarda uygulanmaktadır.

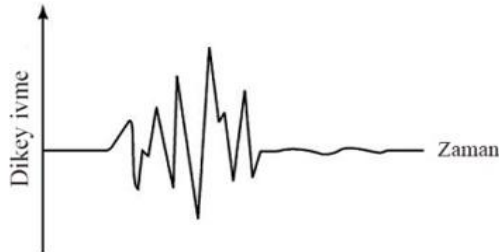
1.2. Dinamik Yük

Dinamik, sistemin davranışının zamana bağlı olarak belirlenmesi şeklinde tanımlanabilir. Bu nedenle dinamik yük, genliği, yönü veya konumu zamana bağlı olarak değişen bir yükür. Analitik bir bakış açısına göre, dinamik yükleri periyodik ve periyodik olmayan olmak üzere iki kategoriye ayırmak mümkündür. Periyodik yük, pistonlu veya döner bir makinenin çalışması gibi zamanla düzenli aralıklarla kendini tekrarlayan ve büyüklüğü değişen özel bir yük türüdür. Periyodik olmayan yükler ise herhangi bir periyodiklik göstermeyen, örneğin bir binaya rüzgâr yükü olarak etkiyen yüklerdir (Das, 1993). Pistonlu veya döner bir makinenin çalışması, tipik olarak Şekil 1.1(a)'da gösterildiği gibi dinamik bir yük modeli üretir. Bu dinamik yük az çok sinüzoidal niteliktedir ve Şekil 1.1(b)'de gösterildiği gibi idealize edilebilir.



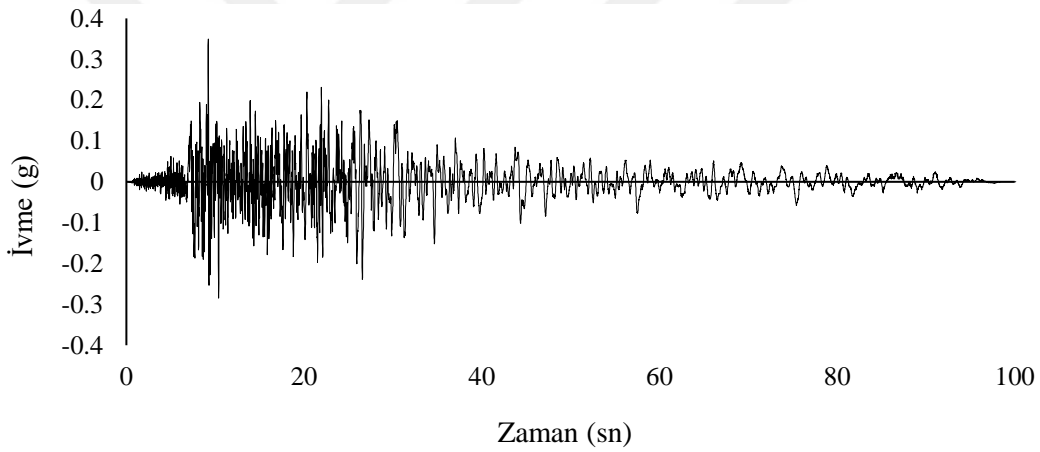
Şekil 1.1. Düşük hızlı bir döner makinenin dinamik yük üretmesi, a) Tipik yük-zaman ilişkisi, b) Sinüsoidal idealizasyon (Das,1993).

Bir kazık çakma işlemi nedeniyle tipik bir yükleme modeli (düşey ivmelenme) Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Kazık çakma nedeniyle zemin ivmesinin düşey bileşeni (Das,1993).

Yapıları etkileyen dinamik yükler; deprem, titreşimli makine yükleri, hareket halindeki yükler (trafik gibi), deniz dalgaları, rüzgâr yükleri, bomba patlaması çeşitli faktörlerden kaynaklanabilmektedir. Yapılar için en güçlü dinamik yüklerden biri, deprem yüklemesidir. Yerkürenin derinliklerinde biriken gerilmeler, yeterli büyüklüğe ulaştığında Yerküre’de titreşim dalgaları oluşturur. Bu dalgaların yer yüzeyini sarsma olayına da deprem adı verilmektedir. Deprem, volkanik patlamalar veya Yerküre’nin içindeki artan deformasyondan kaynaklanabilir. Deformasyondaki artış nedeniyle dünya kabuğunda enerji depolamak mümkün olmadığında, bu enerji açığa çıkar ve dünya kabuğunda hareketler meydana gelir. Bir deprem her yönde düzensiz hareketler meydana getirir. Şekil 1.3’te, 1979’da Richter ölçeğinde 6,53 büyüklüğünde Imperial Valley’de meydana gelen depreminin ivme kaydı gösterilmektedir.



Şekil 1.3. 1979’da Imperial Valley’de meydana gelen depreminin ivme kaydı

1.3. Sismik İzolasyon Sistemleri

Bir deprem meydana geldiğinde, binanın katları aynı anda ve aynı hızda hareket etmediği için, aralarında rölatif bir yatay yer değiştirme (görelî ötelenme) oluşur. Hatta bazen, binaya etki eden kuvvetin yönündeki değişiklik nedeniyle, tüm katlara güç iletimi uyumsuz olur ve katlar farklı yönlerde hareket ederler. Bu davranış, binayı tahrip ederek önemli hasarlara neden olur. Bunun yanında, depremin neden olduğu ivme, yapının katlarına aktarılır ve her katta kütlesi ile orantılı bir ivme oluşturur. Bu ivmenin büyüklüğü de hasara neden olur. Bu nedenle, bir binanın sismik direncinin yüksek olmasının sağlanması için önemli olan, katlar arası yer değiştirme ve kat ivmelenmelerinin en aza indirgenmesidir. Bu

doğrultuda, uzun yıllar boyunca, yapının sünekliğini arttırmak, yapının kütleini azaltmak gibi çeşitli stratejiler önerilmiştir. Bununla birlikte, modern yöntemlerde, yapıya etki eden depremin enerjisini daha fazla sönmölemek için ve yapının taban kesme kuvvetini azaltmak için sönmöleyiciler veya sismik izolatörler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin temeli, yapının periyodunu artırarak depremin ivmesini azaltmak ve üstyapının sönmömünü artırarak yapıyı etkileyen deprem kuvvetlerini azaltmaktır.

Sismik izolatör kullanımı, yapıları sismik olarak iyileştirmek için kullanılan diğer yöntemlere nispeten daha yeni bir yöntemdir. Bu sistemin temel çalışma prensibi, yapının yanal yüklere dayanma kapasitesini arttırmak yerine, deprem nedeniyle yapıya etki eden kuvvetleri azaltmaktır. Ayrılma terimi, iki nesne arasındaki etkileşim derecesini belirtir. Ayrılmış bir nesnenin, yakındaki diğer nesnelere çok az etkileşime sahip olduğu söylenir. Bir nesneyi ayırma eylemi, etkileşimi en aza indirmek için nesne ve çevresi arasına kayan bir bağlantı yerleştirmeyi içerir. Makine titreşimlerinde, izolatör sistemlerinin tasarlanması pratik bir örnektir. Buradaki amaç, makineden temele uygulanan yükleme etkisini en aza indirmektir. Başka bir uygulama, temel hareketinin yapı üzerindeki etkisini en aza indirmektir. Bu, harekete duyarlı ekipman içeren yapıların yanı sıra demiryolu araçlarına bitişik yapılarda daha da önem arz etmektedir. İzolatör, 70 yıldır mekanik ekipmanların kurulumunda bir tasarım stratejisi olarak kullanılmış olsa da ancak son otuz yılda binalar ve köprüler gibi inşaat mühendisliği yapılarında ciddiye alınmıştır.

Deprem esnasında zemin hareket eder ve bu hareket binaları etkiler. Bu tip etkileşimlerde zemin, temel düzeyindeki yapı ile etkileşime girer ve temel yoluyla üst yapıya aktarılır. Bu nedenle, Yerküre'nin titreşiminin yapıya aktarılmasını önlemek için temel bölgesinin izole edilmesi mantıklıdır (Connor, 2002).

1.3.1. Sismik İzolasyon Tasarım Felsefesi

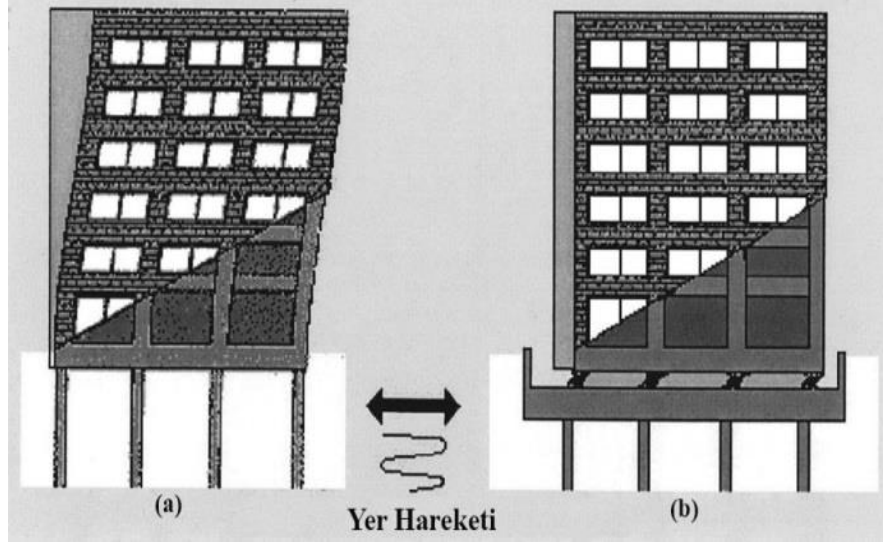
Deprem nedeniyle yapıların tahrip olmasında etkili olan iki ana mekanizma şunlardır:

1. Bina katlarının arasındaki rölatif ötelenme,
2. Bina katlarında oluşan ivme.

Binanın farklı yüksekliklerde deformasyonu rölatif ötelenmeye neden olur. Binanın katları aynı zamanda ve hızda hareket etmediği için, deprem sırasında aralarında rölatif bir yatay yer değiştirme oluşur. Bazen, zemine uygulanan kuvvetin yönündeki değişiklikten dolayı, kuvvetin tüm katlara aktarımının uyumsuzluğu nedeniyle, binanın katları farklı yönlerde

hareket eder. Bu iki mekanizmaya göre, yapısal tahribi en aza indirecek iki tasarım felsefesi vardır. Birincisi, yapının rijit tasarımı ki bu tip yapılarda rölatif ötelenme yapının yüksek rijitliği nedeniyle düşüktür. Ancak bildiğimiz gibi, yapının katlarında oluşan ivme yapının rijitliği ile orantılı olarak artmaktadır. İkincisi, yapıların esnek tasarımıdır. Bir esnek sistem tasarlayarak kat ivmeleri azaltılabilir. Ancak bu, katlar arasında büyük yer değiştirmelerine yol açabilir. Katlar arası yer değiştirmeyi ve kat ivmesini aynı anda azaltmanın tek pratik yolu sismik izolatör kullanmaktır (Naeim ve Kelly, 1999).

Yapıların sismik tasarımının geleneksel yöntemi, yapının kapasitesinin arttırılmasına dayanmaktadır. Bu sismik tasarım yaklaşımında, yapının mukavemetini arttırarak ve sünekliğini sağlayarak yapıda yanal yük taşıma kapasitesi oluşturulur. Bu yöntemin bir sonucu olarak, yapısal elemanların ve bağlantıların boyutları arttırılır ve yapıda, çapraz veya perde duvarlar ya da diğer rijitleştirme elemanları gibi yanal destek elemanları kullanılır. Yapının rijitliği arttıkça, yapı tarafından daha fazla deprem kuvveti emilir ve yapısal mukavemeti sağlamak için, elemanların boyutları artar, bu da projenin ekonomik olarak maliyetini arttırır. Buna ek olarak, geleneksel tasarım yöntemlerinde, yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki doğrusal olmayan deformasyonlar nedeniyle, katlar arası rölatif ötelenme ve ivmeler bu elemanlarda bozulma olasılığına sebep olur. Özellikle, şiddetli depremlerde, depremlerin neden olduğu zararı kontrol etmek zor olacaktır. Şiddetli depremler sonrasında yapılan gözlemlere dayanılarak, geleneksel tasarım ve yapım yöntemlerine göre inşa edilen yapılarda, katlarda önemli ivme değerleri görülmektedir. Bu durum, yüksek katlı bina sakinlerini rahatsız eder ve yapısal olmayan elemanlara zarar verir. Yapının yer hareketine karşı davranışı sismik izolatör sistemi olmadan (Şekil 1.4. (a)) ve taban sismik izolatör sistemi uygulanarak, Şekil 1.4 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Yapının yer hareketine karşı davranışı, a) Sismik izolatör olmadan, b) Taban sismik izolatör uygulanarak (Wu, 2001).

1.3.2. Sismik İzolasyon Teorisinin Temeli

İzolasyon sistemi, yapı ve temel arasında oluşturduğu düşük yatay rijitliği ile binayı veya yapıyı yeryüzü hareketinin yatay bileşenlerinden ayırır. İzolasyon sistemi, depremin enerjisini emmez, aksine, sistemin dinamik davranış özelliklerini kullanarak sismik enerjiyi yönlendirir. Bu etkinin sistemin sönümlenmesi ile bir ilgisi yoktur, ancak izolasyon sisteminin titreşim frekansına eşit frekans aralığında rezonans olasılığını önlemek için belirli bir miktarda sönümlenme yararlı ve gereklidir (Naeim ve Kelly, 1999). İzolatör tabakasının yanıl esnekliğindeki artış oldukça istenir olmakla birlikte, düşey esneklikte dikkatli olunmalıdır. Çünkü düşey yüke ek olarak, izolatörde burkulma problemi vardır. Bu nedenle, izolatörlerin düşey rijitliği, yanıl rijitliğinin birkaç yüz katına kadar artar (Naeim ve Kelly, 1999).

1.3.3. Pasif İzolatörün Ana Bileşenleri

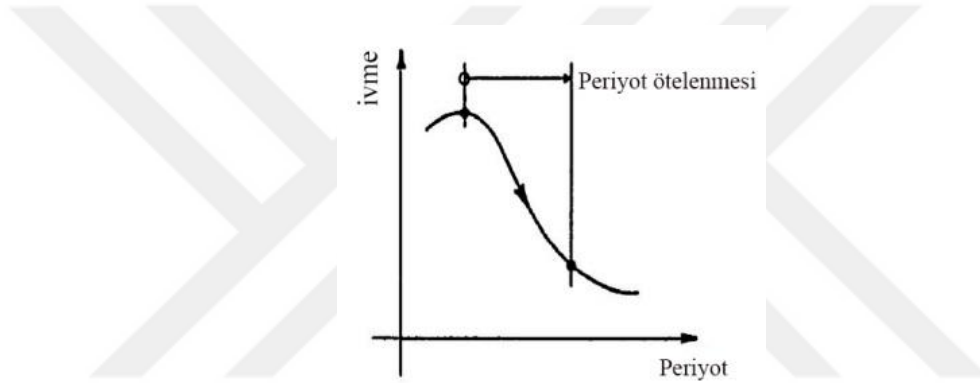
Sismik izolasyonun ana bileşenlerini bilmek, dünya çapında bu alanda kaydedilen ilerlemeyi incelemek için yararlıdır. Bu bileşenler:

- Tüm yapının periyodunu, tepki kuvvetini azaltacak kadar artırmak için esnek bir destek,

- Bina ile zemin arasındaki göreceli deformasyonu kontrol etmek için bir enerji sönümleyicisi,
- Rüzgâr ve küçük depremler gibi düşük yükler altında yapısal rijitlik sağlayan bir malzemedir (Buckle ve Mayes, 1990).

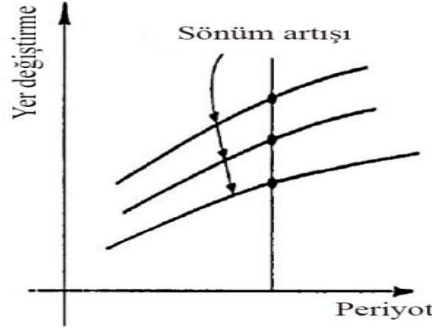
1.3.3.1. Esneklik

İzolatör tabakasının kalınlığı arttıkça, yanal esneklik ve periyot artar ve artan periyot ile, Şekil 1.5'te gösterildiği üzere, yapıya etkiyen ivmeler azalır.



Şekil 1.5. İdeal ivme aralığı (Buckle ve Mayes, 1990).

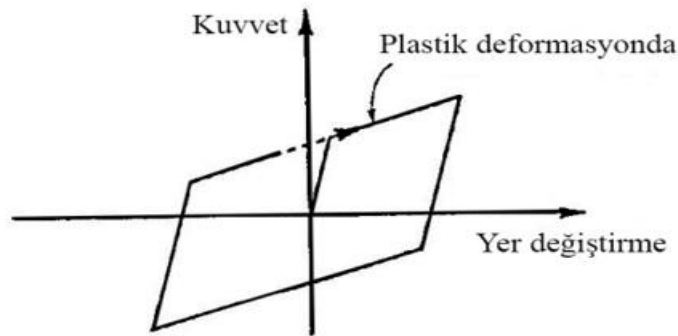
Periyot arttıkça, taban kesme kuvveti önemli ölçüde azalabilir, ancak bu azalmanın miktarı tepki spektrumu eğrisine ve ankastre mesnetli yapının periyoduna bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, periyodun artırılması esnekliği artırır, fakat aynı zamanda esneklik yapının rölatif yer değiştirmesini de artırır. Şekil 1.6'da ideal bir yer değiştirme tepki eğrisi sunulmuştur. Bu eğride görüldüğü üzere, periyot arttıkça yer değiştirme artar ve sönümleme arttıkça bu yer değiştirmeler azaltılabilir.



Şekil 1.6. İdeal yer değiştirme aralığı (Buckle ve Mayes, 1990).

1.3.3.2. Enerji Sönümlemesi

En etkili sönümleme araçlarından biri histerezis enerji kaybının kullanılmasıdır. Histerezis kelimesi, çevrimsel yükler altında yükleme ve boşaltma eğrisindeki enerji kaybını ifade eder. Yükleme sırasında yapılan iş, boşaltma sırasında tamamen geri döndürülemez ve aralarındaki fark ısı şeklinde kaybolur. İdeal kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 1.7’de gösterilmektedir. Kapalı alan, bir çevrim sırasında kaybedilen enerji miktarıdır. Sürtünme, deformasyonları sınırlamak için kullanılan başka bir enerji sönümleme kaynağıdır. Hidrolik sönümleyiciler de bazı köprülerde ve bazı yapılarda başarıyla kullanılmıştır. Bu sistemler, viskoz akışkan akışı yoluyla yüksek sönümlemeyi mümkün kılar, ancak yüksek bakım ve ilk maliyet gereksinimleri bu sönümleyicilerin kullanımını sınırlandırmıştır (Buckle ve Mayes, 1990).



Şekil 1.7. Plastik deformasyonda histerezis kuvveti-yer değiştirme eğrisi (Buckle ve Mayes, 1990).

1.3.3.3. Düşük Yanal Yüklere Karşı Rijitlik

Büyük deprem yükleri için yanal esneklik zorunlu olmakla birlikte, küçük depremler veya rüzgarlar gibi yükler altında önemli ölçüde titreşen yapısal bir sisteme sahip olmanın istenmeyeceği açıktır. Kurşun kauçuk izolatörler ve diğer mekanik enerji dağıtıcıları yüksek başlangıç elastik rijitlik nedeniyle düşük yüklere karşı istenen rijitliği sağlayabilir. Diğer izolasyon sistemleri de bir yer değiştirme sınırlayıcısı kullanır. Bu cihazların her depremden sonra değiştirilmesi gerekir ve bu onların dezavantajlarından biridir (Buckle ve Mayes, 1990).

1.3.4. Uygun Koşullar

İzolatör sisteminin düzgün çalışması için aşağıdaki koşulların yerine getirilmesi gerekir (Skinner vd., 1993).

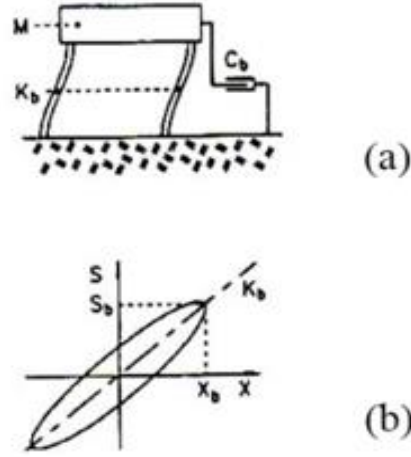
1. Yapının yüksekliği 10 ila 15 kattan az olmalı ve yükseklik/genişlik oranı devrilmeyecek şekilde olmalıdır.
2. Yapının tabanının izin verildiği kadar hareket etmesi için bir engelin bulunmaması.
3. Tasarım rüzgâr yükü veya diğer yanal yükler (deprem yükü hariç) yapının ağırlığının % 10'undan daha az olmalıdır.
4. Temel zemini ne kadar sert olursa izolasyon o kadar etkili olur. Temel zemini yumuşaksa, yüksek deprem frekansına sahip dalgalar kaybolabilir ve zemin yalnızca yüksek periyotlu hareketler oluşturur. Rijit bir yapının periyodunun bu tür zeminlerde uzatılması, deprem etkisini azaltmak yerine çoğaltabilir.

1.3.5. Sismik İzolatörün Davranışı

1.3.5.1. Lineer İzolasyon Sistemi

Bir lineer izolatör sistemi Şekil 1.8 (a)'da gösterilmiştir. Bu sistem şekilde gösterilen K_b kayma rijitliğine ve hıza (viskoz) bağlı olarak C_b sönümlenme katsayısına sahiptir. Şekil-

1.8 (b), bu tür bir sönümlenme lineer izolatör için kapalı bir histerezis eğrisi olarak yer değiştirme açısından kayma kuvvetindeki değişiklikleri göstermektedir.



Şekil 1.8. Sönümlü lineer izolatör sistemi a) Genel şeması, b) İzolatöre ait histerezis eğrisi (Skinner vd., 1993).

İzolasyon sisteminin efektif rijitliği,

$$K_b = S_b / X_b \quad (1.1)$$

ile ifade edilir. Yukarıdaki eşitlikte, (S_b) maksimum kayma kuvveti ve (X_b) maksimum yer değiştirmedir. Bu durumda doğal periyot (T_b), ve hıza bağlı olan sönüm oranı (ξ) aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$T_b = 2\pi \sqrt{M / K_b} \quad (1.2)$$

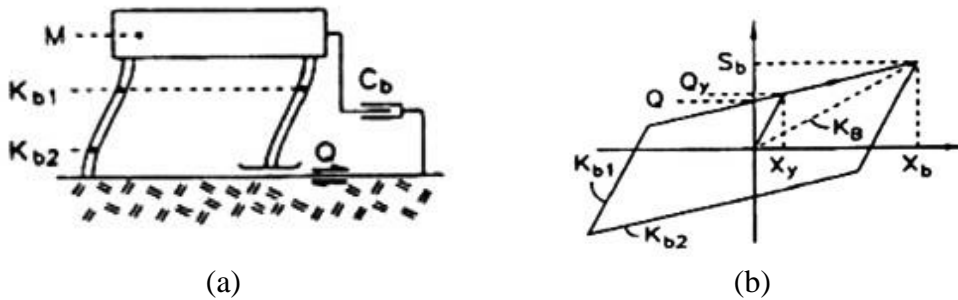
$$\xi = C_b T_b / 4\pi M \quad (1.3)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, (M) yapının toplam kütlesi ve (C_b) viskoz hızına bağlı olan sönümlenme katsayısıdır. Tasarımda, periyot (T_b) ve sönüm oranı (ξ) için seçilen değerler genellikle deprem kuvvetleri, izolatörün yer değiştirme miktarı ve bunların yapının sismik

direnci üzerindeki etkileri ve ayrıca, izole edilmiş yapının toplam maliyetine göre hesaplanır (Skinner vd., 1993).

1.3.5.2. Lineer Olmayan İzolasyon Sistemi

Genellikle izolasyon sistemleri, lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme özelliklerine sahiptir. Lineer olmayan izolatörlerde histerezis enerjisi, sürtünme kayma sistemleri veya kurşun gibi metallerin plastik deformasyonu yoluyla dağıtılır. Çoğu durumda, lineer olmayan histerezis izolatörler ile lineer izolatör ve viskoz damperlerden daha fazla ve daha güvenilir enerji sönümü elde etmek mümkündür. İzolatörün lineer olmayışı, yapının küçük aralıklı hareketlerde rijit davranmasına izin verir, bu da küçük trafik titreşimlerinin ve rüzgâr yükünün neden olduğu yer değiştirmeleri azaltır. Güçlü depremler nedeniyle büyük genliğe sahip hareketlerde, izolatör esnek davranır, böylece büyük esneklik izolatörün etkisini ortaya çıkarır. Lineer olmayan sistemlerin, neredeyse hepsinin bilinear sistemler olarak kabul edilebileceği, yani histerezis eğrilerin paralelkenar olarak kabul edilebileceği düşünülerek analiz edilmesi daha kolaydır. Şekil 1.9'daki paralelkenar izolatör modelin iki adet rijitliği vardır. Birisi, başlangıç veya elastik fazı rijitliği (K_{b1}), diğeri akmadan (teslimden) sonra veya plastik fazı rijitliğidir (K_{b2}). Etkili bilinear değerler, yani uygun etkili periyot (T_B) ve uygun etkili sönümlenme katsayısı (ξ_B) kullanılarak bilinear bir sistem tanımlamak çok faydalı olacaktır. Etkili bilinear değerler (T_B , ξ_B), Şekil 1.9 (b)'deki kayma kuvveti-kayma yer değiştirme diyagramının histerezis eğrilerine göre elde edilir. Genel olarak, etkili değerler kavramı genel bir yaklaşım olmakla birlikte oldukça kullanışlıdır.



Şekil 1.9. Bilinear izolatör sistemi, a) Genel şeması, b) Sistemin paralelkenar histerezis eğrisi (Skinner vd., 1993).

Basit bilinear eğrisi, hıza bağlı olan sönümlenme etkilerini dikkate almadığı unutulmamalıdır. Gösterilen sönüm, histerezis eğrisinin seviyesine bağlı histerezis tipindedir. Şekil 1.9 (b)'de gösterildiği gibi, sekant rijitlik olarak da bilinen efektif rijitliği (K_b), davranış eğrisinin çapının eğimi ile tanımlanmaktadır.

$$K_b = S_b / X_b \quad (1.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte, (S_b) maksimum kayma kuvveti ve (X_b) maksimum yer değiştirmedir. Bu durumda doğal periyot (T_b), aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$T_b = 2\pi \sqrt{M / K_b} \quad (1.5)$$

Bilinear sistemler için efektif viskozite sönümlenme değeri elde etmek için temel viskozite sönümlenme değeri (ξ_b), eşdeğer viskozite sönümlenme katsayısına (ξ_h) eklenmelidir.

$$\xi_B = \xi_b + \xi_h \quad (1.6)$$

Bu eşitlikte, temel viskozite sönümlenme değeri ve eşdeğer viskozite sönümlenme değeri aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir.

$$\xi_b = C_b T_B / 4\pi M \quad (1.7)$$

$$\xi = (2/\pi) A_h / 4(S_b X_b) \quad (1.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte, C_b sönümlenme katsayısı, T_B efektif periyot, M yapının kütlesi, A_h bilinear histerezis eğrisinin alanı, S_b maksimum taban kayma gerilmesi, X_b maksimum yer değiştirmedir (Skinner vd., 1993).

1.3.6. Yaygın İzolatörler

1.3.6.1. Pasif Kauçuk İzolatörler

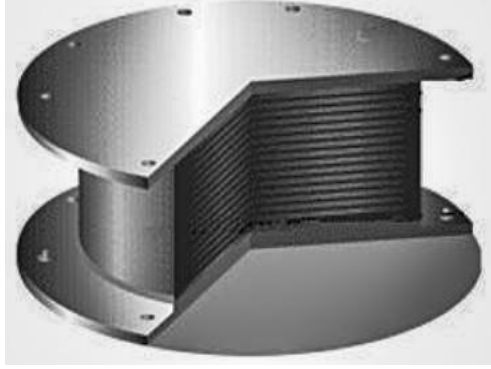
Kauçuk izolatörde en sık kullanılan kauçuklar; doğal kauçuk, neopren, bütül ve nitrildir. Yük altındaki bu lastiklerin tümü, şekil değiştirme kristalizasyonu işlemini göstermektedir. Bu özellik kauçuğun çatlamasını sınırlar ve ayrıca yüksek yer değiştirmelerde kauçuğun rijitliğini artırır ve aşırı yer değiştirmeyi önler. Tüm kauçukların bu özelliğe sahip olmadığını belirtmek önemlidir. Doğal kauçuğun mekanik özellikleri, örneğin yırtılmaya karşı direnci, yüksek yer değişimindeki direnci ve yorgunluk performansı, düşük sıcaklıklardaki performansı, sismik izolatör yapmak için kullanılan çoğu sentetik lastikten daha iyidir. Böylece bu izolatörlerin yapımında doğal kauçuk ve neopren diğer kauçuklardan daha fazla kullanılmaktadır. Bütül kauçukları düşük sıcaklıklarda ve nitril kauçukları deniz yapılarında, sınırlı bir alanda kullanılır (Naeim ve Kelly, 1999).

Elastomerik malzemelerin gerilme ve kayma rijitliği, özellikle sıcaklık sıfırın altına düştüğünde, azalan sıcaklıkla önemli ölçüde artar. Elastomerik malzemelerin yüksek sıcaklıklarda çevrimsel davranışı, önemli ölçüde artmaz (Cardone vd., 2011).

1.3.6.1.1. Düşük Sönümlü Doğal veya Sentetik Kauçuk İzolatörler

Bu izolatörler, üstte ve altta iki kalın çelik levha ve aralarında birkaç ince çelik ve kauçuk plakadan oluşur (Şekil 1.10). Çelik plakalar, kauçuğun yanal olarak genişlemesini önler ve düşey rijitliği büyük ölçüde artırır. Malzemenin %100'den fazla kayma şekil değiştirmelerindeki davranışı tamamen doğrusaldır ve sönümlemesi kritik değerin yaklaşık %2 ila %3'üdür. Malzeme büzülme yapmaz ve kesme modülünün uzun süreli stabilitesi iyidir (Naeim ve Kelly, 1999). Deforme olan kauçuk katmanlardaki enerji kaybı, hıza büyük ölçüde bağımlı olan sönümü ortaya çıkarır. Bu izolatörler, büyük ağırlıklara dayanacak ve geniş yatay deformasyonlara karşı çok az direnç sağlayacak ve izolatörün üst yüzeyinin dönme hareketlerini ayarlayacak şekilde tasarlanmıştır. Belirli bir izolatör alanı ve belirli kauçuk bileşimi için taşıma kapasitesi, kauçuk tabakanın kalınlığının azalmasıyla artar ve toplam yüksekliğinin artmasıyla, yatay ve dönme hareketlerine karşı direnç azalır. Bu sistemlerin davranışı, izolatör sönümünün %10'dan az olduğu doğrusal ve düşük viskoziteli sönümdür. Böyle bir sistemin davranışı ilk modda neredeyse tamamen belirgindir ve daha yüksek

frekansların davranışı çok düşüktür, böylece yüksek frekansların yapısal ekler üzerindeki etkisi ortadan kaldırılır (Skinner vd., 1993).



Şekil 1.10. Düşük sönümlü doğal veya sentetik kauçuk izolatör (Chatzidaki, 2011).

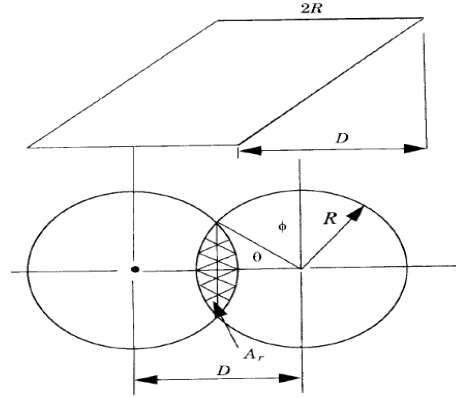
1.3.6.1.1.1. İzolatörün Yatay Rijitliği

Yatay rijitlik, kauçuk tabakanın sayısına ve kalınlığına bağlıdır. Kauçuk tabaka sayısının artırılması rijitliği azaltır. Genellikle bir tabakanın kalınlığı sabit tutulur ve tabaka sayısı artırılır. Yükseklik arttığında, baskın kırılma mekanizması burkulmadır ve bu nedenle yükseklik genellikle çapın yarısı ile sınırlıdır (Connor, 2002). Kauçuk mesnetleri dik kesme kırımları olarak düşünülebilir, çünkü çelik tabakalar bükülme deformasyonlarını büyük ölçüde önler, fakat kesme deformasyonlarını önlemez. Yatay rijitlik yaklaşık olarak aşağıdaki eşitlikten elde edilir.

$$K_b = G \cdot a/h \quad (1.9)$$

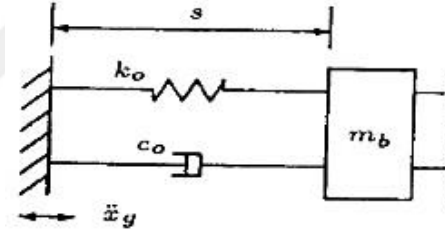
Yukarıdaki eşitlikte, (G) kayma modülü, (a) kauçuk tabaka yüzeyi, (h) toplam lastik kalınlığıdır.

Büyük deformasyonlar sırasında, izolatörün yüksekliği, izolatörün eğilme davranışı ve örtüşen yüzey (A_r) üzerindeki basınçtaki artıştan dolayı hafifçe azalır (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. ($2R$) çaplı silindirik kauçuk izolator, (D) miktarında kayma deformasyonu ve (A_r) örtüşen yüzey (Naeim ve Kelly, 1999).

Bu sistemin performansı Şekil 1.12’de gösterildiği gibi, paralel biçimde uygulanan bir yay ve bir sönümleyici ile gösterilebilir (Ahmadi, 1995).



Şekil 1.12. Düşük sönümlmeli doğal veya yapay kauçukların şematik diyagramı (Ahmadi, 1995).

1.3.6.1.1.2. İzolatorün Düşey Rijitliği

İzolatorün düşey deformasyonu, kauçuk kayma deformasyonunun ve hacimsel değişikliklerinin toplamıdır ve bu iki rijitlik seri olarak birleştirilir. Bu nedenle nihai düşey rijitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K_z = K_z(v) / [K_z(\gamma)K_z(v)] \quad (1.10)$$

Burada, $K_z(\gamma)$ izolatorün hacim değişiklikleri olmadan, düşey rijitliğidir. Aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K_z(\gamma) = 6GS^2A/h \quad (1.11)$$

Burada, (G) kayma modülü, (S) şekillendirilebilirlik faktörü, (A) kauçuğun alanı, (h) toplam kauçuk katmanlarının yüksekliğidir. Eşitlik 1.10'da bulunan $K_z(v)$ ise hacimsel değişikliklerden kaynaklanan düşey rijitliktir. Aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K_z(v) = KA/h \quad (1.12)$$

Burada, (K) kauçuk basınç modülüdür.

Böylece:

$$K_z = 6GS^2AK/(6GS^2A+K)h \quad (1.13)$$

olarak ifade edilir.

Eşitlik 1.10 ve 1.11 göre, şekillendirilebilirlik faktörü küçükse, düşey rijitliği orta değerleri olacaktır; bu durumda kayma kuvveti belirleyici olacaktır. Bununla birlikte, şekil katsayısı yeterince büyükse, düşey rijitlik büyük olacak ve hacim değişiklikleri belirleyici olacaktır (Skinner vd., 1993). Tek bir kauçuk katmanı için kauçuk sıkıştırma modülü miktarı, aşağıdaki şekilde tanımlanan şekil katsayısı tarafından kontrol edilir (Naeim ve Kelly, 1999).

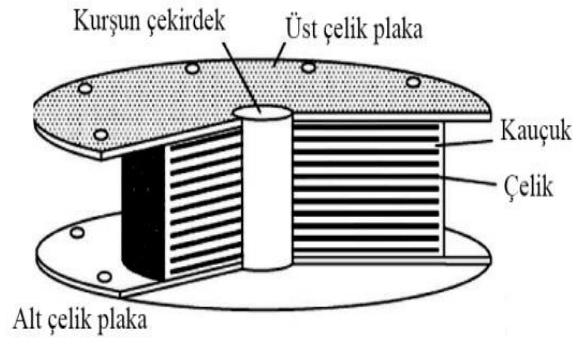
$$S = \text{Yüklü Alan} / \text{Yüksüz Alan} \quad (1.14)$$

1.3.6.1.1.3. Avantajlar ve Dezavantajlar

Düşük sönümlü elastomerik katman izolatörlerin avantajları, kolay kurulum, iyi yangın davranışı, kolay modelleme, sıcaklık, zaman, yaş ve yapısal düzensizliklerden etkilenmeyen basit ve düzgün ivme tepkisi de dahil olmak üzere pek çoktur. Bu sistemin dezavantajları ise, izolatörün yüksek deformasyonunu, rüzgâr hassasiyetini, yüksek periyotlarda rezonans olasılığı ve tamamlayıcı bir sönümleyici sistemine olan ihtiyacı içermektedir (Naeim ve Kelly, 1999).

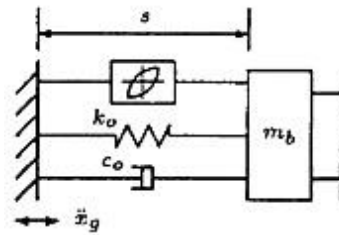
1.3.6.1.2. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Sistemi (LRB)

Kurşun kauçuk izolatorü, Nisan 1975'te W.H. Robinson tarafından icat edilmiştir. W.H. Robinson, Yeni Zelanda Bilim ve Teknoloji Araştırmaları Enstitüsü mühendislik fiziği laboratuvarında çalışmaktaydı. Robinson, elastomerik izolatorde bulunan çelik plakaların, büyük plastik deformasyonlarda sorunları olan kurşun için iyi bir çözüm olduğunu farketmiştir. Bu doğrultuda, elastomerik izolatorün ortasına bir delik açmış ve Şekil 1.13'te gösterildiği gibi kurşun çekirdeğe yerleştirmiştir (Skinner vd., 1993).



Şekil 1.13. Kurşun çekirdekli kauçuk izolator (LRB)

Merkezi kurşun çekirdek kullanımı, sönümü %3'ten yaklaşık %12'ye çıkarmış ve ayrıca rüzgâr yükleri için de yüksek mukavemetli bir eleman olmayı sağlamıştır. Kurşun çekirdeğin görevi, enerji emilimi, kauçuk katmanlarının görevi ise esneklik sağlamaktır. Bu sistemdeki sönümlenme, ısı şeklinde histeretik enerjinin kaybıdır (Naeim ve Kelly, 1999). Şekil 1.14'te gösterildiği gibi bu sistem ve diğer histeretik enerji emici sistemleri bir yay, bir sönümleyici ve bir histeretik eleman ile modellenebilir.



Şekil 1.14. Kauçuk-kurşun izolatorünün şematik diyagramı
(Ahmadi, 1995).

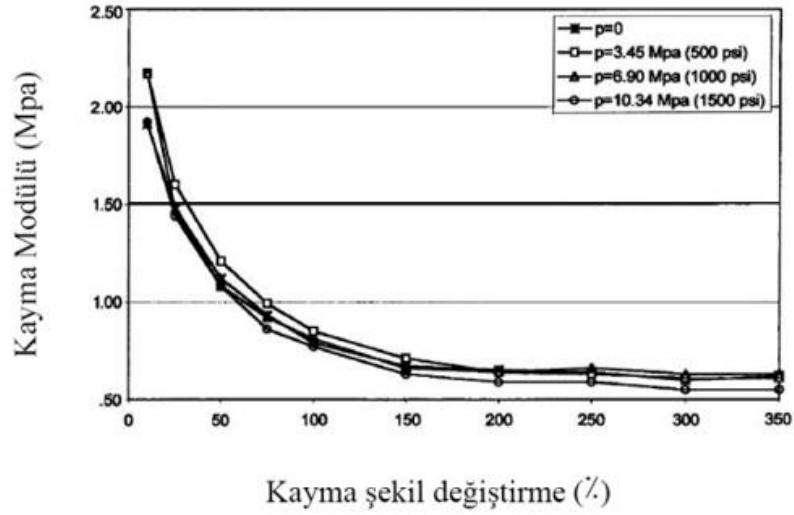
Bu sistemler, yüksek başlangıç rijitliğine sahip olsa da kurşun aktıktan sonra sistemin rijitliği azalmaktadır. Çoğu durumda en uygun ayırma sistemidir. Doğrusal olmasa da histerezis eğrisi paralelkenar şeklinde olduğundan bilinear sistem tarafından iyi tanımlanabilir.

1.3.6.1.2.1. İzolatörde Kurşun Davranışı

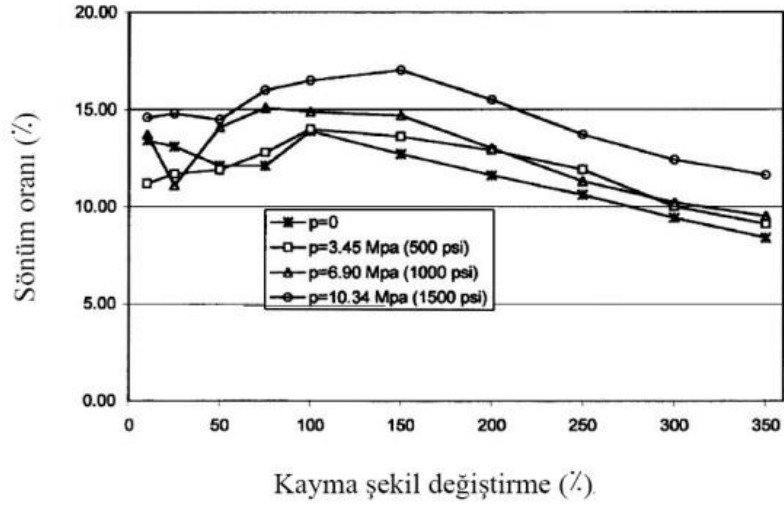
Yumuşak metallerin deformasyonu akma gerilmesinde meydana gelmektedir. Bu noktada, metalin kristal yapısı değişir, gerilmeyi kaldırarak, yeniden kristalleşen metal önceki elastik özelliklerini geri kazanır. Metalin, kristal özelliklerindeki değişiklik miktarı ve modu sıcaklıkla değişir ve bu özellik farklı metaller için değişiklik göstermektedir. Kurşunda, bu değişiklik daha hızlı gerçekleşir, bu da kurşunun izolatör sistemlerinde kullanılmasını uygun hale getirir. Kurşunun rijitliği düşüktür ve yorgunluğa karşı daha az duyarlıdır. Ancak önemli olan kurşunun akma noktasıdır. Kurşun çok düşük gerilim miktarlarında (yaklaşık 10 MPa) akmaya başlar ve elastik plastik bir katı gibi davranır. Bu davranış, rüzgâr yüklerine dayanmak için iyidir ancak tabanda oluşan bir depremden gelen kuvvetlere karşı pek de iyi değildir (Skinner vd., 1993).

1.3.6.1.3. Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDRB)

1982 yılında, Malezya Kauçuk Üreticileri Araştırma Enstitüsü (MRPRA), malzemenin doğal sönümlemesi ve ilave sönümleyici bileşenlerinin kullanılması ihtiyacını ortadan kaldıracak şekilde doğal bir kauçuk bileşiği icat etmişlerdir. Bu kauçuk bileşiğinin sönümlenmesi, çok ince karbon bloklar, yağlar veya reçineler ve diğer özel dolgu maddeleri eklenerek artırılmıştır. Sistemin sönümleme miktarı, %10 ile %20' aralığındadır. Rijitliği düşük ve yaklaşık 0.34 MPa'lık bir kayma modülüne sahip bir sistem için sönüm oranı alt sınırdadır (%10) ve rijitliği yüksek ve yaklaşık 1.4 MPa'lık bir kayma modülüne sahip bir sistem için sönüm oranı üst sınır yani %20'lere kadardır. Bu malzemenin %20'den daha az kayma şekil değiştirmesinde, davranışı doğrusal değildir. Ayrıca, malzemenin özelliği yüksek kayma şekil değiştirmelerinde daha yüksek rijitlik ve sönümleme göstermesidir (Şekil 1.15 ve 1.16). Bu, rüzgâr ve düşük sismik yüklerin tepkisini en aza indirmektedir (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 1.15. Yüksek sönümlü doğal kauçuk izolatörün kayma şekil değiştirme-kayma modülü ilişkisi (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 1.16. Yüksek sönümlü doğal kauçuk izolatörün kayma şekil değiştirme-sönüm oranı ilişkisi (Naeim ve Kelly, 1999).

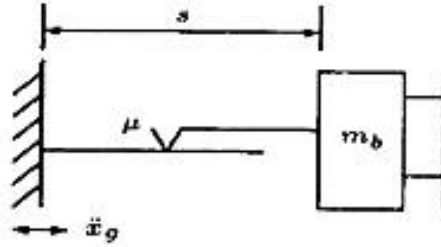
1.3.6.2. Sürtünme Tipi İzolatörler

Çin'deki TangShan depreminde (1976), tuğla yapıların ötelenmesi, tabanın altındaki sürtünme ayırıcı tabakanın ana fikrini ortaya çıkardı. Sürtünme sistemleri yer değiştirmeyi azaltmada önemli rol oynarlar. Tabii ki, bu fikir defalarca önerilmiş ancak gerçekleşmemiştir. 1930'da Dubai'nin ve 1934'te Hindistan'ın şiddetli depremlerinde, bazı ufak yığma yapılar, temellerinin üzerinde kayarak depremden sağ kurtulmuşlardır. Ancak,

benzer ankastre mesnetli binalar yıkılmıştır. Çinli deprem mühendisleri, Çin'deki yıkıcı 1976 Tangshan depreminde benzer bir olay gözlemişlerdir. Depremde, ayakta kalan binaların duvarlarının altında, binanın yaklaşık altı santimetre kaymasına izin veren ve binanın hasar görmesini engelleyen yatay bir çatlak görülmüştür. Çin'de bir dizi bina aynı şekilde inşa edilmiş olup bunların en büyüğü Pekin Deprem Gözlemleri Enstitüsü için yapılan dört katlı bir yurt binasıdır (Naeim ve Kelly, 1999).

1.3.6.2.1. Saf Sürtünme İzolasyon Sistemi (P-F)

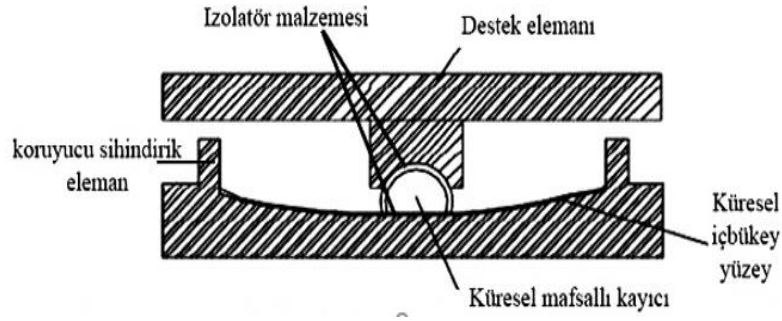
Bu izolasyon sisteminin tek mekanizması coulomb'un saf sürtünmesidir. Bu sistemde, yapıyı yerden ayırmak için bir veya daha fazla sürtünme plakası veya bir kum tabakası kullanılmaktadır. Bu sistemin şematik diyagramı Şekil 1.17'de gösterilmiştir. Bu sistemin sürtünme katsayısı 0.03 ve 0.25 arasındadır (Ahmadi, 1995).



Şekil 1.17. Saf sürtünme izolasyonun şematik diyagramı
(Ahmadi, 1995).

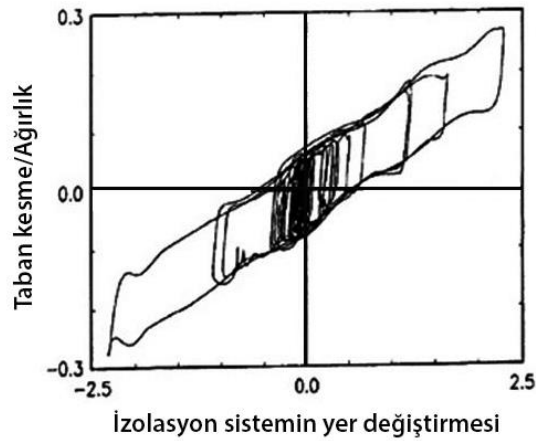
1.3.6.2.2. Sürtünme Sarkaç Sistemi (FPS)

Bu sistem, 1986 yılında icat edilmiş ve ilk olarak San Francisco'da 1989 Lumaprita depreminde ağır hasar gören dört katlı bir binayı güçlendirmek için kullanılmıştır. Şekil 1.18'de görüldüğü üzere bu sistem, paslanmaz çelikten yapılmış küresel bir yüzey üzerinde kayan mafsalardan oluşmaktadır.



Şekil 1.18. Sürtünme sarkaç izolasyonunun

Küresel yüzeyle temas halinde olan bu kaygan parçanın yüzeyi düşük sürtümlü malzemelerle kaplıdır. Kaydırıcının diğer yüzeyi küreseldir ve bir paslanmaz çelik tabaka ile kaplanmıştır. Bu yüzey düşük sürtümlü bir küresel oluğa yerleştirilir. Kayan parça küresel yüzey üzerinde hareket ettikçe, mevcut kütle ondan yükselir, bu da sistemde onarıcı bir kuvvet yaratır. Yer değiştirme değeri, yarıçapın belirli bir oranından daha azsa, geri dönüş kuvveti sürtünme kuvvetinden daha az olacaktır ve sistem orijinal konumuna geri dönmeyecektir. Sarsma tablası deneyinden elde edilen bir FPS sisteminin tipik histerezis eğrisi Şekil 1.19'da gösterilmektedir. Geri yükleme kuvvetinin doğrusal doğası, kaymadan önce aşırı rijitlik ve kaygan sürtünmeye bağlı enerji dağılımı, bu şekilde oldukça açıktır (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 1.19. Sarsma tablası deneyinden elde edilen bir FPS sisteminin tipik histerezis eğrisi (Naeim ve Kelly, 1999).

1.3.6.3. Geoteknik Sismik İzolasyon (GSİ)

Geleneksel izolasyon sistemleri, teknik olarak tasarım ve uygulama zorluğu ve karmaşıklığı ve ayrıca yüksek maliyetleri nedeniyle hastaneler, ofisler ve okullar gibi önemli binalara uygulanabilir. Ancak, sıradan binalardaki depremlerin yıkıcı etkileri göz ardı edilmemelidir. Ayrıca depremler gelişmekte olan ülkelerde kabul edilemeyecek kadar çok ölüm ve yaralanmaya neden olmaktadır (Bozorgnia ve Bertero, 2004). Bu ülkeler, teknolojik ve ekonomik açıdan zayıf olan ülkelerdir. Bu nedenle, düşük ve orta yükseklikte yapılar için kullanılabilir pratik ve ucuz bir sismik izolasyon sisteminin ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Gelişmekte olan ülkeler için düşük maliyetli temel izolasyon sistemleri geliştirmek için çaba sarf edilmiştir (Kelly, 2002) ve Endonezya gibi ülkelerde çeşitli tanıtım projeleri uygulanmıştır (Taniwangsa ve Kelly, 1996).

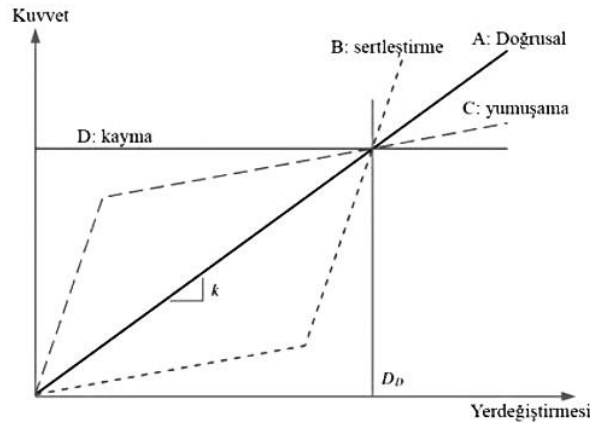
Geoteknik sismik izolasyon (GSİ), hem kolay uygulanması hem de düşük maliyetli olması nedeniyle memnuniyetle karşılanan ve sorunu çözmek için uygulanan yeni bir sismik izolasyon sistemidir (Xiong, 2013). Aslında, bu sistemin tasarımı geleneksel izolasyon sistemlerinden türetilmiştir. Geleneksel izolasyon sistemi, yapı temeli ile düşey taşıyıcı elemanlar arasına yerleştirilen ve yapıyı temelden ayıran esnek veya kayan ara yüzden oluşur. Başka bir deyişle, zemin ve yapının yanal hareketi ayrılır ve bu ayrılma, yapı üzerindeki deprem kuvvetini azaltır, bu da yapıyı deprem hasarına karşı korur (Taylor, 2004).

Geoteknik sismik izolasyon sisteminde yapı, izolasyon mekanizmasının esas olan geoteknik bir tabaka ile temel zemininden ayrılır. Yaygın olarak iki tipte (sürtünme ve sönümleyici) uygulanır. Bu geoteknik tabakanın sürtünme veya sönümlemesi nedeniyle, uygulanan deprem enerjisinin bir kısmı yapıya aktarılmadan önce yutulur. Böylece, depremlerin yapı üzerindeki yıkıcı etkileri azaltılmış olur.

Sürtünme türündeki sistemlerde, sentetik katmanlar izolatör olarak kullanılırlar. Bu katmanların kullanılmasının amacı, deprem enerjisinin bir kısmının bu iki malzeme arasındaki sürtünme yoluyla, diğer kısmının izin verilen yer değiştirmelerle dağıldığı ve yapının altında düzgün bir tabakanın oluşmasının sağlanmasıdır. Sönümleme türündeki sistemlerde, temelin altındaki zeminin sönümleme kapasitesini artırmak için birtakım iyileştirmeler uygulanarak sönümleyici bir geoteknik katman elde edilir. Bu katman depremin enerjisini sönümleyerek azaltabilmektedir.

1.4. İzolasyon Sisteminin Dinamik Modellenmesi

İzolasyon sistemlerinin kuvvet-yer değiştirme tepki yanıtı için dört tip davranış tanımlanmıştır. Aşağıdaki şekilde, bu davranışlar ideal olarak yer değiştirmeye bağlı olarak gösterilmektedir (Şekil 1.20). (A) çizgisi, tüm sismik yükleme seviyeleri için sabit bir efektif rijitlik ve doğal periyota sahip, doğrusal bir davranışı göstermektedir. Üst yapıya iletilen kuvvet daima ayırma seviyesinin yer değiştirmesiyle orantılıdır. (B) çizgisi, ideal bir sürtünme izolasyon sisteminin davranışını göstermektedir. Bu sistemdeki tepki, sürtünme katsayısı ve dolayısıyla mesnetler üzerindeki sürtünme kuvveti tarafından kontrol edilir. Sismik kuvvet arttıkça, etkili periyot da artar. Ancak, yapıya iletilen maksimum kuvvet sabit bir değerle sınırlıdır. Bu sistemleri başlangıç noktasına geri döndürebilecek bir kuvvetin bulunmaması nedeniyle, genellikle bu özelliği sağlayan çelik levhalara sahip kauçuk izolatör gibi sistemlerle birlikte kullanılırlar. (C) çizgisi, esnek bilinear davranışı göstermektedir. Bu sistem ilk başta rijit davranır (etkili periyot kısadır) ama artan deprem kuvveti ile esnek davranmaya başlar (etkili periyot uzar). Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler (HDRB'ler), kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler (LRB'ler) veya geri dönüş kuvvetine sahip sürtünme izolatörleri genellikle bu tür bir davranış sergiler. (D) çizgisi, bir rijitleştirme sisteminin davranışını göstermektedir. Bu tür sistemlerin başlangıç rijitliği çok azdır. Yer değiştirme tepki değeri arttıkça, rijitlikleri de artar. Yukarıdaki şemaların her birinde, tasarımın yer değiştirmesinden önce ve sonra, izolatör sisteminin davranışına dikkat etmek gerekir (ASCE 7-16, 2017).



Şekil 1.20. İzolatörlerin davranış modelleri (ASCE 7-16, 2017).

1.5. GSİ Literatür Araştırması

1.5.1. Sürtünme Tipi Geoteknik Sismik İzolasyon

Deprem enerjisini sönmlemenin bir yolu, önceki bölümde anlatıldığı gibi, kayma ve sürtünme kuvvetinden yararlanmaktır. Bu bölümde, geoteknik sürtünme izolasyon yöntemi hakkında bilgi verilmektedir. Geoteknik sismik izolatörler olarak geomembran-geotekstil katmanları kullanımında, deprem enerjisinin bir kısmı bu iki malzeme arasındaki sürtünme yoluyla geri kalan kısmı da izin verilen yer değiştirmelerle sönmelenmektedir.

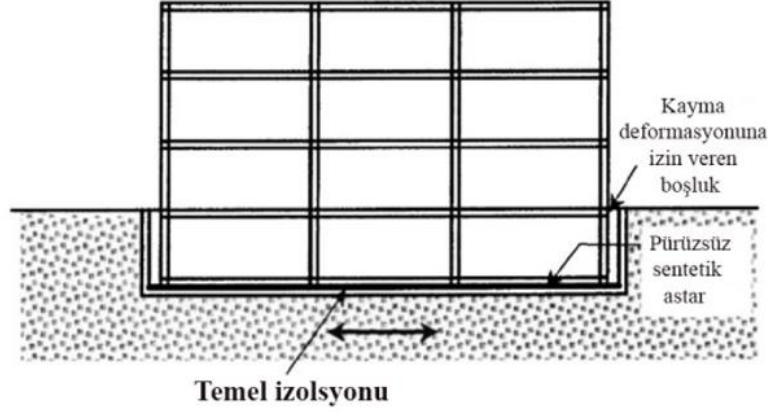
Zemin-geosentetik ara yüzlerin sürtünme direnci, farklı zemin ve geosentetik tiplerinin yanı sıra geosentetiğın dokusuna göre değişebilmektedir. Ling vd., (2002), bir PVC geomembran ile üç farklı kum türü arasındaki sürtünme açısını, eğik masa testleri kullanarak ölçmüşlerdir. Elde ettikleri değer yaklaşık 32° ila 40° arasındadır. Perkins ve Cuelho (1999) tarafından çakıl ve bir geotekstil arasında yapılan çekilme testleri, pik sürtünme açısının 37° ila 53° arasında değiştiğini göstermiştir. Diğer yandan, tipik bir geotekstil ile pürüzsüz bir HDPE geomembranı arasındaki statik sürtünme açısı 10.7° olarak ölçülmüştür (Yegian ve Lahlaf, 1992). Testlerin türü, zeminin ve geosentetiklerin farklılığından bağımsız olarak, bir zemin ile bir geosentetik arasındaki sürtünme direnci genellikle iki geosentetik tabaka arasındakinden daha yüksektir, bu da zemin ile geosentetik arasında kaymanın muhtemel olmadığını gösterir.

Sismik enerjinin kayma yoluyla yayılması için uygulanan sentetik astarın yerleştirmesine bağlı olarak önerilen, temel izolasyonu ve zemin izolasyonu olmak üzere iki farklı yöntem vardır.

1.5.1.1. Sentetik Astarla Temel İzolasyonu

Temel izolasyonu olarak adlandırılan bu yöntemde, pürüzsüz sentetik astar, bir yapının temellerinin hemen altına yerleştirilmektedir (Yegian ve Kadakal, 2004). Yegian ve Kadakal'ın araştırmasında temel izolasyonu olan ve olmayan tek katlı yapısal bir model, sarsma tablası kullanılarak incelenmiştir. Sentetik astardan iletilen ivmeyi en aza indirmek için düşük sürtünme katsayısına sahip malzemeler kullanılmıştır. Sarsma tablası deneyleri, örgüsüz, yüksek mukavemetli bir geotekstilin ultra yüksek moleküler ağırlıklı bir polietilen

(UHMWPE) üzerine yerleştirildiği bir bileşiğin minimum sürtünme katsayısına yol açtığını göstermiştir. Şekil 1.21’de bu tip temel izolasyonu gösterilmektedir.

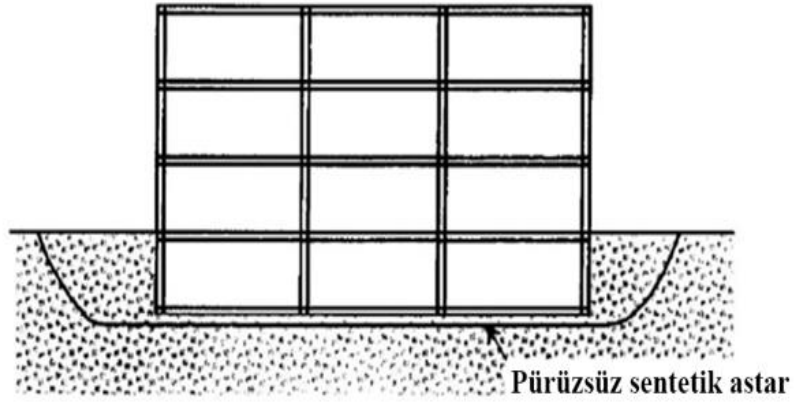


Şekil 1.21. Pürüzsüz sentetik astar kullanarak binaların sismik korunması için temel izolasyonu (Yegian ve Kadakal, 2004).

Deneyler, çeşitli ivme kayıtları altında test edilmiştir. Bu farklı ivmeler altında, sistemin ivmelenmesi ve yer değiştirmesinin sonuçları incelenmiştir. Sonuç olarak, modeldeki sismik kesme kuvvetlerinin önemli ölçüde azaltıldığı gözlenmiştir. Kesme kuvvetlerindeki bu azalmaya eşlik eden, izolasyon astarı boyunca kayma yer değiştirmeleridir. Kalıcı kayma (yapının başlangıç konumuna göre son konumu) pasif toprak direnci ile sağlanabilecek küçük bir geri yükleme kuvveti kullanılarak azaltılabilir. Temel izolasyonunun etkili olabilmesi için zirveden zirveye kaymaya izin verilmelidir. Deneysel ve analitik araştırma sonuçları, deprem tehlikesini azaltmada pürüzsüz sentetik bir astar kullanmanın teknik fizibilitesini göstermektedir (Yegian ve Kadakal, 2004).

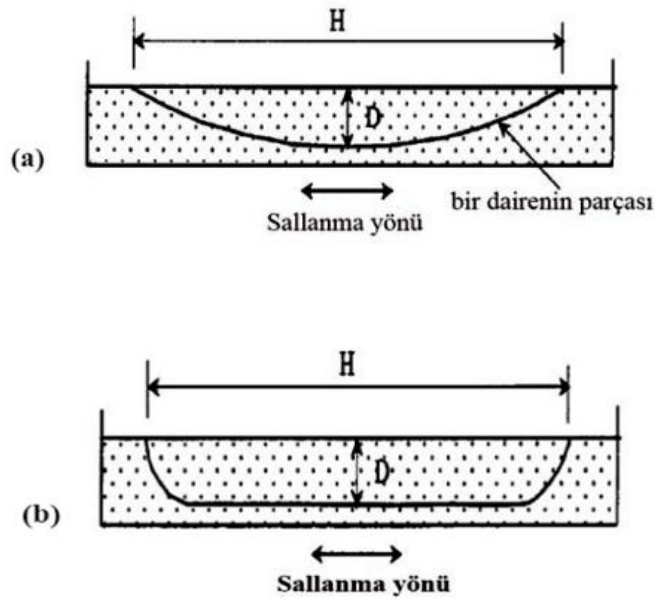
1.5.1.2. Sentetik Astarla Zemin İzolasyonu

Zemin izolasyonu olarak adlandırılan bu yöntemde, sismik enerjinin binaya veya zemin yüzeyine ulaşmasını önlemek için, pürüzsüz sentetik astar zemin içine temellerin altında bir derinlikte yerleştirilir. Böylece, astarın üzerindeki zemin tabakası, alttaki zemin tabakasından izole edilmiş olur (Yegian ve Catan, 2004). Şekil 1.22’de de bu tip zemin izolasyonu gösterilmektedir.



Şekil 1.22. Pürüzsüz sentetik astar kullanarak binaların sismik korunması için zemin izolasyonu (Yegian ve Kadakal, 2004).

Bu çalışmada silindirik (Şekil 1.23, a) ve küvet (Şekil 1.23, b) şeklindeki astarlar kullanılarak izole edilen zemin tabakaları üzerinde sarsma tablası deneyleri harmonik ve deprem bazlı titreşimler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.23. Zemin izolasyon sistemleri, a) Silindirik şekilli, b) Küvet şekilli

Sonuçlar, bir izolasyon astarının izole edilmiş zemin kütesinin yüzeyindeki ivmeleri önemli ölçüde azaltabildiğini göstermektedir. Bir depremden sonra sentetik astar boyunca kalıcı kaymaları en aza indirmek için, astarın yatay olarak yerleştirilmesi yerine kavisli bir

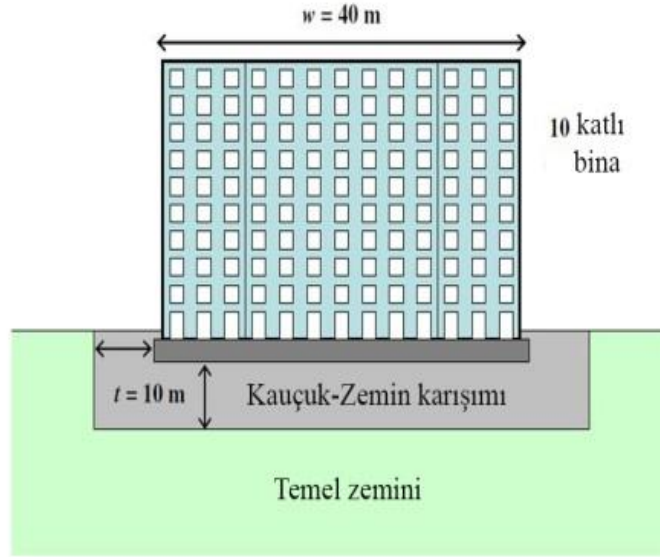
şekilde yerleştirilmesi önerilmiştir. Böylece, geri kazanma yerçekimi kuvveti, kayma işleminden sonra izole edilmiş zemini orijinal konumuna geri getirebilmektedir.

1.5.2. Sönümlenme Tipi Geoteknik Sismik İzolasyon

Enerji yayılımı, sismik yer sarsıntısının azaltılmasında birincil mekanizmadır. Kauçuk, mükemmel enerji emme kapasitesi ile bilinir ve bu nedenle otomotiv bileşenlerinde olduğu gibi titreşim kontrolü ve sönümlenme için kullanımları da yaygındır.

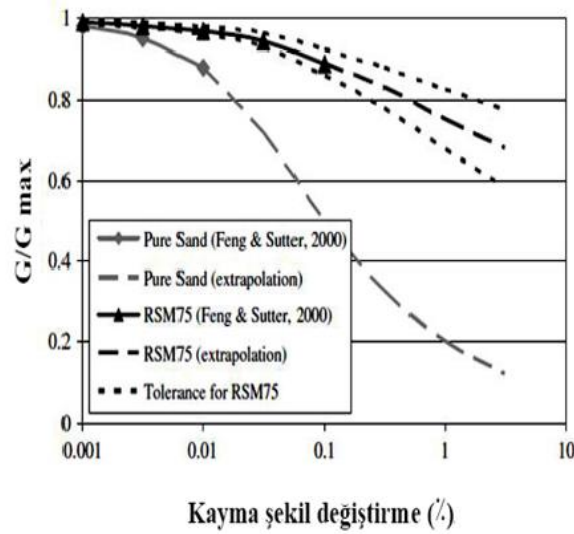
Sönümlenme tipindeki izolasyonun en yaygın yöntemi zemin ve kauçuk karışımıdır. Bu yöntemde, temel zemini olarak, zemin ve belli oranlarda kauçuk karışımları kullanılır. Kauçuk-zemin karışımlarının (RSM), sismik enerjiyi bir yastığa benzeyen bir fonksiyonla emmek için temeller etrafında kullanılması önerilmiştir (Tsang, 2008). Saf zeminle karşılaştırıldığında, kauçukla güçlendirilmiş zeminin kayma mukavemeti önemli bir artış göstermektedir (Edil ve Bosscher, 1994; Masad vd., 1996; Foose vd., 1996) ve daha da önemlisi enerji yutma kabiliyetinde önemli derecede bir artış gözlenmektedir. Atık lastik, önerilen yöntem için potansiyel olarak büyük bir kauçuk kaynağı sağlamaktadır. Dünya genelinde artan araç sayısı nedeniyle her yıl yüz milyonlarca hurda lastik atılmaktadır. Bu nedenle, atık lastik kauçuk kullanımı hem çevre dostu hem de ekonomik açıdan kum-kauçuk karışımında kullanılabilir.

Tsang (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, genişliği 40 metrelik 10 katlı bir bina için kauçuk-zemin karışımının sismik izolatör olarak kullanıla bilinmesi için sayısal analizler yapılarak araştırılmıştır. Bu çalışmada, 10 metre kalınlığındaki kum-kauçuk karışımı temel zemini olarak kullanılmıştır (Şekil 1.24).

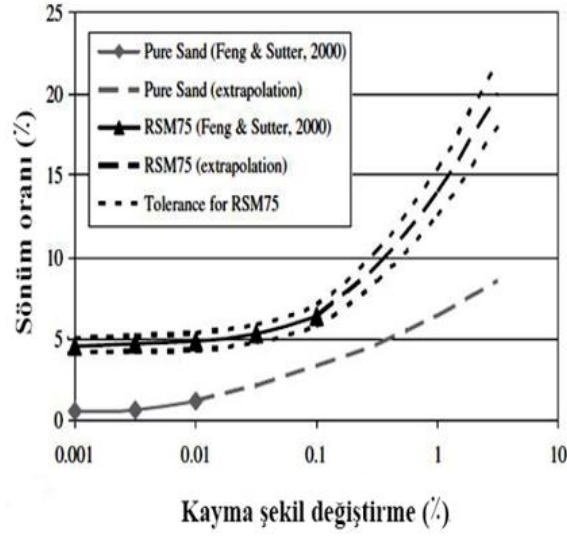


Şekil 1.24. Kauçuk-zemin karışımı (RSM) tabakası kullanılarak önerilen sismik izolasyon yönteminin şematik çizimi (Tsang, 2008).

Analizlerde RSM75 (hacimce %75 kauçuk içeren kauçuk-zemin karışımı) kullanılmıştır. Şekil 1.25'te RSM ve saf kumun kayma modülü azalma eğrisi ve Şekil 1.26'da kayma şekil değiştirme-sönüm oranı ilişkisi gösterilmektedir.

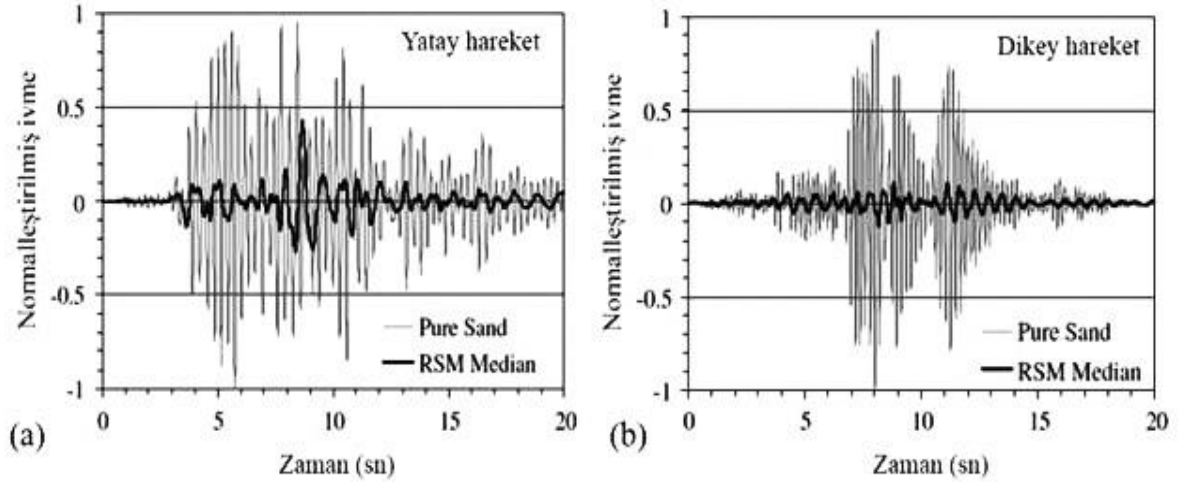


Şekil 1.25. Saf kum ve kauçuk-zemin karışımlarının kayma modülü azalma eğrileri (Tsang, 2008).



Şekil 1.26. Saf kum ve kauçuk-zemin karışımlarının kayma şekil değiştirme-sönüm oranı ilişkisi (Tsang, 2008).

Bu araştırmada, yapı dinamik yük altında iki durumda da incelenmiştir. İlk durumda, temel zemini olarak saf kum incelenmiş olup ikinci durumda ise RSM75 kullanımının etkisi incelenmiştir. Şekil 1.27'de görülebileceği üzere, sismik izolasyon için bir RSM tabakası kullanıldığında yatay (Şekil 1.27 a) ve düşey (Şekil 1.27 b) ivmeler ortalama olarak %80 ve %90 oranında azalma göstermiştir.

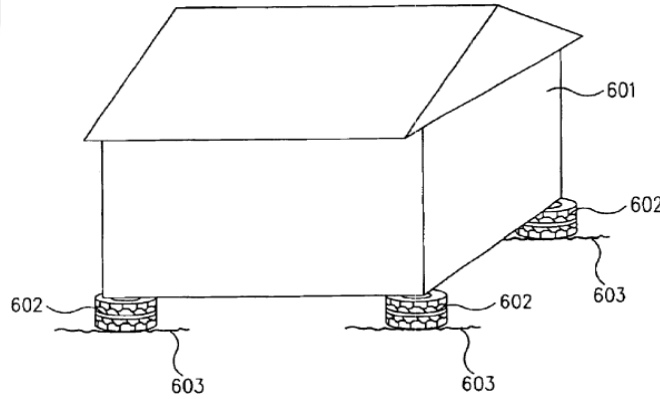


Şekil 1.27. Sismik izolasyon uygulanmış ve uygulanmamış yapı için, a) Yatay tepki ivme b) Düşey tepki ivme (Tsang, 2008).

RSM'nin sıkıştırma özellikleri, sıkıştırılabilirlik, geçirgenlik, kayma mukavemeti, esneklik modülü ve Poisson oranı gibi temel mühendislik özelliklerini incelemek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Edil ve Bosscher, 1994; Masad vd., 1996; Humphrey ve Manion, 1992; Lee vd., 1999).

Dhanya vd., (2020) yaptıkları çalışmada, alçak binaların sismik izolasyonu için geogridlerle güçlendirilmiş SRM'den yapılmış GSİ tabakasının kullanımını araştırmışlardır. İki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, iki katlı bir binanın sismik tepkisinin analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen GSİ sistemi, pik spektral ivmeyi, düşük ve orta frekanslı depremler için %40 oranında ve yüksek frekanslı depremler için ise %30 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir.

Bu yöntemle ilgili farklı araştırmalar ve patentlerde mevcuttur. Örneğin, belirli bir kaya agregası ile doldurulmuş tüm kullanılmış lastiğin yatak olarak kullanıldığı, sismik izolasyon için kauçuk kullanımı patentli bir yöntem vardır (Lang ve Sargent, 2005) (Şekil-1.28).



Şekil 1.28. Belirli bir kaya agregası ile doldurulmuş tüm kullanılmış lastiğin yatak olarak kullanılması (Lang ve Sargent, 2005).

Forcellini (2017), çeşitli köprü konfigürasyonlarına uygulanan bir geoteknik sismik izolasyon sisteminin 3D sayısal simülasyonlarını yapmaya çalışmıştır. Sonuçlar, GSİ'nin etkisinin zemin deforme edilebilirliğine nasıl bağlı olduğunu göstermektedir.

Tsang vd. (2012) yaptıkları bir çalışmada, sismik izolasyon sistemleri için öğütülmüş araç lastiklerini kullanmışlardır. Bu çalışmada, öğütülmüş lastikleri granüler zeminle karıştırdıktan sonra, karışımı binanın temeli altına yerleştirerek, yastığa benzer bir fonksiyon sağlamışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, önerilen yöntemin etkinliği ve gücü

araştırılmıştır. Genel olarak, ivme ve görelî ötelenme açısından yapısal tepkiler %40- %60'a kadar azaltıldığını gözlemlemişlerdir.

Senetakis vd. (2012), kum ve çakıl zemine geri dönüştürülmüş lastik ekleyerek karışımlarının dinamik parametrelerini, yüksek genlikli rezonans kolon deneyi ile belirlemişlerdir. Karışımın küçük gerilme kesme modülü (G_0) ve sönüm oranı (D_{T0}) hücre basıncından (σ_v), kauçuğun içeriğinden, saf zeminin tane-boyut özelliklerinden ve dinamik özelliklerinden etkilenmektedir. Ayrıca, karışımdaki kauçuk miktarı arttıkça, karışımın davranışının zemin-kauçuktan kauçuk-kauçuğa dönüştüğünü ve zemin-kauçuk katı matrisinin sentetik kısım tarafından önemli ölçüde kontrol edildiğini gözlemlemişlerdir.

Yine benzer bir çalışmada Ehsani vd., (2015) GSİ malzemesi olarak öğütülmüş araç lastiklerini kullanılmışlardır. Karışımın dinamik parametrelerini burulma rezonans kolonu ve dinamik üç eksenli deneyler uygulayarak belirlemişlerdir. Kauçuk içeriği ve oranı gibi önemli parametrelerin etkisi incelenmiş ve sonuç olarak kauçuk oranının artırıldığında kayma modülünün önemli ölçüde azaldığını ve karışımların sönüm oranının arttığını belirtmişlerdir.

Nakhaei vd., (2012) granüler zemin ve kauçuk karışımlarının dinamik davranışını incelemek için daha büyük ölçekli deneylerin gerekli olduğunu düşünerek, araştırmalarında büyük ölçekli dinamik üç eksenli deney aleti kullanmışlardır. Sonuçlar, tüm hücre basınçları için, kauçuk yüzdesinde bir artışla, kayma modülünün azaldığını ve her bir kauçuk yüzdesi için, hücre basıncı arttıkça kayma modülünün arttığını göstermiştir. 50 ve 100 kPa'lık hücre basınçlarında, kauçuk yüzdesindeki artışla birlikte sönüm oranının azaldığı, 200 ve 300 kPa'lık hücre basınçlarında kauçuk yüzdesindeki artışla birlikte sönüm oranının arttığını gözlemlemişlerdir.

Nada vd. (2018) zemin kauçuk karışımının dinamik tepkisini modellemek için ABAQUS CAE bilgisayar yazılımını kullanmışlardır ve bir dizi numerik analizler yapmışlardır. Sonuç olarak, yatay yer ivmesinin %50 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir.

1.6. Agrega-Bitüm Karışımının Sismik İzolasyon Amaçlı Kullanımı ve Yapılan Çalışmalar

Bitüm terimi, rafineri işlemi sırasında daha hafif fraksiyonların (sıvı petrol gazı, benzin ve dizel gibi) ham petrolden çıkarılmasıyla üretilen bir hidrokarbon ürünü olan rafine bitümünü tanımlamak için kullanılmaktadır. Bitüm bir mühendislik malzemesidir ve fiziksel özelliklere dayanan çeşitli özellikleri karşılamak için üretilmiştir (Hunter vd., 2015).

Polimer modifiye bitümler (PMB'ler), saf bitümün performans özelliklerini değiştirmek için tasarlanmıştır. Saf bitümün esneklik, yapışma ya da kohezyon mukavemeti gibi özellikleri, bir ya da daha çok kimyasal maddenin kullanılmasıyla iyileştirilebilmektedir. Modifiye malzemeler arasında polimerler, mumlar (waxes), öğütülmüş kauçuk, kükürt ve asitler yer almaktadır. Modifiye bitümler artık çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Hunter vd., 2015). PMB hakkında daha ayrıntılı bilgi 2. Bölümde mevcuttur.

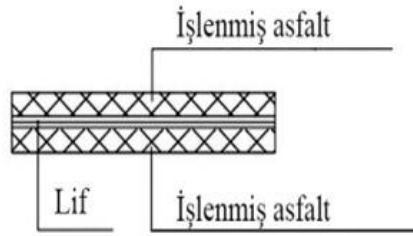
Bitüm, düşük sıcaklıklarda ve/veya kısa yüklemeye sürelerinde cam benzeri elastik bir katı olarak ve yüksek sıcaklıklarda ve/veya yavaş yüklemeye sırasında yapışkan bir akışkan gibi davranan termoplastik ve viskoelastik bir sıvıdır. Yapışkan bir malzeme, doğada yarı akışkan olan bir maddedir. Gerilmeye maruz kaldığında deforme olur ve meydana gelen herhangi bir deformasyon kalıcı olur çünkü yüklemeye kaldırıldığında geri kazanılmaz. Elastik malzemeler de gerilim altında deforme olur veya deforme olma eğilimindedir, ancak yüklemeye kaldırıldığında herhangi bir deformasyon tamamen geri kazanılır (Poel, 1954). Bu nedenle bitümün gerilmeye tepkisi hem sıcaklığa hem de yüklemeye süresine bağlıdır ve sonuç olarak bitümün reolojisi, gerinim, deformasyon, zaman ve sıcaklık tepkisi ile tanımlanır (Taylor ve Airey, 2008).

Asfalt, temel olarak bitüm ve mineral agregalar içeren bir yapı malzemesini tanımlamak için kullanılan genel bir terimdir. Sıcak karışım asfalt (HMA) ve asfalt betonu (AC) içeren birkaç alternatif terim mevcuttur. Asfaltın büyük çoğunluğu inşaat endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Öncelikle yol yapımında kullanılmasına rağmen, çatı keçepleri, rezervuar kaplamaları ve içme suyu tesis boruları için bir iç astar olarak kullanılmaktadır. Mükemmel su geçirmezlik özellikleri ve termoplastik davranışı, asfaltı çok çeşitli uygulamalar için ideal malzeme kılmaktadır.

Asfalt betonu dolgu barajlarında su bariyeri olarak kullanılır. Sıkıştırılmış asfalt beton çekirdekli ilk dolgu barajı, 1961-1962'de Almanya'da inşa edilmiştir. Wang ve Hoeg (2011), üç eksenli deney aleti ile çevrimsel yüklemeye maruz kalan asfalt örneklerinin davranışını araştırmışlardır. Örnekler, barajın şiddetli deprem sarsıntısına karşılık gelen çeşitli yüklemeler ile test edilmişlerdir. Sönüm oranının, gerilme durumuna ve sıcaklık seviyesine bağlı olarak 0.07-0.30 arasında olduğunu bulmuşlardır. Sonuçlar, sismik bir bölgedeki dolgu bir barajdaki asfalt beton çekirdeğin, su sızdırmazlığını bozmadan ve kaybetmeden çok şiddetli sismik sarsılmaya dayanabileceğini göstermektedir. Barajın deprem direnci, mevcut

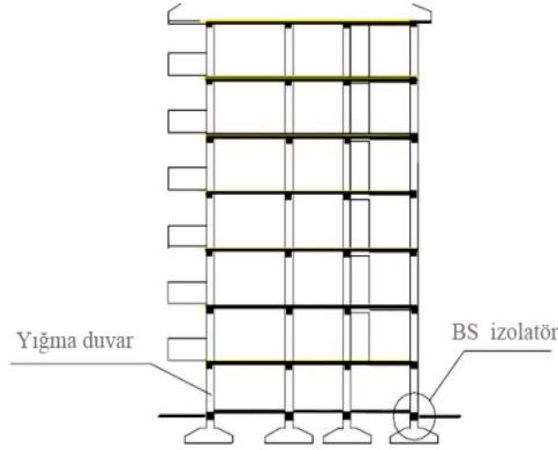
dolgu malzemeleri, temel koşulları ve alanın depremselliği göz önünde bulundurularak setin kendisinin uygun tasarımına ve imarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

İzolasyonda bir başka yenilik, 1999'da Çin'de icat edilmiştir. (Çin Patent Numarası ZL99202381.5). İşlenmiş asfalt-lif sismik taban izolasyon yastığı veya kısaca BS yastığı adı verilmiştir. Bu tip yalıtımın avantajı, maliyet etkinliği ve güvenlik iken ayırma etkisi de orta düzeydedir. Şekil 1.29'da BS yastığının yapısı gösterilmektedir.

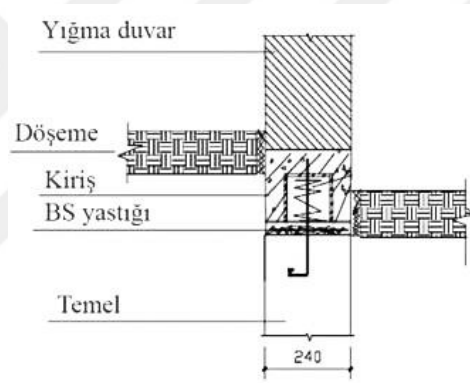


Şekil 1.29. İşlenmiş asfalt-lif sismik taban izolasyon yastığı

Katmanlı kauçuk-çelik izolatörler gibi lif ve işlenmiş asfaltın sırasıyla çelik levha ve kauçuk üzerine alınması, BS yastığının temel felsefesidir. Çin'de BS yastığı ile izole edilmiş 7 katlı iki beton yığma yapı deneme binası inşa edilmiştir. Binaların bir tanesi 4 kat BS yastığı ve 4 kat kum ile izole edilmiştir. Bu binanın temel periyodu 0,3 saniyeden 1 saniyeye uzatılmıştır. Fakat, bu projede, BS yastığının geniş alan uygulaması nedeniyle, bu binanın inşaat maliyeti önemli ölçüde artmıştır. İkinci binada ise, taşıyıcı duvarları şerit temelden ayırmak için sadece 20mm kalınlığında BS yastık tabakası kullanılmıştır. Bu projede, BS yastığının küçük alan uygulaması nedeniyle, bu binanın inşaat maliyeti yalıtılmamış binalara kıyasla artmamıştır. Şekil 1.30'da BS uygulanan bina gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 1.31'de BS izolasyon uygulaması detaylı olarak gösterilmektedir (Chen, 2004). Küçük ölçüde deneyler yapılmış ve onların sonuçlarına dayanarak bu binanın deprem esnasında tepki ivmesinin %36 oranında azaldığı tahmin edilmiştir.



Şekil 1.30. BS sistemin ile sismik izolasyon (Chen, 2004).



Şekil 1.31. BS izolasyon uygulamasının detaylı (Chen, 2004).

Kırsal alanlardaki yapı türü, esas olarak sismik direnç bakımından zayıf olan yığma yapılardır. Yoa vd., (2014) kırsal binaların yapı özelliklerine uygun maliyet etkin sismik izolasyon cihazlarının araştırılmasının gerekli olduğunu düşünmüşlerdir. Bu amaca yönelik olarak şerit temelli duvar yapıları için uygun olan yeni bir çelik-asfalt kompozit sismik izolasyon tabakası sunmuşlardır. Sistemin dinamik özellikleri ve izolasyon etkisi, iki tam ölçekli numunenin sarsma tablası deneyleri ile incelenmiştir. Deneylerde, farklı maksimum yer ivmelerine sahip farklı deprem dalgaları uygulanmıştır (PGA 0,1g ila 0,4g). Sonuç olarak, izolasyon katmanının giriş yer ivmelerini etkili bir şekilde azaltabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, uygulanan depremin maksimum yer ivmesi arttıkça, izolasyon katmanının daha etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Feizi-Khankandi vd. (2008) dolgu barajlarda, deprem yüklerine maruz kalan kullanılan asfalt betonunun sismik davranışını incelenmişlerdir. Beton asfaltın dinamik özelliklerini belirlemek için üç eksenli deney aletini kullanmışlar ve numunelere monotonik ve çevrimsel yüklemeler uygulayarak beton asfaltın dinamik özelliklerini belirlemişlerdir. Bu çalışmada, oldukça yüksek sayıda çevrimsel yüklemelerden sonra yapılan monotonik yüklemelerde ise asfaltın etkinliğini koruduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışma, asfalt betonun deprem uyarılarına dirençli olduğunu göstermektedir. Deprem, dolgu barajlarda, asfalt beton çekirdeğin özelliklerinde bozulma veya herhangi bir zarara neden olması için çok güçlü olması gerekmektedir.

Zhong vd. (2002) demiryolu tramvaylarında kauçukla modifiye edilmiş asfaltın potansiyel uygulaması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Kauçukla modifiye edilmiş asfaltın kayma modülü ve sönüm oranını rezonans kolon deneyi ile incelemişlerdir. Karışımda kauçuk oranı arttıkça kayma modülü ve sönüm oranının arttığını ancak, kayma modülünün artışının çok az olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, kauçukla modifiye edilmiş asfaltın yüksek kayma modülü ve sönüm oranına sahip bir malzeme olduğunu ve demiryollarında titreşimin azaltılması için çok iyi bir malzeme olduğunu belirlemişlerdir. Zeng vd. (2001) benzer çalışmalarda hemen hemen aynı sonuçlara varmışlardır.

1.7. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, taban izolatörleri, özel üretim olduklarından ve kurulum için özel personel ve ekipman gerektirdiğinden maliyetli yatırımlardır. Bu nedenle, bu sistemler özellikle gelişmekte olan ülkelerde normal binalarda kullanılmamaktadır. Bununla birlikte, bu tür binalar, bu ülkelerdeki bir deprem sırasında çökme riski altındaki yapıların çoğunu oluşturmaktadır. Bu nedenle, birçok araştırmacı alternatif, daha az maliyetli ve kolay uygulanabilir sismik izolasyon sistemleri geliştirmeye çalışmıştır. Geleneksel sismik izolasyon araçlarıyla karşılaştırıldığında, geoteknik sismik izolasyon (GSİ) sistemi çok umut verici kılan bazı ayırt edici özelliklere sahiptir. Birincisi, güçlü sismik izolasyon sağlamasına rağmen, GSİ tekniği sadece temel inşaat becerileri gerektirir ve ucuzdur, bu da özellikle sınırlı teknik ve finansal kaynaklara sahip ülkeler veya bölgeler için uygundur.

Bu çalışmada, binalar için düşük maliyetli ve uygulaması kolay sismik izolasyon sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak modifiye edilmiş bitüm kullanılarak, agrega-modifiye bitüm karışımı yapılmıştır, izolatör malzemesi olarak

kullanılan bu karışımın viskoelastik davranışından dolayı yüksek sönümleme kapasitesine ve istenilen rijitliğe sahiptir. Çoğu yapısal taban izolatörlerin enerji sönümleme kapasitesi düşüktür ve bazen izolatörlerle birlikte bina katlarında sönümleyici sistemlerin kullanılması gerekmektedir ki bu yeni tip GSİ sisteminin sönümleme kapasitesi yüksek olduğu için bu ihtiyacı giderecektir. Ayrıca geleneksel izolatörlerin enerjiyi sönümlemek için daha büyük deplasmana ihtiyacı var ki bazen binaların tabanlarında deplasman kısıtlaması gerekli olabiliyor, bu yüzden izolatör uygulaması pek mümkün olmaya biliyor ki agrega-modifiye bitüm karışımı yüksek rijitliği nedeni ile bu sorunu giderebilir.

Çalışmanın amacını oluşturan bu yeni tipte geomateryalı taban izolatörü olarak kullanıldığında binanın maksimum tepki ivme değerlerini ve katlar arası görelî ötelenmesinin azaltılması hedeflenmektedir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde, öncelikle doktora çalışması sırasında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan materyal ve yöntem açıklandıktan sonra nümerik çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir. Literatürde, sismik izolatörler ve asfalt betonla ilgili birçok araştırma mevcut olmakla birlikte agrega-modifiye bitüm karışımının, taban izolatörü olarak kullanılması için hiçbir çalışma yapılmadığı gözlenmiştir. Bu çalışmada, agrega-modifiye bitüm izolatör malzemesi olarak dinamik davranışı çevrimsel direk basit kesme cihazı ile araştırılmıştır. İlk olarak, agrega-modifiye bitüm numunelerinin yapımında kullanılan doğal malzeme, yani granüler zemin ve bağlayıcı bitüm tanıtılarak bitüm modifikasyonunda kullanılan Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) kopolimeri ve karbon lifi (Carbon Fiber Reinforced Polymer-CFRP) tanıtılmıştır. Malzeme tanıtımından sonra bitüm modifikasyonu hakkında bilgi verilmiştir. Bitümün modifikasyonu için SBS kopolimeri ve karbon lifi (CFRP) kullanılmıştır. SBS modifikasyonunda, yüksek hızlı karıştırıcı kullanarak bitüm üç farklı SBS yüzdesi ile modifiye edilmiştir. Lif modifikasyon işleminde, bitüme farklı yüzdeler ve farklı uzunluklarda karbon lifi eklenerek düşük hızlı bir karıştırıcıda karıştırılmıştır. Bitüm modifikasyonu açıklandıktan sonra, numunelerin çevrimsel basit kesme deneyi için nasıl hazırlanacağı ve deney prosedürü hakkında bilgi verilmiştir.

Nümerik çalışma kapsamında, asfalt betonun yapılarda sismik izolatör olarak kullanımı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizler, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan SAP 2000 (CSI Ver. 20) programı kullanılarak yapılmıştır. Üst yapı olarak beş katlı özel moment çerçeveli çelik bir bina tasarlanmıştır. Yapılan analizlerde, sismik analiz için doğrusal olmayan zaman tanım analizi kullanılmıştır.

Taban izolatörün modellenmesi için SAP programında izolatör malzemesi olan, agrega-modifiye bitüm karışımı, link elemanı olarak modellenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler programa girilmiştir ve deney sonuçları ile model sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar gayet uyumlu olduklarından, bahsi geçen link elemanları yapının altında sismik izolatör olarak kullanılmıştır ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

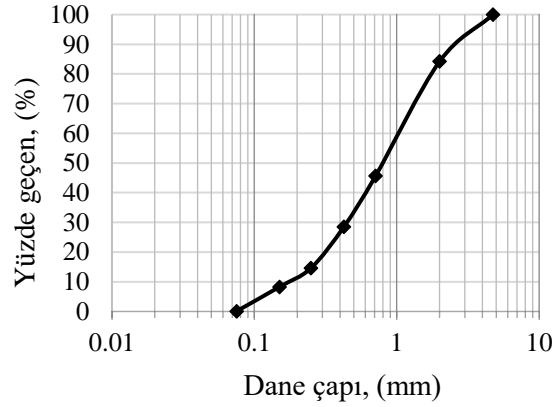
2.2. Deneysel Çalışmalar

Doktora çalışması kapsamında, deneysel çalışmaların bir kısmı Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı'nda, diğer kısımlarından bitüm modifikasyon işlemleri KTÜ Of Teknoloji Fakültesinde ve çevrimsel basit kesme deneyleri de Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Araştırma Geliştirme Daire Başkanlığı Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır.

2.2.1. Materyaller

2.2.1.1. Granüler Zemin

Kum, asfaltın mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmak için her zaman asfaltın en önemli katı parçalarından biri olarak kullanılmıştır. Ayrıca, farklı zemin tiplerine kıyasla granüler zemin, yüksek sönümlenme kapasitesi nedeniyle (Seed ve Idriss, 1970), bu çalışmada kum, izolatör malzemesi olan agrega-modifiye bitüm karışımının katı parçası olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan zemin, inşaatlarda kullanılan 4 No'lu elekten geçirilen kumdur. Daha sağlam agrega-modifiye bitüm karışımı elde etmek ve kum taneleri arasında daha iyi bağlantı sağlamak için, kum 200 No'lu elek üzerinde yıkanmıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada, 4 No'lu ve 200 No'lu elek arasındaki kum kullanılmıştır. Zemini sınıflandırmak için yıkanmış kum, etüvde kurutulduktan sonra ASTM D422 (2007) standardına göre elek analizine tabi tutulmuştur. Kumun granülometri eğrisinden, efektif çap $D_{10}= 0,17$ mm, $D_{30}=0,45$ mm ve $D_{60}= 1,1$ mm olarak belirlenmiştir. Bu zemin için üniformaluluk katsayısı $C_u= 6,47$ ve eğrilik katsayısı $C_c= 1,08$ olarak elde edilmiştir. Kumun granülometri eğrisi Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan kum zeminin granülometri eğrisi

Çalışmada, 4 No'lu ve 200 No'lu elek arasındaki zemin kullanıldığı için Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) (ASTM D2487, 2017) göre kullanılan zeminin sınıfı kum olarak belirlenmiştir. Kumun üniformaluluk katsayısı 6'dan büyük ve eğrilik katsayısı 1'den büyük olduğundan, kullanılan zemin iyi derecelenmiş kum (SW) olarak adlandırılmıştır. Kumun özgül ağırlığı ASTM D854'e (2014) uygun olarak belirlenmiştir. Kumun içsel sürtünme açısı direk kesme kutusu deneyi ile ASTM D3080'e (2020) uygun olarak (rölatif sıkılık $D_r=0.5$) belirlenmiştir. Tablo 2.1'de kullanılan kumun geoteknik özellikleri sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Deneysel çalışmada kullanılan kumun geoteknik özellikleri

Özellik	Sembol	Birim	Değer
Renk			Sarımtırak
Özgül ağırlık	G_s	-	2,59
Maksimum kuru yoğunluk		Mg/m^3	1,75
Minimum kuru yoğunluk		Mg/m^3	1,25
Efektif çap	D_{10}	mm	0,17
D_{30}		mm	0,45
D_{60}		mm	1,1
Üniformaluluk katsayısı	C_u	-	6,47
Eğrilik katsayısı	C_c	-	1,08
Zemin sınıfı (USCS)			SW
İçsel sürtünme açısı	ϕ	derece	34,6

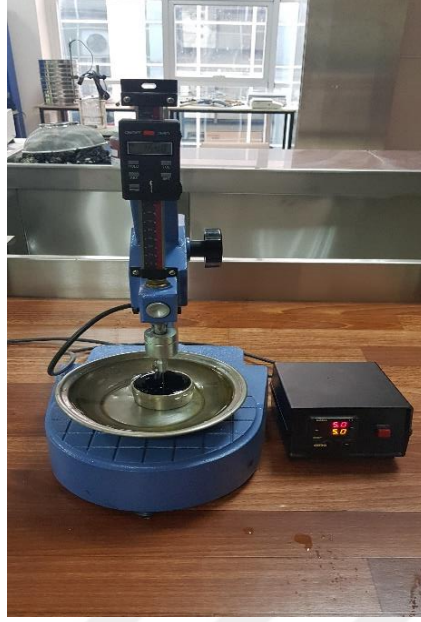
2.2.1.2. Bitüm

Agrega- bitüm karışımının kayma modülü ve sönüm oranı, kullanılan bağlayıcı tipine bağlıdır. Hoeg, (1993) ve Kuvat, (2019) aynı bitüm oranında ve koşullarda farklı penetrasyonlara sahip asfalt numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda, bitümün penetrasyonunun artmasının kayma modülünü azalttığı ve sönüm oranını artırdığını belirtmiştir. Buna dayanarak tez çalışmasında, 160/220 sınıfı bitüm seçilmiştir. Kullanılan bitümler Türkiye Petrol Rafineleri Anonim Şirketinin (TÜPRAŞ) İzmit rafinerisinden temin edilmiştir. Üretici firma tarafından temin edilen bitümün özellikleri ilgili standartlarıyla birlikte Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan bitümün karakteristik özellikleri (URL1, 2, 3 ve 4)

Özellik	Standart	Değer
Bitüm penetrasyonu (x0.1 mm)	TS EN 1426	160/220
Yumuşama noktası	TS EN 1427	35-43
Kütle değişimi (ısıtmadaki kayıp) (%)	TS EN 12607-1 veya 2	1.0
Kalıcı penetrasyon (%)	TS EN 1426	37
Sertleşmeden sonra yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	37
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2592	220
Çözünürlük (% ağırlık)	TS EN 12592	99
Yumuşama noktası yükselmesi (°C)	TS EN 1427	11

Bitümün penetrasyon derecesi penetrasyon deneyi ile belirlenmektedir. Bu deneyde, standart bir iğne bitümün içine 100 gramlık bir yük altında serbest bırakılır ve 5 saniye beklenir. Deney sırasında numunenin sıcaklığı 25 °C’de sabit tutulur. İğnenin bitüme dikey olarak batma mesafesi 0.1 mm cinsinden ölçülür ki buna penetrasyon değeri denilir. Kullanılan bitümün penetrasyon derecesini belirlemek için yapılan penetrasyon deneyi KTÜ Of Teknoloji Fakültesinde, ASTM D5’e uygun olarak yapılmıştır. Kullanılan bitüm için penetrasyon derecesi 173 olarak belirlenmiştir, dolayısıyla bitüm 160/220 sınıfına girmektedir. Bitüm Penetrometre cihazı Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Bitüm penetrometre cihazı

2.2.1.3. Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Kopolimerleri

Bitümün performansını, neme ve kalıcı deformasyona karşı direncini arttırmak ve sıcaklık hassasiyetini azaltmak için bitüme polimer eklenir (Rostler vd., 1972; Lucas, 1976; Chaffin vd., 1978). Günümüzde bitüm modifikasyonu için yaygın olarak kullanılan polimerler; plastomerler ve termoplastik elastomerler (TPE) olarak sınıflandırılabilir. Plastomerlerin elastik bileşenleri çok azdır veya hiç yoktur. Genellikle yük altında da kalıcı deformasyona veya kırılma bozulmaya (brittle failure) neden olurlar (Isacson ve Lu, 1995). Termoplastik elastomerler söz konusu olduğunda, termoplastik davranış olarak ısıtıldığında bir sıvı gibi yumuşama, viskoz ve serbest akış yapma ve oda sıcaklığında soğutulduğunda katıya dönüşme özelliği gözlenirken, elastik davranış olarak ise bir kuvvet uygulandığında ve sonra çıkarıldığında şekil değiştirme ve geri kazanım özelliği gözlenir. Bu iki davranış termoplastik elastomer malzemelerde birleştirilir.

SBS Kopolimerleri, stiren ve bütadiene bağlı homopolimer blokları tarafından yapılan termoplastik elastomerler (TPE) sınıfına ait bir kopolimerdir. Mevcut tüm polimerler arasında SBS, bitümdeki iyi dağılımı (iyi çözünürlük), mükemmel özellikler ve kabul edilebilir maliyet nedeniyle daha fazla dikkat çekmiştir. SBS kopolimerleri, esnek polibütadien (PB) matrisinde (sürekli faz) sert polistiren (PS) alanlarının (dağınık faz) iki fazlı morfolojisine sahip stiren-bütadien-stiren triblok zincirlerinden oluşmaktadır (Polacco

vd., 2006; Lu, 1997). PS ve PB blokları arasındaki kimyasal bağlantılar matristeki alanları hareketsiz hale getirebilir. PS bloklarının cam geçiş sıcaklığı (T_g) yaklaşık 95 °C'dir ve PB bloklarının T_g 'si eksi 80 °C civarındadır (Zanzotto vd., 2000). Asfaltlama bitümünün olağan servis sıcaklıkları altında, PS blokları camsıdır ve SBS'nin mukavemetine katkıda bulunurken, PB blokları elastiktir ve esneklik sağlarlar (Lucena vd., 2004).

Bu tez çalışmasında bitüm modifikasyonu için Kraton fabrikasının D1101AT kodlu SBS ürünü kullanılmıştır. Şekil 2.3'te kullanılan SBS gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Kraton D1101AT kodlu Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) kopolimerleri

Tablo 2.3'te bitüm modifikasyonunda kullanılan SBS kopolimerinin özellikleri verilmiştir.

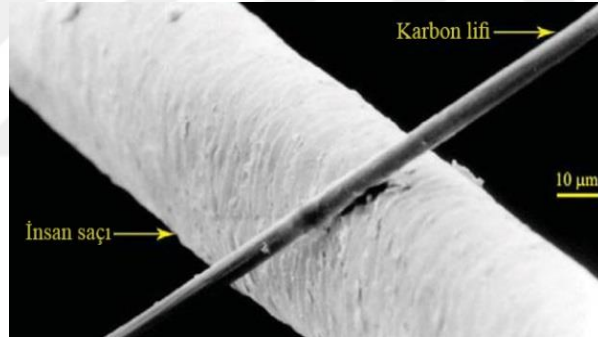
Tablo 2.3. Bitüm modifikasyonunda kullanılan SBS kopolimerin özellikleri (Sengoz, 2008)

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	-	0,940
Erime akışı		$\leq 1,0$ g/10 min
Sertlik		72
Gerilme (çekme) direnci	MPa	33
Kopma uzaması	%	875
Moleküler yapı		Doğrusal
İşlem sıcaklığı	°C	150-170

2.2.1.4. Karbon Lifi (CFRP)

CFRP terimi, Carbon Fiber Reinforced Polymers'in kısaltması olup polimer takviyeli karbon fiber anlamına gelmektedir. Bu kısaltmada bulunan, FRP terimi, dokunmuş liflerle takviye edilmiş polimer bir matristen kompozit olan malzemeleri ifade etmektedir. CFRP, yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlığı ve iyi dayanıklılığı (korozyon direnci) olan kompozit bir malzemedir. Polimer takviyeli karbon fiber (CFRP) asidik ortamlarda çok daha yüksek dirençlere sahip olduğundan kullanımı fayda sağlamaktadır. CFRP, asidik ortamda (pH 2.5) 20.000 saat sonra mukavemetinin yaklaşık %10'unu kaybederken, çelik ise bu asidik ortamda çözülür. Bunun yanında, alkali (bazik) bir ortamda (pH 12.5), 20.000 saat sonra gücünün yaklaşık %5'ini kaybeder (Toufıgh vd., 2013).

Bu tez çalışmasında bitümün modifikasyonu için karbon lifi kullanılmıştır. Şekil 2.4'te karbon lifi ile insan saçının boyut olarak kıyaslanması gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Karbon lifi ile insan saçının boyut olarak kıyaslanması (Liu vd., 2015).

Bu çalışmada, bitümün karbon fiber ile modifiye etmek için önce lifler 2, 4 ve 6 mm'lik uzunluklarda kesilmiştir. Lifler farklı uzunluklarda kesildikten sonra, elle tek tek iplikçikler halinde ayrılmıştır. Şekil 2.5'te lifin kesilmiş ve ayrılmış hali gösterilmektedir. Liflerin birbirinden ayrılmasından sonra, bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Tablo-2.4'te bitüm modifikasyonunda kullanılan karbon lifinin özellikleri listelemektedir.



Şekil 2.5. Çalışmada kullanılan karbon lifinin kesilmiş ve ayrılmış hali

Tablo 2.4. Bitüm modifikasyonunda kullanılan karbon lifin (CFRP) özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	Mg/m ³	1,75-1,95
Çekme dayanımı	MPa	3500-4500
Elastik modül	GPa	230-800
Lif çapı	µm	5-8
Kopma uzaması	%	1,6-2,2
En yüksek uygulama sıcaklığı	°C	400

2.2.2 Bitüm Modifikasyonu

2.2.2.1 SBS Polimeri ile Bitüm Modifikasyonu

Kaliteli ham petrol veya uygun rafineri işlemleri seçilerek kaliteli bir bitüm elde edilmesi mümkündür. Kaliteli bitüm üretimi için sınırlı petrol kaynakları ve rafineri sırasında etkili kontrol işlemlerinin olmaması ve maksimum ekonomik kar elde etme amacının bulunması, endüstrilerin bitüm modifikasyonuna daha fazla dikkat etmelerini sağlamıştır (Becker, 2001).

Saf bitüme katkılar eklenerek bitümün özelliklerinin iyileştirilmesine bitüm modifikasyonu denilmektedir. Bitümün tüm denenmiş veya araştırılmış modifikasyon yöntemleri arasında polimer modifikasyonu en popüler yaklaşımlardan biri olmuştur. Bitümün polimer modifikasyonu, mekanik karıştırma veya kimyasal reaksiyon yoluyla polimerlerin bitüm içerisine dahil edilmesidir (Lu, 1997). Polimerle modifiye edilmiş bitüme kısaca (PMB) (polymer modified bitumen) denilir. Polimer modifiye bitümler, saf bitümün performans özelliklerini iyileştirmek için tasarlanmıştır. Esneklik, yapışma ya da kohezyon mukavemeti gibi özellikler, bir ya da daha çok kimyasal maddenin kullanılmasıyla değiştirilebileceklerdir (Hunter vd., 2015).

Bitüm polimer modifikasyonu ilk olarak çatı endüstrisinde, daha sonra kaldırım endüstrisinde kullanılmıştır. 1965 yılında, Izotaktik Polipropilen (IPP) üretiminin bir yan ürünü olan Ataktik Polipropilen (APP), ilk olarak İtalya'da çatı kaplamada, bitümün modifiye edilmesinde kullanılmış ve ilk ticari ürün 1967'de pazarlanmıştır (Polacco vd., 2005). Bitümün hem elastik davranışının hem de sünekliliğin artırılması için, viskoelastik davranışlarıyla polimerler arasında öne çıkan termoplastik elastomer malzemelerin kullanılması daha uygundur.

Bitüm modifikasyonunda, polimerler arasında Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) kopolimerleri, bitümde nispeten iyi dağılıbilirliği (veya uygun çözünürlüğü) ve kabul edilebilir maliyeti nedeniyle en çok dikkati çekmiştir (Chen vd., 2002). SBS ile modifiye edilmiş bitümün, daha iyi elastik geri kazanım, düşük sıcaklıklarda daha yüksek çatlama direnci ve yüksek sıcaklıklarda daha yüksek sürtünme direnci gibi bazı geliştirilmiş bitüm özellikleri ile sonuçlandığı tespit edilmiştir (Valkering ve Vonk, 1990; Stock ve Arand, 1993).

Bu tezde, SBS ile bitüm modifikasyonu çalışmaları, KTÜ Of Teknoloji Fakültesinde gerçekleştirilmiştir. Modifikasyon için yüksek hızlı mikser kullanılmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Yüksek hızlı polimer modifiye bitüm mikseri

Modifikasyon için önce bitüm etüvde 150 °C’de ısıtılmış ve biraz bekletilmiştir. Daha sonra bitüm miksere yerleştirilerek cihaz çalıştırılmıştır. Karıştırma hızı, 4500 devir/dakika olarak ayarlanmıştır. Modifikasyon sırasında bitüm sıcaklığı 150 °C’de sabit tutulmuştur. Modifikasyon için bitüm ağırlığının %3, %5 ve %7’si kadar SBS eklenmiştir. SBS eklendikten sonra karışımlar en az 25 dakika yüksek hızda karıştırılmıştır. Böylece üç farklı katkı oranlarında SBS ile modifiye edilmiş bitüm elde edilmiştir.

2.2.2.2. Karbon Lifi ile Bitüm Modifikasyonu

Birçok çalışmada zeminin güçlendirilmesi için zemine lif katılmış ve zeminin mekanik özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir (Li vd., 2014; Al-Refeai ve Al-Suhaibani, 1998; Anagnostopoulos vd., 2013; Zardari ve Ouria, 2019). Lifler, bitüm ve asfalt modifikasyonunda mükemmel güçlendirme etkisi sağladığından yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Birçok çalışmada liflerin, bitüm ve asfalt betonun mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkisi araştırılmıştır (Bueno vd., 2003). Agreg-a-bitüm karışımların liflerle güçlendirilmesi ile ilgili temel problem, lifin karışımda topaklanması, dolayısıyla homojen olmayan bir karışım elde edilmesidir. Bu sorunu çözmek için, bu çalışmada, lifler önce bitüme eklenerek daha sonra lif bitüm karışımı agreg-a ile karıştırılmıştır. Böylece, lifler, taneler arasında daha iyi dağılmış olup daha homojen bir karışım elde edilmiştir. Karışımda lifin topaklanıp topaklanmaması çıplak göz ile gözlemlenmiştir.

Bitümü karbon lifi ile modifikasyonu için bu çalışmada düşük hızlı mikser kullanılmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Düşük hızlı mikser

Bitümü lif ile modifiye etmek için önce bitüm 150 °C’de ısıtılarak bu sıcaklık prosedür bitene kadar sabit tutulmuştur. Karıştırma hızı 480 devir/dakika olarak ayarlanmıştır. Lifler daha önceden 2, 4 ve 6 mm uzunluklara kesilerek elle tek tek iplikçikler halinde ayrılmıştır. Hazırlanan lifler bitüm ağırlığının %0,3, %0,6, %1 ve %1,3 oranlarında bitüme eklenmiştir ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Burada, %1,3 oranında modifiye edilmiş bitümün, katılaşması (sertleşme) ve işlenebilirlik açısından kabul edilebilir düzeyi sağlamamasından dolayı 4 ve 6 mm’lik lifler için maksimum katkı oranı %1 olarak belirlenmiştir. Şekil 2.8’de 6 mm’lik lif, %1,3 katkı oranında gösterilmiştir. Böylece karbon lifi ile bitüm modifikasyon kısmında 10 farklı modifiye bitüm elde edilmiştir.



Şekil 2.8. Bitüm modifikasyonunda yüksek oranda lif kullanımının sertleşme etkisi (lifin katkı oranı %1,3 ve uzunluğu 6 mm)

2.2.3. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, izolatör malzemesi olarak agrega-modifiye bitüm karışımı numunelerinin hazırlanması için, yıkanmış kum ve 160/220 penetrasyonlu saf ve modifiye edilmiş bitüm kullanılmıştır. Bu malzemeler önceki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmışlardır.

Bu çalışmada, tüm agrega-modifiye bitüm karışımı numuneleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Ulaştırma laboratuvarında yapılmıştır. Numunenin boyutları ile ilgili, ASTM D6528'de (2017) minimum numune çapı (D) 45 mm, minimum numune yüksekliği (H) 12 mm ve $H/D \leq 0.4$ olduğu belirtilmiştir. Numuneler, çapı 63.5 mm'lik kalıplarda ve ortalama yüksekliği 26 mm olacak şekilde hazırlanmıştır.

Numuneleri hazırlamak için kum etüvde 160 °C'de 12 saat ısıtılmış ve numune yapılışına başlamadan 3 saat önce bitüm ve kalıplar da başka bir etüvde 150 °C'de ısıtılmıştır. Malzemelerin yeterince sıcak olduğundan emin olunduktan sonra, kumun kuru ağırlığının %6, %8, %10 ve %12 oranında bitüm konulmuş ve homojen bir karışım elde edene kadar elle karıştırılmıştır. Elde edilen homojen karışımın sıcaklığının 150 °C olması için tekrar etüve konulmuştur. Daha sonra karışım, sıcak kalıpların içine bir tabaka halinde konularak 7 vuruşla sıkıştırılmıştır. Numunelerin sıkıştırılması için 44,48 N ağırlığındaki standart proktor deneyinin tokmağı kullanılmış olup tokmağın düşüş yüksekliği 457,2 mm olarak

ayarlanmıştır. Numunelerin daha düzgün sıkışması için kalıplara uygun olacak şekilde iki adet aparat imal edilerek standart tokmağa monte edilmiştir. Şekil 2.9’da kalıplar, aparatlar ve tokmak gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Çalışmada kullanılan kalıp ve sıkıştırma elemanı

Sıkıştırma işleminden sonra numuneler, oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve soğutulduktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Tüm numune hazırlama prosedürü saf bitüm ve modifiye edilmiş bitüm için sabittir. Hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi Tablo 2.5, 2.6 ve 2.7’da verilmiştir.

Tablo 2.5. Saf bitümle hazırlana numunelerin isimlendirmeleri

Bitüm Türü	Bitüm İçeriği	Notasyon
Saf bitüm	%6	PB6
Saf bitüm	%8	PB8
Saf bitüm	%10	PB10
Saf bitüm	%12	PB12

Tablo 2.6. SBS polimeri ile modifiye edilmiş bitümle hazırlanan numunelerin isimlendirmeleri

SBS Katkı Oranı	Bitüm İçeriği	Notasyon
%3	%6	S3B6
%3	%8	S3B8
%3	%10	S3B10
%3	%12	S3B12
%5	%6	S5B6
%5	%8	S5B8
%5	%10	S5B10
%5	%12	S5B12
%7	%6	S7B6
%7	%8	S7B8
%7	%10	S7B10
%7	%12	S7B12

Tablo 2.7. Karbon lifi ile modifiye edilmiş bitüm ile hazırlanan numunelerin isimlendirmeleri

Lif Uzunluğu	Lif Katkı Oranı	Bitüm İçeriği	Notasyon
2 mm	%0,3	%12	L2C0.3B12
2 mm	%0,6	%12	L2C0.6B12
2 mm	%1	%12	L2C1.0B12
2 mm	%1,3	%12	L2C1.3B12
4 mm	%0,3	%12	L4C0.3B12
4 mm	%0,6	%12	L4C0.6B12
4 mm	%1	%12	L4C1.0B12
6 mm	%0,3	%12	L6C0.3B12
6 mm	%0,6	%12	L6C0.6B12
6 mm	%1	%12	L6C1.0B12

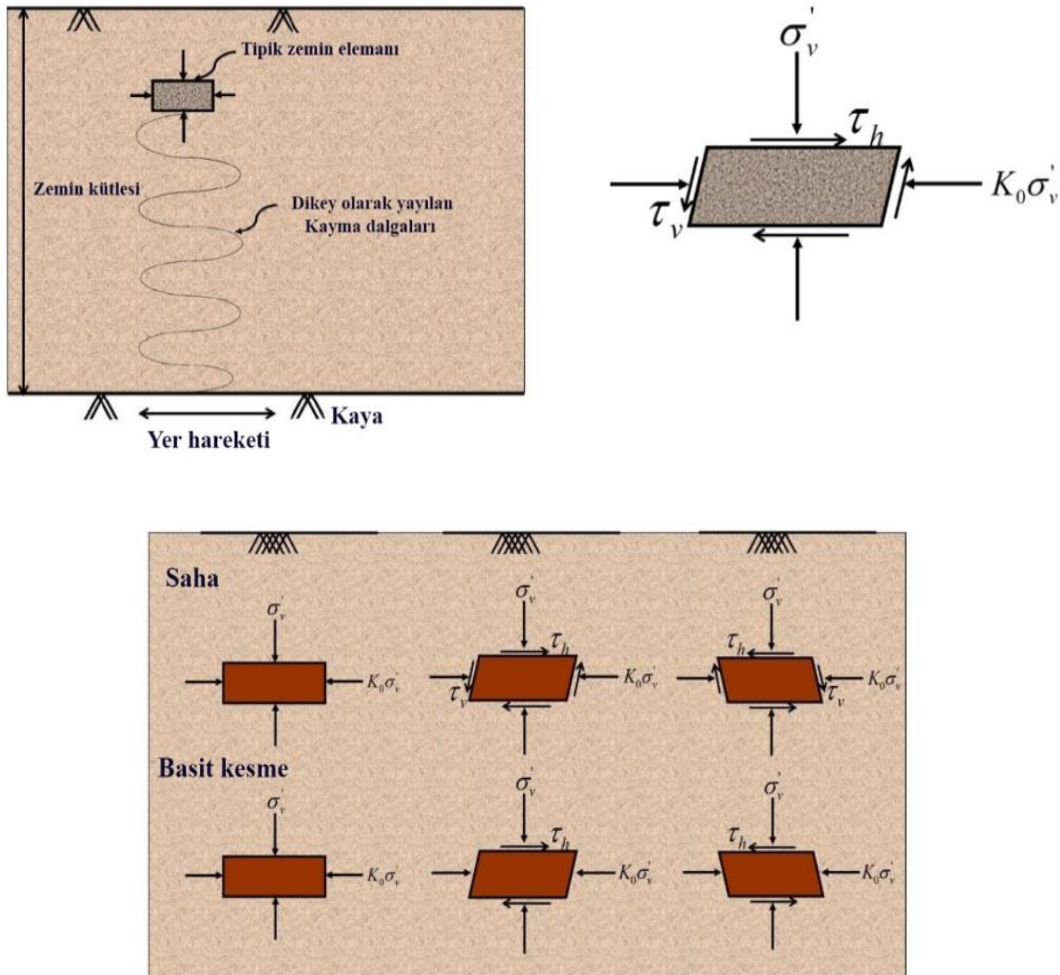
Agrega-modifiye bitüm karışımı numuneleri çevrimsel basit kesme deneyine maruz bırakıldığında dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri, numunenin yüzeyleri ile cihazın yükleme yüzeyleri arasındaki tam ve yeterli temasın olmasıdır. Numunenin iki yüzeyi birbirine paralel değilse, numune yüzeyleri ile cihazın yükleme yüzeyleri arasındaki temas yetersiz olmakta, bu da numunenin dönmesine ve kaymasına neden olarak yanlış sonuçlara neden olmaktadır. Numune hazırlama aşamasında bu durum dikkatle izlenmiştir. Tüm numuneler kontrol edilerek sorunlu numuneler çıkarılmıştır. Şekil 2.10'da bu çalışmada yapılan numuneler gösterilmektedir.



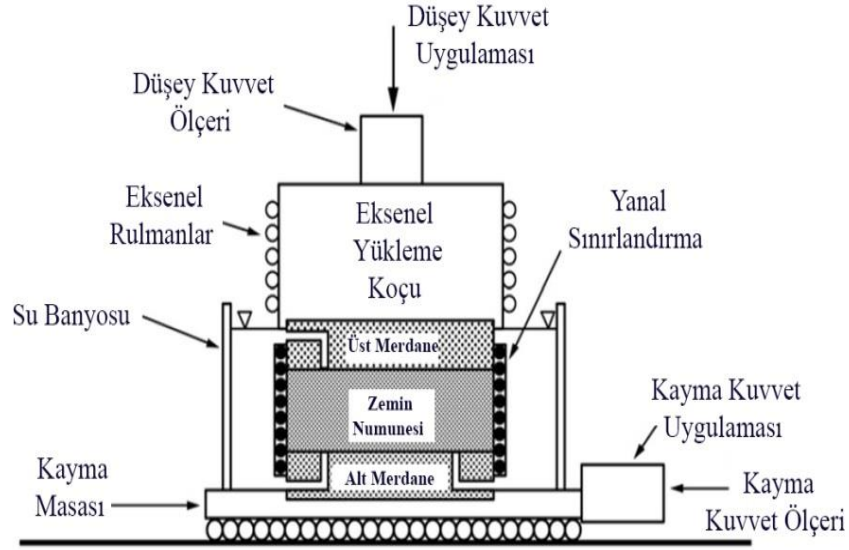
Şekil 2.10. Çalışmada yapılan numuneler

2.2.4. Çevrimsel Direkt Basit Kesme Deneyi

Deprem, patlama ve makine darbesi gibi yükler altındaki malzemelerin dinamik davranışının incelenmesi önemlidir. Sismik yükleme ve malzemelerin dinamik davranış analizinin deneysel modellenmesi nispeten zor bir iştir ve tüm koşulları karşılayabilecek tam olarak uygun bir test bulunmamaktadır. Yine de araştırmacılar birçok çalışmada, sismik yük altında zemin numunelerinin dinamik davranışını araştırmak için basit kesme deneyini uygun bulmuşlardır (Vucetic vd., 1998; Kramer,1996; Ramadan, 2007). Basit kesme deneylerinin birincil avantajı, laboratuvar numunesi üzerine uygulanan kuvvetlerin, sahada malzemenin maruz kaldığı kuvvetlerle çok benzerlik göstermesidir. Şekil 2.11’de bu durum şematik olarak gösterilmiştir (Kammerer, 2002). Şekil 2.12’de basit kesme deneyi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.11. İdealize edilmiş sahada sismik yüke maruz kalan zemin elemanı (Kumar, 2015).



Şekil 2.12. Basit kesme deneyinin şematik görünümü (ASTM D 6528, 2017).

Çevrimsel basit kesme deneyinde numune teflonla kaplanmış ince metal halkalar ile sınırlandırılmıştır. Çevrimsel kayma gerilmeleri numunenin üst veya alt yüzeyine uygulanmaktadır ki bu durum, zemin numunesinin S dalgalarına maruz kaldığı zemine çok benzerdir (Kramer, 1996). Hazırlanan izolatör malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Daire Başkanlığı zemin mekaniği laboratuvarında bulunan Shear Trac II-DSS Geocomp markalı şekil değiştirme kontrolü çevrimsel basit kesme cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, 1960'ın ortalarında Norveç Geoteknik Enstitüsü tarafından (NGI) geliştirilmiş basit kesme tipindedir. Bu tip basit kesme deneyinde, silindirik numune metal ince halkalarla sınırlandırılmaktadır. Önce numuneler konsolidasyon yüklemesine maruz bırakılırlar, daha sonra kesme yüklemesine tabi tutulurlar. Şekil 2.13'te kullanılan cihaz gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Çalışmada kullanılan Shear Trac II-DSS Geocomp markalı çevrimsel basit kesme cihazı

Bu cihaz bilgisayar kontrollü tam otomatik bir makinedir. Tüm yüklemeler, yer değiştirmeler ve deney koşulları shear-cycle ara yüzü ile elektronik olarak yürütülmektedir. Shear-cycle ara yüzü Şekil 2.14’te gösterilmektedir. Cihaz hem statik basit kesme deneylerini hem de dinamik basit deneylerini yapabilmektedir.

Consolidation Table		Cyclic Table		Shear Table
Project	Specimen	Water Content	Read Table	Test Parameters
Project Number:	S7B10	Boring Number:		
Project Name:		Test Number:		
Location:		Sample Number:		
Date of Test:	05/10/2019	Depth:		
Tester:	S. ZARDARI	Elevation:		
Checker:		Sample Type:		
Description:				
Remarks:				

Şekil 2.14. Shear-cycle ara yüzü

Agrega-modifiye bitüm karışımı numunelerinin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için önceden hazırlanan numunelerin boyutları ölçülür. Numune, halkalar içerisinde konularak yükleme hücresine yerleştirilir. Daha sonra, numune düşey konsolidasyon yüklemesine maruz bırakılır ve sabit bir duruma varana kadar beklenir. Konsolidasyonda sabit bir durum elde edildikten sonra kesme kuvveti uygulanır. Kayma yüklemesi 1 Hz frekansında tekrarlanmaktadır. Dinamik özellikleri etkileyen parametrelerinden biri de çevrimsel gerilme oranıdır. Kayma gerilmesinin (τ) konsolidasyon basıncı (σ_v) oranı olan çevrimsel gerilme oranı, CSR (Cyclic Stress Ratio), Eşitlik 2.1’de verilmiştir.

$$CSR = \frac{\Sigma \tau}{\sigma_v} \quad (2.1)$$

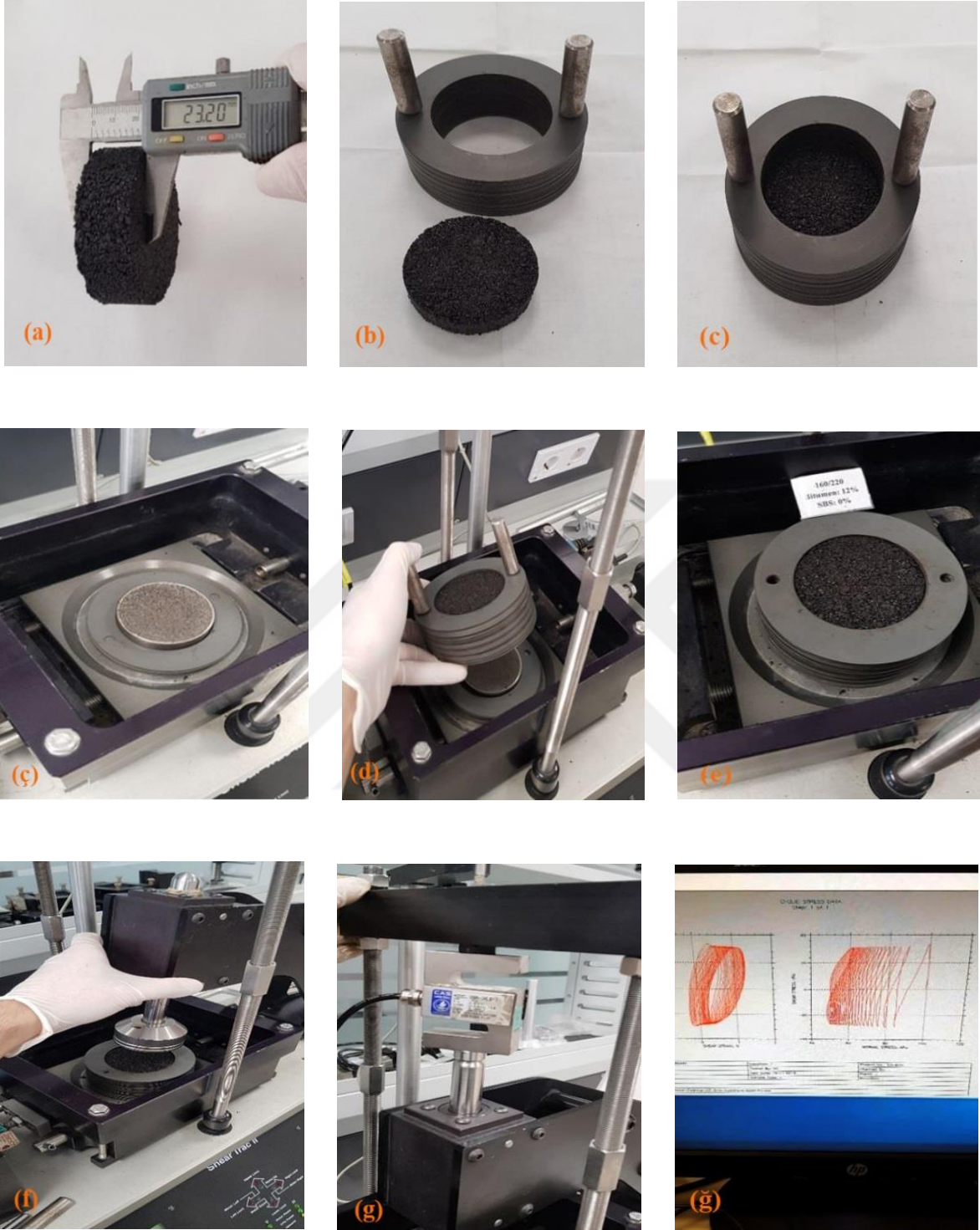
Dinamik yükleme koşullarında agrega-modifiye bitüm karışımının dinamik davranışını incelemek için saf ve modifiye edilmiş bitümlerle dört farklı bitüm içeriklerinde (%6, %8, %10, %12) hazırlanmış olup numunelerin her birisi için iki farklı düşey basınç (100 kPa, 200 kPa) ve iki ayrı çevrimsel gerilme oran aralığında (0.2’den 0.6’ye kadar ve 0.6’dan 1’e kadar) ile üç kere tekrarları ile birlikte toplam 414 adet deney yapılmıştır. Çalışmalarda planlanan ve uygulanan deney programı Tablo 2.8’de sunulmuştur. Tüm numuneler oda sıcaklığında (22 °C) ve 200 çevrim yüklemeye tabi tutulmuştur.

Tablo 2.8. Çevrimsel basit kesme deney programı

Numune	σ_v kPa	CSR Aralığı
PB6	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
PB8	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
PB10	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
PB12	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S3B6	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S3B8	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S3B10	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S3B12	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S5B6	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S5B8	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S5B10	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S5B12	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S7B6	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S7B8	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S7B10	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
S7B12	100 ve 200	0.2- 0.6 ve 0.6- 1.0
L2C0.3B12	200	0.6- 1.0
L2C0.6B12	200	0.6- 1.0
L2C1.0B12	200	0.6- 1.0
L2C1.3B12	200	0.6- 1.0
L4C0.3B12	200	0.6- 1.0
L4C0.6B12	200	0.6- 1.0
L4C1.0B12	200	0.6- 1.0
L6C0.3B12	200	0.6- 1.0
L6C0.6B12	200	0.6- 1.0
L6C1.0B12	200	0.6- 1.0

Şekil 2.15'te tüm basit kesme deney aşamaları sırasıyla gösterilmektedir. İlk aşamada, numunenin yüksekliği ölçülerek (Şekil 2.15(a)) numuneler teflon halkalar (Şekil 2.15(b)) içine yerleştirilmiştir (Şekil 2.15(c)). Daha sonra cihazın deney kutusunun tabanı temizlenerek (Şekil 2.15(ç)) numune kutuya yerleştirilmiştir (Şekil 2.15(d)). Numune yerleştirildikten sonra pinler çıkarılarak (Şekil 2.15(e)) düşey yük uygulama aparatı yerine takılmıştır (Şekil 2.15(f)). Düşey yük uygulaması başlatılarak konsolidasyon sonlanana kadar beklenmiştir (Şekil 2.15(g)). Konsolidasyon tamamlandıktan sonra çevrimsel kayma yüklemesi uygulanmıştır (Şekil 2.15(ğ)).





Şekil 2.15. Çevrimsel basit kesme deneyi aşamaları a) Numunenin yüksekliğinin ölçülmesi b) Hücre halkaların dizilmesi c) Numunenin halka içerisinde yerleştirilmesi ç) Cihazın deney kutusu d) Numunenin deney kutusuna yerleştirilmesi e) Pinlerin çıkarılması f) Düşey yük uygulama aleti g) Konsolidasyon yük ölçeri ğ) Çevrimsel yükün uygulaması ve histerezis eğrileri

2.3. Nümerik Çalışmalar

Bu bölümde, deneysel çalışmada incelenmiş olan agrega-modifiye bitüm karışımı, yapılarda izolatör olarak kullanılması durumu sayısal modellerle incelenmiştir. Bu doğrultuda, üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan SAP2000 programı kullanılarak yapılmıştır. SAP programında üstyapı olarak, beş katlı özel moment çerçevesi çelik bina tasarlanmıştır. Daha sonra taban izolatörü olarak uygulanması istenilen visko-elastik malzemenin dinamik özellikleri tanıtılmıştır. Deneysel sonuçlarla model sonuçları karşılaştırılarak numune doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra, agrega-modifiye bitüm karışımı farklı boyutlarda taban izolatörü olarak kolonların altına yerleştirilmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım analizi uygulanarak çözülmüştür.

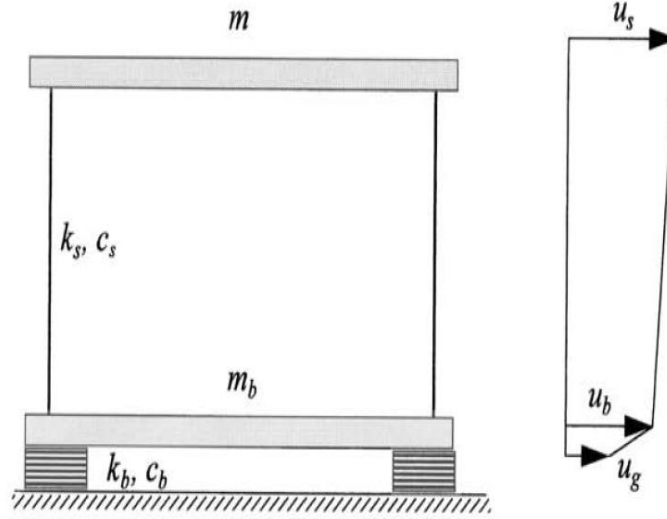
2.3.1. Dinamik Yükleme İçin İzolasyon Sistemin Davranışı

Sismik izolatör sisteminin doğrusal tasarım teorisi, yapının kütleline göre tanımlanır. Şekil 2.16'da gösterildiği üzere, (m) , binanın üst yapısının kütlesi ve (m_b) ise taban katının izolasyon sisteminin üzerindeki kütlesidir. Yapının rijitliği ve sönümlemesi k_s, c_s ile izolasyonun rijitliği ve sönümlemesi k_b, c_b ile ifade edilmiştir. İki kütleli mutlak yer değiştirmesi de u_s ve u_b ile gösterilmiştir. Ancak, aşağıdaki eşitlikte tanımlanan göreceli yer değiştirmeyi kullanmak daha uygundur (Kelly, 1990):

$$v_b = u_b - u_g \quad (2.2)$$

$$v_s = u_s - u_b \quad (2.3)$$

Bu eşitliklerde, (v_b) , izolatör yer değiştirmesini, (v_s) , göreceli ötelenmeyi ve (u_g) zeminin hareketini temsil etmektedir.



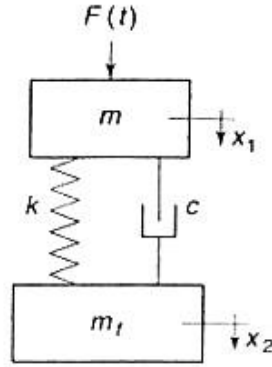
Şekil 2.16. İki serbestlik dereceli izole edilmiş sistemin parametreleri (Kelly, 1990).

İki serbestlik dereceli modelin temel hareket denklemleri Eşitlik 2.4 ve 2.5 ile tanımlanmaktadır (Kelly, 1999):

$$(m+m_b) \ddot{u}_b + m\ddot{u}_s + c_b\dot{u}_b + k_b u_b = -(m+m_b) \ddot{u}_g \quad (2.4)$$

$$m\ddot{u}_b + m\ddot{u}_s + c_s\dot{u}_s + k_s u_b = -m\ddot{u}_g \quad (2.5)$$

Tek serbestlik dereceli, tek eksenli titreşim izolasyon sistemi, titreşim izolasyon tesisatlarının temel dinamik etkilerini netleştirmek için uygun bir modeldir. Tipik olarak, bir titreşim izolasyon sistemi Şekil 2.17’de gösterildiği gibi üç alt sistemi içermektedir. Bunlar, izole edilecek nesne (kütle, m); esnek konektörler (titreşim izolatörleri) ve ekli olmayan temeldir (kütle, m_f).



Şekil 2.17. Tek eksenli titreşim izolasyon sisteminin tipik modelleri (Rivin, 2001).

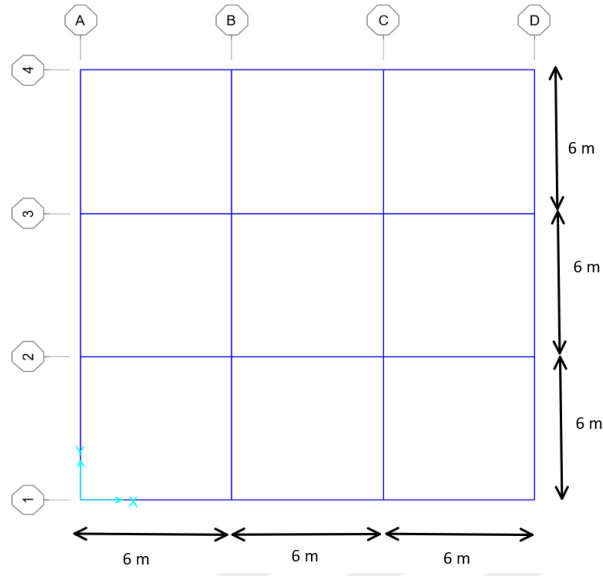
Sistemin geçerli hareket denklemi şu şekildedir:

$$m \ddot{u}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t) \quad (2.6)$$

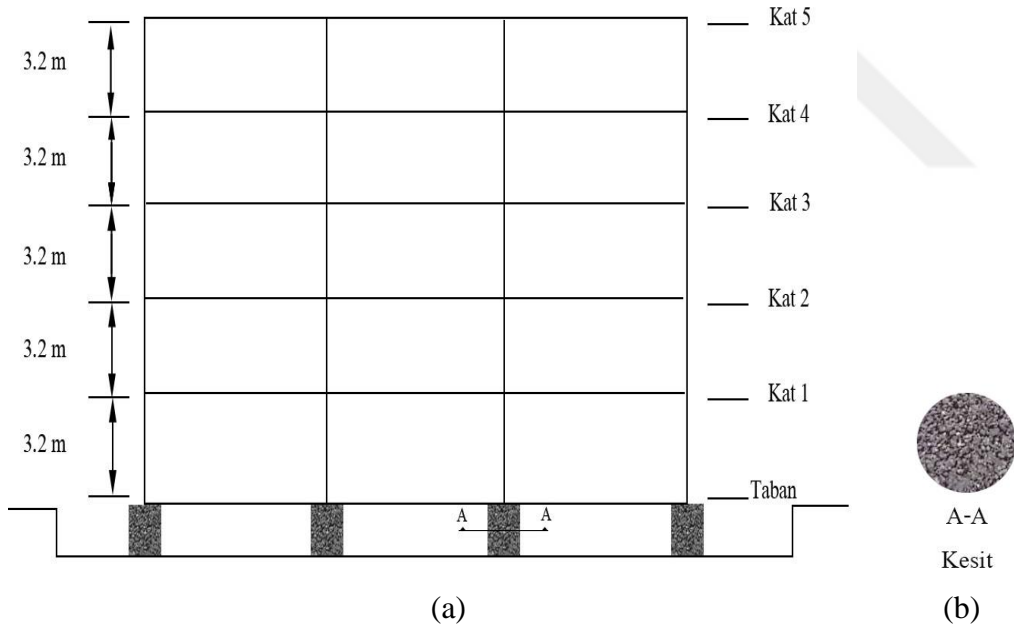
Burada, (m), (k) ve (c) sırasıyla sistemin kütle, rijitlik ve viskoz sönümleme parametreleridir. (p) uygulanan yük, (v) yer değiştirme ve (t), bağımsız zaman değişkenidir (Connor, 2002).

2.3.2. Yapının Üç Boyutlu Modeli

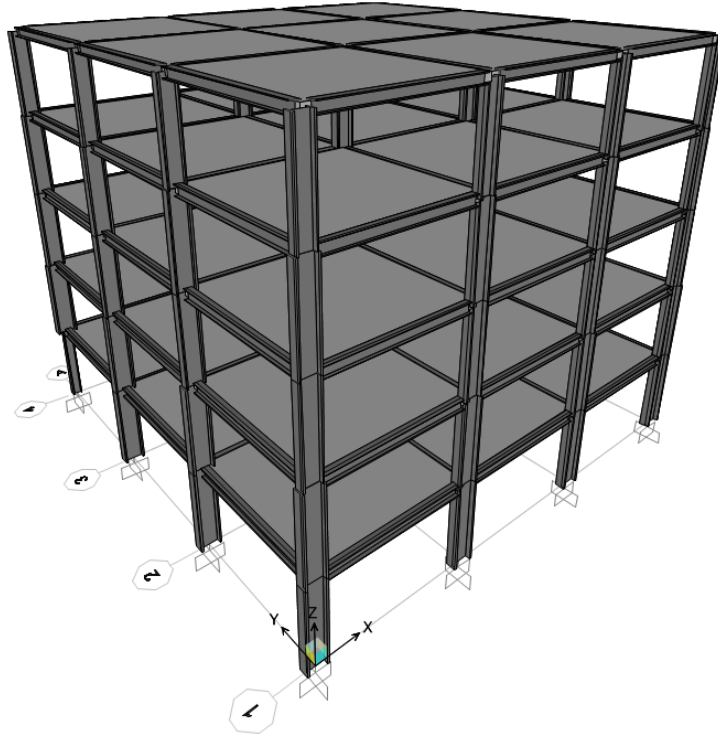
Üst yapı olarak beş katlı özel moment çerçevesi çelik bina Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü Yönetmeliğine (AISC 360, 2016) uygun olarak tasarlanmıştır. Analizler, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan SAP 2000 programı kullanılarak yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan yapı modelinin planı Şekil 2.18’de, yapı kesiti ve izolatör kesiti ise Şekil 2.19’da ve üç boyutlu görünümü ise Şekil 2.20’de görülmektedir. Kat yükseklikleri 3,2 m olarak alınmıştır. Binanın kolon ve kiriş boyutları Tablo 2.9’da verilmiştir. Kolonlar ve kirişlerde (I) şeklinde profil kullanılmıştır. Kullanılan çeliğin özellikleri Tablo 2.10’da verilmiştir. Çelik malzemesi, kolonlar ve kirişler programın kütüphanesinden otomatik olarak çağrılmışlardır. Döşeme kalınlıkları tüm katlar için 0,25 metre olarak alınmıştır. Döşeme yükleri ASCE 7’ye (2017) göre uygulanmış olup Tablo-2.11’de yüklere ait bilgiler verilmiştir. Bina 1. derece deprem bölgesinde, I = 1.5 bina önem katsayısına sahip ve C sınıfı zemin şeklinde tasarlanmıştır.



Şekil 2.18. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan yapı modeli plan görünümü



Şekil 2.19. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan yapı modeli, a) Kesit görünümü, b) Agrega-modifiye bitüm karışımı izolatör kesiti



Şekil 2.20. Model binanın üç boyutlu görünümü

Tablo 2.9. Yapı modelinde kullanılan kolon ve kiriş boyutları

Kat	Kolon	Kiriş
1	W27*368	W14*82
2	W27*368	W14*82
3	W24*250	W14*68
4	W24*250	W14*68
5	W21*223	W12*106

Tablo 2.10. Yapı modelinde kullanılan çeliğin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Minimum akma dayanımı f_{yk}	(MPa)	345
Minimum kopma dayanımı f_{su}	(MPa)	448
Elastisite modülü E	(MPa)	$2 \cdot 10^5$
Poisson oranı ν		0,3

Tablo 2.11. Döşemelere uygulanan yükler

Kat	Yapı elemanlarının ağırlığı (kN/m ²)	Hareketli yük (kN/m ²)
Normal katlar	6	2
Çatı katı	4	1,5

2.3.3. Doğrusal Elastik Olmayan Zaman Tanım Analizi

Bu çalışmada, sismik analiz için doğrusal olmayan zaman tanım analizi kullanılmıştır. Bu yöntemde, bina ve bina türü yapıların zaman tanım alanında doğrusal elastik ya da doğrusal elastik olmayan deprem hesabı için, yapay yollarla üretilen, daha önce kaydedilmiş veya benzeştirilmiş deprem yer hareketleri kullanılabilir (DBYBHY, 2007). Kayıtlar faylanma mekanizması, büyüklük, mesafe ve zemin özelliklerine göre Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER, 2018) veri tabanından alınabilir. Bu çalışmada, zaman tanım analizi için üç farklı faydan uzak olan istasyonlardan alınmış yer hareketinin yatay ivme bileşeni kullanılmıştır. Kullanılan deprem kayıtları Tablo 2.12’de detaylı olarak verilmiştir. Çalışmanın bu kısmında SeismoSignal programı kullanılmıştır.

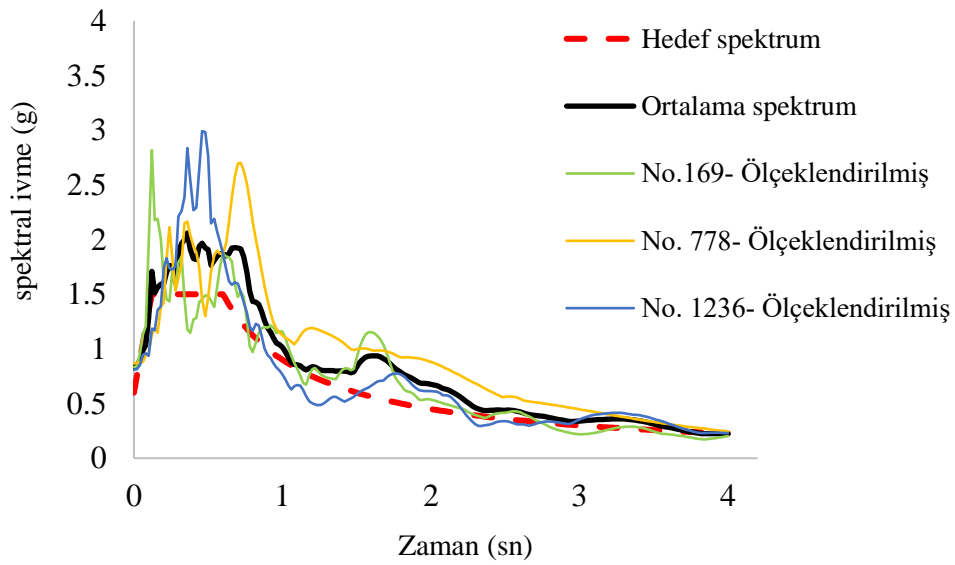
ASCE 7’ye (2017) göre, maksimum dikkate alınan deprem (MCE_R) 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan bir depremdir (2.475 yıllık geri dönüş süresi). Bu standart tarafından dikkate alınan en şiddetli deprem etkileri, yatay yer hareketlerine en büyük maksimum yanıt ve hedeflenen riske göre ayarlamaya yol açan yönlendirme için belirlenmiştir. Bir MCER tepki spektrumu gerektiğinde, bu depremin ivme spektrumunun ordinatları, tasarım spektrumunun ordinatlarının 1,5 katı olarak kabul edilmektedir.

Tablo 2.12. Zaman tanım analizinde kullanılan deprem kayıtları (PEER, 2018).

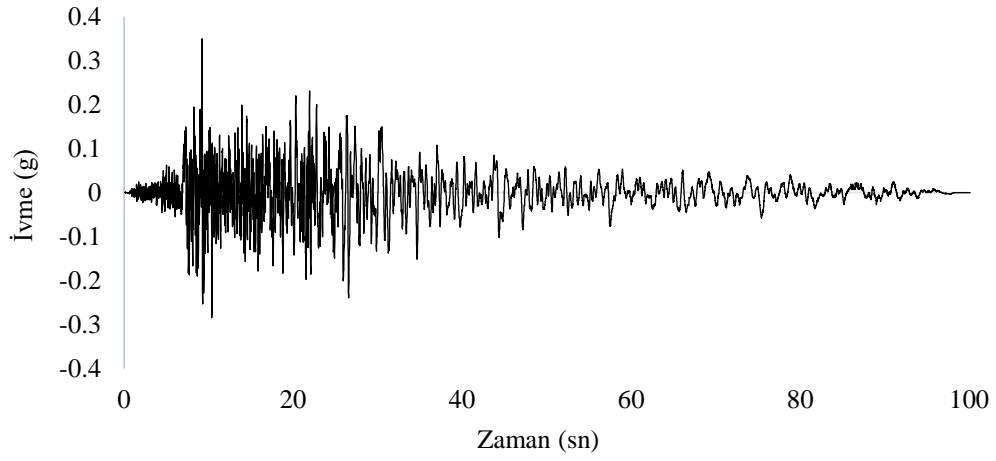
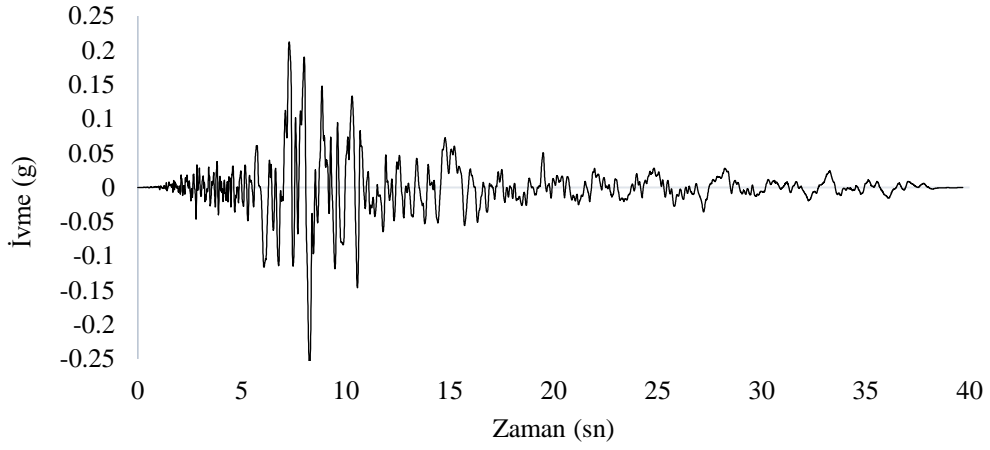
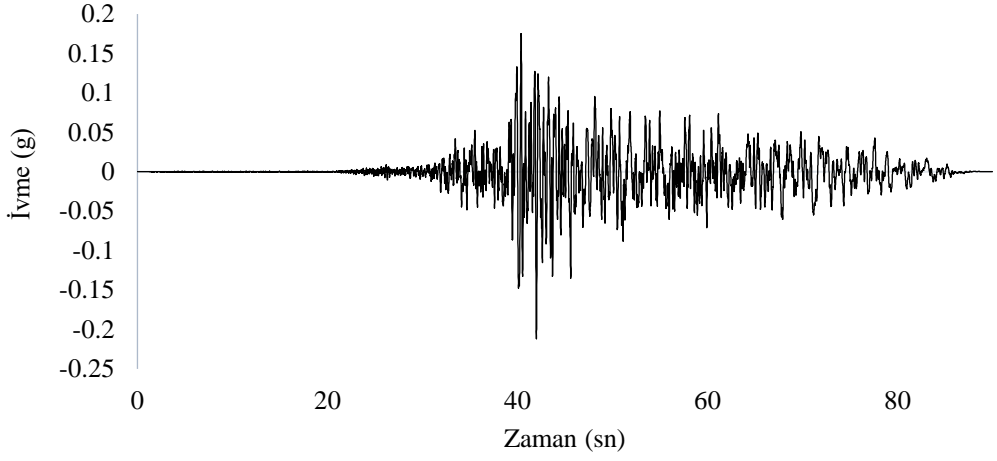
Kayıt No.	Deprem kaydı	Yıl	İstasyon	Magnitüd	Yer ivmesi ¹	Fay uzaklığı (km)
1236	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY088	7,62	0,211g	37
778	Loma Prieta	1989	Hollister	6,93	0,278g	24
169	Imperial Valley#06	1979	Differential Delta	6,53	0,35g	23

1* ölçeklendirmeden önce maksimum yer ivmesi

Bu çalışmada, üç deprem ivme kaydı alınarak Türk Deprem Yönetmeliğinde ifade edilen elastik tasarım ivme spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir. ASCE standardında da belirtildiği gibi, tasarım tepki spektrumu 1,5 ile çarpılmıştır. Standarda göre analizlerde kullanılan spektrum, belli bir aralıkta artan tasarım spektrumdan daha yüksek bir değere sahip olmalıdır. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan spektrumlar farklı değerlerle çarpılarak bu koşulun sağlanmasına dikkat edilmiştir. Şekil 2.21’de hedef veya tasarım spektrumu ve kullanılan yer ivmelerine ait spektrumlar ve ortalamaları ölçeklendirme yapılarak sunulmuştur. Şekil 2.22’de, analizde kullanılan depreminin kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Seçilen yer hareketi kayıtlarının ivme spektrumları (üst yapının sönümü oranı %5 olarak alınmıştır)



Şekil 2.22. Analizde kullanılan ivme kayıtları, a) Chi-Chi, Taiwan, b) Loma Prieta, c) Imperial Valley

2.3.4. Viskoelastik Malzeme Tanımlaması ve Doğrulaması

2.3.4.1. Viskoelastik Malzeme

Çoğu katı madde, küçük şekil değiştirmeler için Hooke'un doğrusal elastisite yasası ile açıklanmaktadır. Bu yasada, gerilme (σ), şekil değiştirme (ϵ) ile orantılıdır. Hooke yasası aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\sigma = E \epsilon \quad (2.7)$$

Burada, E, Young Modülüdür.

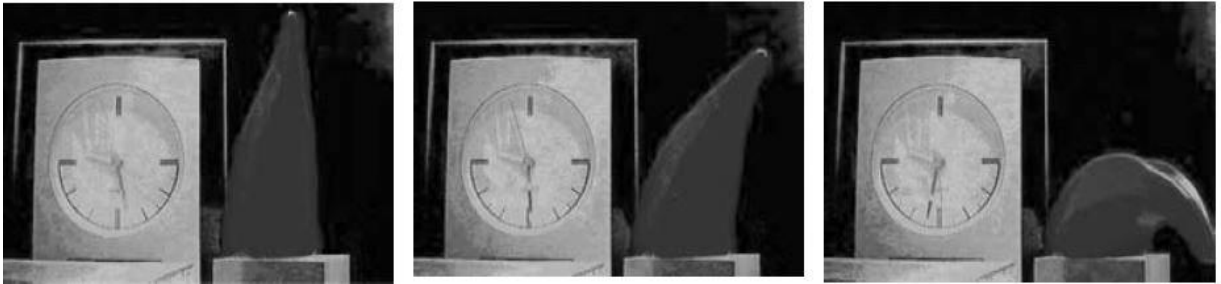
Hooke'un elastik malzemeler yasası aynı zamanda (J) uyumluluğu açısından da Eşitlik 2.8'deki gibi yazılabilir.

$$\epsilon = J \sigma \quad (2.8)$$

Sonuç olarak, elastik uyum, J; E modülünün tersidir (Eşitlik 2.9).

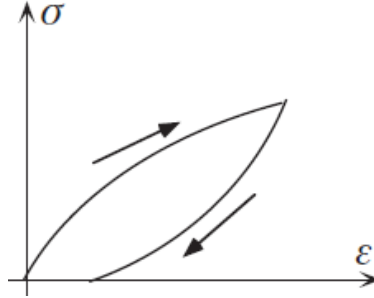
$$J = \frac{1}{E} \quad (2.9)$$

Gerçekte, tüm materyaller hem viskoz benzeri hem de elastik özellikler sergileyerek Hooke yasasından çeşitli şekillerde saparlar. Viskoelastik materyaller, gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkinin zamana bağlı olduğu malzemelerdir (Şekil 2.23) (Lakes, 2009; Ferry, 1980).



Şekil 2.23. Viskoelastik bir piramidin zamanla sarkması (soldaki saat) (Lakes, 2009).

Lineer viskoelastik (LVE) malzeme için sabit gerilme hızında deformasyon ve ardından boşaltma için gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Lineer viskoelastik malzeme için sabit gerilme hızında deformasyon ve ardından boşaltma için gerilme-şekil değiştirme grafiği (Lakes, 2009).

Viskoelastik malzemenin davranışı zamana bağlı olduğu gibi sıcaklığa da bağlıdır. Aslında tüm malzemeler bir miktar viskoelastik davranış sergilerler. Örneğin, oda sıcaklığında ve küçük gerilmelerde, çelik veya alüminyum gibi metallerin davranışı, doğrusal elastik malzemelerin davranışından fazla sapmaz. Ancak, yüksek sıcaklıkta büyük viskoelastik etkiler gösterirler. Bazı uygulamalarda, küçük bir viskoelastik yanıt bile önemli olabilir.

2.3.2.2. Agrega-Bitüm Karışımının Viskoelastik Davranışı

Asfalt malzemelerin, karmaşık fiziksel yapıları ve bunlara karşılık gelen karmaşık davranışları nedeniyle, mühendislik modellemesi zordur. Asfaltik malzemelerin hem yükleme hızına hem de sıcaklığa bağlı olduğu ve viskoelastik davranış sergilediği tespit edilmiştir (Collop vd. 2003; Lakes, 2009). Asfalt betonu, bitüm ve agregadan oluşan karma bir malzemedir ve bağlayıcı kısmı olan bitüm, viskoelastik davranış sergiler (Lakes vd., 2002).

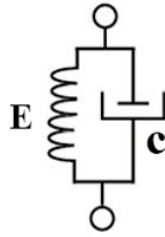
Bitümün mekanik özellikleri, asfaltik karışımların deformasyon davranışında önemli bir rol oynayabilir. Bitüm viskoelastik bir malzemedir ve stres altındaki deformasyonu sıcaklığa, şekil değiştirme seviyesine ve yükleme süresine bağlıdır. Bitümler, yüksek sıcaklıklarda ve/veya uzun yükleme sürelerinde viskoz bir sıvı gibi davranırken düşük

sıcaklıklarda ve/veya kısa yükleme sürelerinde elastik bir katı gibi davranırlar. Ara sıcaklıklarda ve yükleme sürelerindeki davranışları ise viskoelastiktir.

2.3.4.3. Agrega-Bitüm Karışımının Mekanik Modellemesi

Yaylara ve sönümleyicilere dayanan mekanik modeller, viskoelastik malzemeleri modellemek için kullanılmaktadır. Mekanik modeller tamamen elastik elemanlardan (yaylar) ve tamamen viskoz elemanlardan (sönümleyici) oluşmaktadır. Tamamen elastik yayların sapması, strese ve rijitliğine bağlı olup zamandan bağımsızdır. Viskoz sönümleyicilerin sapması ise gerilmeye, viskoziteye ve zamana bağlıdır. Bu elemanlar, seri (Maxwell modeli), paralel (Voigt elemanı) veya her ikisinin çeşitli kombinasyonları halinde birleştirilerek materyalden istenen elastik, viskoelastik ve viskoplastik şekil değiştirmeleri simüle ederler (Xu ve Solaimanian, 2009; Lakes, 2009; Gluck vd., 1996).

ASCE 41-13 (2014)'e göre viskoelastik izolatörlerin modellenmesi için Kelvin modeli olarak da adlandırılan Voigt modeli kullanılmaktadır. Bu modelde, yay ve sönümleyici paralel olarak konumlandırıldığı için ikisi de aynı deformasyona maruz kalırlar ve toplam gerilme, elementteki gerilmenin toplamı olur. Şekil 2.25'te yay ve sönümleyicinin paralel olarak oluşturduğu Kelvin modeli gösterilmektedir.

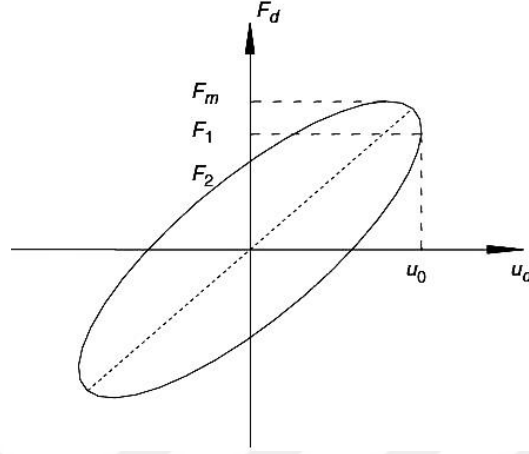


Şekil 2.25. Kelvin modeli (yay-sönümleyici), (E) yayın rijitliğini ve (C) sönümleyicinin viskozitesini temsil eder (Lakes, 2009).

2.3.4.4. Viskoelastik Malzemenin Çevrimsel Yük Altındaki Davranışı

Doğrusal viskoelastik bir malzemenin çevrimsel yüklenmesinde kuvvet-yer değiştirme arasındaki ilişki Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Şekildeki eğri, histerezis eğrisi olarak adlandırılmaktadır. Histerezis, genel olarak etki ve tepki arasındaki gecikmeyi ifade

eder (Lakes, 2009). Her bir çevrimde, bir alan kaplar ki bu alan da çevrim başına malzemede dağıtılan hacim başına enerjiyi temsil eder.



Şekil 2.26. Doğrusal viskoelastik bir malzemenin çevrimsel yüklenmesinde kuvvet-yer değiştirme arasındaki ilişki (Xu vd., 2010)

Burada, (u_0), maksimum yer değiştirme, (F_1) maksimum yer değiştirmeye karşılık gelen kuvvet, (F_m) maksimum kuvvet ve (F_2), $t=0$ saniyeye denk gelen kuvvettir. Malzemenin rijitliği, kuvvetin yer değiştirmeye bölünmesiyle elde edilir. Viskoelastik malzeme için depolama rijitliği (k_1) ve kayıp rijitliği (k_2) olmak üzere iki farklı rijitlik tanımlanmaktadır (ASCE 41-13, 2014). Eşitlik 2.10 ve 2.11'de viskoelastik malzemenin rijitlikleri ifade edilmiştir.

$$K_1 = F_1/u_0 \quad (2.10)$$

$$K_2 = F_2/u_0 \quad (2.11)$$

Benzer şekilde, çevrimsel yükleme altında viskoelastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi çizilirse burada da iki farklı elastisite modülü elde edilir. Bunlardan malzemenin elastik kısmını temsil eden modül depolama modülü (E_1), malzemenin viskoz kısmını temsil eden modül de kayıp modülü (E_2) olarak adlandırılır (Xu ve Solaimanian, 2009). Ayrıca, malzemenin kayıp katsayısı (η_v) Eşitlik 2.12'den elde edilir.

$$\eta_v = F_2/F_1 \quad (2.12)$$

2.3.4.5. İzolasyon Malzemesinin Modellemesi

Önceki bölümde bahsedildiği üzere viskoelastik malzemenin modellenmesi için Kelvin modeli kullanılmaktadır. Bu modelde bir yay ve sönümleyici paralel olarak modellenmekte olup malzemedeki kuvvet miktarı aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir.

$$F = c\dot{u} + ku \quad (2.13)$$

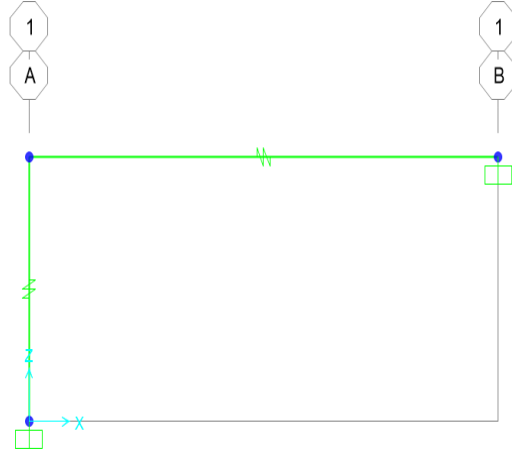
Burada, (F), malzemeye uygulanan kuvveti, (c) ve (k) sırayla malzemenin sönümü ve rijitliği, (u) ve (\dot{u}) uygulanan kuvvetten dolayı hareket ve hız miktarını temsil etmektedir. Ayrıca, (k) değerinin miktarı Eşitlik 2.10'dan, (c) değeri ise aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir (ASCE 41-13, 2014):

$$c = W_D / (\pi \omega u_{ave}^2) \quad (2.14)$$

Burada, (W_D), malzemenin kuvvet-yer değiştirme tepkisinin tam bir çevrim ile çevrelenen alanı ifade eder. (ω), açısal frekans olup $2\pi f$ 'e eşittir. (u_{ave}) ise yer değiştirmenin ortalaması olup $u_{ave} = (u_{maks} + u_{min}) / 2$ olarak ifade edilir.

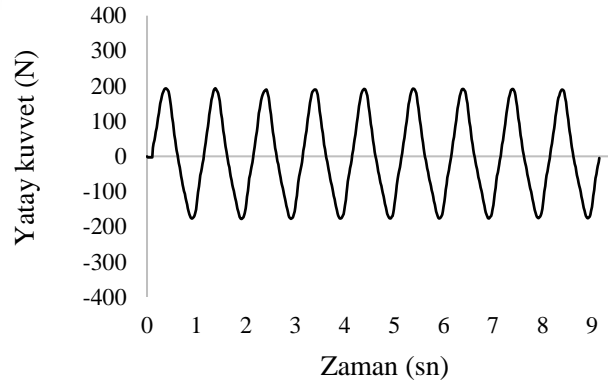
Deneysel çalışmalarda, basit kesme deney cihazı kullanılarak asfalt betonuna çevrimsel yükler uygulanmıştır. Uygulanan yükler ve elde edilen histerezis eğrileri kullanarak farklı deney koşullarında asfalt betonu için farklı (c) ve (k) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler ve Kelvin modeli kullanarak asfaltın SAP programında modellenmesi yapılmıştır.

Şekil 2.27'de görüldüğü üzere, SAP programında asfalt betonu, link elemanı ile modellenmiştir. Basit kesme deneyinde yük yatay olarak uygulandığından elde edilen (c) ve (k) değerleri bu linke yatay olarak uygulanmıştır. Başka bir deyişle, yayın yatay hareketi serbest bırakılarak rijitlik ve sönüm değerleri yatay yönde uygulanmıştır.



Şekil 2.27. SAP2000 programında agrega-modifiye bitüm karışımının, link elemanı ile modellenmesi

Basit kesme deneyinde uygulanan çevrimsel yüklemenin ilk saniyeleri Şekil 2.28’de gösterilmektedir. Malzeme modellemesinde link elemanları oluşturulduktan sonra elemana çevrimsel yükleme uygulanarak model çözülmüştür. Çözümüne ait sonuçlar ve karşılaştırmalar bulgular bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.28. Basit kesme deneyinde uygulanan çevrimsel yükleme

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

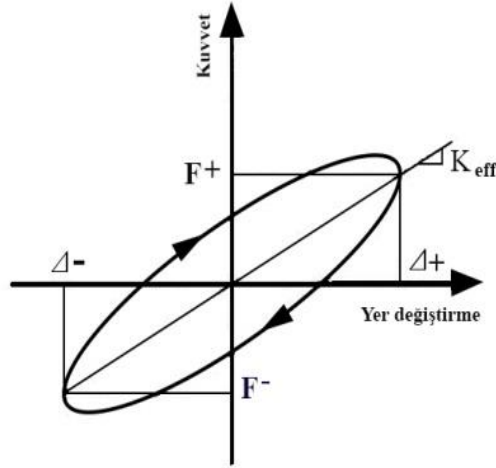
3.1. Giriş

Bu bölümde, deneysel bulgular ve irdellemeler yapılarak nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, izolatör malzemesi olan agrega-modifiye bitüm karışımı numunelerinin çevrimsel yük altındaki davranışları incelenmiştir. Bu numunelerin dinamik davranışlarının tespit edilmesi için, çevrimsel basit kesme deneyi yapılarak sönüm oranı ve kayma modülü parametreleri incelenmiştir.

3.1.1. Sönüm Oranı ve Kayma Modülü

Kayma modülü ve sönüm oranı, depremler, okyanus dalgaları veya patlamalar gibi dinamik veya çevrimsel yükler altında hem doğal hem de mühendislik yapılarının dinamik ve performans analizinde kullanılan önemli parametrelerdir (ASTM D3999, 2013). Her çevrimsel yükleme için, gerilme-şekil değiştirme eğrisi çizilebilir. Yükleme sırasında yapılan iş, boşaltma sırasında tamamen geri dönüştürülmez ve aralarındaki fark ısı şeklinde kaybolur. Histerezis kelimesi, çevrimsel yükler altında yükleme ve boşaltma eğrisindeki enerji kaybını ifade eder (Buckle ve Mayes, 1990). Histerezis eğrisi, her bir çevrim için kayma modülü (G) ve sönüm oranının (ξ) hesaplanmasında kullanılmaktadır. Genel olarak, malzemelerde çevrimsel yükleme altında maksimum yer değiştirme, maksimum kuvvet uygulandığında elde edilir. Histerezis eğrisinde maksimum yer değiştirme ve maksimum kuvvet bir noktada oluşur. Bu nokta kullanılarak malzemenin dinamik parametreleri elde edilir. Ancak, viskoelastik malzemenin çevrimsel yük altındaki davranışı farklılık göstermektedir.

ASCE 41-13 (2014)'te viskoelastik malzemenin çevrimsel yük altındaki davranışı Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, bu eğriye göre maksimum yer değiştirmeye karşı gelen kuvvet, maksimum kuvvetten daha azdır.



Şekil 3.1. Viskoelastik malzeme için çevrimsel yük altında kuvvet-yer değiştirme eğrisi (ASCE 41-13, 2014).

Yukarıdaki eğriyi kullanarak, viskoelastik malzeme için rijitlik (k) aşağıdaki eşitlikle elde edilir.

$$K = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte, Δ^+ ve Δ^- , maksimum (pozitif) ve minimum (negatif) yer değiştirme, F^+ ve F^- maksimum ve minimum yer değiştirmeye karşılık gelen kuvvet değeridir.

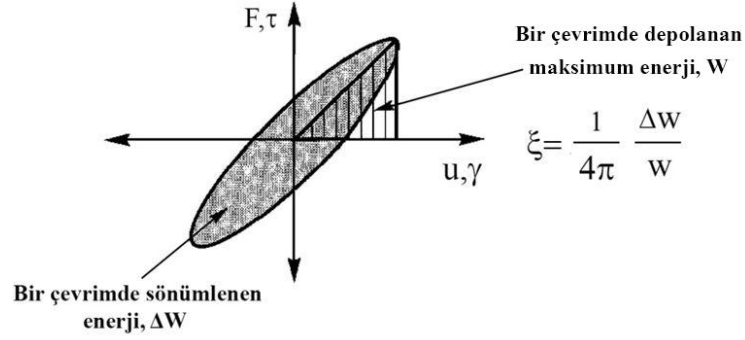
Kayma modülü (G), elemanın kayma rijitliğini temsil eder ve Eşitlik 3.2'den hesaplanır (ASCE 41-13, 2014).

$$G = k \frac{t}{A_s} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte, (k) malzemenin rijitliği, (t) numunenin kalınlığı ve (A_s) numunenin alanıdır.

Kuvvet-yer değiştirme (veya muadili olarak gerilme-şekil değiştirme) eğrisinin içinde bulunan alan (ΔW), malzeme tarafından sönmölen enerji miktarına karşılık gelmektedir. Her çevrimde depolanan maksimum potansiyel enerji üçgen alanla (W) temsil edilmektedir. Sönüm oranı (ξ), Eşitlik 3.3 ile hesaplanır (Kramer, 1996; Ossa ve Romo, 2011) (Şekil 3.2).

$$\xi = \frac{\Delta W}{4\pi W} * 100 \quad (3.3)$$



Şekil 3.2. Histerezis eğrisi ile sönüm oranı arasındaki ilişki (Kramer, 1996).

Viskoelastik malzemenin farklı davranışlarından dolayı burada dikkat edilmesi gereken husus, üçgen alanının seçimidir. Anlatıldığı gibi, bu alan, maksimum potansiyel enerjiyi temsil ettiğinden, üçgen alan seçilirken en büyük değer elde edilecek şekilde seçilmelidir. Üçgen alan daha büyük seçildiğinde sönüm oranının değeri en az elde edilmiş olacağından güvenli tarafta kalınmış olunacaktır.

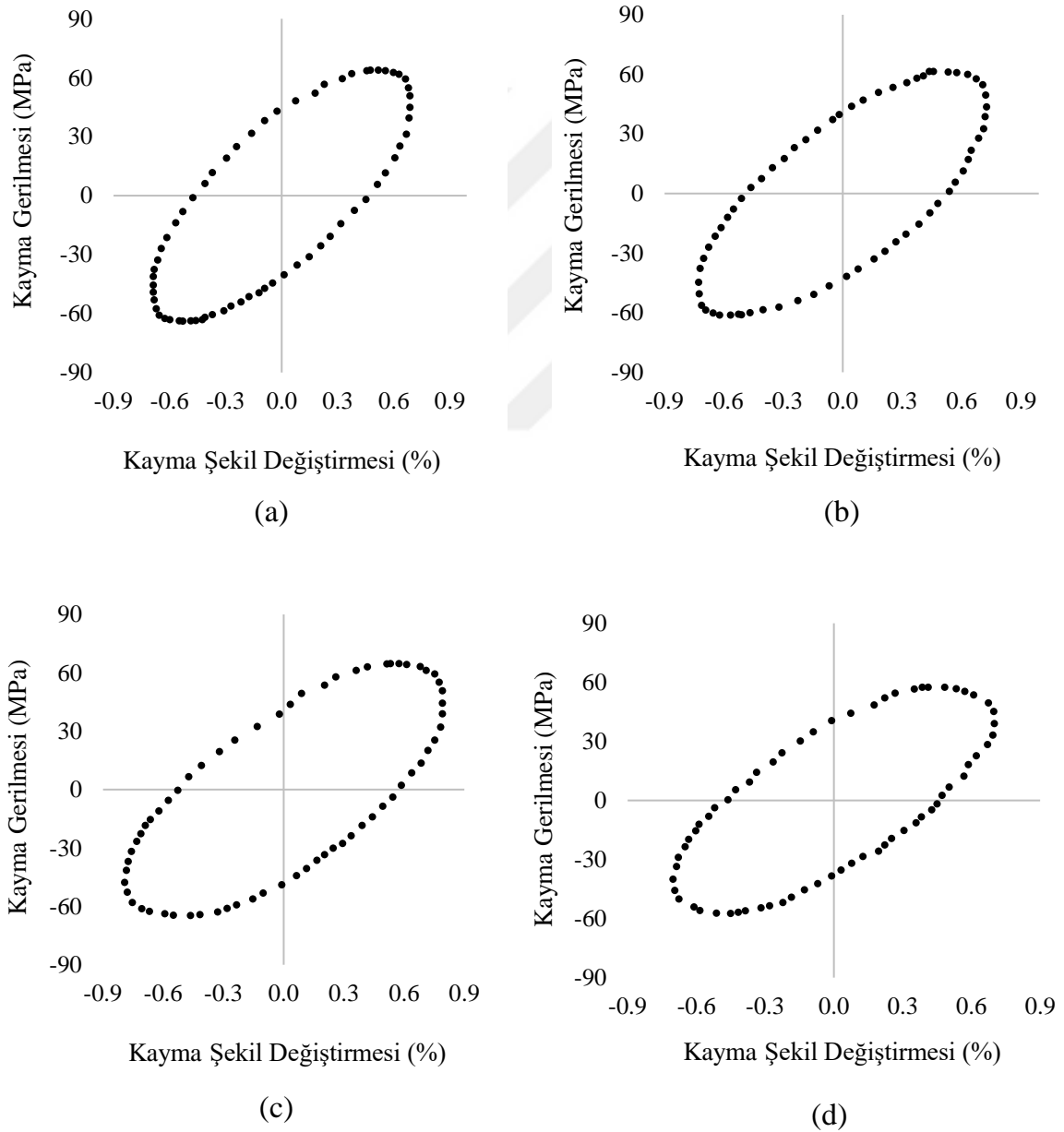
3.2. Deneysel Bulgular

3.2.1. Çevrimsel Basit Kesme Deney Sonuçları

Bu çalışmada, çivimsel basit kesme deneyi kullanılarak izolatör malzemesi olarak agrega-modifiye bitüm karışımının dinamik özellikleri (kayma modülü ve sönüm oranı) incelenmiştir. Numuneler, kumun kuru ağırlığının dört farklı bitüm içeriklerinde (%6, %8, %10, %12) hazırlanmışlardır. Numune yapımı safhasında, saf bitüm, SBS ve lif ile modifiye edilmiş bitüm kullanılmıştır. Çivimsel basit kesme deneyinde iki farklı düşey basınç (100 kPa, 200 kPa) ve iki farklı çivimsel gerilme oranı aralığı uygulanmıştır. Tüm numuneler oda sıcaklığında ve 200 çevrim yüklemeye tabi tutulmuştur. Kayma yüklemesi 1 Hz frekansında tekrarlanmıştır. Sonuçlar, bitüm özelliklerine göre sınıflandırılarak sunulmuştur. Burada sunulan her bir sonuç, üç tane numunedan elde edilen değerlerin oranlamasıyla elde edilmiştir. Her bir sınıf için dinamik özellikler incelendikten sonra tüm bitüm sınıfları karşılaştırılmıştır.

3.2.2. İzolatör Malzemesi Olarak Saf Bitüm ile Elde Edilmiş Malzemeye Ait Sonuçlar

Modifiye edilmiş numunelerin dinamik özelliklerinin saf hali ile karşılaştırılması için, öncelikle saf bitüm ile elde edilmiş numunelerin sonuçları verilmiştir. Şekil 3.3'te farklı bitüm katkı oranlarındaki numunelerin kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi ilişkileri (histerezis eğrileri) gösterilmektedir. Burada, örnek olarak, sadece düşey basınç 200 kPa ve çevrimsel gerilme oranı 0,6-1,0 aralığında olan deneylerin sonuçları görülmektedir.



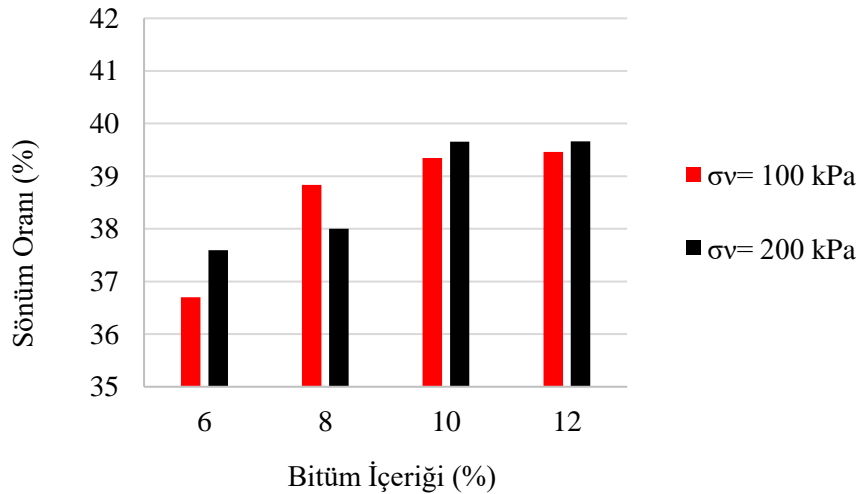
Şekil 3.3. Saf bitüm ile yapılan izolatör malzemeye ait histerezis eğrileri, a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12

3.2.2.1. Bitüm İçeriğinin Dinamik Özelliklere Etkisi

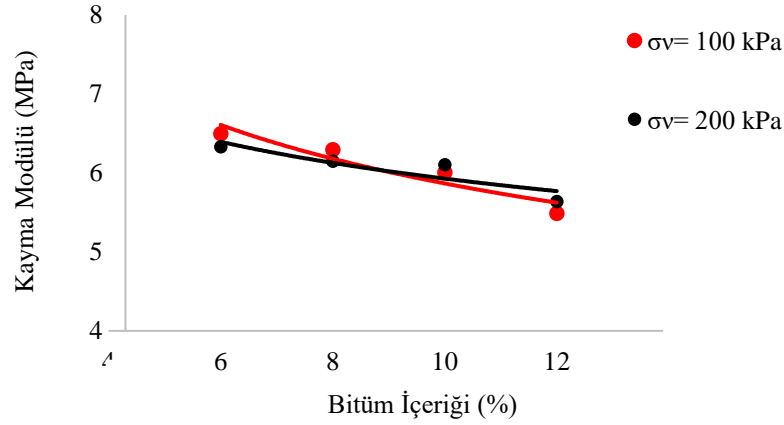
Saf bitüm ile elde edilmiş numuneler için, bitüm içeriğine bağlı olarak elde edilen sönüm oranları ve kayma modülleri grafik olarak Şekil 3.4 ve 3.5'te sunulmuştur. Burada bulunan sonuçlar, CSR aralığı 0,6-1,0 olan deneylere aittir.

Akhtarpour ve Khodai (2013), asfalt betonun dinamik özelliklerini dört farklı bitüm içeriği ve dinamik üç eksenli cihazını kullanarak incelemiştir. Yaptıkları bu çalışmada, bitüm içeriği arttıkça kayma modülünün düştüğünü gözlemlemiştir. Kuvat ve Sadoglu (2020) da benzer bir çalışma yaparak izolator malzemesi olarak kum-bitüm karışımının sönüm oranını üç eksenli cihazda incelemişler ve bitüm içeriğinin artışıyla birlikte sönüm oranının arttığını gözlemlemiştir.

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, bitüm içeriğinin artışıyla birlikte sönüm oranı artmakta ve 36,7 ile 39,7 arasında bir değişim göstermektedir. %10 ve %12 bitüm içeriklerinde sönüm oranı hemen hemen aynı kalmakta, dolayısıyla saf bitüm için %10 bitüm içeriğinden sonra bitüm içeriğindeki artışın, sönüm oranında etkisinin olmadığı gözlenmektedir. Bunun yanında, Şekil 3.5'de görüldüğü üzere, artan bitüm içeriği kayma modülünde azalmaya sebep olmaktadır. Maksimum kayma modülü %6 bitüm içeriğine ve 100 kPa düşey basınca aittir ve değeri 6,5 MPa'dır. Bitüm içeriği arttıkça kayma modülü 5,49 MPa'la kadar düşmektedir.



Şekil 3.4. Bitüm içeriğinin sönüm oranına etkisi

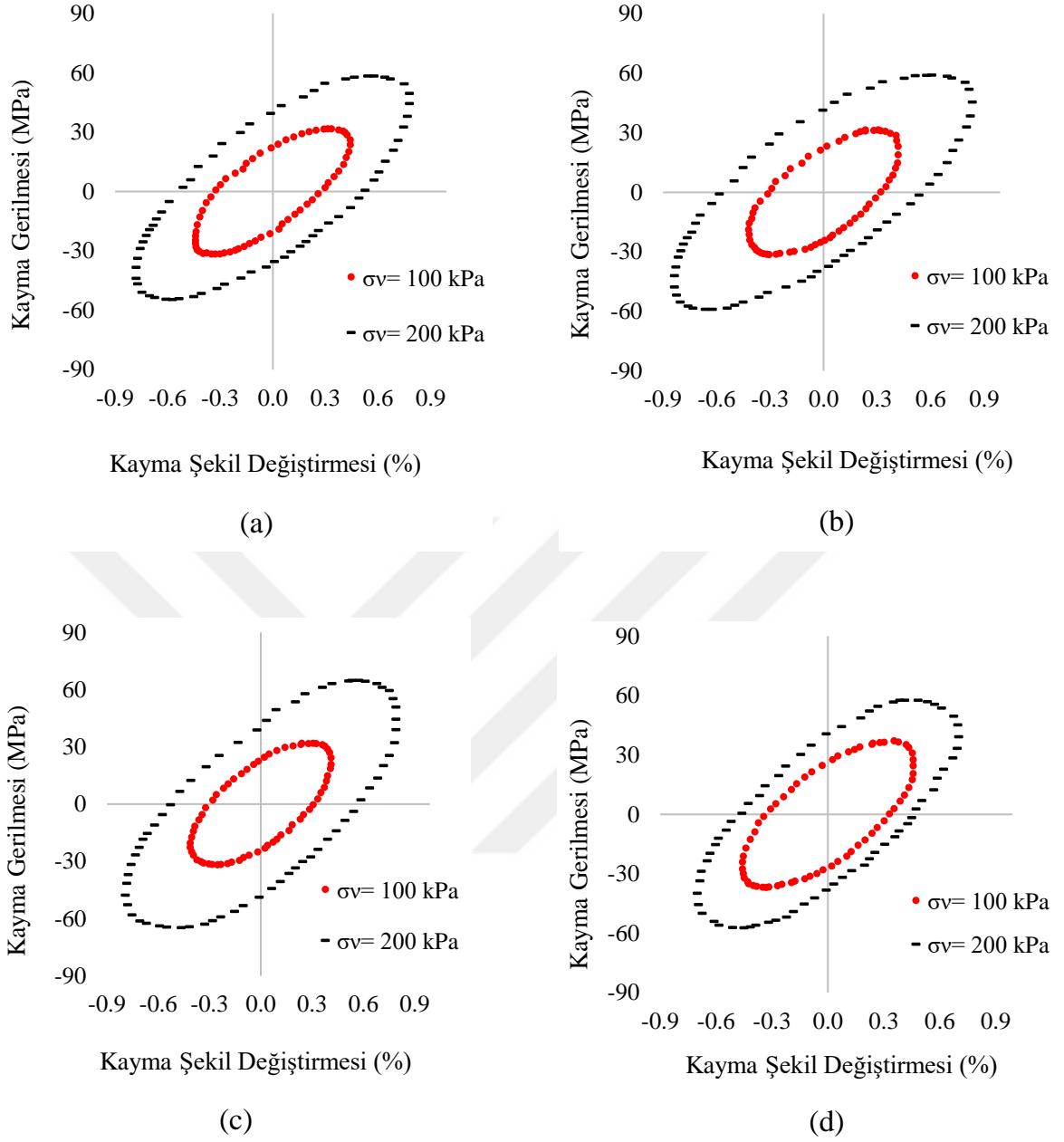


Şekil 3.5. Bitüm içeriğinin dinamik kayma modülüne etkisi

3.2.2.2. Düşey Basıncın Dinamik Özelliklere Etkisi

Düşey basıncın dinamik özelliklere etkisi incelendiğinde, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi agrega-modifiye bitüm karışımının lineer viskoelastik davranışından dolayı düşey basıncın kayma modülü üzerinde pek de etkisinin olmadığı görülmektedir. Asfaltın lineer viskoelastik davranışı birçok çalışmada kanıtlanmıştır (Benedetto vd., 2004; Lesueur vd., 1996). Ayrıca, Wang ve Hoeg, (2011) asfalt betonu üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda üç eksenli deney cihazını kullanarak numunelere farklı koşullarda çevrimsel yük uygulamışlardır. Sonuç olarak, tüm deney koşullarında çevrimsel gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin lineere yakın olduğunu elde etmişlerdir.

Düşey basıncın sönüm oranındaki etkisi incelendiğinde ise, aralarında uyumlu bir bağ kurulmadığı gözlemlenmektedir. Şöyle ki, yüksek sönüm oranı bazen 100 kPa düşey basınç uygulandığında elde edilirken bazen de 200 kPa uygulandığında elde edilmiştir. Şekil 3.6'da farklı bitüm katkı oranlarındaki numunelerin her iki uygulanan düşey basınçta ($\sigma_v = 100$ ve 200 kPa), histerezis eğrileri karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde histerezis eğrilerine dikkat edilirse, eğimleri dolayısıyla kayma modülleri her iki düşey basınçta çok yakın bir değerlerdir.

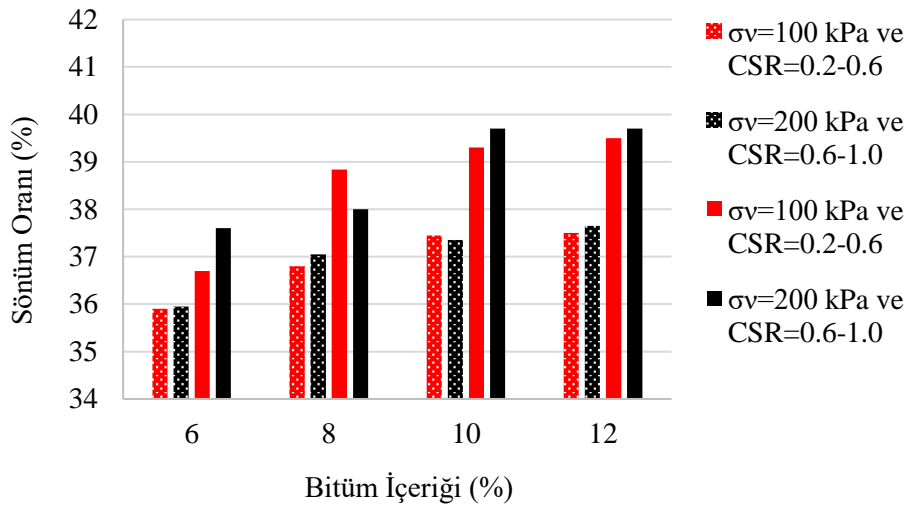


Şekil 3.6. Saf bitüm ile yapılan izolatör malzemesi için iki farklı düşey basınçta ki histerezis eğrilerinin karşılaştırılması, a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12

3.2.2.3. CSR Aralığının Dinamik Özelliklere Etkisi

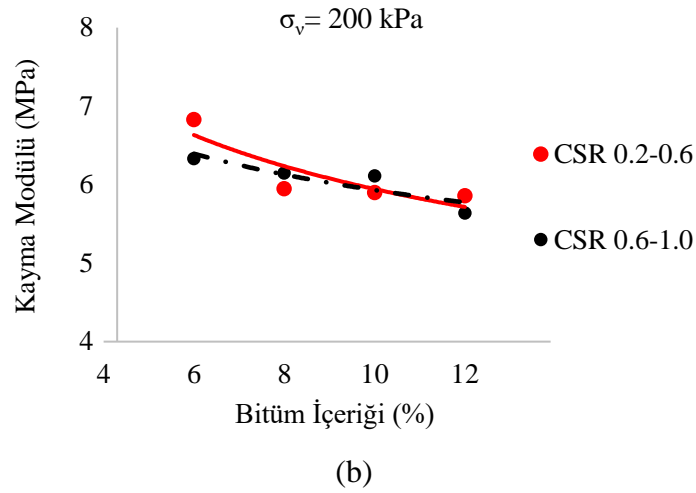
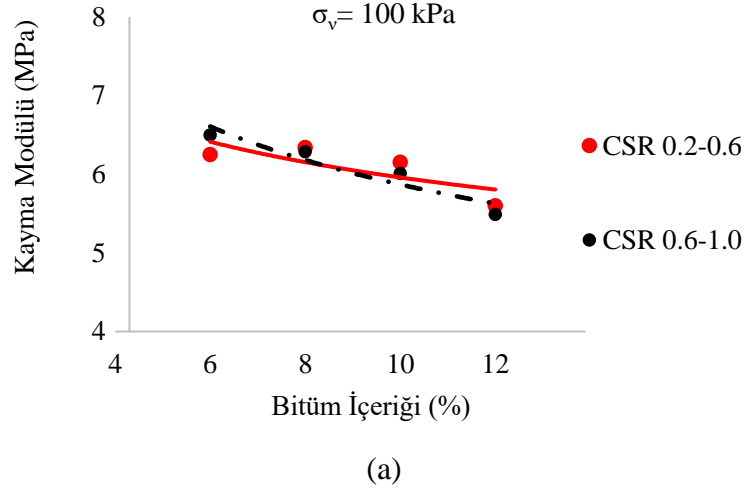
Tüm deneyler iki farklı CSR aralığında (0,2-0,6 ve 0,6-1,0) yapılmıştır. Önceki bölümlerde CSR 0,6-1,0 aralığındaki deneylere ait sonuçlar gösterilmiştir. Burada 0,2-0,6 aralığının sonuçları verilmiş ve iki aralığa ait sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, CSR değerinin artışıyla birlikte (başka deyişle uygulanan kayma şekil değiştirmesinin genliği arttıkça) sönüm oranı artmaktadır. CSR 0,2-0,6 aralığı için maksimum sönüm oranı 37,7 olarak, %12 bitüm içerikli numune ve 200 kPa düşey basıncında uygulanan deney için elde edilmiştir ki bu değer, CSR 0,6-1,0 aralığında aynı koşullardaki numune için 39,7 olarak elde edilmiştir. Feizi-Khankandi vd. (2008), asfalt betonunun sismik davranışını incelediklerinde, kayma şekil değiştirmenin artışıyla birlikte sönüm oranında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7. İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait sönüm oranı karşılaştırılması

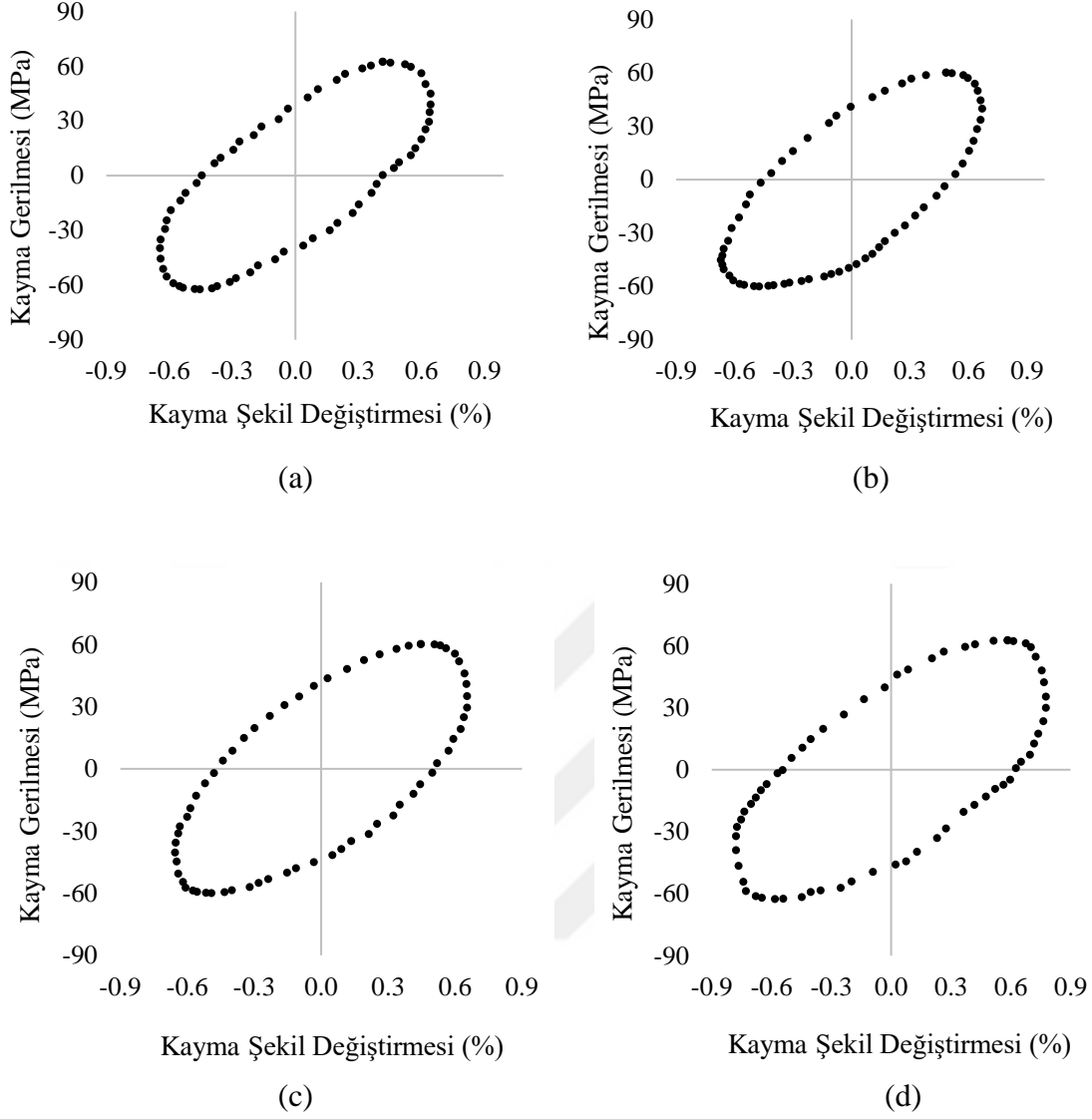
CSR aralığının kayma modülünün üzerindeki etkisi incelendiğinde, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi agrega-saf bitüm karışımının lineer viskoelastik davranışından dolayı CSR aralığının kayma modülü üzerinde pek de etkisinin olmadığı görülmektedir. Başka bir deyişle, histerezis eğrisinde kayma modülünün eğimi sabittir ve gerilmeler ne kadar artarsa belli bir oranda şekil değiştirmelerde de artmaktadır.



Şekil 3.8. İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait kayma modülü karşılaştırılması, a) Düşey basınç $\sigma_v=100$ kPa, b) Düşey basınç $\sigma_v=200$ kPa

3.2.3. İzolatör Malzemesi Olarak SBS ile Modifiye Edilmiş Bitüm ile Elde Edilmiş Malzemeye Ait Sonuçlar

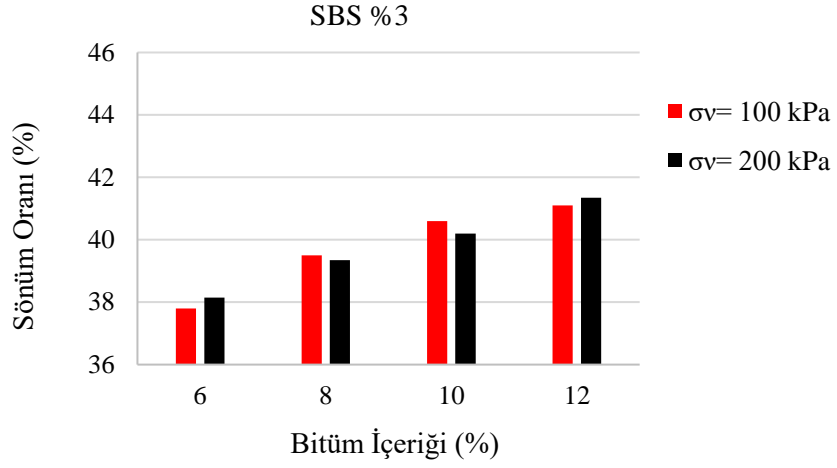
Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, bitüm, üç farklı katkı oranında (%3, %5, %7) SBS polimeri ile modifiye edilmiştir. Şekil 3.9’da farklı bitüm katkı oranlarındaki numunelerin kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirilmesi ilişkileri (histerezis eğrileri) gösterilmektedir. Burada, örnek olarak sadece %5 oranında SBS ile modifiye edilmiş numunelerin sonucu ve uygulanan düşey basınç 200 kPa ve CSR aralığı 0,6-1,0 değerlerinde yapılan deneylerin sonuçları gösterilmektedir. %5 oranında SBS ile modifiye edilmiş numunelerin farklı düşey basıncı ve farklı CSR değer aralığında 200 çevrimine ait histerezis eğrileri Ek-1’de verilmiştir.



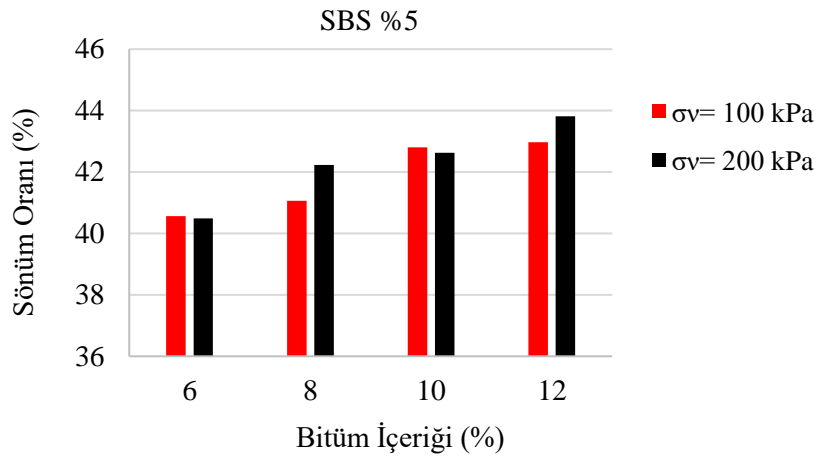
Şekil 3.9. %5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ile elde edilen numunelere ait histerezis eğrileri a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12

3.2.3.1. Bitüm İçeriğinin Dinamik Özelliklere Etkisi

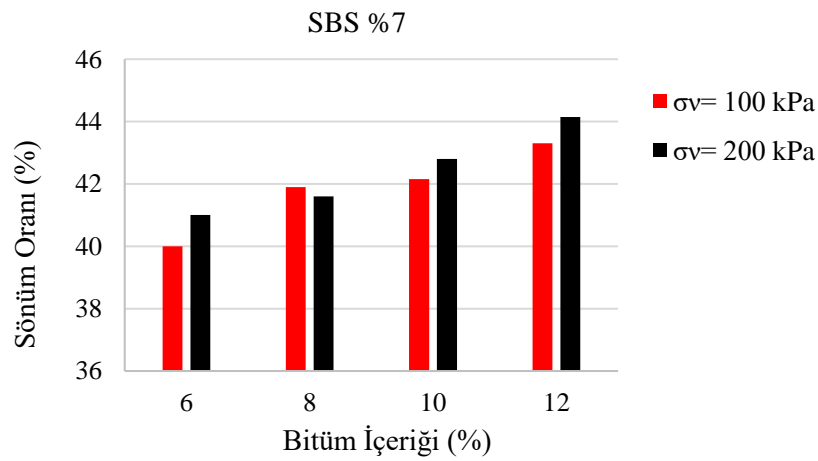
Bitüm içeriğinin sönüm oranına etkisi farklı SBS katkı oranları ile modifiye edilen izolatör malzemeler üzerinde incelenerek Şekil 3.10'da bulunan grafikler çizilmiştir. Burada, saf bitüm ile elde edilmiş numunelerin sonucuna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bitüm içeriğinin artışıyla birlikte sönüm oranında artış da gözlenmektedir. %3 SBS katkılı malzeme için sönüm oranı 37,8 ile 41,4 arasında bir değer, %5 SBS katkılı malzeme için sönüm oranı 40,3 ile 43,8 arasında bir değer ve %7 SBS katkılı malzeme için sönüm oranı 40 ile 44,2 arasında bir değer göstermektedir.



(a)



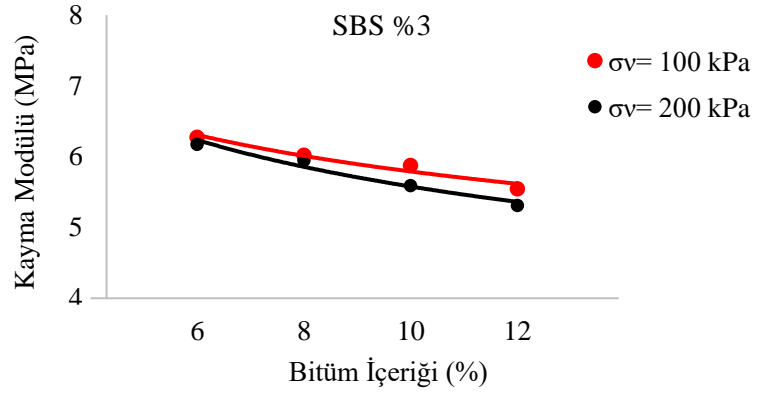
(b)



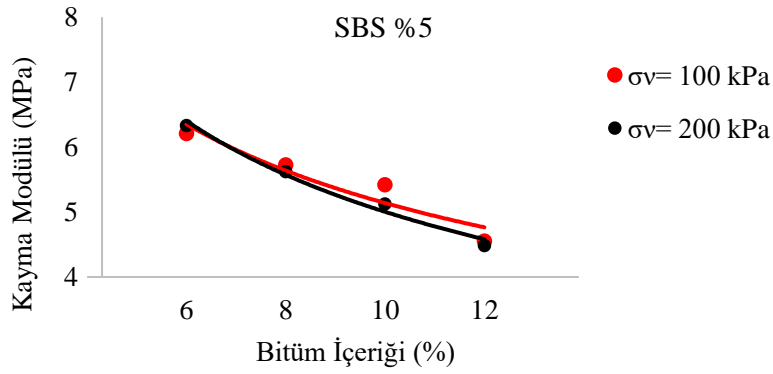
(c)

Şekil 3.10. Bitüm içeriğinin sönüm oranında etkisi, a) SBS %3, b) SBS %5, c) SBS %7

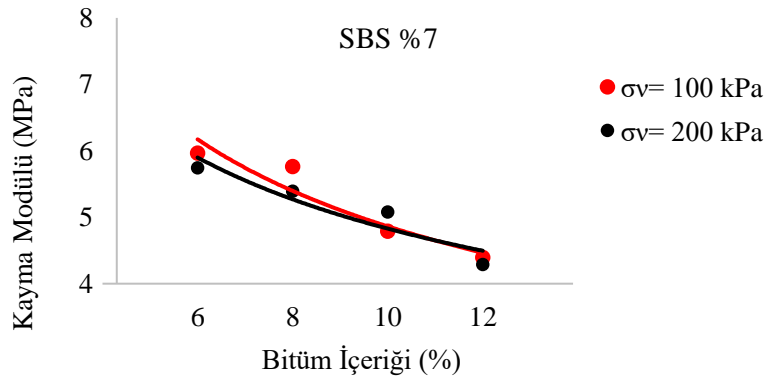
Bitüm içeriğine bağlı olarak elde edilen dinamik kayma modülleri, Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi, artan bitüm içeriği kayma modülünde azalmaya sebep olmaktadır. Maksimum kayma modülü %3 SBS’li malzeme, %6 bitüm içeriğine ve 100 kPa düşey basınca aittir ve değeri 6,28 MPa’dır. Bitüm içeriği arttıkça kayma modülü 5,55 MPa’la kadar düşmektedir.



(a)



(b)



(c)

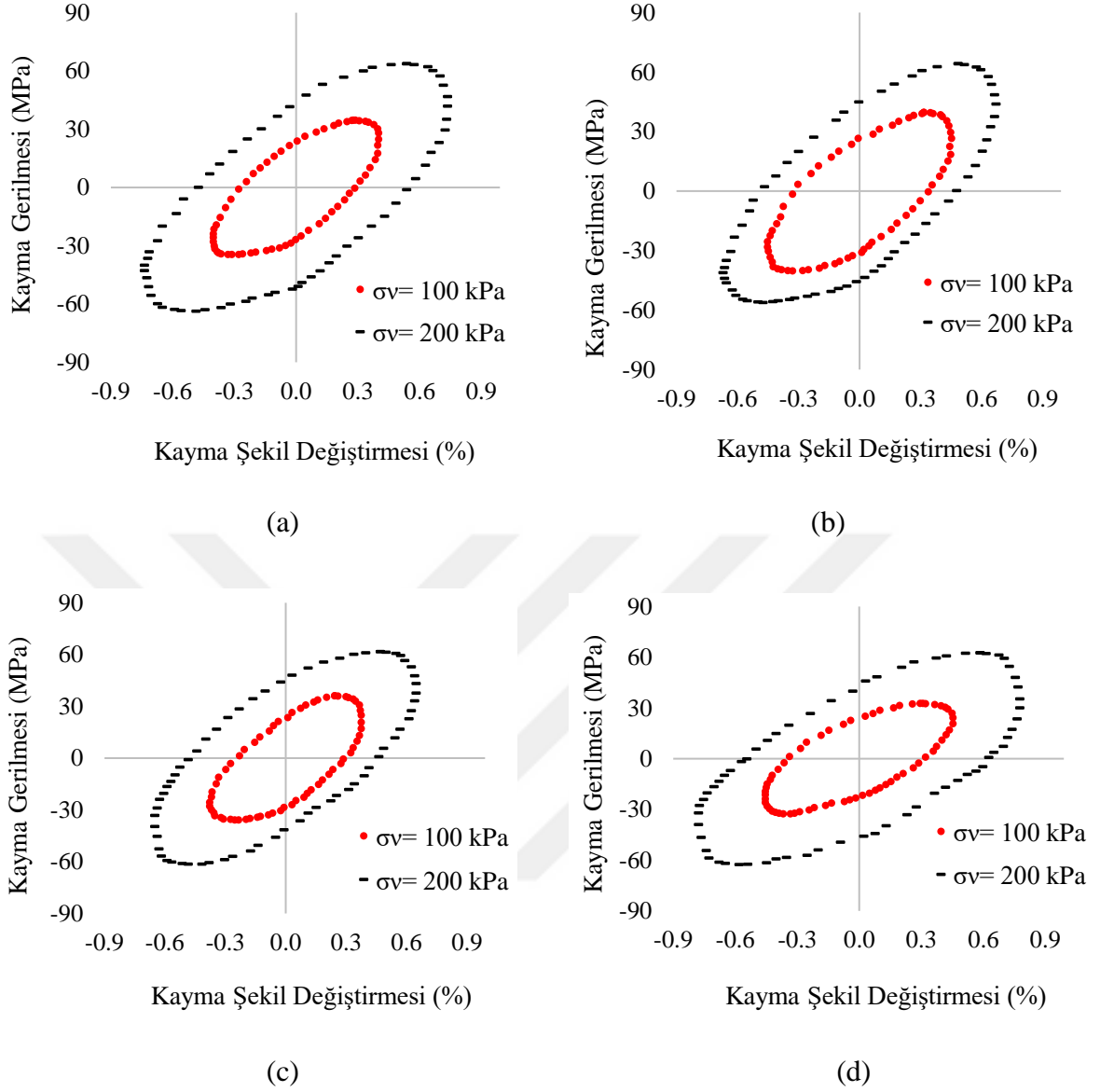
Şekil 3.11. Bitüm içeriğinin dinamik kayma modülünde etkisi,
a) SBS %3, b) SBS %5, c) SBS %7

3.2.3.2. Düşey Basıncın Dinamik Özelliklere Etkisi

SBS ile modifiye edilmiş izolator malzemelerin dinamik davranışında düşey basıncın etkisini incelemiş olduğumuzda Şekil 3.11’de görüldüğü gibi düşey basıncın sönüm oranında pek etkisi olmadığı görünmektedir. Farklı bitüm içeriklerde bazen 100 kPa düzey basınçta bazende 200 kPa düşey basınç maksimum sönüm oranı elde edilmiştir. Ancak tüm SBS katkı oranları için maksimum sönüm oranları bitüm içeriği %12 ve düşey basıncın 200 kPa olan numunelerine aittir.

Düşey basıncın kayma modülü üzerinde etkisi Şekil 3.11’de görülmektedir. Önceki bölümlerde bahsi edildiği gibi asfalt betonu olan izolator malzemesinin lineer viskoelastik davranışından dolayı, farklı düşey basınçlar için malzemenin kayma modülü pek değişmiyor.

Şekil 3.12’de farklı bitüm içeriklerdeki ve %5 SBS ile modifiye edilmiş numunelerin her iki uygulanan düşey basınçta ($\sigma_v=100$ ve 200 kPa), histerezis eğrileri karşılaştırmaktadır. Bu grafiklerde histerezis eğrilerine dikkat edilirse, eğimleri dolayısıyla kayma modülleri her iki düşey basınçta çok yakın bir değerlerdir.

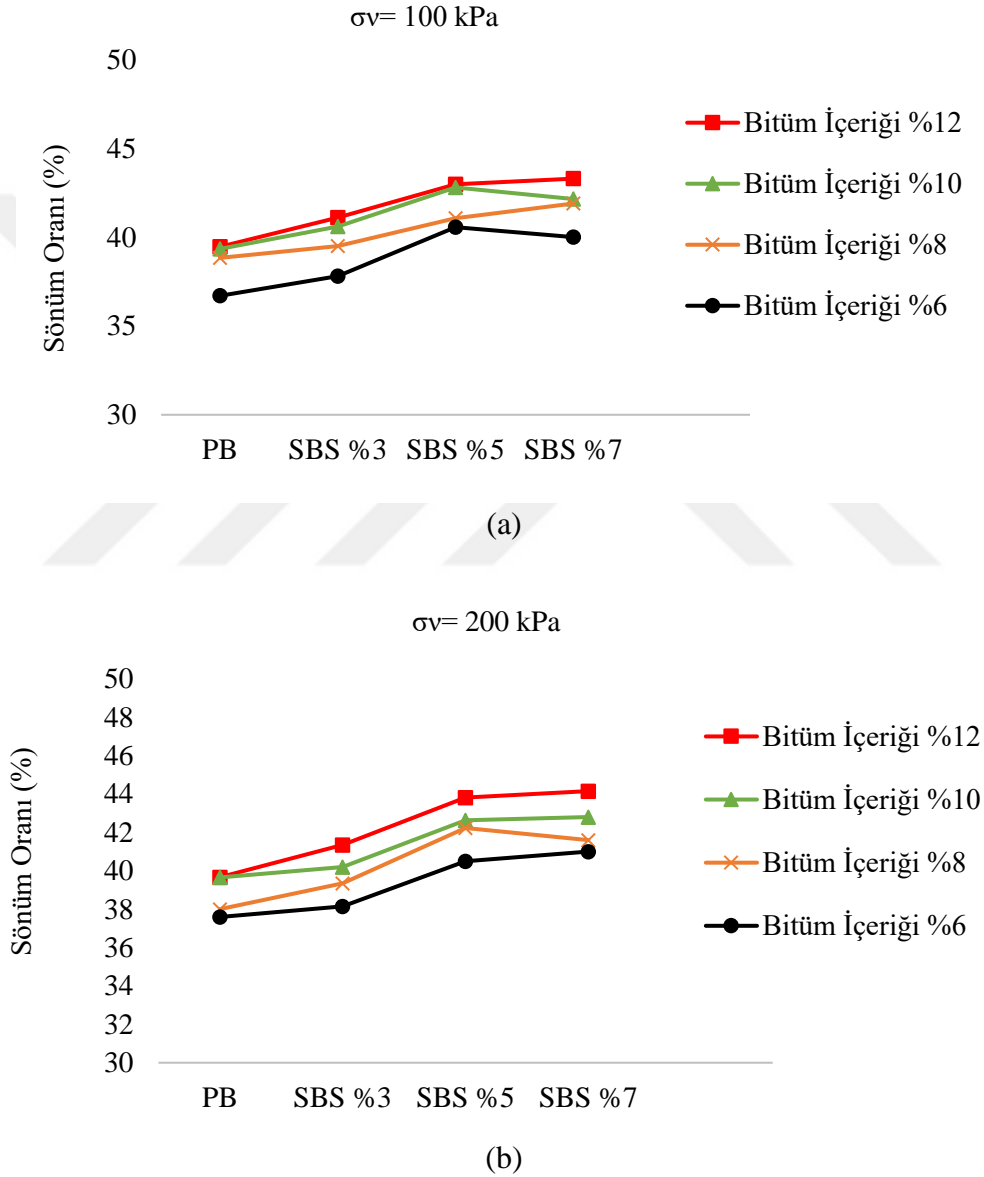


Şekil 3.12. %5 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ile yapılan izolatör malzemesi için iki farklı düşey basınçtaki histerezis eğrilerinin karşılaştırılması, a) Bitüm içeriği %6, b) Bitüm içeriği %8, c) Bitüm içeriği %10, d) Bitüm içeriği %12

3.2.3.3. SBS Katkı Oranının Dinamik Özelliklere Etkisi

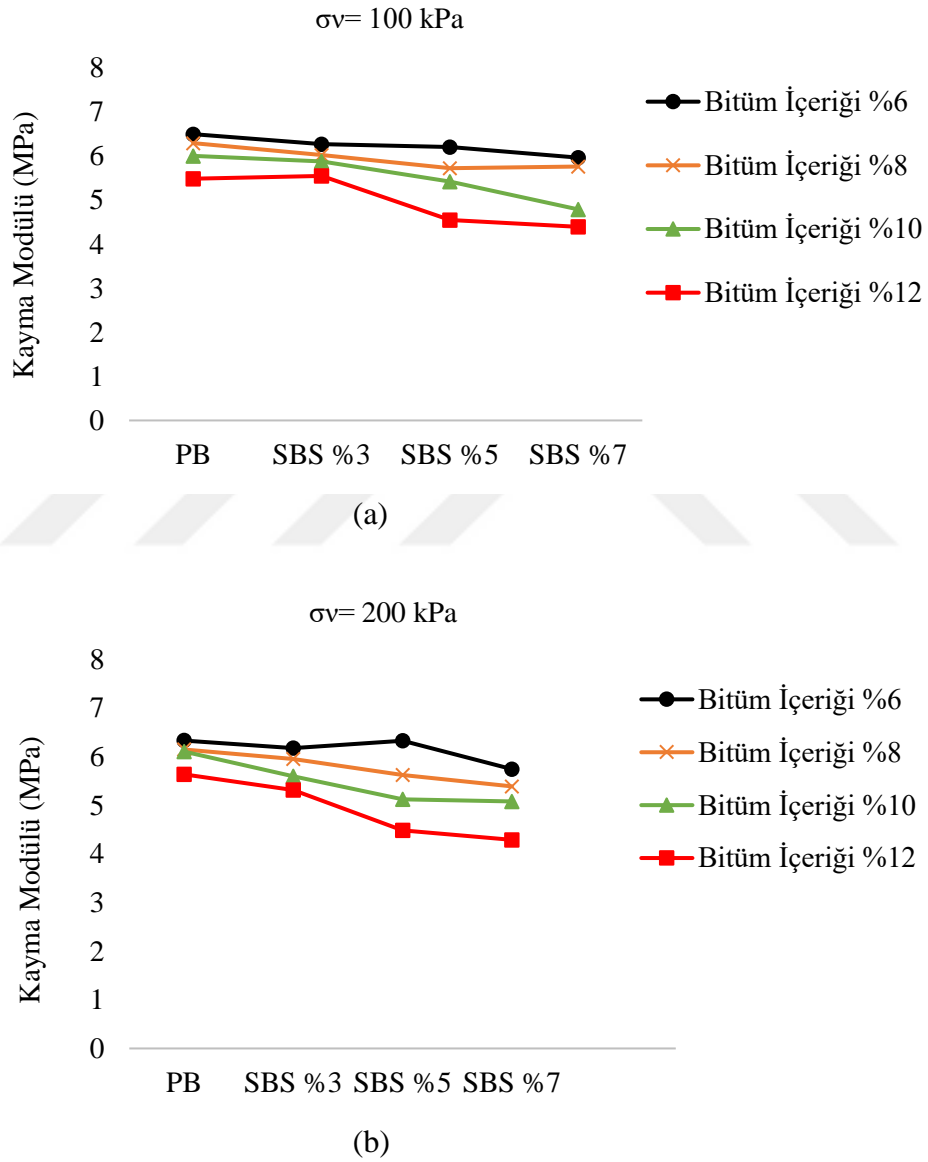
SBS kopolimerinin tanıtıldığı bölümde anlatıldığı gibi, termoplastik elastomerlerde malzemenin elastik davranışı, bir kuvvetin uygulanması ve sonrasında kaldırılması durumunda oluşan şekil değiştirmenin geri gelme özelliğidir. İzolatör malzemesi olan asfalt betonun SBS ile modifiye edilmesinin nedenleri arasında malzemenin elastik, mukavemet ve adezyon davranışının artırılması vardır (Pamplona vd., 2012; Airey, 2003). Bu çalışmadaki sonuçlar incelendiğinde, SBS oranı artışı ile sönüm oranının arttığı ve kayma modülünün ise

azaldığı gözlemlenmiştir. Malzemenin farklı bitüm içeriklerinde, farklı düşey basınçta ve üç farklı SBS katkı oranındaki sönüm oranı değerleri Şekil 3.13'de verilmiştir. Bitüm içeriği %12 ve SBS katkı oranı %5 ve düşey basıncın 100 kPa olduğu deney için sönüm oranı %42,8 olarak elde edilmiştir. SBS oranı %7'ye yükseldiğinde sönüm oranı %43,3 olarak elde edilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi %5 SBS oranından sonra sönüm oranlarında önemli miktarda artış meydana gelmemiştir.



Şekil 3.13. Malzemenin üç farklı SBS katkı oranında ve farklı bitüm içeriklerde sönüm oranı değerleri, a) Düşey basınç $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$, b) Düşey basınç $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$

Malzemenin farklı bitüm içeriklerinde, farklı düşey basınçta ve üç farklı SBS katkı oranındaki kayma modülü değerleri Şekil 3.14'te verilmiştir. Bitüm içeriği %12 ve SBS katkı oranı %5 olan malzeme için kayma modülü 4,55 MPa olarak elde edilmiştir. SBS oranı %7'ye yükseldiğinde kayma modülü 4,4 MPa olarak elde edilmiştir. SBS oranı artışı ile birlikte kayma modülünün azaldığı gözlemlenmiştir. Başka deyişle SBS artışı ile birlikte malzeme daha esnek ve sönümleyici bir davranış göstermektedir.



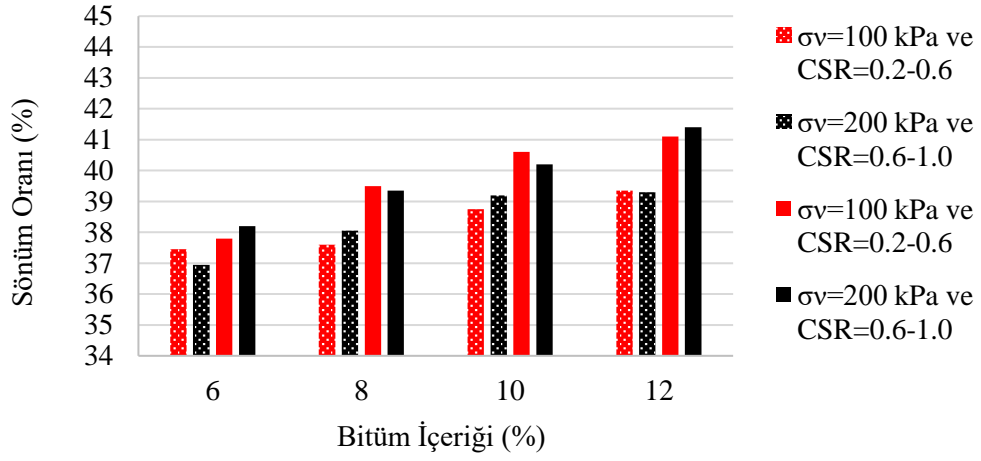
Şekil 3.14. Malzemenin üç farklı SBS katkı oranında ve farklı bitüm içeriklerde kayma modülü değerleri, a) Düşey basınç $\sigma_v=100$ kPa, b) Düşey basınç $\sigma_v=200$ kPa

Airey, (2003) SBS ile bitüm modifikasyonu çalışmasında, düşük SBS katkı oranında (%3) modifiye edilmiş bitümün davranışının saf bitüme yakın olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca, katkı oranının %5-%7 aralığını uygun bulmuştur. Farklı çalışmalarda da SBS katkı oranının %5 ve %6'da bitüm içinde polimer fazının devamlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, sonuçlar karşılaştırıldığında SBS katkı oranının optimum değerinin %5 olduğu belirlenmiştir.

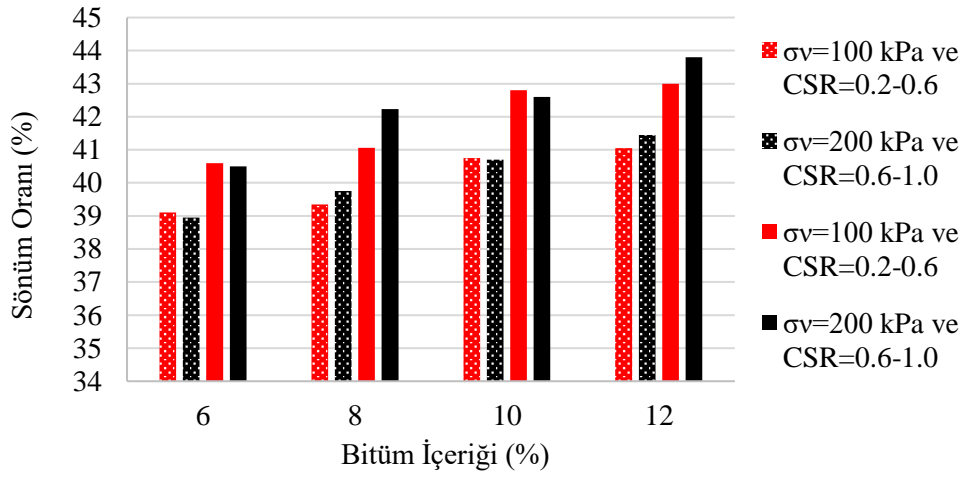
3.2.3.4. CSR Aralığının Dinamik Özelliklere Etkisi

SBS ile modifiye edilmiş izolatör malzemelerin dinamik davranışında CSR aralığının etkisini incelemiş olduğumuzda, Şekil 3.15'de görüldüğü gibi %3 SBS'li malzeme için farklı bitüm içeriklerinde ve 100 kPa düşey basınçtaki numunelerde CSR aralığı 0,2-0,6 iken sönüm oranı %37,5 ile %39,4 aralığındadır. CSR aralığı 0,6-1'e yükseldiğinde, sönüm oranı %37,8 ile %41,1 aralığındadır. 200 kPa düşey basıncındaki numunelerde ise, CSR aralığı 0,2-0,6 iken sönüm oranı %37, ile %39,3 aralığındadır. CSR aralığı 0,6-1'e yükseldiğinde sönüm oranı %38,2 ile %41,4 aralığındadır. Farklı SBS katkı oranlarını ve farklı düşey basınçlarına ait sonuçları incelediğimizde, CSR değerinin artışıyla birlikte sönüm oranının artışı gözlenmektedir. Saf bitümlü malzemeler içinde aynı sonuç geçerlidir.

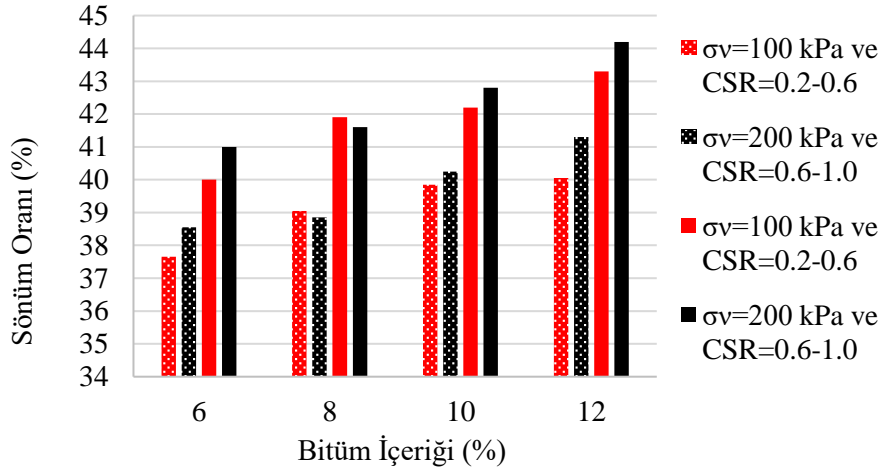
CSR aralığının kayma modülü üzerinde etkisi Şekil 3.16'da görülmektedir. Önceki bölümlerde bahsi edildiği gibi izolatör malzemesinin lineer viskoelastik davranışından dolayı, farklı CSR değerleri için malzemenin kayma modülü pek değişmiyor. Başka bir deyişle, histerezis eğrisinde kayma modülünün eğimi sabittir ve gerilmeler ne kadar artarsa belli bir oranda şekil değiştirmelerde de artmaktadır.



(a)

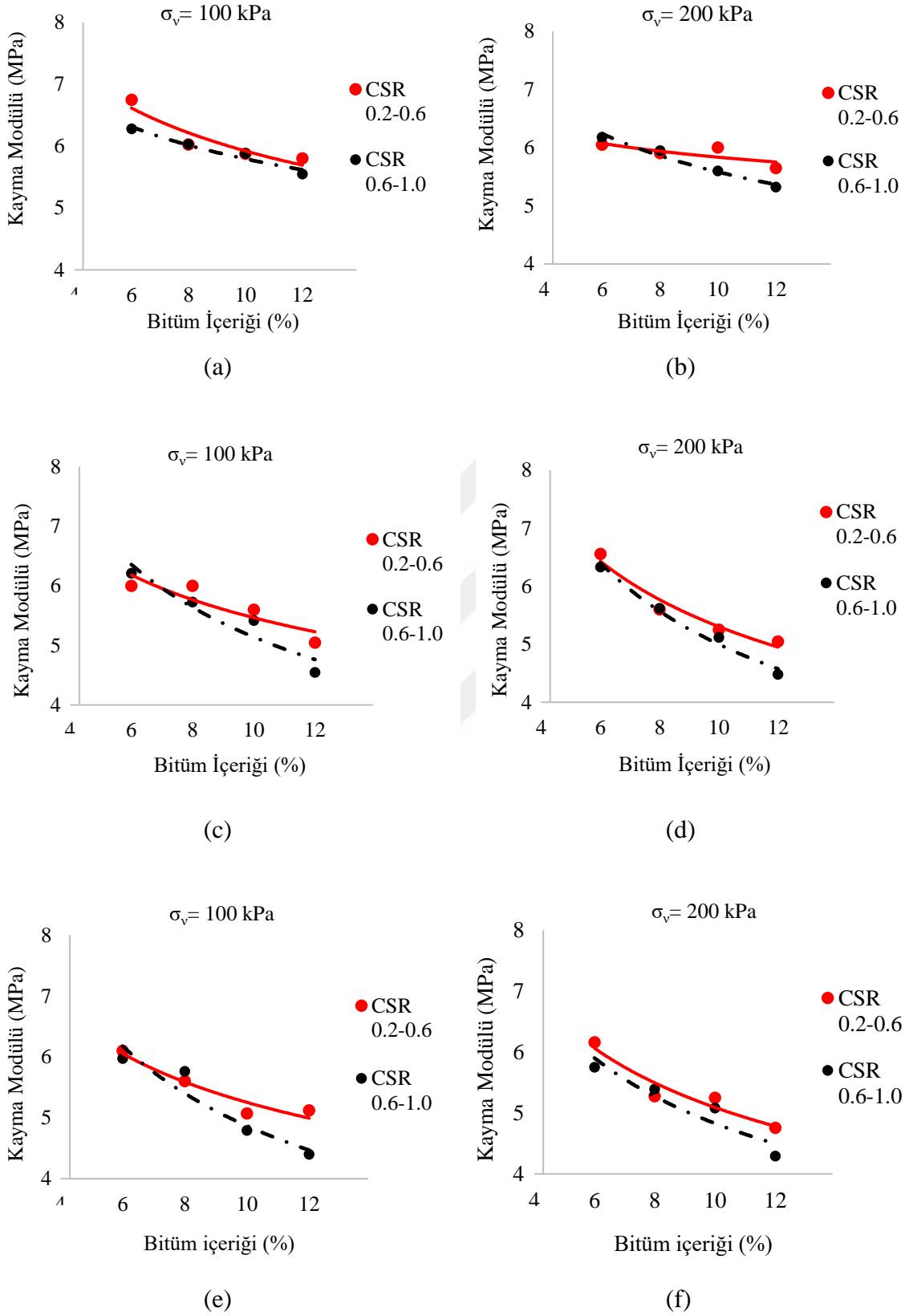


(b)



(c)

Şekil 3.15. İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait sönüm oranı karşılaştırılması, a) SBS %3, b) SBS %5, c) SBS %7



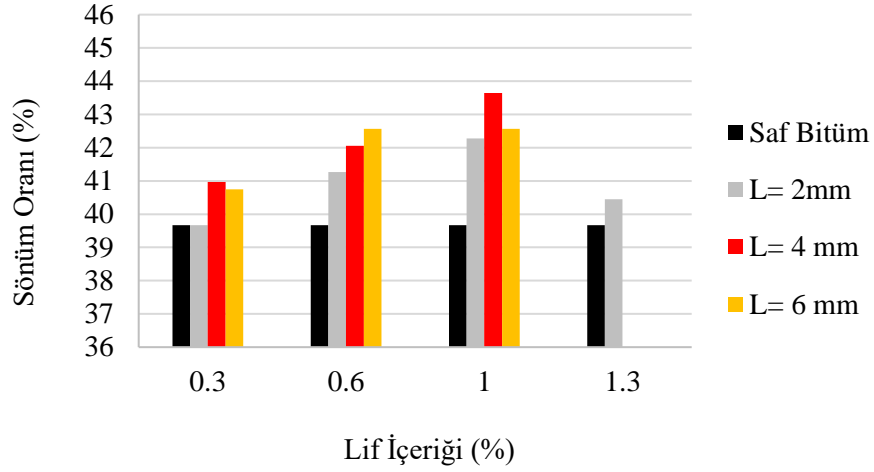
Şekil 3.16. İki farklı CSR aralıklarında yapılan deneylere ait kayma modülü karşılaştırılması, a) SBS %3 ve $\sigma_v=100$ kPa, b) SBS %3 ve $\sigma_v=200$ kPa, c) SBS %5 ve $\sigma_v=100$ kPa, d) SBS %5 ve $\sigma_v=200$ kPa, e) SBS %7 ve $\sigma_v=100$ kPa, f) SBS %7 ve $\sigma_v=200$ kPa

3.2.4. İzolatör Malzemesi Olarak Karbon Lifi ile Modifiye Edilmiş Bitüm ile Elde Edilmiş Malzemeye Ait Sonuçlar

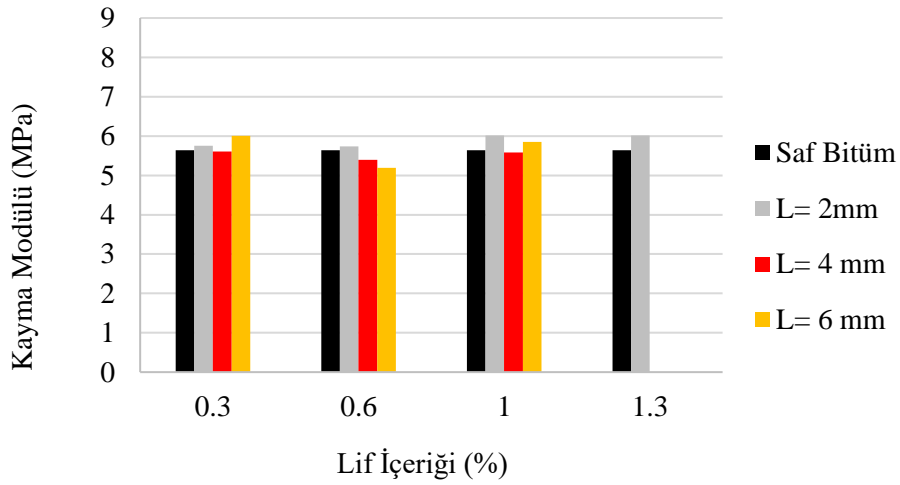
Ye ve Wu (2009), asfalt bağlayıcıların farklı lifler ile modifikasyonu ve liflerin buradaki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, üç farklı çeşitteki lifleri %0-%1 arasında asfalt bağlayıcıya eklemişler ve liflerin, viskoelastik bitümün elastik davranışının iyileştirilmesini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, malzemenin viskozitesinin lif artışı ile birlikte arttığını da gözlemlemişlerdir. Huang ve White (1996) lifler ile modifiye edilmiş asfaltın dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, asfaltı polipropilen lifi ile modifiye ederek numuneleri yorulma ve kompleks modülü deneyine tabi tutmuşlardır. Asfalt numunelerin yapımında farklı agregalar ve farklı lif içerikleri kullanmışlardır. Sonuç olarak, lifin eklenmesi ile asfaltların yorulma performanslarının iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Asfaltın dinamik modülünü incelediklerinde, numunelere lif eklendiğinde, agregası kısmı cüruf, kireçtaşı ve doğal kum olan numunelerin dinamik modülleri azalırken agregası kısmı çakıl, cüruf ve kum olan numuneler için dinamik modülde bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ise bitüm modifikasyonu için üç farklı uzunlukta (2, 4, ve 6 mm) karbon lifi kullanılmıştır. Liflerin katkı oranları bitüm ağırlığının %0,3, %0,6, %1 ve %1,3'dür. Fakat daha öncede belirtildiği gibi, %1,3 oranında modifiye edilmiş bitümün katılaşması (sertleşme) ve işlenebilirlik açısından kabul edilebilir olmaması sebebiyle 4 ve 6 mm'lik lifler için maksimum katkı oranı %1 olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.17'de lifli izolatör malzemeler için lif uzunluğu ve içeriğinin sönüm oranına etkisi gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği gibi lif uzunluğu ve içeriği arttıkça sönüm oranında da artış gözlemlenmektedir. Ancak, belli lif içerikten sonra lif uzunluğunun etkisi azalmaktadır. Bu çalışmada, maksimum sönüm oranı, 4 mm'lik ve %1 içerikli numunelerden elde edilmiştir dolayısıyla, sönüm oranı açısından optimum lif uzunluğu 4 mm ve optimum lif içeriği de %1 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.18'de ise lif uzunluğu ve içeriğinin kayma modülüne etkisi sunulmuş olup grafikte görüldüğü üzere lifin kayma modülüne etkisi çok az olmuştur. (En fazla %10 azalma veya artma gözlemlenmiştir)



Şekil 3.17. Lif uzunluğu ve içeriğinin sönüm oranına etkisi



Şekil 3.18. Lif uzunluğu ve içeriğinin kayma modülüne etkisi

3.3. Numerik Bulgular

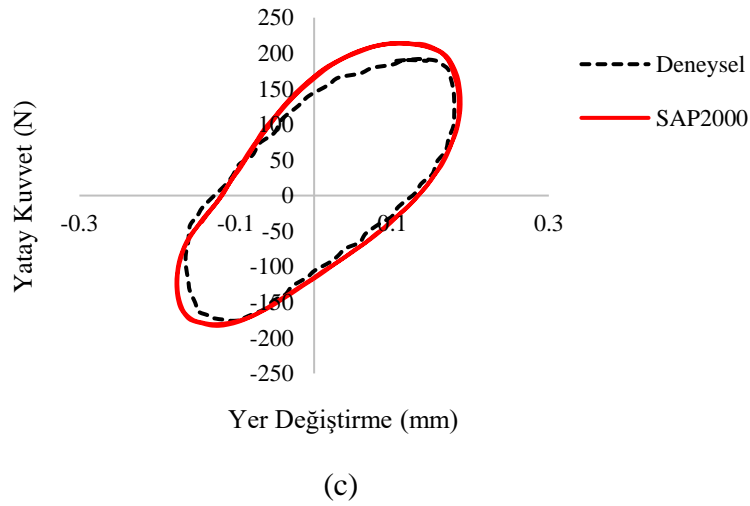
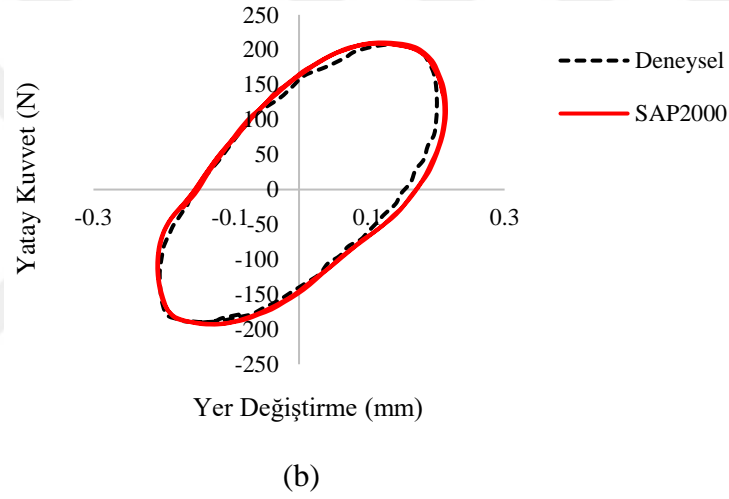
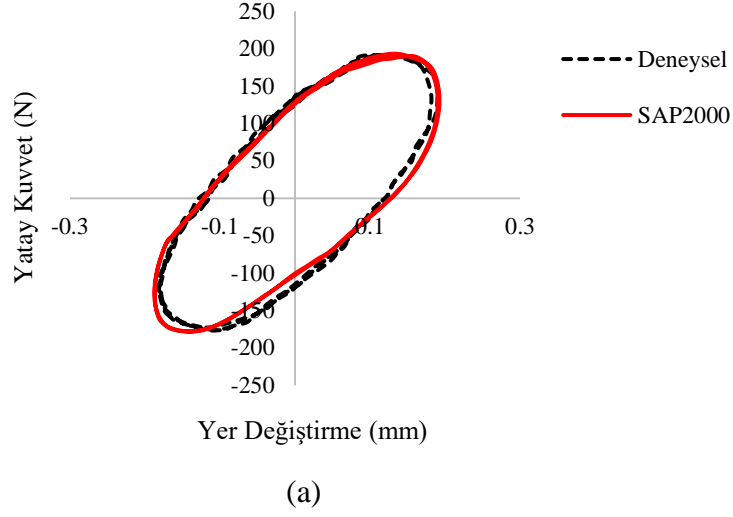
3.3.1. Agrega-Modifiye Bitüm Karışımının Deneysel ve Numerik Modelinin Karşılaştırılması

Önceki bölümde bahsedildiği gibi, agrega-modifiye bitüm karışımı farklı yükleme koşullarındaki rijitliği (K) ve sönüm katsayısı (C) değerleri, Eşitlik 2.10 ve 2.14 kullanılarak elde edilmiştir. Agrega-modifiye bitüm karışımının modellenmesi ise Kelvin modeli kullanılarak SAP2000 programında yapılmıştır. Malzeme modellenmesi saf, SBS ve lif katkılı bitüm ile yapılan karışımlar için yapılmıştır. En yüksek sönüm oranı, bitümün %12

içeriğinde, yükleme koşullarında düşey basıncın 200 kPa ve CSR aralığının 0.6-1 olduğu durumda elde edilmiştir. Dolayısıyla, numune modellemesi için bu örnekler seçilmiştir. SBS katkıli asfaltlar için %5 katkı oranı seçilmiş olup lif ile modifiye edilmiş numuneler için ise katkı oranı %1 ve lif uzunluğu 4 mm olan numuneler seçilmiştir.

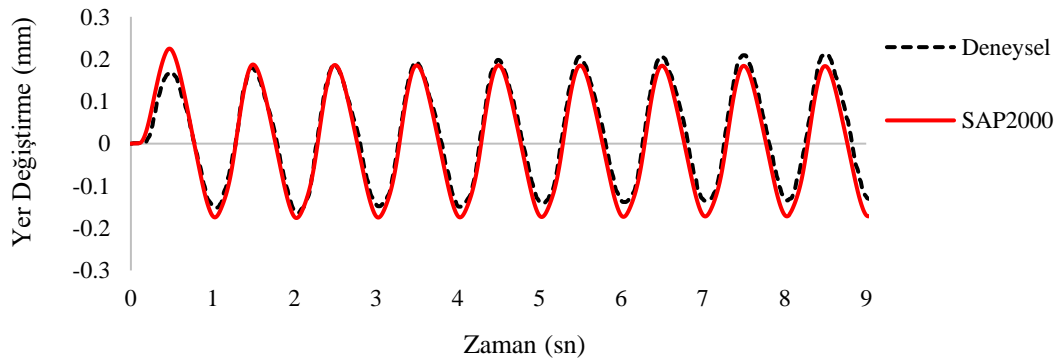
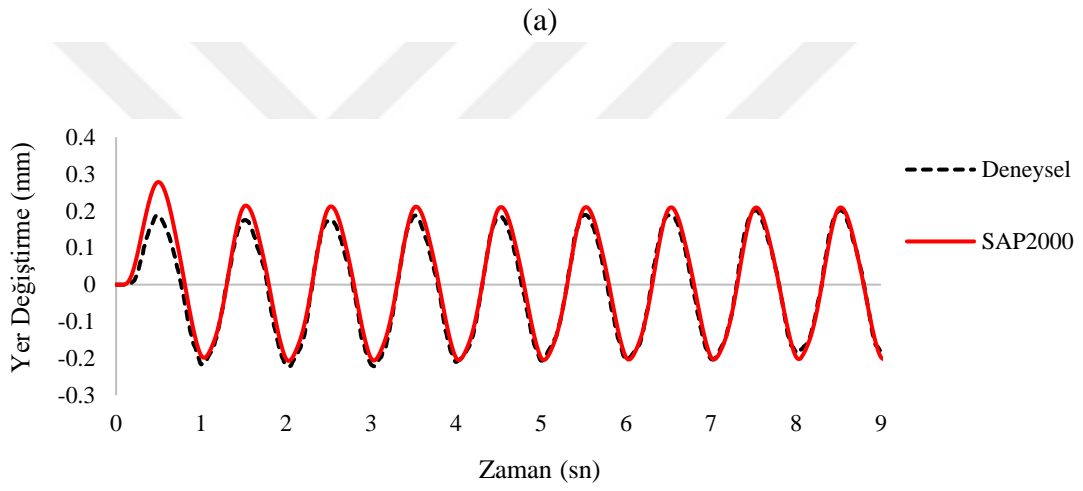
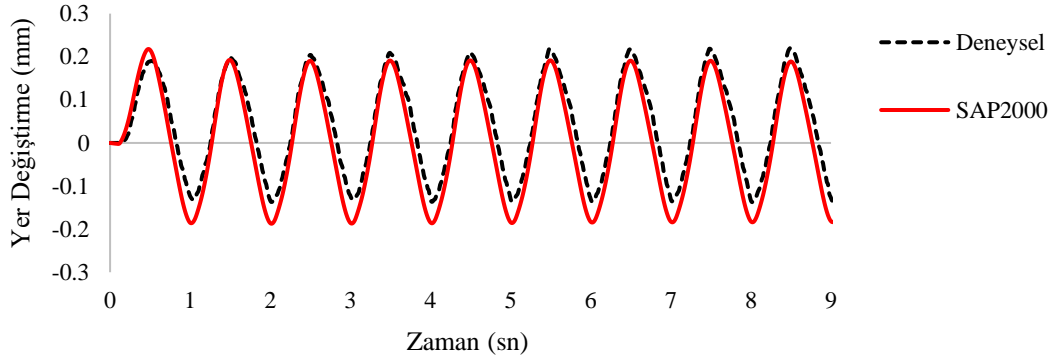
Bahsedilen üç çeşit izolator malzemesinin modeli SAP2000 programında yapılarak basit kesme deneyinde uygulanan çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Kuvvet-yer değiştirme ilişkileri elde edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, Şekil 3.19'da saf bitümlü, SBS ve lif ile modifiye edilmiş numunelerin deneysel ve numerik çalışmalardan elde edilen histerezis eğrileri karşılaştırılmıştır.





Şekil 3.19. Agrega-modifiye bitüm karışımlarının deneysel ve numerik histerezis eğrileri, a) Saf bitümlü, b) SBS ile modifiye edilmiş bitümlü, c) Lif ile modifiye edilmiş bitümlü

Şekil 3.20'de deneysel ve numerik çalışmalara ait zamana bağlı yer değiştirmeler gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Agrega-modifiye bitüm karışım numunelerinin deneysel ve numerik zamana bağlı yer değiştirmeler, a) Saf bitümlü, b) SBS ile modifiye edilmiş bitümlü, c) Lif ile modifiye edilmiş bitümlü

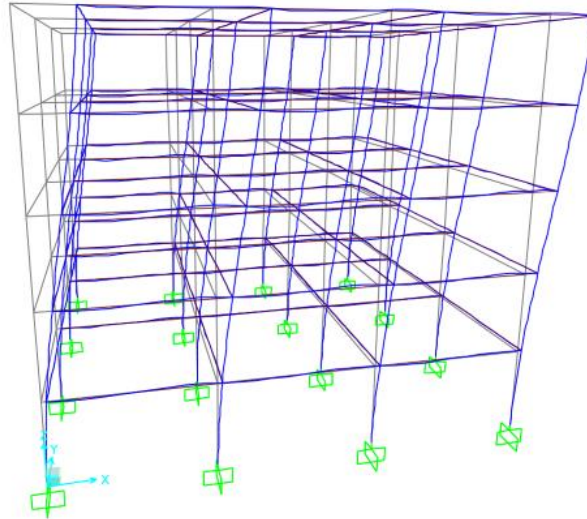
Buradan, izolatör malzemesi olan agrega-modifiye bitüm karışımının, deneysel sonuçları ile Kelvin modelin sonuçlarının uyumu gözlenmiştir. Olumlu sonuçlar alındığı için, bu Kelvin modeli üç boyutlu yapı modelinin altına yerleştirilmiş ve üst yapının sismik davranışına etkisi sayısal modellerle incelenmiştir.

3.3.2. Ankastre Mesnetli Modelin Sonuçları

İzolatör malzemesinin üst yapının sismik davranışına etkisini kıyaslamak için yapı öncelikle ankastre mesnetli olarak modellenmiştir. Ankastre mesnetli yapıyı çözmek için önce modal analiz daha sonra da zaman tanım analizi uygulanmıştır.

3.2.2.1. Modal Analizi

Ankastre mesnetli modelin modal analizi, mod şekillerini ve karşılık gelen doğal periyotları bulmak için yapılır (Dao ve Ryan, 2015). Şekil 3.21’de ankastre mesnetli yapının birinci modu gösterilmektedir.

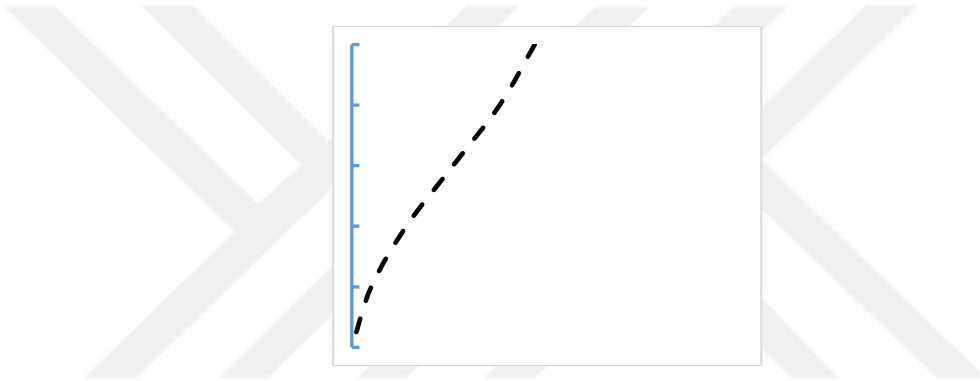


Şekil 3.21. Ankastre mesnetli yapının birinci modu

Yapının X yönünde olan birinci modunun periyodu, doğal ve açısal frekans değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Katların geometrik merkezlerinden geçen düşey merkez çizgisindeki bu mod şekli, Şekil 3.22'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Birinci moda ait periyot ve frekanslar

Mode No.	Periyot-T (sn)	Doğal frekans-f (Çevrim/sn)	Açısal frekans- ω (rad/sn)
1	0,596	1,67	10,52



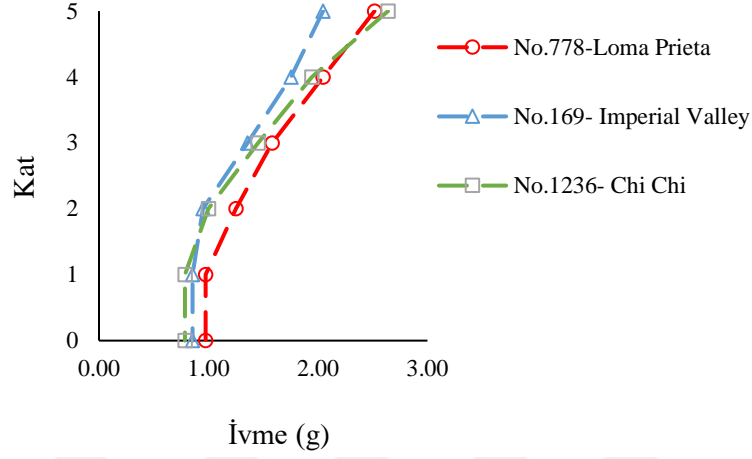
Şekil 3.22. X yönünde birinci modun şekli

3.3.2.2. Zaman Tanım Analizi ve Sonuçları

Bu çalışmada sismik analiz için doğrusal olmayan zaman tanım analizi kullanılmıştır. Zaman tanım analizi için üç farklı faydan uzak istasyonlardan alınmış yer hareketinin yatay ivme bileşeni kullanılmıştır. Kullanılan deprem kayıtlarının detayları Bölüm 2.3.3'de verilmiştir.

Birinci bölümde anlatıldığı gibi, deprem nedeniyle binanın katları arasındaki rölatif ötelenme ve katlarda oluşan ivmeler, binaların tahrip edilmesinde etkili olan iki ana mekanizmadır. İzolatörler, genellikle, bu iki mekanizmayı kontrol etmek için uygulanırlar. Bu nedenle, bu çalışmada, bitümlü GSI'nin etkisini karşılaştırmak için her bir sayısal modelde katların geometrik merkezlerinden geçen merkezler dikkate alınarak, uygulanan deprem ivmelerinden dolayı bu noktalarda oluşan yer değiştirmeler ve ivmeler ölçülmüş ve

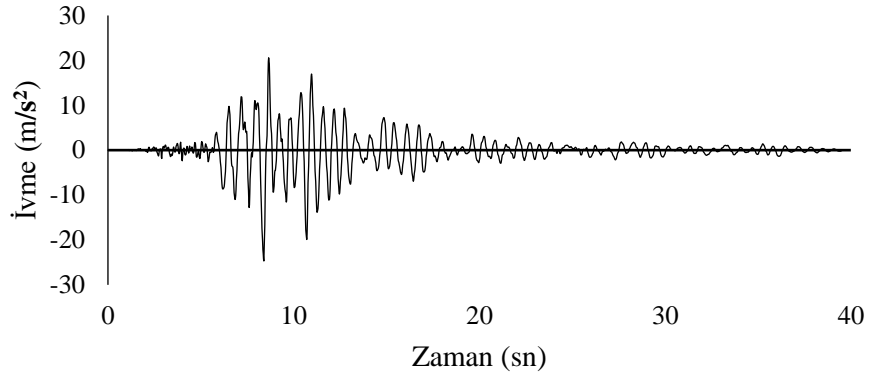
karşılaştırılmıştır. Ankastre mesnetli binanın tüm katlarının geometrik merkezindeki maksimum ivmeler Şekil 3.23'te verilmiştir.



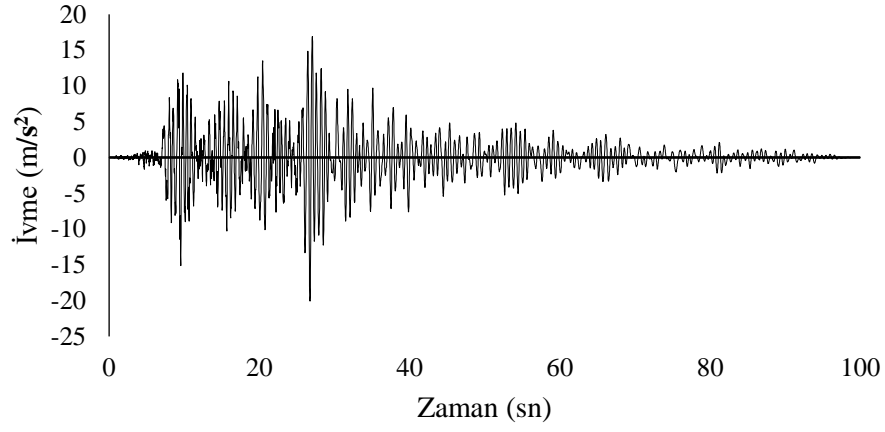
Şekil 3.23. Her deprem ivme kaydı için maksimum kat ivmesinin dağılımı

Yukarıdaki eğride görüldüğü gibi maksimum tepki ivme değeri 2,64g olarak elde edilmiştir ki bu da Chi-Chi ivme kaydına aittir.

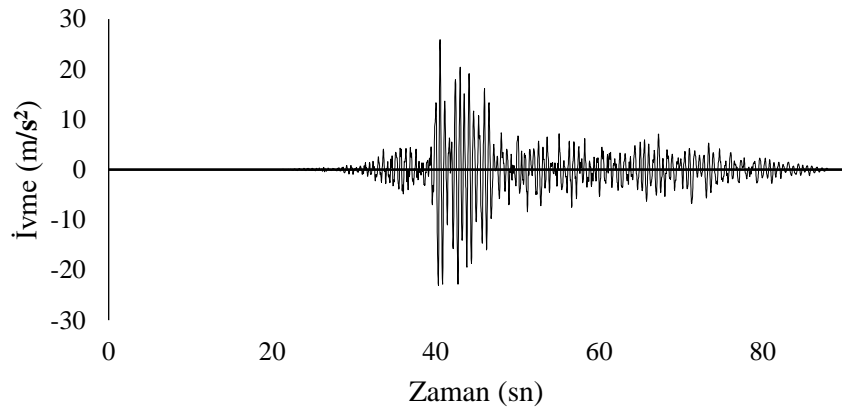
Binanın maksimum tepki ivme değerlerinin, en üst katta oluşması sebebiyle en üst katın ivme değerlerinin zamana bağlı olarak incelenmesi önemlidir. Şekil 3.24'te binanın en üst katında bulunan tepki ivmeleri zamana bağlı olarak gösterilmiştir.



(a)



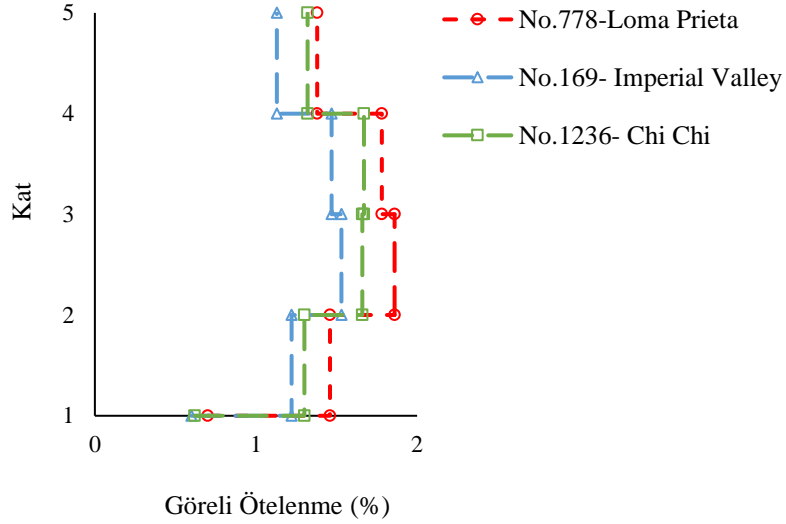
(b)



(c)

Şekil 3.24. Her deprem ivme kaydı için binanın en üst katında zamana bağlı olarak tepki ivmeleri, a) No.778-Loma Prieta, b) No.169-Imperial Valley#06, c) No.1236- Chi-Chi, Taiwan

Binanın deprem tepkisinde incelenmesi gereken ikinci önemli husus ise katlar arasındaki görelî ötelenmedir. Şekil 3.25'te, her bir deprem kaydı için tüm katların geometrik merkezinde oluşan maksimum katlar arası görelî ötelenmeler çizilmiştir.



Şekil 3.25. Her deprem ivme kaydı için maksimum katlar arası görelî ötelenme

Yukarıdaki şekillerde görüldüğü gibi maksimum katlar arası görelî ötelenme miktarı %1,86'ya ulaşmıştır ki bu durum binanın üçüncü katında ve Loma Prieta ivme kaydına oluşmuştur.

3.3.3. İzolasyonlu Modelin Sonuçları

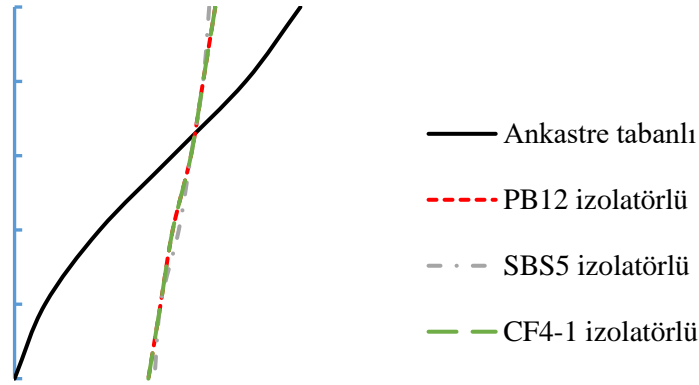
İzolasyon sistemi olarak bu çalışmada saf, SBS ve lif ile modifiye edilmiş bitümden elde edilen numuneler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan alınan verilere göre, sönümleyici malzeme olarak %5 SBS ile modifiye edilmiş, bitüm içeriği %12 olan numuneler, CSR aralığı 0,6-1 ve düşey basıncı 200 kPa olan deney koşullarında yapılan deneyler seçilmiştir. Ayrıca, aynı deney koşullarında saf bitüm ve 4 mm uzunluğunda ve %1 katkı oranında lifli numuneler izolator malzemesi olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla üç ayrı izolasyonlu model oluşturulmuş olup izolasyonlu modellerde izolatörler her bir kolonun altına yerleştirilecek şekilde toplam 16 adet olarak kullanılmıştır.

3.3.3.1. Modal Analiz

Oluşturulan üç modelin birinci modunun periyodu, doğal ve açısal frekans değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Katların geometrik merkezlerinden geçen düşey merkez çizgisindeki bu mod şekli her üç model için Şekil 3.26’da gösterilmiştir.

Tablo 3.2. İzolatörlü modellerin birinci moda ait periyot ve frekansları

İzolator	İzolator kodu	Mode No.	Periyot-T (sn)	Doğal frekans f (Çevrim/sn)	Açısal frekans ω (rad/sn)
Ankastre mesnetli	-	1	0,596	1,67	10,52
Saf Bitümlü	PB12	1	1,30	0,76	4,8
%5 SBS’li	SBS5	1	1,42	0,70	4,41
%1 karbon lifli	CF4-1	1	1,31	0,76	4,78



Şekil 3.26. X yönünde birinci modun şekli

Taban izolasyonunun hareketi binanın katlarında yer değiştirmenin artmasına neden olur. Bu durum, periyodun artışına ve etkileyen kuvvetlerin azalmasına sebep olur. (Constantinou vd., 2011). Tablo 3.2’te de görüldüğü gibi geoteknik sismik izolatörün yapının altına yerleştirilmesi ile yapının periyodu artmakta ve böylelikle de yapıya etki eden kesme kuvvetinin azalması beklenmektedir.

3.3.3.2. GSİ İzolatörün Boyut Etkisi ve Optimum Boyut Belirlenmesi

Daha öncede anlatıldığı gibi, izolatörün malzemesi yaylarla modellenmiştir. İzolatörlerin modellenmesi, malzemenin sertliği (k) ve sönüm katsayısını (C) kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler izolatörün boyutlarına ve yapının açısal frekansına bağlıdır ve Eşitlik 3.4 ve 3.5'den elde edilir (Xu vd. 2010).

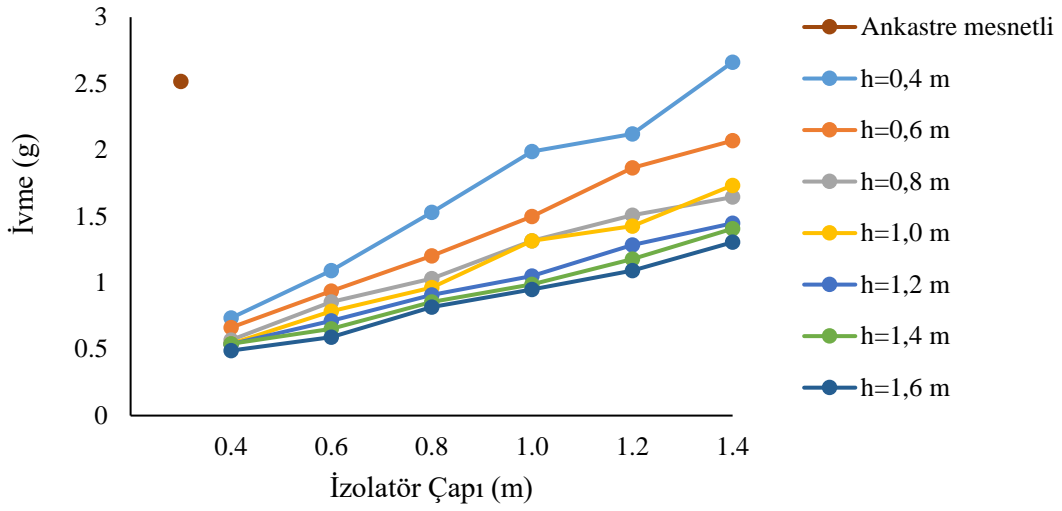
$$k = G_1 * \frac{A}{h} \quad (3.4)$$

$$C = \frac{\eta G_1}{\omega} * \frac{A}{h} \quad (3.5)$$

Bu eşitliklerde, G_1 , izolatör malzemesinin depolama kayma modülü, η kayıp katsayısı (Eşitlik 2.12 kullanılarak hesaplanır), A izolatörünün alanı, h izolatörünün yüksekliği, (ω) yapının ankastre mesnetli modal analizdeki açısal frekansıdır.

GSİ izolatörün boyut etkisini belirlemek için ve optimum boyutunu elde etmek için farklı boyutlar modellenerek çözülmüştür. İzolatör malzemesi olarak sadece, SBS ile modifiye edilen malzeme seçilmiştir. Ayrıca, farklı deprem ivme kayıtları için, en etkili ivme kaydı seçilmiş ve tüm modellerde uygulanmıştır. Ankastre mesnetli model için zaman tanım analizi sonuçları incelediğinde en yüksek görelî ötelenme No. 778 Loma Prieta ivme kaydında elde edilmiştir. Dolayısıyla bu ivme kaydı seçilerek izolatörün boyut analizleri yapılmıştır.

İzolatörler çember şeklinde tasarlanmıştır. Çap olarak 0,4 metreden başlatılmış ve 0,2 metre arttırılarak 1,4 metreye kadar 6 farklı çap denenmiştir. Yükseklik için ise aynı şekilde 0,4 metreden başlanarak ve 0,2 metre artışla 1,6 metre kadar 7 farklı yükseklik denenmiştir. Dolayısıyla, bu kombinasyonda 42 model çözülmüştür. Analiz sonuçlarından elde edilen çatı katının geometrik merkezindeki maksimum ivme değeri, grafik olarak Şekil 3.27'de çizilmiştir.



Şekil 3.27. GSİ izolatörün boyutunun ivmeler üzerindeki etkisi

Şekilde görüldüğü gibi izolatörün yüksekliği sabit tutulduğunda, çap artışı ile birlikte ivme değerleri de artmaktadır. Yüksekliğin sabit tutulması ve çapın artışı malzemenin kayma rijitliğinin artması anlamına gelmektedir. Kayma rijitliği arttıkça bina ankastre mesnetli davranışa benzer davranarak ivmelerin artışına sebep olmaktadır. Aynı zamanda, çapı sabit tutup yüksekliği arttırmamızda ise malzemenin kayma modülü azalmakta dolayısıyla daha esnek davranarak ivme değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır.

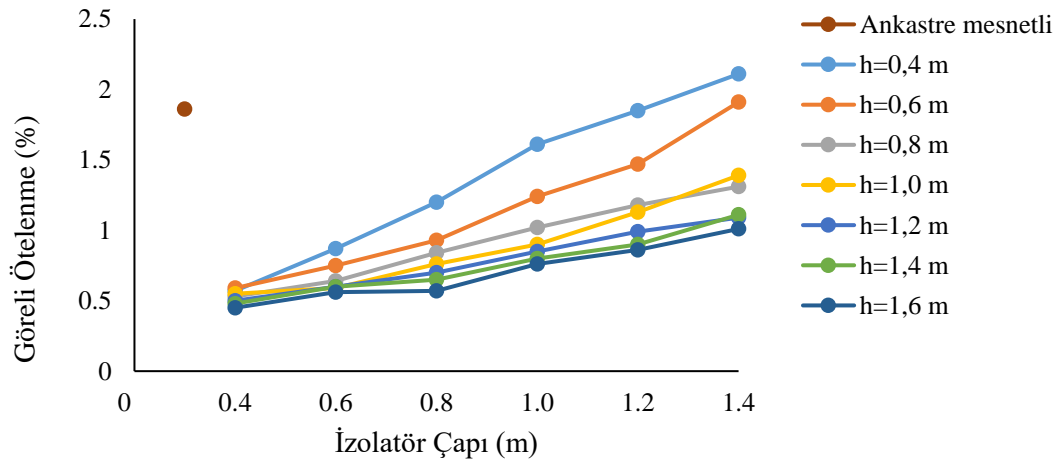
İzolator boyutlarının görelî ötelenme üzerindeki etkisinin incelenmesi için analiz sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir. Değerler katların geometrik merkezindeki görelî ötelenmeye aittir.

Tablo 3.3. GSİ izolatörün boyutunun görelî ötelenme üzerindeki etkisi (birim %)

İzolatörün yüksekliği h (m)	Kat	Ankastre mesnetli	İzolatör çapı Φ (m)					
			0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
0,4	5	1,38	0,45	0,61	0,79	1,04	0,8	0,92
	4	1,78	0,55	0,80	1,08	1,43	1,11	1,41
	3	1,86	0,57	0,87	1,20	1,61	1,85	2,11
	2	1,46	0,56	0,76	1,10	1,47	1,55	1,7
	1	0,7	0,45	0,54	0,74	1,00	1,35	1,53
0,6	5	1,38	0,38	0,53	0,61	0,80	1,07	1,14
	4	1,78	0,51	0,69	0,82	1,1	1,12	1,78
	3	1,86	0,59	0,75	0,93	1,24	1,47	1,91
	2	1,46	0,57	0,65	0,82	1,12	1,25	1,36
	1	0,7	0,45	0,46	0,58	0,76	0,86	1,01
0,8	5	1,38	0,34	0,46	0,59	0,68	0,85	0,84
	4	1,78	0,46	0,61	0,77	0,91	1,00	1,15
	3	1,86	0,53	0,64	0,84	1,02	1,18	1,31
	2	1,46	0,50	0,56	0,72	0,91	1,03	1,18
	1	0,7	0,38	0,45	0,52	0,64	0,93	0,80
1,0	5	1,38	0,33	0,36	0,55	0,63	0,74	0,91
	4	1,78	0,44	0,5	0,71	0,83	0,99	1,2
	3	1,86	0,55	0,59	0,76	0,90	1,13	1,39
	2	1,46	0,48	0,57	0,67	0,80	1,02	1,25
	1	0,7	0,37	0,46	0,48	0,56	0,69	0,84
1,2	5	1,38	0,33	0,38	0,51	0,60	0,65	0,77
	4	1,78	0,44	0,52	0,67	0,77	0,88	0,50
	3	1,86	0,50	0,60	0,70	0,85	0,99	1,09
	2	1,46	0,47	0,58	0,61	0,74	0,88	0,98
	1	0,7	0,37	0,45	0,42	0,53	0,62	0,84
1,4	5	1,38	0,31	0,38	0,47	0,57	0,63	0,73
	4	1,78	0,42	0,51	0,61	0,74	0,84	0,96
	3	1,86	0,48	0,60	0,65	0,80	0,90	1,11
	2	1,46	0,45	0,57	0,52	0,70	0,81	0,98
	1	0,7	0,35	0,37	0,37	0,49	0,56	0,68
1,6	5	1,38	0,28	0,37	0,35	0,54	0,61	0,65
	4	1,78	0,39	0,48	0,48	0,70	0,80	0,89
	3	1,86	0,45	0,56	0,57	0,76	0,86	1,01
	2	1,46	0,42	0,54	0,57	0,66	0,76	0,89
	1	0,7	0,33	0,43	0,45	0,47	0,54	0,63

Tablo 3.3'te görüldüğü gibi maksimum görelî ötelenmeler 3. katta oluşmuştur. Dolayısıyla, sadece 3. katın değerleri göz önüne alınarak boyut karşılaştırmaları Şekil 3.28'de çizilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi izolâtörün yüksekliği sabit tutulduğunda, çap artışı ile birlikte görelî ötelenmeler de artmaktadır. Yüksekliğin sabit tutulması ve çapın artışı malzemenin kayma rijitliğinin artması demektir. Kayma rijitliği arttıkça bina, ankastre mesnetli davranışa benzer davranmakta ve görelî ötelenmeler artmaktadır. Aynı zamanda, çap sabit tutulup ve yükseklik artırıldığında, malzemenin kayma modülü azalır dolayısıyla, daha esnek davranarak görelî ötelenmelerde azalmaya sebep olur. Ancak, istenilen kadar yüksekliği arttırmak veya çapı azaltmak mümkün değildir. Çünkü, mühendislik (projelendirme) açısından sıkıntılar olabilmektedir. İzolâtöre uygulanan düşey basınçtan dolayı izolâtörün alanı uygulanan yüke göre ayarlanmalıdır. Ayrıca, kırılma ve devrilme tehlikelerine benzer sorunlardan dolayı yüksekliğinde çapa göre bir alt sınırı olmalıdır.

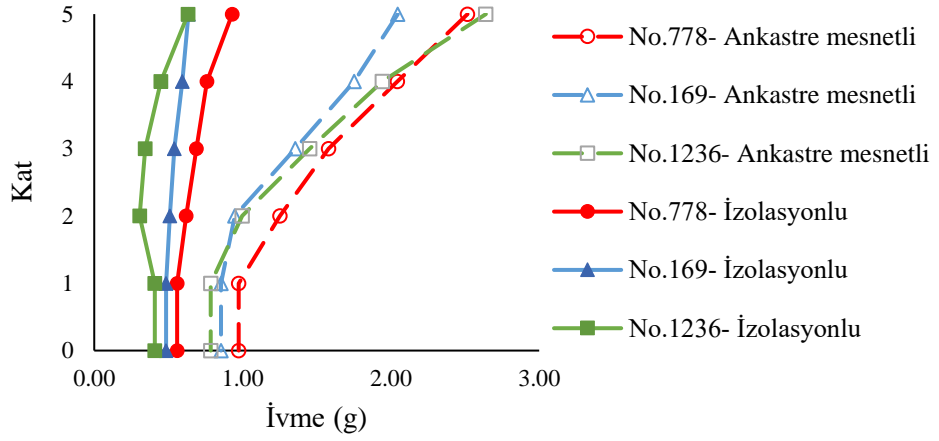
Bu çalışmada izolâtöre uygulanan basınçlar dikkate alınarak izolâtör çapı 0,8 m ve yüksekliği 1,2 m olarak seçilmiştir.



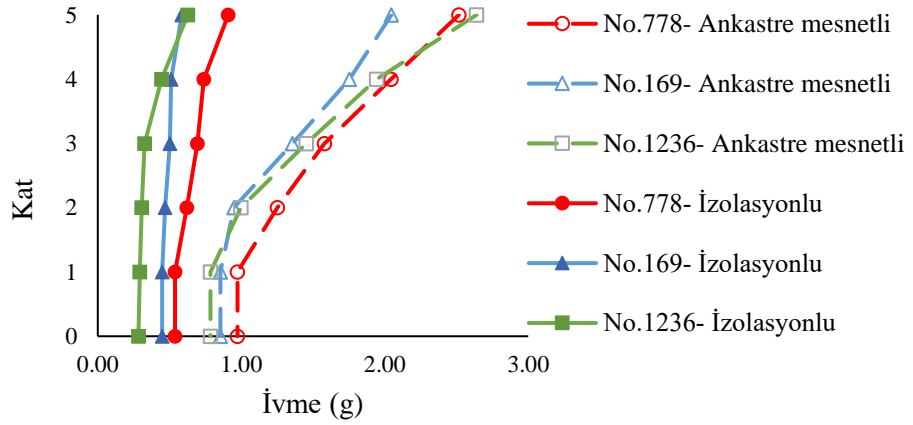
Şekil 3.28. GSİ izolâtörün boyutunun görelî ötelenme üzerindeki etkisi

3.3.3.3. Zaman Tanım Analizi ve Sonuçları

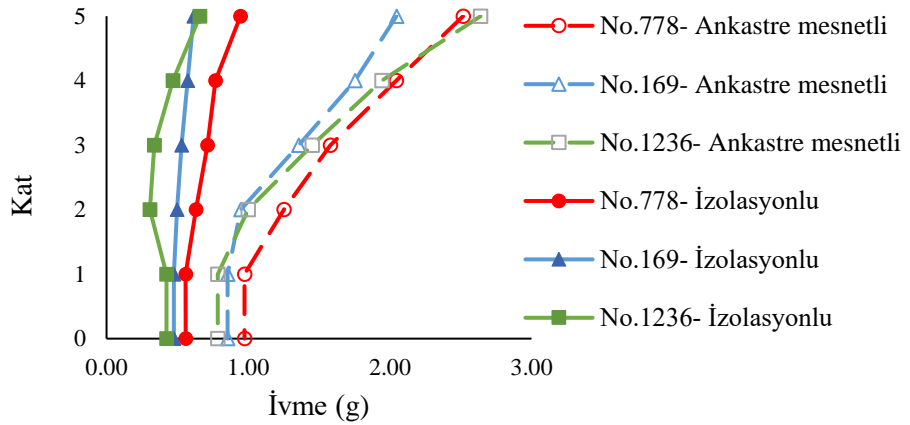
Çalışmada, GSİ izolâtörün boyutlarına karar verildikten sonra, izolâtörlerin (k) ve (C) değerleri boyut ve kullanılan bitümün türüne göre hesaplanmıştır. Oluşan her üç model için de zaman tanım analizleri uygulanmıştır. Bu modeller için binanın tüm katlarının geometrik merkezindeki maksimum ivmeler Şekil 3.29'da çizilmiştir.



(a)



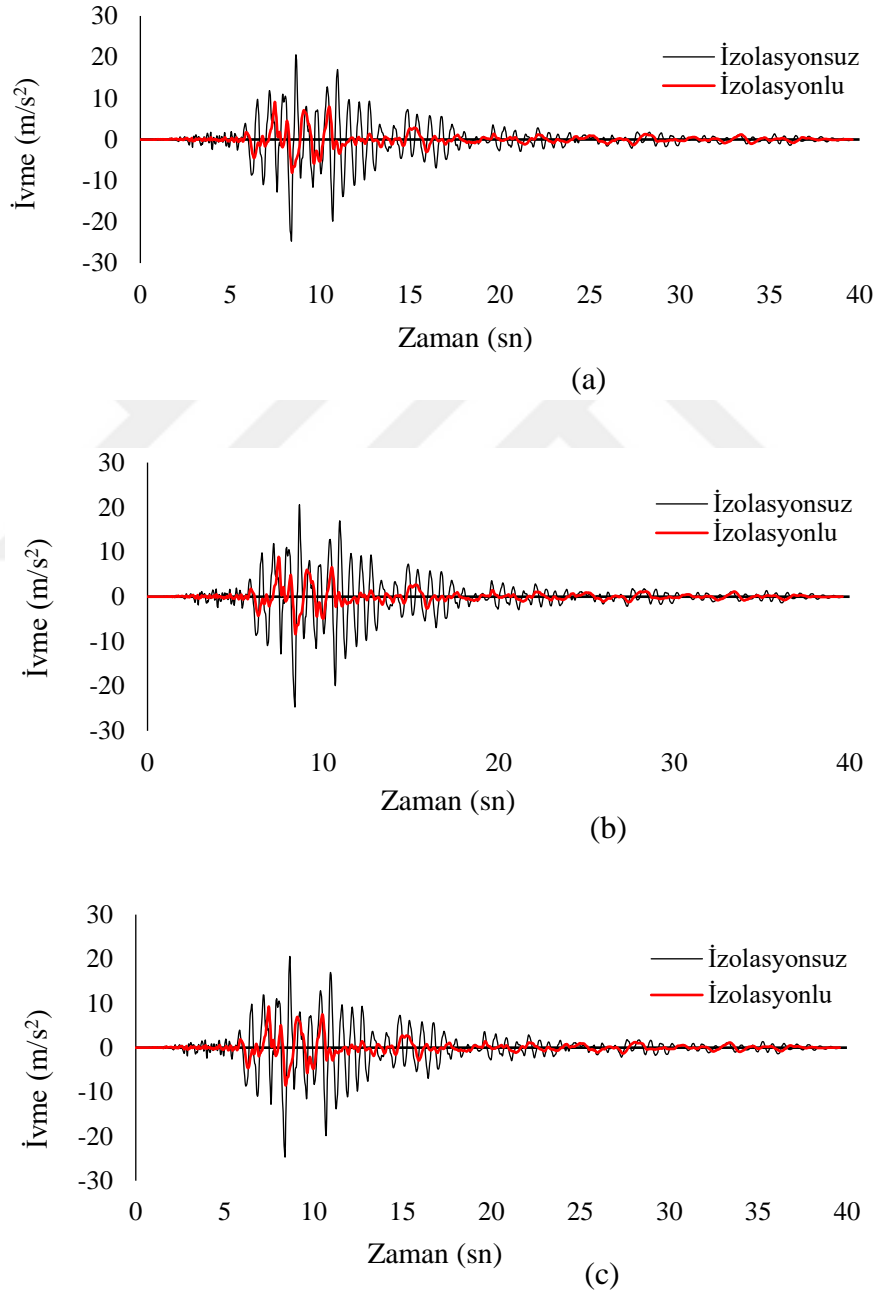
(b)



(c)

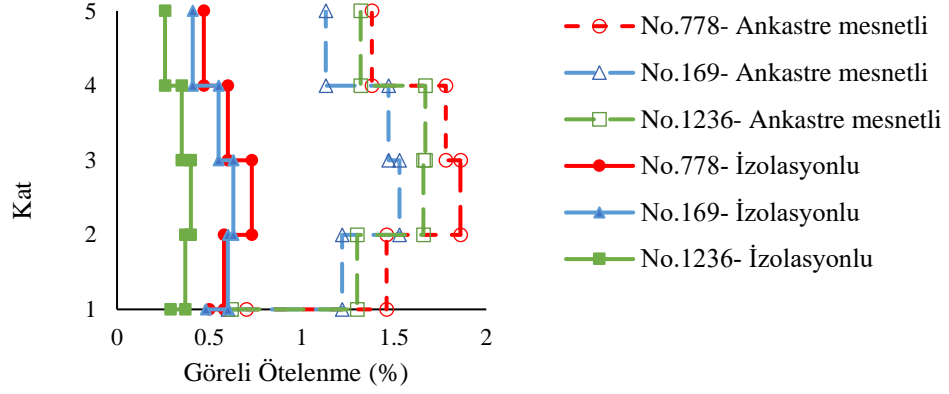
Şekil 3.29. İzolasyonlu ve izolasyonsuz binanın geometrik merkezindeki maksimum kat ivmesinin dağılımı ve karşılaştırılması, a) Saf bitümlü izolatör, b) SBS'li izolatör, c) Lifli izolatör

İzolasyonsuz bina için maksimum tepki ivme değeri Chi-Chi ivme kaydından 2,64 g olarak alınmıştır. Yapının kolonları altına farklı izolatörler yerleştirildikten sonra maksimum ivme değeri 2.64 g'den yaklaşık 0,65 g'ye düşmüştür. Dolayısıyla, ivmelerde yaklaşık %75 oranında azalma meydana gelmiştir. Binanın No. 778 Loma Prieta ivme kaydının çatı katında oluşturduğu maksimum tepki ivme değerleri zamana bağlı olarak Şekil 3.30'da her üç çeşit izolatör için gösterilerek izolasyonsuz binadaki değerler ile karşılaştırılmıştır.

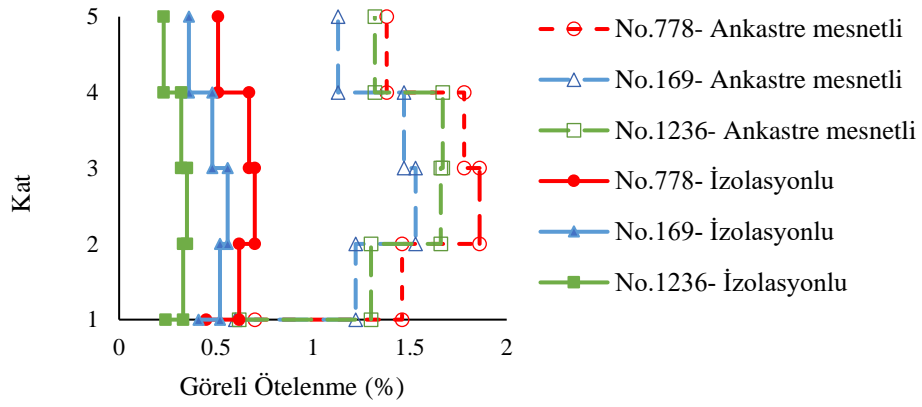


Şekil 3.30. No. 778 Loma Prieta ivme kaydının zamana bağlı olarak çatı katında oluşturan maksimum tepki ivme değerleri, a) Saf bitümlü izolatör, b) SBS'li izolatör, c) Lifli izolatör

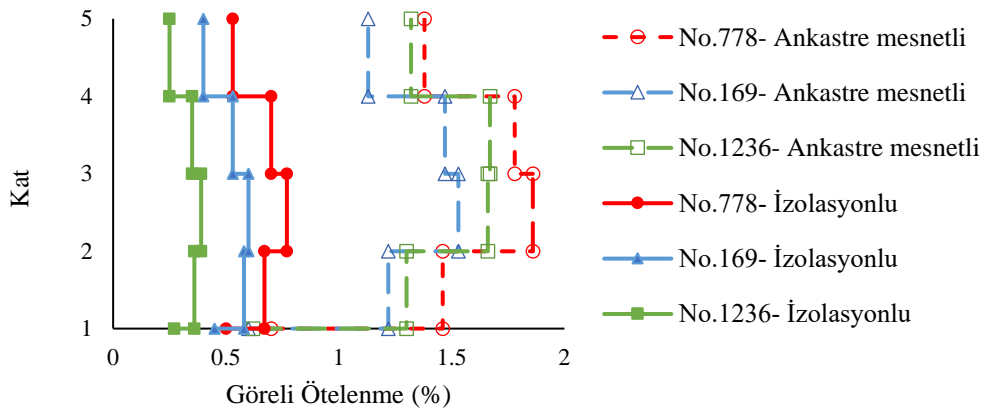
Şekil 3.31’de maksimum katlar arası görelî ötelenme, her üç izolâtörlü model için ve her bir deprem kaydı için tüm katların geometrik merkezinde çizilmiştir.



(a)



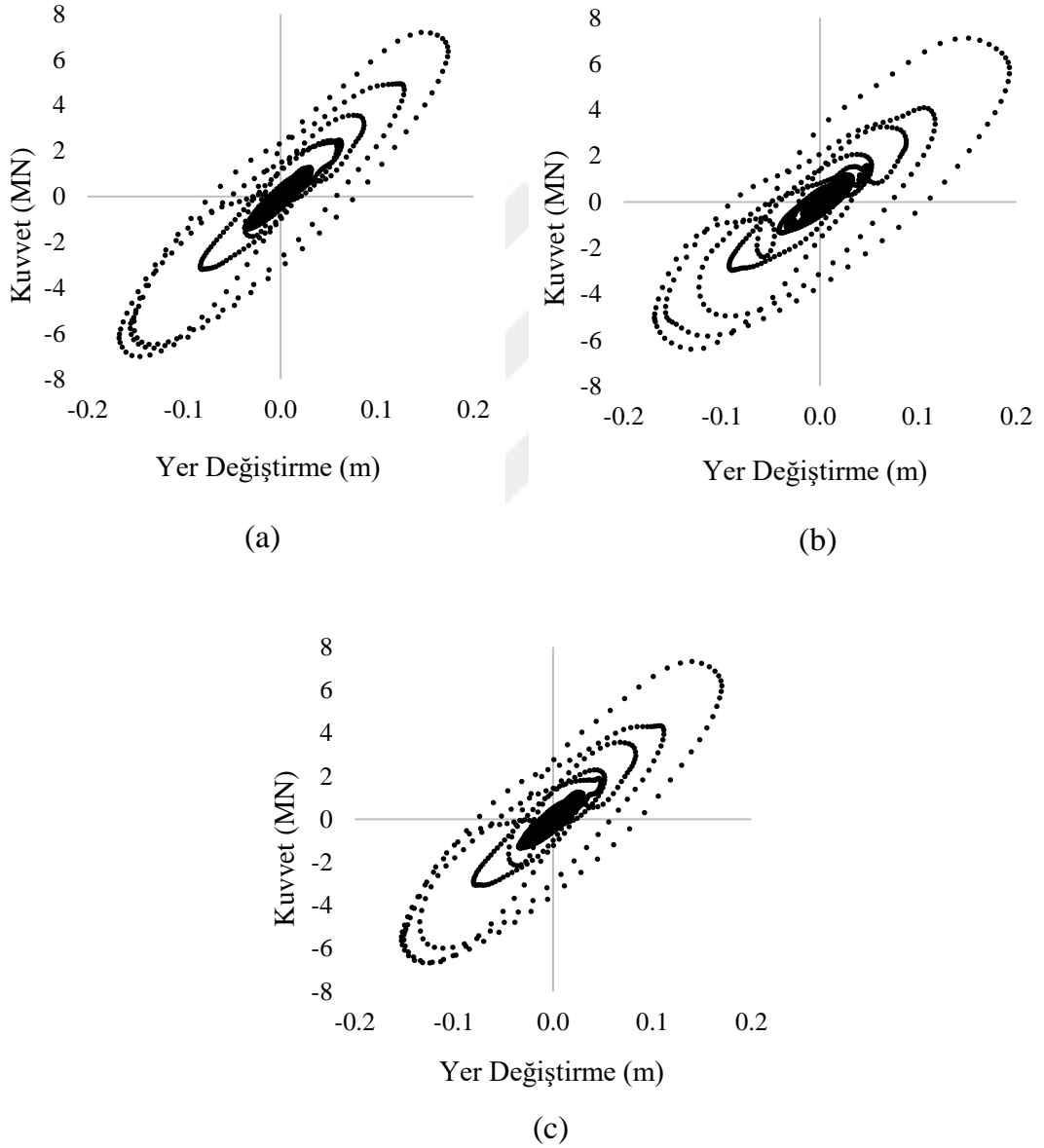
(b)



(c)

Şekil 3.31. Ankastre mesnetli ve Farklı izolâtörler ile izole edilmiş modelin katlar arası görelî ötelenmeleri, a) Saf bitümlü izolâtör, b) SBS’li izolâtör, c) Lifli izolâtör

Yukarıdaki şekiller ve çizgilerde görüldüğü gibi ankastre mesnetli model için maksimum katlar arası görelî ötelenme miktarı %1,86'dır. İzolatör kullanıldığında bu değer %0,70'e düşmüştür dolayısıyla, görelî ötelenmede %62 oranında azalma meydana gelmiştir. Şekil 3.32'de izolasyonlu modelde kullanılan izolatörlere ait No.778 Loma Prieta ivme kaydı uygulanan durum için çizilen histerezis eğrileri görülmektedir.



Şekil 3.32. No.778 Loma Prieta ivme kaydı uygulandığında, kullanılan izolatörlere ait histerezis eğrileri, a) Saf bitümlü izolatör, b) SBS'li izolatör, c) Lifli izolatör

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapılar üzerindeki deprem etkisini azaltmak için, düşük maliyetli ve uygulaması kolay bir sismik izolasyon malzemesinin geliştirilmesi ve yapının davranışına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, agrega ve modifiye bitüm karışımından elde edilen malzemeyi, sismik izolatör olarak kullanılarak yapıların altında deprem enerjisinin yutulması hedeflenmiştir. İzolatör malzemesinin dinamik özelliklerini incelemek için çevrimsel basit kesme deneyleri yapılmıştır. Deneysel bulgular incelenerek ideal malzemeler numerik çalışmada kullanılmak üzere tespit edilmiştir. Numerik çalışmada, agrega-modifiye bitüm karışımı, taban izolatörü olarak yapının altına yerleştirilmiştir ve zaman tanım analizleri uygulanarak çözülmüştür. Yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları ve bazı öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Çevrimsel basit kesme deneyi sonuçları incelendiğinde, agrega-saf bitüm karışımı olan numunelerde bitüm içeriğinin artması ile sönüm oranı artmaktadır. Ancak, %10 oranında bitüm içeriğinden sonra ise sönüm oranında önemli miktarlarda artış görülmemektedir.
- Tüm agrega-bitüm karışımlı numunelerde bitüm içeriği arttıkça kayma modülü azalmaktadır.
- Düşey basıncın sönüm oranına etkisi incelendiğinde, aralarında uyumlu bir bağ kurulmadığı gözlemlenmektedir. Diğer bir anlatımla, düşey basıncın bu numunelerin sönüm oranı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir seviyededir.
- Düşey basıncın kayma modülü üzerinde pek bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu durum, literatürde de birçok çalışmada kanıtlandığı üzere, bitümlü karışımlarının lineer viskoelastik davranışından kaynaklanmaktadır.
- Agrega-SBS ile modifiye edilmiş bitüm karışımı numunelerde, bitüm içeriğinin artması ile sönüm oranı da artmaktadır. Maksimum sönüm oranı %43,8 oranında ve %12 oranında bitüm içeriğinde elde edilmiştir.
- Bitüm modifikasyonunda SBS oranı arttıkça izolatör malzemesinin sönüm oranı artmaktadır ancak %7 oranında, %5 oranına göre malzemenin sönüm oranındaki artış miktarı çok az olduğu için sönüm oranı açısından optimum SBS katkı oranı %5 olarak seçilmiştir.

- SBS katkı oranının kayma modülü üzerinde etkisi incelendiğinde, SBS oranı arttıkça kayma modülünün azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, %5 oranında ve %7 oranındaki malzemelerin kayma modülü değerleri çok yakın olduğundan, %5 SBS oranı optimum değer olarak seçilmiştir.
- CSR aralığının sönüm oranı üzerinde etkisi incelendiğinde, CSR değerinin artışıyla birlikte (başka deyişle uygulanan kayma şekil değiştirmesinin genliği arttıkça) sönüm oranı artmaktadır.
- İzolatör malzemesinin lineer viskoelastik davranışından dolayı, farklı CSR değerleri için malzemenin kayma modülü pek değişmiyor.
- Agregalı lifli bitüm izolatör malzemeleri için lif uzunluğu ve içeriğinin sönüm oranına etkisi incelendiğinde, lif uzunluğu ve içeriği arttıkça sönüm oranında artış gözlemlenmektedir. Ancak, belli lif içeriğinden sonra lif uzunluğun etkisi azalmaktadır. Bu çalışmada, maksimum sönüm oranı, 4 mm'lik ve %1 oranında içerikli numunelerden elde edilmiştir.
- Agregalı lifli malzemeleri için lif uzunluğu ve içeriğinin kayma modülüne etkisi çok az olmuştur.
- Modal analizlerin sonuçları incelendiğinde, ankastre mesnetli modele izolatör eklendiğinde periyodu 0,596 sn'den yaklaşık 1,4 sn'ye kadar yükselmektedir. Periyot arttıkça, taban kesme kuvveti önemli ölçüde azalabilmektedir.
- Optimum izolatör çapının bulunması için farklı izolatör çapları ve yükseklikleri incelenmiştir. İzolatör yüksekliği sabit tutulduğunda, çapın azalmasıyla birlikte maksimum ivme değeri ve maksimum göreceli ötelenmeler azalmaktadır.
- İzolatör malzemesinin çapı sabit tutulduğunda yüksekliğin artmasıyla birlikte maksimum ivme değeri ve katlar arası göreceli ötelenme değerlerinde azalma gözlemlenmektedir.
- Çapın azalması ve yüksekliğin artması maksimum ivmelerin ve katlar arası göreceli ötelenmelerin azalmasına sebep olmaktadır. Ancak, mühendislik açısından projelendirmede sorun yaşanabileceğinden istenilen kadar yüksekliğin artırılması veya çapın azaltılması mümkün değildir. Bu çalışmada, izolatöre uygulanan düşey basınçlar dikkate alınarak izolatörün çapı 0,8 m ve yüksekliği 1,2 m olarak seçilmiştir.

- Zaman tanım analizlerinin sonucuna göre, izolasyonsuz model için maksimum tepki ivme değeri 2,64g olarak bulunmuştur ki izolatör kullanıldığında 0,65g'e düşmüştür. Dolayısıyla, ivmelerde yaklaşık %75 oranında azalma meydana gelmiştir.
- Maksimum katlar arası görelî ötelenme miktarı %1,86 oranındadır ki izolatör kullanıldığında bu değer %0,70'e düşmüştür. Dolayısıyla, görelî ötelenme de %62 oranında azalma meydana gelmiştir.

Agrega-modifiye bitüm karışımının taban izolatörü olarak kullanılması için bu çalışmaya ilaveten bazı konuların araştırılması gerekmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda malzemenin kısa ve uzun süreli statik yük altında mukavemeti ve oturması incelenmelidir. Malzemenin yatay rijitliğini artırmadan düşey rijitliğinin artırılması araştırma konusu olabilir. Ayrıca bitüm içerikli malzemeler sıcaklıktan etkilendiği gerçeği ışığında bu malzemelerin farklı sıcaklıklarda deneye tabi tutulmalarda ayrı bir araştırma konusu olmalıdır.

Agrega-modifiye bitüm karışımının taban izolatörü olarak uygulanması ile ilgili araştırmaların yapılması gerekmektedir. Önerilen malzemenin etkinliği büyük ölçekli yapı modellerinde sarsma tablası deneyleri ile detaylı bir şekilde test edilmesi zorunluluğu bulunmaktadır. Bu hususların değerlendirecek deneysel, analitik ve nümerik çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Ahmadi, G., 1995. Overview of Base Isolation Passive and Active Vibration Control Strategies Aseismic Design of Structures, Scientia Iranica, 2, 2, 99-116, Iran.
- Airey, G.D., 2003. Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, Fuel, 82, 14, 1709-1719.
- Akhtarpour, A. ve Khodaii, A., 2013. Experimental Study of Asphaltic Concrete Dynamic Properties as an Impervious Core In Embankment Dams, Construction and Building Materials, 41, 319-334.
- Al-Refeai, T. ve Al-Suhaibani, A., 1998. Dynamic and Static Characterization of Polypropylene Fiber-Reinforced Dune Sand. Geosynthetic. Int, 5, 5, 443-458.
- Anagnostopoulos, C. A., Papaliangas, T. T., Konstantinidis, D. ve Patronis, C., 2013. Shear Strength of Sands Reinforced with Polypropylene Fibers, Geotech. Geolog. Eng., 3, 401-256.
- ANSI/AISC 360-16, 2016. American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings. Standard.
- Antoniou, S. ve Pinho, R., 2004. Seismosignal: A Computer Program for Signal Processing of Strong-Motion Data, Technical Report-SeismoSoft, 4.0.0. Pavia, Italy.
- ASCE/SEI 7-16., 2017. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and other Structures, American Society of Civil Engineers, LCCN 2017018275/ISBN 9780784414248.
- ASCE/SEI 41-13, 2014. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers. Baker.
- ASTM D 422, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 3080, 2020. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 2487, 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 854, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

- ASTM D 6528, 2017. Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 5, 2006. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 3999, 2013. Standard Test Method for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Becker, Y., Méndez, M.P. ve Rodriguez, Y., 2001. Polymer Modified Asphalt, Vision Tecnologica, 9 ,1, 39–50.
- Bozorgnia, Y. ve Bertero, V.V., 2004. Earthquake Engineering: from Engineering Seismology to Performance-based Engineering, CRC Press LLC: Boca Raton, FL.
- Buckle, I. G. ve Mayes, R. L., 1990. Seismic Isolation: History, Application and Performance-A World View, Earthquake spectra, 6, 2, 161-201.
- Bueno, B. d. S., Da Silva, W. R., de Lima, D. C. ve Minete, E., 2003. Engineering Properties of Fiber Reinforced Cold Asphalt Mixes, Journal of Environmental Engineering, 129,10,952–955.
- Cardone, D., Gesualdi, G. ve Nigro, D., 2011. Effects of Air Temperature on The Cyclic Behavior of Elastomeric Seismic Isolators, Springer Netherlands, Bulletin of Earthquake Engineering, 9, 4, 1227-1255.
- Chaffin, C. W., O Connor, D.L.ve Hughes, C.H., 1978. Evaluation of The Use of Certain Elastomers in Asphalt, Washington, D.C.: Federal Highway Administration, July, FHWA-TX-78180-1F Final Rpt.
- Chatzidaki, F., 2011. Optimum Design Oase Isolated Rc Structures, Postgraduate Diploma Thesis, Athens NTUA.
- Chen, J.S., Liao, M.C. ve Shiah, M.S.,2002. Asphalt Modified by Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, Journal of Materials in Civil Engineering, 14,3, 224-229.
- Chen, X., 2004. Stars Behavior Analysis and Application Research for Treated Asphalt-Fibre Seismic Isolation Cushion, 13th world conference on earthquake engineering vancouver, b.c., August ,1-6, 1959, Canada.
- Collop, A. C., Scarpas, A., Kasbergen, C. ve de Bondt, A., 2003. Development and Finite Element Implementation of a Stress Dependent Elasto-Visco-Plastic Constitutive Model with Damage for Asphalt, Proc. of 82nd TRB Annual Meeting, Washington D.C., U.S.

- Connor, J. J., 2002. Introduction to Structural Motion Control, Massachusetts Institute of Technology, Boston: Pearson education.
- Constantinou, M. C., Kalpakidis, I., Filiatrault, A. ve Ecker Lay, R. A., 2011. LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, Technical Report MCEER-11-0004, University at Buffalo, New York.
- CSI, SAP 2000, Ver. 20, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, Berkeley (CA, USA): Computers and Structures.
- Dao, N. D. ve Ryan, K. L., 2015. Seismic Response of a Full-Scale 5-Story Steel Frame Building Isolated by With Triple Pendulum Bearings Under 3d Excitations, Rep. No. CCEER-15-01, Center for Civil Engineering Earthquake Research, Univ. of Nevada, Reno, NV.
- Das, B. M. ve Ramana, G.V., 1993. Principles of Soil Dynamics PWS-KENT Publishing Boston.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik, 2007. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi.
- Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzeat, C. ve Delaporte, B., 2004. Linear Viscoelastic Behavior of Bituminous Materials: From Binders to Mixes, Int. J. Road Mater Pave Des., 5 special issue,163-202, European Asphalt Technology Association, Nottingham.
- Dhanya, J.S., Boominathan, A. ve Banerjee, S., 2020. Response of low-rise building with geotechnical seismic isolation system, Soil Dyn. Earthquake Eng., 2020, 136, 106187.
- Edil, T.B. ve Bosscher, P.J., 1994. Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures, Geotech. Test. J., 17,4, 453-464.
- Ehsani, M., Shariatmadari, N. ve Mirhosseini, S. M., 2015. Shear Modulus and Damping Ratio of Sand-Granulated Rubber Mixtures, J. Cent. South Univ., 22, 3159–3167.
- Fahjan, Y. M., 2008. Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY–2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi. İMO Teknik Dergisi, 292, 4423–4444.
- Feizi-Khankandi, S., Mirghasemi, A.A., Ghalandarzadeh, A. ve Höeg, K., 2008. Cyclic Triaxial Tests on Asphalt Concrete as a Water Barrier for Embankment Dams, Soils and Foundations, 48, 3, 319-332.
- Ferry, J. D., 1980. Viscoelastic Properties of Polymers, 3rd ed., John Wiley Sons, New York.
- Foose, G.J., Benson, C.H. ve Bosscher, P.J.,1996. Sand Reinforced with Shredded Waste Tires, J. Geotech. Eng. ASCE, 122,9, 760-767.

- Forcellini, D. 2017. Assessment on Geotechnical Seismic Isolation (GSI) on Bridge Configurations, Innov. Infrastruct. Solut., 2:9 DOI 10.1007/s41062-017-0057-8.
- Gluck, N., Reinhorn, A. M., Gluck, J. ve Levy, R., 1996. Design of Supplemental Dampers for Control of Structures, ASCE Journal of Structural Engineering, 122,12, 1394–1399.
- Hoeg, K., 1993. Asphaltic Concrete Core for Embankments Dam Experience and Practise, Statkraft, Veidekke, Norwegian Geotechnical Institute
- Huang, H. ve White, T. D., 1996. Dynamic Properties of Fiber-Modified Overlay Mixture Trans Res Rec, 1545, 98-104.
- Humphrey, D. ve Manion W., 1992. Properties of Tire Chips for Light-Weight Fill, Grouting, soil improvement, and geosynthetics, ASCE: 2, 1344-1355, New York.
- Hunter, R. N., Self A. ve Read J., 2015. The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition, by ICE Publishing, One Great George Street, Westminster, SW1P 3AA, London.
- Isacsson, U. ve Lu, X., 1995. Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens-State of The Art, Materials and Structures, 28,3, 139-159.
- Kammerer, M., Pestana, J.M. ve Seed, R.B., 2002. Undrained Response of Monterey 0/30 Sand Under Multidirectional Cyclic Simple Shear Loading Conditions, Geotechnical Engineering, Report No UCB/GT/02-01.
- Kelly, J. M., 1990. Base Isolation: Linear Theory and Design, J. Earthquake Spectra,6, 223-244.
- Kelly, J. M., 1999. The Role of Damping in Seismic Isolation, earthquake engineering and structural dynamics, 28, 3-20.
- Kelly, J. M., 2002. Seismic Isolation Systems for Developing Countries. EERI Distinguished Lecture, Earthquake Spectra, 18,3, 385-406.
- Kim, D. S. ve Konagai, K., 2001. Key Parameters Governing the Performance of Soft Tunnel Coating for Seismic Isolation, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 30,9, 1333-1343.
- Kramer, S. L.,1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Publ. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kumar G. T., 2015. Dynamic Properties of Indian Standard Sand and Coal Ashes from Cyclic Simple Shear Tests, Thesis, Indian Institute of Technology Hyderabad.
- Kuvat, A. 2019. Bitümlü Sönümleyici Geomateryallerin Tasarlanması ve Sismik İzolasyon Amaçlı Kullanılabilirliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon

- Kuvat, A. ve Sadoglu, E., 2020. Dynamic Properties of Sand-Bitumen Mixtures as A Geotechnical Seismic Isolation Material, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, May, 132, 106043.
- Lakes, R., 2009. Viscoelastic Materials, Cambridge University Press.
- Lakes, R. S., Kose, S. ve Bahia, H. U., 2002. Analysis of High-Volume Fraction Particulates with Applications to Asphalt and High Damping, Composites, Transactions of the ASME, 124(April): 174–178.
- Lang, A.F. ve Sargent, J.D., 2005. Method and Apparatus for Reducing Earthquake Damage in Developing Nations Using Recycled Tires, United States Patent Number: 6,862,848 B1, 8 March.
- Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. ve Lovell, C.W., 1999. Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125,2, 132-141.
- Lesueur, D., Gerard, J. F., Claudy, P., Letoffe, M. M., Planche, J. P. ve Martin, D., 1996. Astructure Related Model to Describe Asphalt Linear Viscoelasticity, J Rheology, 40, 813–836.
- Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X. ve Shi, B., 2014. Effect of Discrete Fibre Reinforcement on Soil Tensile Strength, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 6,2,133-137.
- Ling, H.I., Burke, C., Mohri, Y. ve Matsushima, K., 2002. Shear Strength Parameters of Soil-Geosynthetic Interfaces Under Low Confining Pressure Using a Tilting Table, Geosynthetics International,9,4, 373-380.
- Liu, Y., Zwingmann, B. ve Schlaich, M., 2015. Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures-A Review, Polymers, 7, 2078–2099; doi:10.3390/polym7101501.
- Lu, X., 1997. On Polymer Modified Road Bitumens, Doktora Tezi, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Lucas, A. G., 1976. Modified Bitumens for Rolled Asphalt. Highways and Road Construction International, 44,1800,4-5.
- Lucena, M.C.C., Soares, S.A. ve Soares, J.B., 2004. Characterization and Thermal Behavior of Polymer-Modified Asphalt, Materials Research Ibero-american, Journal of Materials, 7,4, 529-534.
- Masad, E., Taha, R., Ho, C. ve Papagiannakis, T., 1996. Engineering Properties of Tire/Soil Mixtures as a Lightweight Fill Material, Geotech. Test. J., 19,3, 297-304.
- Naeim, F. ve Kelly, J. M., 1999. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. Copyright © John Wiley & Sons, Inc.

- Nakhaei, A., Marandi, S. M., Kermani, S. S. ve Bagheripour, M. H., 2012. Dynamic Properties of Granular Soils Mixed with Granulated Rubber, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43, 124-132
- Nanda, R. P., Dutta, S., Khan, H. A. ve Majumder S., 2018. Seismic Protection of Buildings by Rubber-Soil Mixture as Foundation Isolation, International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering, 9, 1, 99-109.
- Ossa, A. ve Romo, M. P., 2011. Dynamic Characterization of Eps Geofoam, Geotextiles and Geomembranes, 29, 40-50.
- Pamplona, T. F., Amoni, B. C., Alencar, A. E. V., Lima, A. P. D., Ricardo, N. M. P. S. ve Soares, J. B., 2012. Et Al. Asphalt Binders Modified by Sbs and Sbs/Nanoclays: Effect on Rheological Properties, J. Braz. Chem. Soc., 23,2012,639.
- Peer, Pacific Earthquake Engineering Research center strong motion database, <http://peer.berkeley.edu>. 2018.
- Perkins, S.W. ve Cuelho, E.V., 1999. Soil-Geosynthetic Interface Strength and Stiffness Relationships from Pullout Tests, Geosynthetics International, 6,5, 321-346.
- Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J. ve Zanzotto, L., 2005. Asphalt Modification with Different Polyethylene-Based Polymers, European Polymer Journal, 41,12, 2831-2844.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D. ve Zanzotto, L., 2006. Relation Between Polymer Architecture and Nonlinear Viscoelastic Behavior of Modified Asphalts, Current Opinion in Colloid & Interface, 11,4, 230-245.
- Ramadan, J. I., 2007. Settlement of Dry Cohesionless Soil Deposits Under Earthquake Induced Loading, Doctor of Philosophy Dissertation, Civil Engineering Department, University of Southern California.
- Rivin, E.I., 2001. Passive Vibration Isolation, ASME Press, New York.
- Rostler, F. S., White, R. M. ve Cass, P. J., 1972. Modification of Asphalt Cements for Improvement of Wear Resistance of Pavement Surfaces, Washington, D.C.: Federal Highway Administration, March, FHWA-RD-72-24 Final Rpt.
- Seed, H.B., ve Idriss, I.M., 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Senetakis, K., Anastasiadis, A. ve Pitilakis, K., 2012. Dynamic Properties of Dry Sand/Rubber (SRM) and Gravel/Rubber (GRM) mixtures in a Wide Range of Shearing Strain Amplitudes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 33, 38-53.

- Sengoz, B. ve Isikyakar G., 2008. Evaluation of The Properties and Microstructure of SBS and Eva Polymer Modified Bitumen, Constr. Build Mater, 22 ,9, 1897-1905.
- Skinner, R. I., Robinson, W. H. ve McVerry, G. H., 1993. An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Stock, A.F. ve Arand, W., 1993. Low Temperature Cracking in Polymer Modified Binders, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, March 22-24, Austin, Texas. St. Paul, Minnesota, 23-53.
- Taniwangsa, W. ve Kelly, J.M., 1996. Studies on Seismic Isolation for Housing in Developing Regions, In Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, July, 261, Mexico.
- Taylor, A.W. ve Igusa, T., 2004. Primer on Seismic Isolation; American Society of Civil Engineers (ASCE): Reston, VA.
- Taylor, R. E. ve Airey, G. D., 2008. Polymer Modified Bitumens, Part one: background and history, Asphalt Professional, 34, 11–16.
- Toufigh, V., Saeid, F., Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C. ve Saadatmanesh, H., 2013. Laboratory Study of Soil-Cfrp Interaction Using Pullout Test, Geomechanics and Geoengineering, DOI: 10.1080.
- Tsang, H., H., Lo, S., H., Xu, X. ve Sheikh M., N. 2012, Seismic Isolation for Low-Tomedium- Rise Buildings Using Granulated Rubber-Soil Mixtures: Numerical Study, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41, 2009-2024.
- Tsang, H.H., 2008. Seismic Isolation by Rubber-Soil Mixtures for Developing Countries, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 37,2, 283-303.
- Tsang, H. H., 2009. Geotechnical Seismic Isolation, Earthquake engineering: new research. Nova Science Publishers, Inc., 55–87, New York.
- URL-1, [https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_50_70_\(750\).pdf](https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_50_70_(750).pdf), 10.05.2019
- URL-2, [https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_70_100_\(760\).pdf](https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_70_100_(760).pdf), 10.05.2019
- URL-3, [https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_100_150_\(770\).pdf](https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_100_150_(770).pdf), 10.05.2019
- URL-4, [https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_160_220_\(780\).pdf](https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/BITUM_160_220_(780).pdf), 10.05.2019
- Valkering, C.P. ve Vonk, W., 1990. Thermoplastic Rubbers for the Modification of Bitumens: Improved Elastic Recovery for High Deformation Resistance of Asphalt Mixes, Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 15th, 1990, Darwin, Northern Territory, August, 26-31, 1-19.

- Van der Poel, C., 1954. A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumen and Its Relation to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, 4, 221–236.
- Vucetic, M., Lanzo, G. ve Doroudian, M., 1998. Damping at Small Strains in Cyclic Simple Shear Test, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 124,7, 585–594.
- Wang, W. ve Hoeg, K., 2011. Cyclic Behavior of Asphalt Concrete Used as Impervious Core in Embankment Dams, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 137, 5, 536-544.
- Wu, T. C., 2001. Design of Base Isolation System for Buildings, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 18-21.
- Xiong, W. ve Li Y., 2013. Seismic Isolation Using Granulated Tire-Soil Mixtures for Less Developed Regions: Experimental Validation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42, 2187-2193.
- Xu, Q. ve Solaimanian, M., 2009. Modelling Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Concrete by The Huet-Sayegh Model, Int. J. Pavement Eng., 10,6,401–422.
- Xu, Z. D., Wang, D. X. ve Shi, C. F., 2010. Model, Tests and Application Design for Viscoelastic Dampers, J. Vib. Control, 17 ,9, 1359-1370.
- Yao, F., Shang, S. ve Liu, K., 2014. Shake Table Tests of a New Steel–Asphalt Composite Layer System for The Seismic Base Isolation of Housing Units, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 59, 1–7.
- Ye, Q. S. ve Wu, S. P., 2009. Rheological Properties of Fiber Reinforced Asphalt Binders Indian j. Eng. Mater. Sci., 16,2,93-99.
- Yegian, M.K. ve Catan, M., 2004. Soil Isolation for Seismic Protection Using a Smooth Synthetic Liner, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130,11, 1131-1139.
- Yegian, M.K. ve Kadakal, U., 2004. Foundation Isolation for Seismic Protection Using a Smooth Synthetic Liner, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130,11, 1121-1130.
- Yegian, M.K. ve Lahlaf, A., 1992. Geomembranes as Base Isolation, Geotechnical Fabrics Report, 10,6, 17-21.
- Zanzotto, L., Stastna, J. ve Vacin, O., 2000. Thermomechanical Properties of Several Polymer Modified Asphalts, Applied Rheology, 10,3, 134-144.
- Zardari, S. ve Ouria, A., 2019. Effect of The Length and Content of Fibers on The Shear Strength of Randomly Distributed Fiber-Reinforced Soil, 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET), Bayburt Üniversitesi.

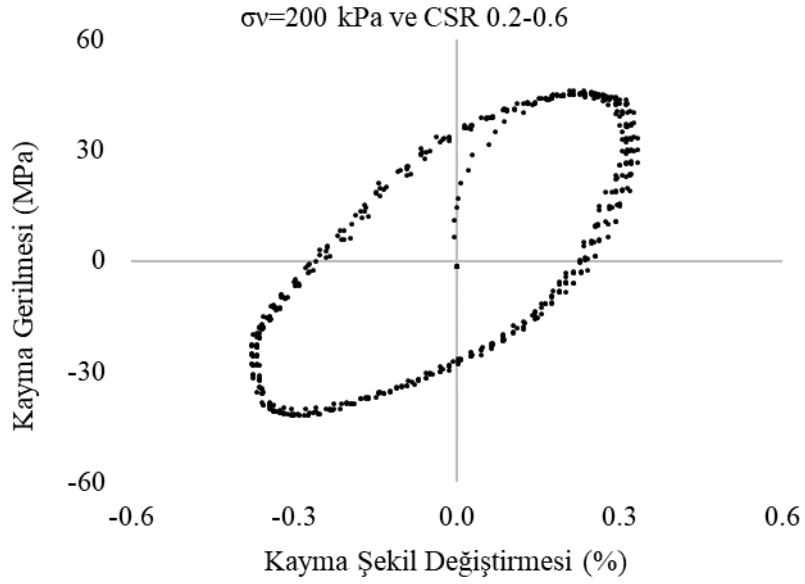
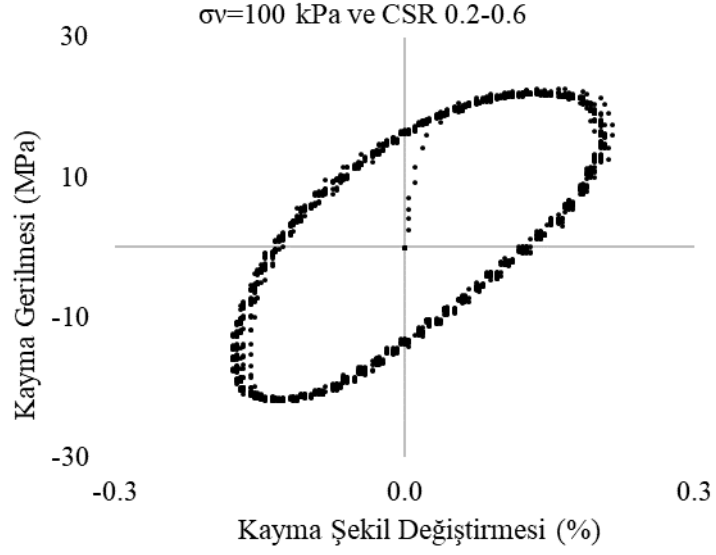
Zeng, X., Rose, J. G. ve Rice, J. S., 2001. Stiffness and Damping Ratio of Rubber-Modified Asphalt Mixes: Potential Vibration Attenuation for High-Speed Railway Trackbeds, J. Vib. Control, 7,4, 527–538.

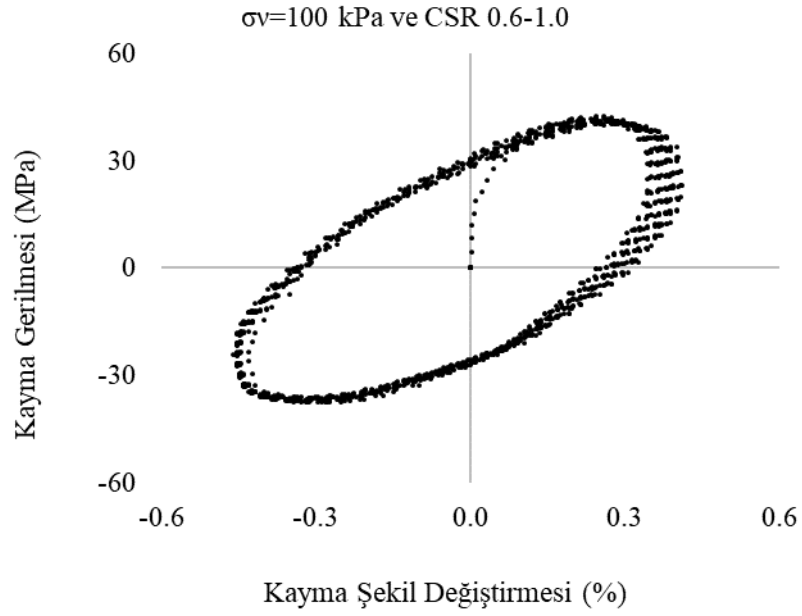
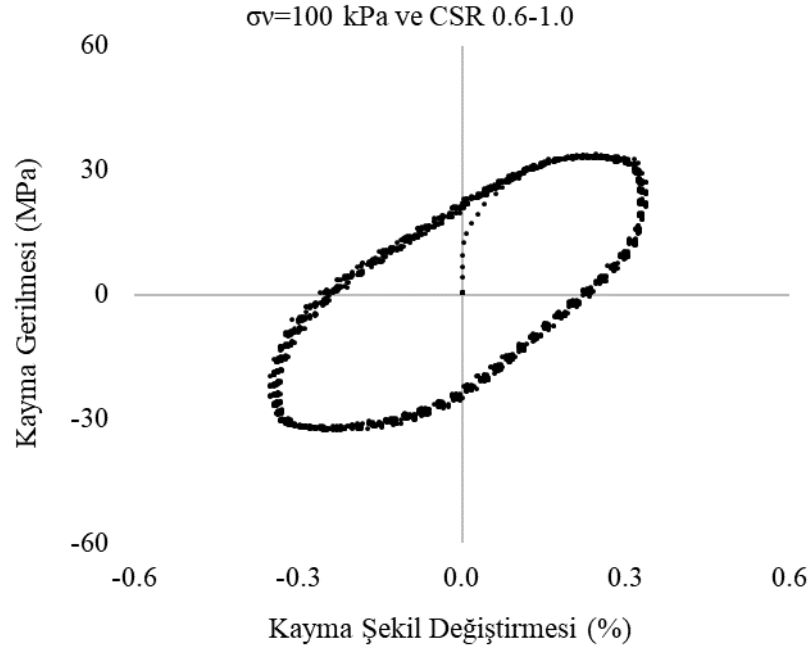
Zhong, X. Z., Zeng, X. ve Rose, J. G., 2002. Shear Modulus and Damping Ratio of Rubber-Modified Asphalt Mixes and Unsaturated Subgrade Soils, Journal of Materials in Civil Engineering, 14, 6, 496–502.



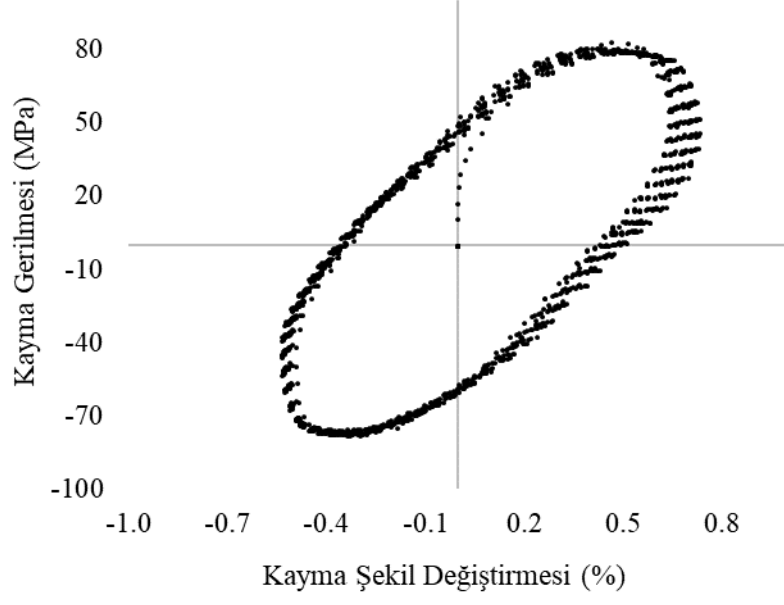
6. EKLER

Ek 1. Çevrimsel Basit Kesme Deneyin Histerezis Eğrileri
(Agrega- %5 SBS'le modifiye bitüm karışımı farklı CSR aralıkları ve düşey basınçları) (Bitüm içeriği %12)





$\sigma_v=200$ kPa ve CSR 0.6-1.0



ÖZGEÇMİŞ

Saeid ZARDARI, 1987 yılında Tabriz’de doğdu. 2006-2011 yılları arasında Tabriz-İAÜ üniversitesinde, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimini tamamladı. 2011-2014 yılları arasında Muhakkık-İ Ardebili Üniversitesinde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2011-2015 yılları arasında özel sektörde inşaat mühendisi olarak çalıştı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

