DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOLON ALTI SİSMİK İZOLATÖR KUVVET ANALİZİ

Mehmet TOKER

Kasım, 2015

İZMİR

KOLON ALTI SİSMİK İZOLATÖR KUVVET ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon-İmalat Programı

Mehmet TOKER

Kasım, 2015

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MEHMET TOKER tarafından **Prof. Dr. Onur SAYMAN** yönetiminde hazırlanan **"KOLON ALTI SİSMİK İZOLATÖR KUVVET ANALİZİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Onur SAYMAN

Yönetici

Prof. Dr. Mustafa TOPARLI

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Çiçek ÖZES

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Mehmet PAKDEMİRLİ

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Şenol ATAOĞLU

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce beni okumaya ve öğrenmeye teşvik edip cesaretlendirmiş olan biricik anneme ve de bu çalışmada bana her zaman yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Onur Sayman'a ve hiçbir zaman yardımını esirgemeyen ve de her zaman desteğini esirgemeyen sevgili eşim Nurgün Hanım'a ve kızım Ayşenur'a çok teşekkür ederim.

Mehmet TOKER

KOLON ALTI SİSMİK İZOLATÖR KUVVET ANALİZİ

ÖZ

Günümüzde birçok betonarme ve çelik yapı, depremlerin yıkıcı ve hasar verici etkilerine karşı ne yazıktır ki korumasızdır. Birçok mimari yapı, mimari bir zorunluluğun gereği veya yapının kullanım amacının gereği olarak, asimetrik bir planda yapılmaktadır. Simetrik plana sahip olan birçok yapıda ise, kütlelerin eşit olmayan dağılımı söz konusudur. Yapıların planındaki asimetriklik ve yapıdaki düzgün olmayan kütle dağılımı, deprem hareketi sırasında yapıda burulma momentlerine neden olur. Yapıda deprem nedeniyle meydana gelen bu burulma, yapının düşey taşıyıcı elemanlarında ilave kesme kuvvetleri oluşmasına sebep olur. Bu ilave kesme gerilmeleri de, yapının kütle merkezinin yapının rijitlik merkezinden uzaklaşma oranına bağlı olarak büyür ve bu ilave gerilmeler sayesinde, yapıda ciddi hasarlar olabilir.

Depreme dayanıklı yapıların tasarımında, geleneksel yaklaşıma göre; yapıları bu tür hasarlardan korumanın yolu, projede simetrinin olması ve rijitlik merkezi ile kütle merkezinin aynı düşey eksen üzerinde olmasına dikkat edilmesidir. Ancak, günümüzde, her geçen gün daha fazla uygulama alanı bulan modern yaklaşımda ise, bu tür yapıların depremsel davranışı, yapısal kontrol mekanizması kullanılarak iyileştirilebilir bir durumdur ve böylece yapılardaki depremsel hasar oluşma riski en aza indirililir.

Bu çalışmada, binaların deprem nedeniyle meydana gelen kuvvetlerin etkisi altında, elastomer esaslı deprem izolatörleri kullanarak taban yalımı yapılmış yapıların davranışlarının kontrol altına alınmasının faydaları üzerinde durulmuştur. Yapıların deprem yalıtımında kullanılan elastomer esaslı deprem izolatörleri üzerinde deprem nedeniyle oluşan kuvvetler incelenmiştir. Özellikle, betonarme ve çelik yapıların depremin zarar verici ve yıkıcı etkilerini önlemek amacıyla geliştirilen ve binaların ve köprülerin kolonları ve kirişleri altına yerleştirilerek taban yalıtımı

yapımında kullanılan “Elastomer Esaslı Deprem İzolatörlerinin” kuvvet ve gerilme analizlerinin yapılması bu doktora çalışmasının ana konusudur. Bu çalışma ile kolonların altına yerleştirilen deprem izolatörlerine gelen kuvvetlerin analizinden hareketle performansı yükseltilmiş olan elastomer esaslı yeni nesil deprem izolatörlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında kurşun Çekirdekli LRB tipi elastomer esaslı deprem izoltörlerine alternatif ELRB tipi elastomer çekirdekli izolatörler geliştirilmiştir ve bölüm yedide ayrıntılı bir şekilde bilgi verlmiştir.

Anahtar kelimeler: Deprem yalıtımı, taban yalıtımı, sismik izolasyon, deprem izolatörü, kuvvet ve gerilme analizleri, elastomer esaslı izolatörler, kauçuk esaslı izolatörler, yüksek sönümleme kabiliyetli kauçuk esaslı izolatör (HDRBr), kurşun çekirdekli elastomer izolatör (LRBr) ve elastomer çekirdekli kauçuk esaslı izolatörler ELRB.

FORCE ANALYSIS OF SEISMIC ISOLATOR UNDER THE COLUMN

ABSTRACT

Nowadays, most of the concrete and steel structures unfortunately remain unprotected against the destructive and damaging effects of earthquakes. As for the architectural structure requirements or for the purpose of structural use, many architectural structures are carried out in an asymmetrical plan. On the other hand many structures having symmetrical design have uneven distribution of the mass. Nonuniform mass distribution and asymmetrical plan of the structures, leads the structures to have torsional moments during the earthquake motions. These earthquake caused these moments bring on new additional vertical shear forces on vertical loadbearing elements. This additional shear stresses also increases with the increasing distance between the center of gravity and the center of rigidity, where as a result of these additional shear stresses the structure may face severe damages.

In the designing of the earthquake resistant structures, according to the traditional approach; the way to protect the structure from such kind of earthquake damages is to make a symmetrical structural design and to ensure the center of gravitiy and the center of rigidity on the same vertical axis. However, in the modern approach which can be used in a wider range of fielr application today, seismic behavior of such structures is a recoverable condition by using structural control mechanism. Thus seismic damage risk of the structure is minimized. For the structures under the influence of forces caused by earthquakes, this study has been focused on the benefits of controlling the behavior of structures by using elastomer based seismic isolation. This study also analyzes the forces on the elastomer based seismic isolators formed by the earthquakes and also examines the elastomer based seismic isolators in detail.

In particular one of the main objective of this study is to analyse the forces and stresses of the “Elastomer Based Seismic Isolators” which have been placed either

under the columns or beams of the buildings and bridges, below reinforced concrete and steel structures in order to avoid the damaging and devastating effects of the earthquakes. In this study, based on the analysis of the forces formed on the seismic isolators, new generation performance increased Elastomer Based Seismic Isolators' development has been targeted and it has been developed a new isolator which has elastomer core ELRB. and it has been given information in detail at chapter seven.

Keywords: Seismic isolation, base isolation, seismic isolator, force and strain analysis, rubber isolator, elastomeric isolator, high damping rubber bearings (HDRBr), lead rubber bearings(LRBr) and elastomer core rubber bearings ELRB.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT vi
ŞEKİLLER LİSTESİ xvi
TABLOLAR LİSTESİ xxiii

BÖLÜM BİR-DEPREM YALITIMINA GENEL BAKIŞ 1

1.1 Deprem Taban Yalıtım Konsept 1
1.2 Yapıların Deprem Etkisi Altındaki Davranışlarını ve Tepkilerini Kontrol Etme Fikri 2
1.3 Deprem Taban Yalıtımının Amacı 4
1.4 Deprem Taban Yalıtım Tarihine Kısa Bir Bakış 7
1.5 Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımında Yaklaşımlar 8
1.5.1 Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımında Geleneksel Yaklaşım 9
1.5.2 Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Modern Yaklaşım 10
1.6 Yapıların Deprem Kontrolünde Kullanılan Ana Sistemler 11
1.6.1 Aktif Deprem Yalıtım Sistemleri 11
1.6.2 Pasif Deprem Yalıtım Sistemleri 12
1.6.2.1 Pasif Deprem Yalıtım Sistemlerinin Tarihine Bakış 15
1.7 Taban Yalıtımı Ana Prensipleri 25
1.7.1 Esnekliğin Periyot Üzerindeki Etkisi 25
1.7.1.1 Elastomer Deprem İzolatörlerinin Yatay Yöndeki Esnekliklerinin Periyot Üzerindeki Etkisi 25
1.7.1.2 Deprem Hareketi Karakteristikleri 26
1.7.1.3 Standart Kodlarda Deprem Yükleri 26
1.8 Deprem İzolatörleri Tarafından Yutulan Enerji ve Ek Sönümleme 29
1.9 Deprem İzolatörü Sönümleme Tipleri 33

1.10 Deprem Yalıtımında Esneklik ve Sönümleme 34
1.11 Taban Yalıtımlı Rijit Bir Yapının Tasarım Prensipleri 36
1.11.1 Maksimum Taban Kesme Katsayısı Tasarımı 37
1.12 Taban Yalıtımında, Uygun Periyot Değeri ve Makul Sönüm Oranı Ne Olmalıdır? 39
1.13 Rijit Yapı Kabulünün Uygulanabilirliği 42
1.14 Deprem İle İlgili Olmayan Yükler 42
1.15 Bir Deprem Yalıtım Sistemi için Olmazsa Olmazlar 43
1.16 Deprem İzolatör Tipleri 44
1.16.1 Elastomer Esaslı Kauçuk Deprem İzolatörleri 44
1.17 Binalarda Deprem Yalıtımı Uygulaması Yapımı 44
1.17.1 Yapılarda Deprem Yalıtımı Ne Zaman Uygulanır? 44
1.17.1.1 Taban Yalıtımı Uygulanacak Yapının Ağırlığı 45
1.17.1.2 Yapının Periyodu 45
1.17.1.3 Uzun Periyotlu Dalgalara Neden Olan Sismik Şartlar 46
1.17.1.4 Bina Zemin Şartları 46
1.17.1.5 Yakın Fay Etkileri 46
1.17.1.6 Yapısal Düzenleme 47
1.17.1.7 Yapısal Sistemlerin En-Boy Oranı 48
1.18 Binaların Deprem Yalıtımı İle İlgili Standart Kodlar 49
1.18.1 Mekanik Enerji Sönümleyici Cihazlar İçeren Yapılar 50
1.19 Deprem Taban Yalıtım Uygulaması 51
1.19.1 Başlangıç Taban Yalıtım Tasarımı 51
1.19.2 Deprem Yalıtım Elemanları Satın Alma Stratejileri 52
1.19.3 Ayrıntılı Deprem Yalıtım Tasarımı 54
1.19.4 İnşaat Yapım Aşamasında Deprem Yalıtım Sisteminin Uygulanması55
1.19.5 Deprem Taban Yalıtım Sistemi Maliyeti 55
1.20 Deprem Girdi Şekli 56
1.21 Taban Yalıtımının Binalar Üzerindeki Etkisi 58
1.21.1 Prototip Binalar 58
1.21.1.1 Bina Konfigürasyonu 58
1.21.1.2 Deprem İzolatörlerinin Tasarımı 60

1.22 Taban Yalıtımının Binalar Üzerinde Etkisi 62
1.22.1 Prototip Binalar 63
1.22.1.1 Bina Konfigürasyonu 63
1.22.1.2 Deprem İzolatörlerinin Tasarımı 64
1.22.1.3 Deprem Yalıtım Sistemi Değerlendirme Prosedürü 68
1.22.1.3.1 Tepki Spektrum Analizi 70
1.22.1.3.2 Zaman-Tanım Analizi 71
1.22.1.4.1 Tepki Spektrum Analizi 72
1.23 Bina Atalet Yükleri 77
1.23.1 Tepki Spektrum Analizi 77
1.23.2 Zaman-Tanım Analizi 79
1.24 Uygun İzolasyon Sistemleri 81
1.24 Tepki Spektrum Metodu İle İlgili Sorunlar 84
1.24.1 Devrilmenin Yetersiz Tahmini 84
1.25 Deprem İzolatörü Özellikleri ve Örnek İzolatör Uygulaması 86
1.26 Deprem İzolatörü Montaj Yerleri ve Montaj Tipleri 89
1.26.1 İzolasyon Düzlemi Seçimi 89
1.26.1.1 Binalar 89
1.26.1.2 Taban Yalıtımım Mimari Özellikleri ve Bakımı 93
1.26.2 İzolatör Tipi Seçimi 94
1.26.2.1 Karışık İzolatör Tipleri ve Boyutları 95
1.26.2.2 Elastomer Esaslı Deprem İzolatörleri 96
1.26.2.3 HDRBr Yüksek Sönümlemeli Kauçuk İzolatörler 99
1.26.2.4 LRBr Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler 100
1.26.3 Cihazların Avantajları ve Dezavantajları 101
1.27 Deprem İzolatörleri 1.25 Deprem İzolatörü Özellikleri ve Örnek İzolatör Uygulaması 103
1.27.1 Bilgi Kaynakları 1.25 Deprem İzolatörü Özellikleri ve Örnek İzolatör Uygulaması 103
1.27.2 Kurşun Çekirdekli İzolatörlerin Mühendislik Özellikleri 1.25 Deprem İzolatörü Özellikleri ve Örnek İzolatör Uygulaması 104
1.27.2.1 Kesme Modülü 104

1.27.2.2 Kauçuk Sönümlemesi..... 105
1.27.2.3 Özelliklerde Tekrara Bağlı Değişim 106
1.27.2.4 Özelliklerin İzolatör Ömrüne Bağlı Değişimi..... 109
1.27.2.5 Basma Gerilmesi Tasarımı..... 110
1.27.2.6 Tasarım Çekme Gerilmesi..... 111
1.27.2.7 Maksimum Kesme Gerilmesi..... 112
1.27.2.8 Yapışma Dayanımı..... 114
1.27.2.9 Düşey Yönde Bel Vermeler ve Çökmeler..... 114
1.27.2.10 Uzun Dönem Düşey Yönde Bel Vermeler..... 114
1.27.2.11 Yanal Yük Altında Düşey Yönde Bel Verme..... 115
1.27.2.12 Rüzgâr Deplasmanı..... 116
1.27.2.13 Test Sonucu Özelliklerinin Teori ile Karşılaştırılması..... 117
1.27.3 HDRBr'nin Mühendislik Özellikleri..... 118
1.27.3.1 Kesme Modülü..... 118
1.27.3.2 Sönümleme 119
1.27.3.3 Özelliklerde Yükleme Tekrarına Bağlı Değişiklikler..... 121
1.27.3.4 İzolatör Özelliklerinde Zamana Bağlı Değişimler..... 121
1.27.3.5 Tasarım Basma Gerilmesi..... 122
1.27.3.6 Maksimum Kesme Gerilmesi 122
1.27.3.7 Yapışma Dayanımı122
1.27.3.8 Deprem İzolatöründe Düşey Yönde Bel Vermeler ve Çökmeler. 122
1.27.3.9 Uzun Dönem Düşey Bel Vermeler 123
1.27.3.10 Rüzgâr Deplasmanları..... 123
1.28 İzolasyon Sistemi Tasarımı..... 123
1.28.1 Tasarım Prosedürü 123
1.28.3 Kauçuk Özellikleri Aralığı 125
1.28.4 Düşey Rijitlik ve Yük Kapasitesi 126
1.28.5 Sıkıştırma Dereceli Yük Kapasitesi..... 128
1.28.5.1 AASHTO-1999 Teknik Şartnamesi Gereklilikleri..... 130
1.28.6 Yükleme Kapasitesi Hızına Bağlı Çekme..... 131

1.28.7 Burkulma Yük Kapasitesi 131
1.28.8 Deprem İzolatörleri İçin Yatay Rijitlik ve Histeresiz Parametreleri... 132
1.28.9 Kurşun Çekirdeğin Deprem İzolatörü İçine Yerleştirilmesi 135
1.28.10 Tasarım Prosedürü 137
1.28.11 Deprem Yalıtımı Uygulanmış Bazı Örnek Projeler..... 139

BÖLÜM İKİ - BASINÇ YÜKÜ ALTINDA DEPREM İZOLATÖRLERİNE GELEN KUVVETLER 140

2.1 Çok Tabakalı Elastomer Esaslı Deprem İzolatörleri..... 140
2.2 Sıkıştırılamaz Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altında Davranışı 141
2.2.1 Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Analizi..... 148
2.2.2 Dikdörtgen veya Kare Kesitli Deprem İzolatörünün Analizi 149
2.2.3 İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Analizi 151
2.3 Deprem İzolatörü Üzerindeki Basınç Zorlamaları Tarafında Üretilen Kesme Gerilmeleri 154
2.4 Sıkıştırılabilir Bir Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörüne Ait Tek Bir Elastomer Tabakanın Basınç Altındaki Davranışı 158
2.4.1 Dairesel Kesitli Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altındaki Davranışı 159
2.4.2 Dikdörtgen Kesitli Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altındaki Davranışı 163
2.4.3 İçi Delikli Dairesel Kesitli Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altında Davranışı 166

BÖLÜM ÜÇ - EĞİLME ZORLAMASI ALTINDA ELASTOMER ESASLI DEPREM İZOLATÖRLERİNİN DAVRANIŞLARI 171

3.1 Sıkıştırılamaz Kauçuk Malzemeden Üretilmiş Olan Deprem İzolatörüne Ait Tek Bir Elastomer Tabakanın Eğilme Rijitliği Davranışı 171

3.1.1 Kauçuk Esaslı ve Dairesel Kesitli Deprem İzolatörü İçin Eğilme Momenti Davranışı 174
3.1.2 Kauçuk Esaslı ve Dikdörtgen Kesitli Deprem İzolatörü için Eğilme Momenti Davranışı 175
3.1.3 Kauçuk Esaslı İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörü için Eğilme Momenti Davranışı 178
3.2 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı Deprem İzolatörüne Ait Tek Bir Kauçuk Tabakanın Eğilme Rijitliği 179
3.2.1 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı ve Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Eğilme Rijitliği 180
3.2.2 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı ve Dikdörtgen Kesitli Deprem İzolatörünün Eğilme Rijitliği 182
3.2.3 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı ve İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Eğilme Rijitliği 185

BÖLÜM DÖRT - BASINÇ VE EĞİLME ZORLAMASI ALTINDAKİ ÇOK TABAKALI DEPREM İZOLATÖRLERİNDEKİ ÇELİK PLAKALARIN İNCELENMESİ 190

4.1 Elastomer Esaslı Bir Deprem İzolatöründe Basınç ve Eğilme Konusunun Gözden Geçirilmesi 191
4.2 Sıkıştırılamaz Kauçuk Esaslı Dairesel Kesitli Bir Deprem İzolatörü Çelik Plakalarında Meydana Gelen Gerilmeler 193
4.2.1 Deprem İzolatörü Çelik Plakalarında Sadece Basınç Zorlaması Altında Meydana Gelen Gerilim Fonksiyonu Çözümü 198
4.2.2 Deprem İzolatörü Çelik Plakalarında, Sadece Eğilme Zorlaması Altında Meydana Gelen Gerilim Fonksiyonu Çözümü 201
4.3 Sıkıştırılabilir Kauçuk Esaslı Dairesel Kesitli Bir Deprem İzolatöründe Güçlendirme İçin Kullanılan İnce Çelik Plakalardaki Gerilmeler 205
4.3.1 Sadece Basınç Zorlaması Altındaki Çelik Plakalarda Gerilme Fonksiyonu Çözümü 205

4.3.2 Sadece Eğilme Zorlaması İçin Çelik Plakadaki Gerilme Fonksiyonu Çözümü 209
4.4 Basınç Zorlaması Altında İnce Çelik Plakaların Akması 212
4.4.1 Sıkıştırılamaz Kauçuk İçin Deprem İzolatörü İnce Çelik Plakalarının Akması 212
4.4.2 Kauçuğun Sıkıştırılabilir Olması Durumunda Çelik Plakalarda Meydana Gelen Akma 214

BÖLÜM BEŞ - ÇOK TABAKALI ELASTOMER ESASLI DEPREM İZOLATÖRLERİNİN BURKULMA DAVRANIŞI 218

5.1 Deprem İzolatörlerinin Denge Dayanıklılık Analizleri 218
5.2 İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörü Stabilite Analizi 227
5.3 Deprem İzolatörlerinde Düşey Yükün Yatay Rijitlik Üzerindeki Etkisi 229
5.4 Elastomer Esaslı Bir Deprem İzolatörünün Üstteki Çelik Yükleme lakasının Düşey Yönde Yukarıdan Aşağıya Doğru Deplasmanı 233
5.5 Elastomer Esaslı Deprem İzolatörü İçin Basit Bir Burkulma-Mekanik Modeli 241
5.5.1 İzolatörün Burkulma Sonrası Davranışı 246
5.5.2 Basınç Yükünün Deprem İzolatörü Sönümleme Özellikleri Üzerindeki Etkisi 249
5.6 Stabilite Lansmanı 252
5.7 Deprem İzolatörü Burkulmasında Kauçuğun Sıkıştırılabilirliğinin Etkisi .. 254

BÖLÜM ALTI - GERİLİM ALTINDAKİ ÇOK TABAKALI KAUÇUK ESASLI DEPREM İZOLATÖRLERİNİN BURKULMA DAVRANIŞI 257

6.1 Giriş 257
6.2 Elastomer Esaslı Bir Deprem İzolatöründe Çekme Gerilmesi Altında Düşey Yükün İzolatör Yatay Rijitliği Üzerindeki Etkisi 259
6.3 Yatay Yük Altında Deprem İzolatöründe Meydana Gelen Düşey Deplasman 262

6.4 Gerilme Altındaki Deprem İzolatörünün Sayısal Burkulma Modeli 267
6.4.1 İzolatör Modellemenin Detayları 267
6.4.2 Basınç ve Gerilme Altında Kritik Burkulma Yüklemesi 271
6.5. Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti Etkisi Altındaki Elastomer Esaslı Deprem İzolatörü Montajı 278
6.5.1 İzolatör Montaj Bağlantı Civatası Tasarımı 279

BÖLÜM YEDİ – KURŞUN ÇEKİRDEKLİ (LRB) TİPİ İZOLATÖRLERE ALTERNATİF OLARAK GELİŞTİRİLEN ELASTOMER ÇEKİRDEKLİ DEPREM İZOLATÖRLERİ (ELRB)..... 281

7.1 Giriş 281
7.2 Binalarda uygulanacak deprem yalıtım sisteminin ana amacı 282
7.3 Taban Yalıtımında Kullanılan Bir İzolatörden Beklentiler 282
7.4 Elastomerik İzolatörler için Kuvvet-Deplasman (histeresiz) Eğrisi İlişkisi 282
7.5 Kolon Altıdaki Deprem İzolatöründe Oluşan Kuvvetlerin Analizi 284
7.6 Elastomer Çekirdekli Deprem İzolatörü ELRB 285
7.7 ELRB, LRB ve HDRB Tipi İzolatörlerin FEM Analizleri 286
7.8 ELRB, LRB ve HDRB Tipi İzolatörlere Ait FEM Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi 290

BÖLÜM SEKİZ – SONUÇLAR 292

KAYNAKLAR 298

EKLER 302

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Taban yalıtımlı bir bina (Holmes Consulting Group Ltd. , 2010). 4
Şekil 1.2 1G'lik Deprem Yükleri için Tasarım, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 5
Şekil 1.3 Malzeme Süneklik Grafiği, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 6
Şekil 1.4 Bir inşaat kolonu altına yerleştirilmiş olan elastomer esaslı deprem izolatörü..... 13
Şekil 1.5 Dairesel kesitli elastomer esaslı deprem izolatörü kesit resmi 14
Şekil 1.6 (a) Depremde geleneksel ankastre tabanlı yapının davranışı, (b)Depremde taban yalıtımlı bir yapının davranışı, (Holmes Consulting Group Ltd, (2010). 26
Şekil 1.7 Periyot değişiminin ivme üzerindeki etkisi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 27
Şekil 1.8 Periyot değişiminin deplasman üzerindeki etkisi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 27
Şekil 1.9 Sönümlemenin ivmeler üzerindeki etkisi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 31
Şekil 1.10 Sönümün deplasmanlar üzerinde etkisi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 32
Şekil 1.11 El Centro 1940 depremi, farklı sönüm oranlarına göre ivme spektrumu, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 32
Şekil 1.12 El Centro 1940 Depremi, farklı sönüm oranlarına göre N-S yönündeki deplasman spektrumu, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 32
Şekil 1.13 Eşdeğer Vizkoz Sönüm, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 33
Şekil 1.14 Doğrusal olmayan ivme spektrumu, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 33
Şekil 1.15 Doğrusal olmayan deplasman spektrumu, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 34
Şekil 1.16 Deplasmana karşılık gelen histerik eşdeğer viskoz sönüm oranları, (Holmes Consulting Group Ltd,2010). 41

Şekil 1.17 Eğimli bir zeminde yapılan binanın deprem yalıtım kat planı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 48
Şekil 1.18 Deprem taban yalıtımı bina prototipleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 59
Şekil 1.19 İzolatör sistemin karakteristik tanımı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 60
Şekil 1.20 UBC Tasarım spektrumu, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 62
Şekil 1.21 HDRBr tip izolatör özellikleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). .. 66
Şekil 1.22 İzolasyon sistemi histerisizleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). . 69
Şekil 1.23 Etkin rijitlik, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 70
Şekil 1.24 Periyot-ivme ilişkisi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 71
Şekil 1.25 Üç deprem kaydının %5 sönümlenmiş ivme spektrumları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 71
Şekil 1.26 Tasarım ile tepki spektrum analizi izolatör sonuçlarının karşılaştırılması, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 73
Şekil 1.27 LRB -1, Periyot T = 1.5sn için spektrum sonuçları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 73
Şekil 1.28 (a) Zaman-tanım analizi maksimum sonuçları ile tasarım değerleri karşılaştırması, (b) Zaman-tanım analizi ortalama sonuçları ile tasarım değerleri karşılaştırması, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 75
Şekil 1.29 LRB 1 için periyot T = 1.5sn için zaman-tanım sonuçları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 76
Şekil 1.30 Depremler arası farklılıklar, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 77
Şekil 1.31 Atalet kuvvetleri tepki spektrumları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 78
Şekil 1.32 Atalet yükleri yüksekliği, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 80
Şekil 1.33 Beş katlı bina grafik şeması, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 84
Şekil 1.34 Kolonlarda eksenel yükler, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 85
Şekil 1.35 Taban kesme katsayılarına karşılık deplasmanlar, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 87

Şekil 1.36 Kat ivmelerine karşılık deplasmanlar, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 88
Şekil 1.37 Kat ivmesi profilleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 89
Şekil 1.38 Bodrum katı olmayan binada izolatör montaj yeri ve şekli, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 90
Şekil 1.39 Binalarda izolatör montajı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 91
Şekil 1.40 Tablalı kriko, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 91
Şekil 1.41 Kavramsal güçlendirme montaj şekli, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 93
Şekil 1.42 Bir inşaat kolonu altına yerleştirilmiş olan elastomer esaslı deprem izolatörünün kesit resmi..... 97
Şekil 1.43 Elastomer esaslı izolatörlerin yük kapasitesi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 98
Şekil 1.44 HDRBr tipi izolatör kesit resmi 100
Şekil 1.45 Kurşun çekirdekli izolatör kesiti..... 101
Şekil 1.46 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör histerisizi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 104
Şekil 1.47 Kauçuk kesme modülü, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 105
Şekil 1.48 Histerisiz alanındaki döngüsel tekrara bağlı değişim, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 108
Şekil 1.49 Histerisiz alanındaki ortalama tekrara bağlı değişim, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 109
Şekil 1.50 Elastomer esaslı izolatörlerde gerilme-şekil değişikliği testleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 112
Şekil 1.51 Birleştirilmiş basma ve kesme testleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 116
Şekil 1.52 HDRBr histerisiz eğrisi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 118
Şekil 1.53 HDRBr kesme modülü ve sönümü, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 119
Şekil 1.54 HDRBr'de viskoz sönümleme etkileri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 120

Şekil 1.55 “Boynu sıkılmış” HDRBr izolatörlerde tekrarlı yüklemeye bağlı özelliklerdeki değişim, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 121
Şekil 1.56 İzolatör Performansı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 125
Şekil 1.57 İzolatör tasarımı için tekrarlı prosedür, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 125
Şekil 1.58 İzolatörlerde etkin çakışma (sıkıştırma) alanı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 128
Şekil 1.59 Kurşun çekirdekli deprem izolatörleri için histeresiz döngüsü, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010)..... 133
Şekil 1.60 Kurşun çekirdek çapının etkileri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010). 136
Şekil 2.1 Bina kolonu altına yerleştirilmiş elastomer esaslı bir deprem izolatörünün düşey ve yatay yükler altındaki kesit resmi 140
Şekil 2.2 Düşey (P) Yükü ve Yatay (F) yükü altında elastomer esaslı deprem izolatöründe oluşan momentin (M) şematik gösterimi..... 141
Şekil 2.3 (a)Gelişigüzel seçilmiş bir kauçuk tabakası üzerinde kartezyen koordinat sistemi, (b)Gelişigüzel seçilmiş bir kauçuk tabakasında meydana gelen deplasman alanı,(Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 144
Şekil 2.4 R yarıçaplı dairesel bir izolatör kauçuk tabakası için koordinat sistemi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 148
Şekil 2.5 Uzunluğu 2b ve genişliği l olan dikdörtgen kesitli deprem izolatörü kauçuk tabakası için koordinat sistemi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 149
Şekil 2.6 Genişliği 2b ve uzunluğu l olan bir izolatöre ait - Dikdörtgen kesitli deprem izolatörü tabakası için sıkıştırma modülü- bir adet kauçuk tabakası için sıkıştırma modülü, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 151
Şekil 2.7 Dairesel kesitli bir deprem izolatörünün sıkıştırma modülü eğrisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010)..... 153
Şekil 2.8 Çeşitli geometrik şekillere sahip kauçuk tabalarındaki basınç dağılımları: (a) sonsuz şerit; (b) dikdörtgen; (c) dairesel; (d) içi delikli dairesel, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 154

Şekil 2.9 Bir kauçuk tabakası üzerinde sadece basınç zorlaması tarafında üretilen kesme gerilmeleri, ... 156
Şekil 2.10 Sadece basınç altında bulunan sonsuz bir kauçuk şeritte normal basınç dağılımı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 159
Şekil 2.11 Dairsel kesitli kauçuk esaslı deprem izolatörü İçin Ec üzerinde hacimsel sıkıştırılabilirliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 162
Şekil 2.12 Farklı en-boy oranları p için Ec üzerinde hacimsel sıkıştırılabilirliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 165
Şekil 2.13 Farklı dış çap-iç çap oranları η için Ec üzerinde hacimsel sıkıştırılabilirliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 169
Şekil 2.14 Dairesel kesitli deprem izolatörünün sıkıştırma modülü üzerine izolatör düşey eksenindeki küçük bir deliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis D. A., 2010). 170
Şekil 3.1 Deprem izolatörüne ait iki adet rijit çelik plaka arasındaki kauçuk tabakanın sadece eğilme altındaki davranışı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 172
Şekil 3.2 Eğilme Zorlaması Altındaki Dikdörtgen Kesitli Elastomer Esaslı Deprem İzolatörü, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 176
Şekil 3.3 Dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörünün EI etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 177
Şekil 3.4 Kauçuk esaslı iç delikl yarıçapı α ve dış yarıçapı b olan dairesel kesitli bir deprem izolatörü için EI etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 179
Şekil 3.5 Sadece eğilme altındaki sonsuz bir kauçuk şeridin normal basınç dağılımı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 181
Şekil 3.6 Elastomer esaslı ve dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörü için sıkıştırılabilir kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğinin sıkıştırılamaz kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğine oranını gösteren eğriler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 185

Şekil 3.7 Elastomer esaslı ve içi delikli dairesel kesitli bir deprem izolatörü için sıkıştırılabilir kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğinin sıkıştırılamaz kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğine oranını gösteren eğriler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 189
Şekil 4.1 Kesme gerilmelerinin (kayma gerilmeleri) çelik plakada eşdeğer gövde kuvvetleri üretimi grafiği, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 195
Şekil 4.2 Sıkıştırılamaz kabulü ile basınç altında çelik plakadaki gerilmeler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 200
Şekil 4.3 Sıkıştırılamaz durum için eğilme momenti altındaki çelik plakada meydana gelen gerilmeler, ... 204
Şekil 4.4 Büyük şekil faktörleri için basınç altında çelik plakadaki gerilmeler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 208
Şekil 4.5 Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz durumlarda çelik plakalardaki maksimum gerilme oranları, ... 208
Şekil 4.6 Büyük şekil faktörlerinde eğilme zorlaması altındaki çelik plakada gerilmeler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 212
Şekil 4.7 Tresca akma koşulu, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 214
Şekil 5.1 Elastomer esaslı bir deprem izolatörü için deformasyon şekli (deformasyondan sonra ve deformasyondan önce kesit planı görünümü, fakat deformasyon eksenine dik yönde gerekli değildir), (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 219
Şekil 5.2 Deformasyona uğramış bir deprem izolatörü üzerindeki iç kuvvetler ve dış yükler (Deformasyon kesitine kesme kuvveti V pareleldir ve eksenel kuvvet N ise kesite diktir), (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 220
Şekil 5.3 Düşey bir P yükü altındaki bir deprem izolatörü için sınır şartları, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 223
Şekil 5.4 Yatay rijitlik üzerine eksenel yükün etkisi, düz çizgili eğri: GAS / P = 0, 05, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 232
Şekil 5.5 Yatay deformasyona uğramış elastomer esaslı bir deprem izolatörünün eksenel deplasman geometrisi (Kelly ve Konstantinidis, 2010)..... 234

Şekil 5.6 Elastomer esaslı bir deprem izolatörünün basit ikili yay modeli, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 242
Şekil 5.7 Dübelli deprem izolatörleri için mekanik yuvarlanma açılması, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 253
Şekil 5.8 Burkulma yükü üzerinde kauçuğun sıkıştırılabilirliğinin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 255
Şekil 6.1 Sonlu Elemanlar Simülasyonu Kordinat Eksenleri ve Geometrisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 268
Şekil 6.2 Polinominal davranışlı kauçuk malzeme modelinin (a)Kesme Gerilmesi altında, ... 270
Şekil 6.3 Basınç sıkıştırması altında burkulma davranışı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A.,2010). 272
Şekil 6.4 Gerilme zorlaması altında burkulma davranışı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 273
Şekil 6.5 Deprem izolatörünün burkulmuş şekli ve model-2 (basınç sıkıştırması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). .. 273
Şekil 6.6 Deprem izolatörünün burkulmuş şekli ve Model-2 (gerilme zorlaması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). .. 274
Şekil 6.7 Deprem izolatörünün burkulmuş Şekli ve Model-5 (basınç sıkıştırması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). ... 274
Şekil 6.8 Deprem izolatörünün burkulmuş şekli ve Model-5 (gerilme zorlaması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). .. 275
Şekil 6.9 Şekil faktörüne S karşılık GA ile normalize edilmiş kritik burkulma yükü, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 276
Şekil 6.10 Denklemler (6.32), (6.35a), ve (6.35b) ile verilen şerit izolatör için şekil faktörlerine karşılık gelen GA ile normalleştirilmiş kritik yük, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 277
Şekil 6.11 Deformasyona uğramış elastomer esaslı bir deprem izolatöründe kesme kuvvet ve eğilme momenti, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). 278
Şekil 6.12 Eşdeğer kolon yükleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010). .. 279

Şekil 6.13 İzolatör montaj civatası kuvvet dağılımı, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010). 280

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1Taban kesme katsayısı C'ye karşılık gelen deplasman değerleri 28
Tablo 1.2 UBC ve AASHTO sönümleme katsayıları 30
Tablo 1.3 FEMA-273 sönümleme katsayıları 30
Tablo 1.4 Sönümleme faktörlerinin karşılaştırılması 31
Tablo 1.5 Esneklik ve sönümlemenin etkisi 35
Tablo 1.6 Sabit taban kesme kuvveti katsayısı tasarımı 38
Tablo 1.7 Sabit deplasman tasarımı 39
Tablo 1.8 Deprem yalıtım sistemi için kullanışlı bir kontrol listesi 49
Tablo 1.9 Deprem izolatörü satın alma stratejileri 53
Tablo 1.10 UBC tasarım faktörleri 61
Tablo 1.11 İzolasyon sistemi varyasyonları 68
Tablo 1.12 İzolasyon sistemi performansı (Tüm binalar ve tüm depremler için maksimum değerlerdir) 74
Tablo 1.13 Optimum izolasyon sistemleri 83
Tablo 1.14 Binalarda atalet yükleri yükseklikleri 85
Tablo 1.15 Optimum izolatör konfigürasyonu 88
Tablo 1.16 Deprem izolatörlerinin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırması 102
Tablo 1.17 Benecia-Martinez Köprüsü izolatörleri karekteristikleri 107
Tablo 1.18 Bileşik kesme gerilmesi ve çekme gerilmesi testleri 112
Tablo 1.19 Yüksek kesme gerilmesi test sonuçları 114
Tablo 1.20 Skellerup Industries üretimi LRBr izolatörleri test sonuçları 117
Tablo 1.21 Vulkanize doğal kauçuk bileşenleri 126
Tablo 1.22 Deprem yalıtımı uygulanmış bazı örnek projelere ait değerlendirmeler 139
Tablo 6.1 Deprem İzolatörlerin Şekil Faktörüne Göre Sonlu Eleman (FEM) Modelleri 268
Tablo 6.2 İki tip kauçuk modeli için malzeme parametreleri 271
Table 7.1 Sınır şartları, izolatör yapımında kullanıla malzemelerin özellikleri ve izolatörlerin tasarım paremetreleri……..…….287

BÖLÜM BİR
DEPREM YALITIMINA GENEL BAKIŞ

1.1 Deprem Taban Yalıtım Konsepti

Sözlüklerde taban yalıtımının tanımı şu şekilde verilmektedir; yalıtım kelimesini ‘ayrılmış olma hali’ ve taban kelimesini de ‘alttan destekleyen bölüm’ şeklinde yapar. Gerçek manasında önerildiği gibi herhangi bir yapının temelinden ayrılmasıdır. Taban yalıtımı, orijinal ifadesi bugünlerde yaygın olarak sismik izolasyon, yani deprem yalıtımı yerine kullanılmaktadır. Bu yer değiştirme, bazı durumlarda temelin üzerinde bir yerdedir. Örneğin, bir binada üstyapının zeminden ayrılması gibi, diğer bir deyişle, sismik izolasyon ifadesi yapının deprem etkilerinden korunması için temelden ayrılmasıdır.

Depremin, önceden tahmin edilememesinden dolayı, doğal afetler içinde çok özel bir yeri vardır. Sonuçları itibariyle çok tehlikeli bir afet olan deprem, mevcut yapıları alışılmış yüklerin çok üzerinde zorlayarak, yapıların tasarım hatalarını ve yapım hatalarını ortaya çıkarır. Bu nedenle, depremlerin sıklıkla ve şiddetli olduğu ülkelerde bu durumun incelenmesi “Yapı Dinamiğinin” ana problemlerinden birisidir (Celep & Kumbasar, 2000)

Yapılarda oluşan deprem kuvvetlerinin şiddeti aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

1. Yapının kütlesi,
2. Yapının periyodu,
3. Yer ivmesi,
4. Zemin-yapı etkileşimi.

Deprem etkisi altındaki yapılar kendilerine özgü periyot oluşturarak depreme karşı dinamik tepki gösterirler. Eğer yapının taşıyıcı sisteminin periyodu ile deprem etkisi altındaki yapı zeminin periyodu birbirine eşit olursa, yapıda rezonans meydana gelebilir ve böylece yapı kütlesinin ivmeleri büyür. Ayrıca, deprem enerjisi, yapı içerisinde değişik şekillerde sönümlenir. Yapıların dinamik analizinde, bu

sönümlemeye katkı yapan tüm etkilerin toplamı “kritik sönüm” ün bir oranı olarak ifade edilir (Atımay, 2000).

Depremin dinamik etkisinin oluşturduğu hasarlardan kaçınmak için, yapının zeminden ayrılması konsepti, daha uygun bir yaklaşımdır. Sonuç olarak, bir depremde, yer kabuğu hareket eder ve yapılara en çok zarar veren bu yer kabuğu hareketidir. Bilindiği gibi, deprem esnasında, havadaki bir uçak yer hareketinden etkilenmez. Yani prensip basittir; Yapıyı yerden ayır ve depremin vereceği zararlardan kurtul. Bunun anlamı, yer hareket edecek, fakat yapı hareket etmeyecek demektir. Pek çok şeyde olduğu gibi, şeytan ayrıntıda gizlidir. Bir yapının yer çekimi altında desteklenmesi demek, onun zemin üzerinde sabit durmasıdır. Sismik izolasyon, bu temel inşaat mühendisliği gereksinimi ile çelişir. Nasıl oluyor da bir yapı deprem yükleri için zeminden ayrılırken aynı zamanda yerçekimine dayanabilir?

Çoğu inşaat mühendisinin en azından deprem taban yalıtımının ne olduğu ile ilgili olarak, deprem hasarına karşı yapıyı koruyan ve yapının tabanına monte edilen bir sistem olduğu şeklinde genel bir bilgileri vardır. Onların deprem yalıtımının ne zaman ve niçin kullanılacağı hususunda çok az bilgileri olduğu muhakkaktır. Nasıl olacağına gelince, ya çok az bilgisi, ya da çok fazla bilgisi olan iki ayrı grup mühendis vardır. Bu yüzden, deprem yalıtım seçenekleri arasından bir sistem seçilse bile, geride hala deprem yalıtım sistemini nasıl tasarlamak gerektiği, deprem yalıtımı yapılaması düşünülen yapıyla nasıl ilişkilendirileceği, sistem performansının nasıl değerlendirileceği, deprem izolatörlerinin üretimi ve testleri gibi uzmanlık gerektiren birçok konu vardır.

1.2 Yapıların Deprem Etkisi Altındaki Davranışlarını ve Tepkilerini Kontrol Etme Fikri

Depremler, tıpkı diğer doğal afetler gibi, oluşması engellenemeyen felaketler olup, depremlerin meydana getirdiği ve sebep olduğu yıkıcı ve de can kaybına neden olan etkilerinden korunma fikri de insanlık tarihi kadar eskidir.

İnsanoğlu, depremlerin neden olduğu felaketleri, çok ciddi can ve mal kayıpları yaşayarak öğrenmiş ve böylece depremden nasıl korunacağı konusunda düşünmeye başlamıştır. İnsanlık, medeniyet yolculuğunda ilerledikçe, diğer doğal afetlerde olduğu gibi, depremlerden de nasıl ve ne şekilde korunabileceğini araştırmaya başlamıştır. Böylece, insanoğlu depremlerin oluşmasını engelleyemese de, zamanla depremin yıkıcı etkilerine karşı dayanıklı yapılar inşa etmenin gerekli olduğunu anlamış ve bu doğrultuda çalışmalara başlamıştır.

Bugünün dünyasında ise, depremlere dayanıklı binaların, köprülerin ve nükleer santral gibi mühendislik yapılarının tasarımında ve inşasında birbirinin alternatifi olan iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Bu iki temel yaklaşımdan birincisi; depremlere dayanıklı yapıların tasarımıdır ve inşaat mühendisleri buna kısaca "geleneksel yaklaşım" demektedir. Birinci yaklaşımdan oldukça farklı olan "ikinci yaklaşım" ise; yapıların deprem güvenliğini istenen düzeyde sağlanabilmesi için taban yalıtım sistemlerinin kullanıldığı "modern yaklaşım"dır.

Süspansiyon ve amortisör sistemi olmayan bir otomobil hareket halindeyken yoldaki tüm tümsek ve çukurlar üzerinden geçerken oluşan her darbeyi içindekilere iletir. Süspansiyon sistemi, tekerlekler yolda bu gibi düzgün olmayan yüzeylerde yuvarlandıkça oluşan bu sarsıntı kuvvetlerini, yolcuların bu tür hareketlerin ancak küçük bir kısmını hissetmeleri için modifiye eden yaylardan ve sönümleyicilerden oluşmuştur. Daha sonra da göreceğimiz gibi, bu taban yalıtımını anlaşılması için iyi bir analojidir ve yaylar ile sönümleyiciler herhangi bir izolasyon sisteminin ana bileşenleridir. İşte elastomer esaslı izolatörlerle deprem yalıtımı, yapıdaki sönümü de kapsayan pasif enerji sönümleme genel kategorisinde yer almaktadır. Yapıdaki sönümleme, yapıda bulunan enerjiyi yutmak için kullanılan sönümleme cihazlarının sönümlemesine eklenir. Depremin olumsuz etkilerini azaltmadaki diğer kategori 'Aktif Kontrol' olarak adlandırılır, ki burada izolasyon ve/veya enerji sönümleme cihazları ile optimum performans için yapılarda güç kontrollüdür.

Taban yalıtımı yapılmış yapılarda, elastomer esaslı ve çelik plakalarla güçlendirilmiş çok tabakalı deprem izolatörleri kullanımı hızla artmaktadır ve

kullanımları yaygınlaşmaktadır. İzolatörlerin ince çelik plakalarla güçlendirilmelerinin esas amacı, düşey yönde yüksek rijitlik elde etmek ve fakat yatay yönde ise çok düşük rijitlik olan esnek bir yapı sağlamaktır. Elastomer esaslı deprem izolatörlerinin günümüzde düşük sönümlü ve yüksek sönümlü olmak üzere iki farklı tipi kullanılmaktadır (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 1.1 Taban yalıtımlı bir bina (Holmes Consulting Group Ltd. , 2010).

Taban yalıtımında verimlilik yapının doğal periyodunu değiştirerek, yani yapının periyodunu artırarak sağlanır. Yapını depreme tepkisi, tamamen enerji dağıtımı yoluyla azaltılmış olur (Kelly ve Takhirov, 2001).

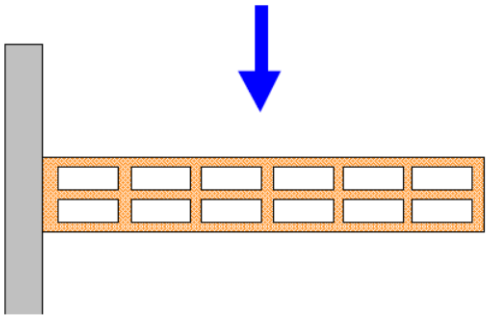
1.3 Deprem Taban Yalıtımının Amacı

Dünyanın büyük bir kısmında yapılar depremlere maruz kalmaktadır ve toplumların deprem sonrasında hayatta kalabilmek için mühendislerden bu depremin olumsuz etkilerini azaltacak şekilde yapılar tasarlamalarını ve yapılar yapmalarını beklemektedir. Yapı tasarım sürecinde, yerçekimi ve rüzğar gibi tüm yük senaryolarını hesaplanırken aslında tek bir basit denklemi sağlamak için çalışılır. Biz biliyoruz ki, depremler her zaman olabilir ve kontrol edilemez doğal felaketlerdir.

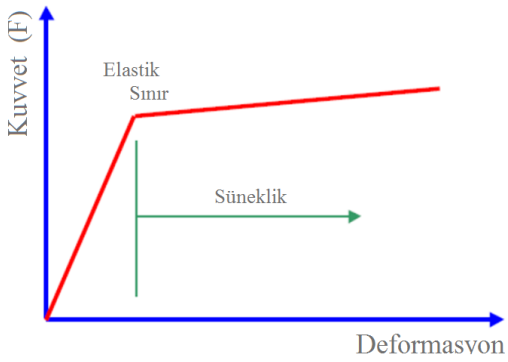
Dolayısı ile deprem yalıtımının bir ihtiyaç olduğu kabul etmeli ve yapıları tasarlarken ve inşa ederken yapıların kapasitesinin bu ihtiyaçtan daha fazla deprem güvenliği sağladığından emin olmalıyız.

Deprem, bina kütlesi ve deprem ivmeleri ile doğru orantılı olarak atalet kuvvetlerine neden olur. Yapısal hasarlardan kaçınmak için, yer ivmeleri arttıkça, yapının dayanımı ve kapasitesi de artırılmalıdır. Yapının dayanımının sınırsız bir şekilde artması, uygulanabilir bir gerçeklik de değildir. Yüksek deprem riskine sahip bölgelerde yapılan binalarda kuvvetler oluşmasına neden olan ivmeler, yerçekimi ivmesinin bir veya iki katından fazla olabilir. Bu seviyede bir yük için gerekli olan dayanımı göz önüne getirmek kolaydır.

1G'lik ivmeye dayanım, binanın yandan yerçekimi kuvvetine maruz kalması, yani yan yatırıldığı durumda formunu hasar oluşmadan koruyabilmesi demektir. Bu seviyede dayanım için, yapı tasarımı ne çok kolaydır ne de çok ucuzdur. Bu nedenle, bu konuda hazırlanıp yayınlanmış olan pek çok standart kod, kapasite yeterliliği için inşaat mühendislerine esnekliğin kullanımına izin verir. Esneklik, yapısal elemanların esneklik limitlerinin aşılması halinde, kontrollü bir şekilde deformasyonuna izin veren bir yaklaşımdır. Bu limitin ötesinde, yapısal elemanlar yumuşar ve küçük bir kuvvet ile bile deplasmanlar artabilir.



Şekil 1.2 1G'lik Deprem Yükleri için Tasarım**,** **(**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.3 Malzeme Süneklik Grafiği**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Esneklik limiti, yüklerin etkilerinin kalıcı olmadığı üst limittir. Yani, esneklik limitine kadar olan aralıkta, yük kaldırıldığında malzeme başlangıç durumuna geri döner anlamına gelmektedir. Bu esneklik limiti, bir kere aşıldığında malzemede değişiklikler oluşur. Bu değişiklikler kalıcıdır ve yük kaldırıldığında bile malzeme eski haline geri dönmez. Beton gerilmede esneklik limitini aştığında yarıklar veya çatlaklar, yani hasarlar oluşur. Süneklik sınırını aşan ve kalıcı deformasyona uğramış bir yapının yüklere karşı artık dayanım kapasitesi bozulmuştur. Kapasiteye odaklanmış bir yapı tasarım anlayışı, iki kötü seçim yapmayı gerektirir:

1- Esneklik dayanımının artırılmasının devam ettirilmesi. Bu pahalı bir yöntemdir ve kat ivmelerini artırıcı etki yapar. Yapının hasar dayanımının normal dayanıma göre daha fazla artırılması, binanın içindekilere daha fazla zarar verebilir.

2- Elastik dayanıma ve esneklik detayına sınır koyma. Bu yaklaşım tamiri mümkün olmayan yapısal hasarları kabul etmek demektir.

Deprem taban yalıtımında ise, bunun tam zıddı bir yaklaşım esas alınır; Bu yaklaşım, kapasiteyi artırmak yerine ihtiyacı azaltmaya yöneliktir. Taban yalıtımı, depremi kontrol edemeyiz ama yapıya iletilen deprem hareketlerini temel seviyesinde engelleyerek, binanın depreme dayanım ihtiyacını azaltabiliriz fikrine dayanan bir mühendislik yaklaşımıdır. Deprem yalıtımının esas amacı, depremin

olumsuz etkilerini hafifletmektir. Doğal olarak, deprem taban yalıtımının bir maliyeti vardır ve ancak faydasının maliyetten daha fazla olduğu durumlarda kullanmak oldukça mantıklıdır.

1.4 Deprem Taban Yalıtım Tarihine Kısa Bir Bakış

Deprem taban yalıtımı için ilk patentler 1800'lü yıllarda alınsa da ve deprem izolasyon örneklerinin 1900'lerin başında olduğu iddia edilse de, inşaat mühendisliğinde deprem taban yalıtımının ana akım olması 1970'li yıllarda başlamıştır. 1970'lerin başında deprem yalıtımı, önce köprülerde ve 1970'lerin sonlarında da binalarda kullanılmaya başlamıştır. Köprüler, genellikle ana yapı ile alt yapıyı ayıran izolatörler üzerine inşa edildikleri için, deprem taban yalıtımı konusunda binalara göre deprem yalıtımı uygulanması için ilk örnekleri teşkil ederler.

İlk köprü uygulamaları esnekliğe enerji dağılımını eklemiştir. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör (LRBr), 1970'lerin ortalarında bulunmuş ve esneklik ile sönümlemeyi tek bir izolatörde toplamayı başarmıştır. Hemen hemen, aynı zamanlarda, izolasyon için sadece kauçuk kullanılan elastomer esaslı deprem izolatörleri uygulamaları da yapılmıştır. Ne var ki, bunlar bir miktar doğal esnekliğe sahip oldukları için, rüzgâr gibi servis yüklerine dayanım için yeterli rijitlikte üretilememişlerdi. Bu nedenle, kurşun çekirdekli elastomer esaslı izolatörler ilk defa Dr. Robinson tarafından üretilmiştir, (Robinson, 2000).

1980'lerin başlarında, kauçuk teknolojisindeki gelişmeler "yüksek sönümlemeli kauçuk" olarak adlandırılan yeni kauçuk bileşenlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur, yani (HDRBr) tipi izolatörlerin yapılması mümkün olmuştur. Bu tür izolatörler, düşük kesme gerilmelerinde yüksek sertlikli, fakat daha yüksek gerilme seviyelerinde azaltılmış sertliğe sahip izolatör üretimine olanak vermiştir. Yük boşalmalarında, bu izolatörler kayda değer bir sönümlemeye sahip histerisiz eğrisi oluştururlar. 1980'lerin başlarında Amerika'daki ilk bina ve köprü uygulamalarında hem LRBr hem de HDRBr tipi izolatörler kullanılmıştır. İlk uygulamaların

bazılarında, tipik olarak merdivenler gibi hafif bileşenlerin desteklenmesi maksatlı olarak kaymalı yataklı PTFE tip izolatörler, LRBr veya HDRBr tip izolatörler ile birlikte kullanılmışlardır.

Kaymalı yataklı izolatörlerin yüksek sönümleme kabiliyetleri olmasına rağmen, geri çağırıcı kuvvete sahip olmamaları nedeni ile tek başına kullanılmamışlardır. Kaymalı yataklı izolatörler üzerindeki bir yapı, deprem sonrasında muhtemelen zemin üzerindeki orijinal yeri değişmiş olacak ve bu yer değiştirmeler artçı depremler ile devam edecektir. Sürtünmeli sarkaç sistemli izolatörlerin (FPS) geliştirilmesi, kaymalı yataklı izolatörlerin (PTFE) şeklini küresel yüzeye sahip olacak şekilde değiştirilmesine neden olmuş ve böylece dezavantajlı olan geri çağırıcı kuvvet eksikliğinden kurtulmuşlardır. İzolatör yana doğru hareket ettirildikçe, aynı zamanda dikey olarak yukarı doğru hareket etmektedir ve böylece, geri çağırıcı kuvvet oluşturulmuş olur.

Deprem taban yalıtım izolatörleri pazarı, kurşun çekirdekli LRBr, yüksek sönümlemeli kauçuk izolatörler HDRBr, kaymalı yataklı izolatörler (PTFE) ve sürtünmeli sarkaç sistemli izolatörler (FPS) arasında paylaşılmıştır. Tedarik ile ilgili olarak; LRBr tipi izolatörlerin patent süreleri dolmuş ve dünyanın pek çok yerinde rekabetçi tedarikçiler bulmak mümkündür. Belirli bazı HDRBr bileşenlerinin patent korumasının devam etmesine rağmen, bazı üreticiler aynı genel performans seviyesinin elde edilmesine yarayan kendilerine ait özel elastomer bileşiklerine sahiptir. FPS sistemi de patent ile korunmaktadır, fakat dünyanın pek çok yerinde ruhsat sahipleri vardır.

1.5 Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımında Günümüzdeki Yaklaşımlar

Depreme dayanıklı yapıların tasarımında iki temel yaklaşım vardır ve bu yaklaşımlar aşağıda kısaca izah edilecektir.

1.5.1 Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımında Geleneksel Yaklaşım

Günümüz İnşaat mühendislerinin iyi bildiği geleneksel yaklaşıma göre; yapının inşası düşünülen bölgedeki inşaat yeri, uygun zemin koşullarına sahip olmalı, inşa edilecek üstyapı mümkün olduğunca hafif olmalı, yapının temeli olabildiğince ağır ve yekpare blok bir kütle olmalıdır. Yapının dayanımı, rijitliği ve esnekliği istenilen seviyede olmalı ve de yapının doğal titreşim periyotları ise olması muhtemel depremin hâkim periyotlarından farklı olmalıdır. Ayrıca yapı deprem hareketleri esnasında yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olmalıdır. Kısacası, yukarıda belirtilen koşullar sağlanabilir gibi görünse de, uygulamada bunları gerçekleştirmek oldukça zor ve karmaşıktır.

Örneğin; "uygun zemin koşulları" şartını ele alalım; ilgili yapının inşa edileceği bölgede, zemin sıvılaşması, zeminde oluşabilecek büyük zemin oturmaları veya heyelan gibi etkilerin olmaması gerektiği ve bölgedeki yapının inşa edileceği zeminin yapı için uygun olmayan titreşimler üretme potansiyeline sahip olmaması gibi, yani depremlerin etkilerini yükselterek yapıya aktarmaması gibi konular oldukça önemlidir. Bu ve buna benzer birçok alt başlıkların "uygun zemin koşulları" başlığı altında alınması gereklidir. Depreme dayanımda diğer bir koşul olan yapının ağırlığı ve dayanımı ile ilgili konu başlığı ise; "Yapının dayanımı/yapının ağırlığı oranı mümkün olduğunca yüksek olmalıdır" ifadesi ile konu özetlenebilir.

Yukarıda bahsedilen koşullar, bir yapının Newton'un II. Kanunu olan F = ma prensibine göre bir cisme sabit kuvvet etki ederse, bu cisim kendisini etkileyen kuvvet yönünde sabit bir ivme kazanır, yani Newton'un II. Kanununa göre hesaplanan deprem kuvvetlerini taşıyabilmek için yapının yeterli mukavemete sahip olması gerektiği prensibine dayanır, (Ristic, 1993).

Doğal titreşim periyodu ve deprem enerjisini yutma kapasitesi ile ilgili koşullar ise, oldukça karmaşık olan analitik analizlere gereksinim duymaktadırlar. Söz konusu olan bu analitik analiz teknikleri, doğrusal olmayan titreşim teorisinin ve yapıların doğrusal olmayan dinamik analizinde kullanılan ileri seviyedeki mühendislik çözüm

yöntemlerinin bu işlere özel olarak geliştirilmesi ile elde edilen bilgisayar yazılımları kullanılarak yapılabilmesinden ibarettir. Ancak, bahsi geçen mühendislik çözümleri ve başarıları sayesinde, depreme dayanıklı yapıların yeterli deprem dayanımı ve yüksek süneklik esasına dayanan geleneksel yaklaşım prensibinin kullanıldığı yapı tasarımlarında yolun sonuna gelindiği söylenebilir. Şimdi daha doğru bir mühendislik yaklaşımı olan taban yalıtım yaklaşımı, hızla gelişmekte ve her geçen gün uygulaması yaygınlaşmaktadır ve bu yaklaşımın adı "yapıların tasarımında modern yaklaşımdır".

1.5.2 Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Modern Yaklaşım

Dünyanın çeşitli bölgelerinde meydana gelen depremler nedeniyle birçok can ve mal kaybı yaşanmıştır. Özellikle şiddetli depremler sonrasında çok sayıda yapıda gözlemlenen ve tespit edilen maddi hasar bize, yapıların depremlere karşı dayanıklılığının yükseltilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle, günümüz dünyasında, yapıların depreme dayanıklı olarak tasarımında ve inşasında yenilikler bulmak için yoğun çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir.

Bu araştırma faaliyetleri ile mühendisler sonunda, yapılara gelen deprem kuvvetlere karşı yapıların dayanabilmesi için daha yüksek dayanım sağlamak yerine, yapıları azaltılmış deprem kuvvetlerine göre tasarım yapmanın daha akıllıca bir yaklaşım olduğu fikrine ulaşmışlardır. Bu yeni yaklaşımda, yapıya etki eden deprem kuvvetleri ve depremin ürettiği titreşimleri, taban yalıtımı ve deprem enerjisinin yutulması yoluyla kontrol altına alan özel mühendislik araçları olan deprem izolatörleri geliştirilip uygulama yolu tercih edilmiştir.

Söz konusu deprem izolatörleri uygulaması, çoğu zaman yapının temeli üzerine yerleştirilen izolatörlerin enerji yutarak üst yapıda oluşabilecek deprem enerjisi girdisini yutması ve sonunda depremin yıkıcı etkisini ortadan kaldırmasıyla yapıların depreme dayanımı sağlanmıştır. Bu tür yapılara "taban yalıtımlı yapılar" ve yalıtım işleminin kendisine de "taban yalıtımı" adı veya "deprem yalıtımı" adı verilmiştir. Taban yalıtımı fikri oldukça eski zamanlara dayanır, ancak yapıların depreme

dayanacak şekilde tasarımda taban yalıtımının kullanımı tarihte ilk defa 20. yüzyılın başlarında gerçekleşmiştir. Özellikle de, gelişmiş ülkelerde 1965 yılından itibaren kullanıma başlamış ve 1980'lerden itibaren de giderek kullanımı yaygınlaşmıştır, (Buckle ve Mayes, 1990).

1.6 Yapıların Deprem Kontrolünde Kullanılan Ana Sistemler

Deprem esnasında yapıların kontrolü veya yapıların dinamik davranışlarının kontrol edilmesi; dinamik dış kuvvetlerinin ve özellikle de dinamik deprem kuvvetlerinin etkisi altında yapının istenilen ve kontrollü bir davranış sergilemesi amacıyla, yapının tepkisel özelliklerinin düzenlenmesi anlamına gelmektedir.

Yapıların dinamik davranışlarının kontrolü çok farklı yöntemlerle yapılabilirse de, yapısal kontrol sistemleri iki ana grupta incelenmektedir.

a-Pasif yapı kontrol sistemleri

b-Aktif yapı kontrol sistemleri

Ayrıca, bu iki tip deprem kontrol sistemi birbirini tamamlayacak şekilde birlikte kullanılarak üçüncü bir kontrol sisteminden söz edilebilir.

Pasif ve aktif deprem kontrol sistemlerinin ortak bir özelliği de, deprem izolasyonu yapılan yapıların dinamik davranışlarını sürekli olarak ayarlama yeteneğinde olacak şekilde tasarlanıp yapıya uygulanmış olmalarıdır.

1.6.1 Aktif Deprem Yalıtım Sistemleri

Yapıların yalıtımının ikinci türü, aktif deprem yalıtım sistemleridir. Aktif deprem yalıtım sistemlerini pasif deprem yalıtım sistemlerinden ayıran temel fark, aktif deprem sistemlerinin dışarıdan bir enerji kaynağından enerji kullanmasıdır. Aktif deprem yalıtım sistemleri davranışları sınırsız olarak kontrol edilebilmesi nedeniyle pasif deprem sistemlerinden daha verimlidirler. Ancak aktif deprem yalıtım sistemini

besleyen dış enerji kaynağı herhangi bir nedenle devreden çıkarsa, sistem çalışmasını pasif deprem yalıtım sistemi olarak sürdürür. Aktif deprem yalıtım sistemleri üç temel bileşenden oluşurlar;

a- Deprem hareketi girdisini, yapının yapısal davranışını veya her ikisini ölçebilen ve yapıya veya yalıtımı yapılan binanın etrafına yerleştirilmiş olan özel algılayıcılardır.
b- Bu algılayıcılardan alınan verileri işleyen ve bunlara göre yalıtımı yapılan yapının depremsel davranışları kontrol etmek için gerekli olan kuvvetleri hesaplayan cihazlar.
c- Dış enerji kaynağı ile beslenen ve çalışan ve de aktif yalıtım sistemi tarafından hesaplanan kontrol kuvvetleri üreten ve yapıya uygulayan actuator cihazları.

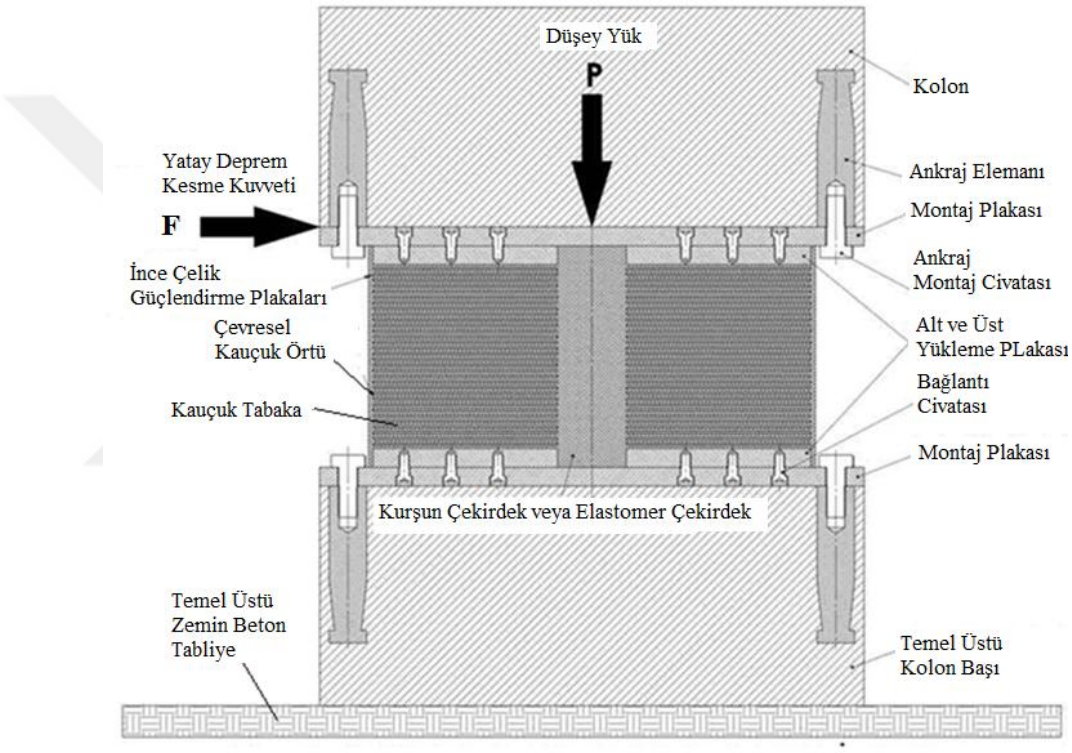
Aktif deprem yalıtım sistemi ile yalıtım yapılan yapı arasındaki etkileşim, özel olarak tasarlanıp üretilmiş olan yazılımlar sayesinde sağlanmaktadır.

1.6.2 Pasif Deprem Yalıtım Sistemleri

"Pasif deprem yalıtımı", deprem nedeniyle oluşan titreşimin ve yer kabuğu sarsıntısının ürettiği deprem kuvvetlerinin yapıların belirli yerlerine yerleştirilen ve özel olarak tasarlanmış deprem izolatörleri sayesinde deprem yalıtımının yapılması ve böylece yalıtım yapılan yapının depremin yıkıcı ve zarar verici etkilerinden izole edilmesi veya depremin sebep olduğu titreşimlerin, kuvvetlerin ve deplasmanların kontrol altına alınmasıdır.

1980 yılından beri kullanımı her geçen gün artarak yaygınlaşan ve yapıların tabanına yerleştirilen ve yer kabuğuna yatay yönde esnek ve yer kabuğuna dik düşey yönde oldukça rijit olan pasif deprem izolatörleri, üst yapıda deprem nedeniyle oluşan ivmeyi, çok katlı yapılarda katlar arasında meydana gelen deplasmanları ve sonuçta oluşması muhtemel depremsel kuvvetleri ve gerilmeleri ve de momentleri azaltmaktadır.

Deprem yalıtım izolatörleri, çoğunlukla yapının tabanında kolon altlarına, kolon ortalarına veya kolon başlarına ve köprülerde köprü ayakları üst başına köprü taşıyıcı gövde kirişleri altına yerleştirilirler. Bu nedenle pasif yalıtım sistemlerine "taban yalıtım sistemleri" denilmektedir. Yapıların tabanına yerleştirilen ve yatay yönde esnek olan deprem izolatörleri çoğunlukla elastomer tabakaların ardışık olarak ince çelik güçlendirme plakalarına yapıştırılmasıyla elde edilen çok tabakalı kompozit yapılı elemanlardır.

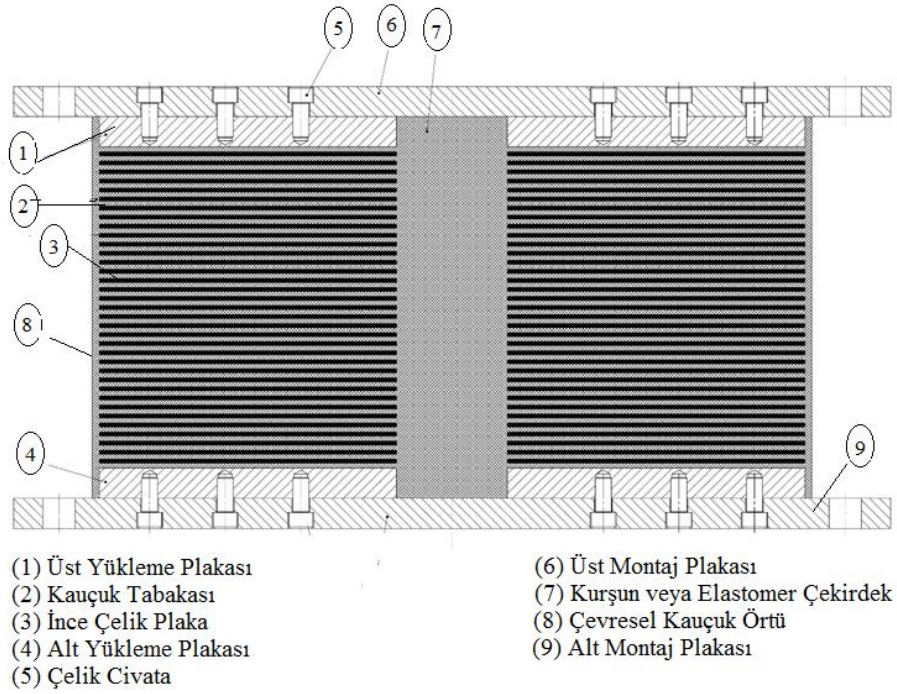


Şekil 1.4 Bir inşaat kolonu altına yerleştirilmiş olan elastomer esaslı deprem izolatörü

Elastomer esaslı deprem izolatörlerinde kullanılan çelik plakalar düşey rijitliği sağlar ve elastomer tabakalar ise yatay yönde kontrollü esnekliği sağlar.

Elastomer esaslı deprem izolatörlerinden başka pasif deprem yalıtıcıları arasında histerik enerji yutucular, viskoz enerji sönümleyiciler, mekanik enerji dağıtıcılar, visko-elastik enerji dağıtıcılar, ayarlı kütle sistemleri ve esnek kat yalıtım elemanları deprem yalıtıcıları olarak sayılabilir. Bahsi geçen bu pasif deprem yalıtım

elemanlarının hepsi yapıların uygun yerlerine yerleştirilerek depremlerin neden olduğu zararlı ve yıkıcı etkilerinden yapılar korunmuş olur. Şekil 1.4 ve 1.5'te görülen deprem izolatörlerinin her biri, deprem sırasında yapıyı depreme karşı korumak için tasarlanmıştır. Pasif deprem izolatörleri, dışarıdan ilave bir enerji girdisine ihtiyaç duymaksızın harekete geçerler ve bu özellikleri ile de aktif deprem yalıtım sistemlerinden ayrılırlar.



Şekil 1.5 Dairesel kesitli elastomer esaslı deprem izolatörü kesit resmi

Depremlerin neden olduğu titreşimleri ve kuvvetleri kontrol altına alan pasif deprem izolatörleri, yapının davranışlarından dolayı ortaya çıkan ve üretilen potansiyel enerji ile yüklenirler. Ancak unutulmamalıdır ki, depremi kontrol altına alacak olan kuvvetlerinin yalıtımı, taban yalıtım sisteminin üstyapının titreşimini kontrol etme kabiliyeti ile sınırlıdır. Çünkü bu tür sistemlerin daha ileri düzeyde davranışları başarabilmeye yetecek kadar kabiliyetleri yoktur.

1.6.2.1 Pasif Deprem Yalıtım Sistemlerinin Tarihine Bakış

Depremin etkilerinden yalıtılmış bir yapı inşa etme fikri, günümüzden binlerce yıl öncesine dayanır. Ancak, geçmişte düşünülmüş ve uygulanmış olan fikirlerin bugün kanıtlanması oldukça zordur. Çünkü tarihsel süreçte meydana gelmiş olan yangınlar, seller ve savaşlar gibi afetlere göre şiddetli depremlerin tekrarlamaları daha uzun sürelerde olduğundan, deprem yalıtımı düşüncesiyle inşa edilen yapıların pek çoğu yıkıcı depremler meydana gelmeden önce başka diğer sebeplerle yıkılmış ve tarih sahnesinden silinip gitmiştir. Ancak, deprem yalıtımı yapılan yapılardan bugüne kadar ayakta kalabilen yapıların en eskisi olarak bilinen, günümüzden 1200 yıl önce inşa edilmiş olan Japon Pagoda'larıdır. Pagoda, uzakdoğu ülkelerinde piramit şeklinde yapılan kutsal tapınaklara verilen addır. Burada yapı, pasif deprem yalıtım sistemi ile yalıtılmış, binanın temelinde ağaç tomrukların yan yana ve üst üste yerleştirilmesiyle yapılan deprem yalıtım sistemi, bu tomrukların arasındaki yüksek sürtünme kuvvetlerinin çok büyük düzeyde enerji dağıtımı ile açıklanabilmektedir. Ayrıca, oldukça büyük titreşim periyoduna sahip olmalarından dolayı bu tür bir yalıtım sistemi ile deprem yalıtımı yapılan Pagodalar, Japonya'da sık sık meydana gelen kısa periyotlu depremlerin oluşturduğu rezonans etkisinden yapıları tarih boyu korumuşlardır.

Eski tarihlerdeki deprem yalıtımlı yapılarda verilebilecek diğer bir örnek de Pekin'deki Kral Zi Jing Ceng'in sarayı gösterilebilir. Söz konusu sarayın deprem yalıtımı, saray temellerinin kireçtaşı ile kaynamış pirinç tanesi kabuklarından oluşan yapay bir kompozit zemin üzerine inşaatı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yapay zeminin esnekliği ve deprem sönümleme özelliklerinin yüksek olması nedeniyle bu zemin üzerinde yapılan saraya çok iyi bir deprem yalıtımı sağlamıştır.

Bugün elimizdeki bilgi kaynaklarına göre, deprem yalıtımlı yapılar hakkında günümüzdeki anlayışa en yakın ilk öneri, Kawai tarafından M=8,0 şiddetindeki Nobi depreminin hemen sonrasında 1894 yılında ortaya atılmıştır. Japon Kawai'nin önerisi, yapıların temellerine enine ve boyuna doğrultularda zemine paralel olarak yerleştirilmiş olan ve birbiri üzerinde yuvarlanabilen ağaç tomrukları üzerine yapının oturtulması prensibine dayanmaktadır.

1906 yılında San Francisco'da meydana gelen M=7,8 büyüklüğündeki depremden sonra İngiliz fizikçi Calantarients, yapının temeli ile zemin arasına toz ve mıcır tanelerinden oluşan bir ara tabaka üzerine inşa edilerek deprem yalıtımı yapılması fikrine patent almıştır.

Kısacası, yukarıda bahsedilen gerek ağaç tomrukları ve gerek gevşek granül malzeme tabakası üzerine inşa edilen yapıların deprem yalıtım fikri, deprem sırasında yatay yönde kayan, yani yatay yönde esnek bir sistem prensibine dayanmaktadır.

1930'lu yıllara ulaşıldığında, R.R. Martel ve arkadaşları "esnek kat" fikrini ortaya atıp geliştirdiler. Burada ana fikir, yapı zeminin ilk katının diğer üst katlara göre yatay yönde daha esnek olmasıdır, bu esnek katta daha fazla deprem enerjisinin yutulması ve böylece yalıtım yapılan yapının diğer katlara oranla daha fazla yer değiştirme yapmasına ve arta kalan deprem enerjisinin esnek olmayan üst katlara azaltılarak aktarılmasına olanak vermesi nedeniyle yapının depremden yalıtılması prensibine dayanmaktadır.

20. yüzyılın en büyük depremlerinden sayılan ve 1 Eylül 1923 tarihinde meydana gelen Büyük Japonya'daki Kanto Depremi, M=7,9 büyüklüğünde olup Tokyo şehrinin %20sinin yıkılmasına ve 143.000 kişinin ölümüne ve de yüz binlerce kişinin yaralanmasına neden olmuştur. Japonya'daki bu depremde, on katın üzerinde çok sayıda çökmüş ve bu nedenle çok katlı yapıların depremlere karşı güvenli olmadığı fikrini doğurmuş ve bu fikrin sonucunda 31 metreden daha yüksek binaların yapımı yasaklanmıştı. Ancak, bu fikrin uygulamaya konulduğu tarihlerde şiddetli depremlere ait deprem ivme kayıtlarının yapılamaması dolayısıyla yapıların gerçek deprem davranışlarının açıklanamaması çok katlı yapıların yapılamaması fikrinin ana nedeniydi. Bu nedenle, yapıların deprem yalıtım çalışmaları bu bahsedilen tarihten itibaren rijit binalar için taban yalıtım sistemlerinin geliştirilmesi fikrine odaklandı ve sonunda dünyada taban yalıtım sistemi uygulanan mühendislik yapısı Fudo Bank binaları 1934 yılında Japonya'da inşa edildi. Fudo-Bank binalarının deprem yalıtımı için bina zemininde küresel şekilli, yatay yönde yuvarlanmaya yetenekli yataklar

kullanıldı. Bu binaların tasarımı R. Oka tarafından yapıldı. Aradan geçen bunca yıla ve birçok depreme rağmen Fudo Bank binaları halen ayaktadırlar ve işlevini sürdürmektedir. Ancak, orta şiddetli depremlerin olduğu bir bölgede olan bu binalar henüz şiddetli bir depreme maruz kalmadığından bu binanın depremlere karşı dayanıklılığı tam olarak test edilememiştir, (Buckle ve Mayes, 1990).

Yeni Zelanda'da 1934 yılında düzenlenen 3. Deprem Mühendisliği Konferansında, Matsushita ve Izumi tarihte ilk defa yapılardaki taban yalıtımının etkilerini sayısal verilerle sunmuşlardır. Özellikle çok tabakalı elastomer deprem izolatörleri 1950'lerden sonra otoyol köprülerinde ve binaların titreşim yalıtımında izolasyon yastığı olarak kullanılmışlardır.

Makedonya'da ise, deprem yalıtımı ilk kez 1963 yılında meydana gelen Skopje depreminden sonra, Skopje kentinde inşa edilen J.H.Pastaloci ilkokulu binası, dünya tarihinde ilk olarak kauçuk esaslı elastomer deprem izolatörlerinin kullanıldığı yapıdır ve günümüze kadar geçen sürede bu bölgede yapılan taban yalıtımlı tek yapıdır. Ancak yıllar hızla geçmiş ve 1980li yıllar sonrası, özellikle Japonya, ABD, Yeni Zelanda ve Çin gibi depremlerin yoğun yaşandığı ülkelerde deprem yalıtımlı binaların, köprülerin ve nükleer santralların sayılarında hızlı bir artış görülmüş ve gün geçtikçe gelişen taban yalıtım teknolojileri hızlı bir şekilde bu tür yapılara uygulanmıştır (Ristic, 1993).

Tarihte ilk defa, ince çelik plakalara yapıştırılarak lamine edilen çok tabakalı kauçuk deprem izolatörü fikrini Fransız Mühendis Eugene Freyssinet (1879-1962) ortaya atmıştır. Fransız Mühendis çelik plakalarla güçlendirilmiş kauçuğun düşey yönde oldukça rijit davrandığını ve yatay yönde oldukça esnek olduğunu fark etmiştir ve 1954 yılında bu fikrin patentini almıştır.

Yapıların inşaatında taban yalıtımının uygulama detayları Grootenhuis ve Crockett(1983) tarafından bulundu. Düşük frekanslı titreşimlere karşı izole edilen ilk bina 1966 yılında Londra'da yapılan bir apartman binası idi. Daha sonra 1975 yılında Malezya Kauçuk üreticileri Araştırma Kuruluşu (MRPRA), şimdi Tun Abdul Razak

Araştırma Merkezi ile birlikte Atkins Araştırma ve Geliştirme Merkezi tarafından kauçuk izolatörler geliştirildi (Derham ve Walker, 1975).

1975 yılından sonra kauçuk esaslı deprem yalıtımı izolatörleri birçok otel ve hastane binasının deprem yalıtımında kullanıldı. İskoçya'da, Glasgow şehrinde 1990 yılında Glasgow Royal konser Salonu yakınından geçen demiryolunun sebep olduğu titreşimlere karşı deprem izolatörleri ile taban yalıtımı yapıldı. Betonarme olarak yapılan bu konser salonu binası 450 adet doğal kauçuk deprem izolatörü kullanılarak taban yalıtımı yapıldı.

İngiltere'de, Birmingham şehrinde, 1991 yılında, uluslar arası Kongre Merkezi binası yapımı tamamlandı ve çok büyük bir kompleks olan bu kongre merkezi binası 2000 adet doğal kauçuk deprem izolatörü kullanılarak titreşimlere ve sarsıntılara karşı yalıtıldı.

Diğer bir taban yalıtım uygulaması 1970 ile 1979 yılları arasında Almanya'nın Berlin şehrinde, II. Dünya savaşı sonrasının en büyük binası olan "Uluslar arası Kongre Merkezi (ICC)" binasında yapıldı. Bu bina (320 x 80)m yani 25.600 m^2 taban alanında ve 40 m yükseklikte yapılmıştır. Bu binanın taban yalıtımında sentetik kauçuk olan neopren esaslı deprem izolatörleri kullanılmıştır.

Amerika Birleşik Devletlerinde son zamanlarda gerçekleştirilen titreşim yalıtımı uygulamasından biri, 1999 yılında Washington Seattle şehrinde, Benaroya Konser Salonu Binası ve diğeri ise California Los Angeles şehrinde, 2003 yılında tamamlanan Walt Disney konser Salonu binasıdır.

Amerika Birleşik Devletlerinde, taban yalıtımının yapıldığı ilk bina Rancho Cucamonga şehrindeki Foothill Commuties LAw and Justice Center (FCLCY) binasıdır. Bu bina aynı zamanda, dünyada ilk defa HDRB (High Damping Rubber Bearings) tip doğal kauçuk deprem izolatörlerinin taban yalıtımı projesidir (Derham ve Kelly, 1985).

Yukarıda örnek olarak verilen bu bina, San Andreas deprem fay hattına 20 km uzaklıktadır. Dört katlı ve 15.794 m^2 taban alanına sahip olan bu binanın 8,3 büyüklüğündeki bir depreme dayanabilecek şekilde taban yalıtımı yapılmıştır. Bu adalet sarayı binasını taban yalıtımında 98 adet HDRB tipi doğal kauçuk kullanılmıştır ve bina 1985 yılında tamamlanmıştır (Tarics vediğer., 1984).

Aynı özelliklerde HDRB doğal kauçuk deprem izolatörleri kullanılarak, Los Angeles'ta Fire Command ve Control Facility (FCCF) binasında taban yalıtımı uygulanmıştır.

Los Angeles kentinde, deprem yalıtımı yapılan ve hatta FCCF ile aynı bölgede olan ikinci bir bina ise, The Emergency Operations Center (EOC) binasıdır. Bu bina iki katlı ve çelik kontrüksiyon olup taban yalıtımında 28 adet, Bridgestone Engineered Products Company Inc. imalatı HDRB tip yüksek sönüm kabiliyetli doğal kauçuk deprem izolatörü kullanılmıştır.

Yakın zamanda, California, san Diego yakınlarındaki Kearny Mesa'da yapılan iki katlı "Caltrans CHP Traffic Management Center" binasıdır (Walters ve arkadaşları, 1995). Bu binanın taban yalıtımı da, Bridgestone Engineered Products Company Inc. tarafından üretilen 40 adet ve 60cm çapındaki HDRB doğal kauçuk deprem izolatörleri uygulanarak yapılmıştır.

Taban yalıtımı uygulanan diğer binalara örnek olarak, California Berkeley şehrindeki San Francisco 911 Center binası ve Public Safety binası verilebilir. Ayrıca, California'da gerçekleştirilen taban yalıtımlı hastane bina projeleridir. M.L.King Jr.-C.R.Drew Diagnostics Trauma Center, California-Willow-brook'ta yapılmıştır. Bu bina 5 katlı ve 13.006 m^2 taban alanına sahip olup, taban yalıtımında 70 adet doğal kauçuk deprem izolatörü ve 12 adet kaymalı yatak kullanılmıştır. Los Angles kentinde yapılan bu bina Newport-Inglewoood deprem fay hattına 5 km mesafede ve 7,5 Richter büyüklüğündeki depremlere dayanabilecek şekilde taban yalıtımı yapılmıştır. Bu binanın deprem yalıtımında kullanılan doğal kauçuk

izolatörler 100 cm çapında olup Amerika Birleşik Devletlerinde binaların taban yalıtımında kullanılan en büyük çaplı izolatörlerdir (Buckle ve Mayes, 1990).

Bütün bu örneklere ilaveten, ABD'de birçok yeni yapılan hastane binasında, HDRB ve Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör LDRB kullanılarak taban yalıtımı realize edilmiştir. Taban yalıtımı yapılan bu hastane binaları içinde taban yalıtımı uygulanan "University of Southern California Teaching Hospital" binası da vardır. Bu hastane binası 1991 yılında yapımı tamamlanmış ve hizmete açılmıştır ancak 17 Ocak 1994 yılında Northridge depremi meydana gelmiştir. Northridge Depremi 6,7 büyüklüğünde yer ivmesi 1g ile 1,8g (16,7 m/s^2)olup gece saat 4.31'de meydana gelmiş, bu depremde 60 kişi ölmüştür.7.000 kişi yaralanmış, 20.000 kişi evsiz kalmış, 40.000 bina hasar görmüştür ve depremin verdiği zarar 20 milyar dolar civarındadır. Northridge depremi, depremin merkez üssünün güneyinde ve 7 km uzaklığındadır. Ancak bahsettiğimiz Southern California Hospital üniversite hastanesine Northridge depremi herhangi bir zarar vermemiş ve bu binada uygulanan taban yalıtımının ne kadar doğru bir deprem koruyucu sistem olduğu açıkça görülmüştür. Daha sonraki yıllarda, örneğin 1998 yılında "The Arrowhead Regional Medical Center" binası San Bernardino'da yapılmıştır."St. John's Medical Center Private Hospital" binası Santa Monica'da 2001 yılında inşa edilmiştir. Bu iki hastanenin taban yalıtımında da HDRB doğal kauçuk deprem izolatörleri kullanılmıştır.

Bu yeni yapılan deprem yalıtımlı binalara ilave olarak taban yalıtımı yapılan binalar vardır, örneğin "The Oakland City Hall" ve "San Francisco City Hall" binaları, bu iki bina eski bina olup 1989 yılındaki Loma Prieta depreminde çok ciddi hasar görmüşlerdir ve "Los Angeles City Hall" binası bunlardan birkaçıdır.

17 Ekim 1989 yılında gündüz saat 5.04'te meydana gelen Loma Prieta depreminin Merkez üssü Santa Cruz Dağlarında olup Santa Cruz şehrine yaklaşık 14km ve San Francisco'nun güneydoğusunda 96km uzaklıktadır. 1989 yılındaki Loma Prieta depreminde 67 kişi ölmüş, 3.757 kişi yaralanmış, 12.000 kişi evsiz kalmış ve 5,9 milyar dolarlık zarar meydana gelmiştir.

Daha sonradan taban yalıtımı yapılan “Oakland City Hall” binası inşa edildiği yıllarda ABD’de batı sahillerindeki en yüksek binaydı. 1914 yılında inşa edilen “Oakland City Hall” binasından sonra 1928 yılında yapımı tamamlanan “Los Angeles City Hall binası daha yüksek olarak yapılmıştı. “Oakland City Hall” binası, 1989 Loma Priet depreminden sonra 1995 yılında taban yalıtımı yapılarak depreme dayanıklı hale getirilmiştir. “Oakland City Hall” binası dünyada taban yalıtımı uygulanan ilk yüksek binadır (Buckle ve Mayes, 1990). Diğer bir taban yalıtımı yapılan bina ise “Los Angeles City Hall” olup, bu binanın deprem yalıtımı 1998 yılında tamamlanmıştır. Yukarıda bahsedilen, “Oakland City Hall” binasının taban yalıtımında 74 cm ve 94 cm çaplarında 110 adet doğal kauçuk deprem izolatörü kullanılmıştır.

The Los Angeles City Hall binası 1928 yılında yapımı tamamlanmıştır ve bu binanın taban alanı 82.728 m^2 olup 28 katlı olarak yapılmıştır. “The Los Angeles City Hall” 17 Ocak 1994 depreminde hasar görmüş ve özellikle 25. ve 26. Katlarda ciddi hasarlar oluşmuştur. Bu binanın taban yalıtımında 416 adet HDRB tipi doğal kauçuk deprem izolatörü, 90 adet kayıcı yatak ve 52 adet mekik viskoz sönümleyici damper kombinasyonu kullanılmıştır ve kauçuk izolatörlerin taban yalıtım maliyeti 35 milyon olmuştur.

San Francisco City Hall binası, 1906 yılında meydana gelen San Francisco Depreminde büyük hasar görerek tahrip olmuş ve 1912 yılında tekrar inşa edilmiştir. Ayrıca 1989 Loma Prieta depreminde tekrar hasar görmüştür ve bu depremden sonra “San Francisco City Hall” binası restore edilmiş ve 530 adet LRBr tipi Kurşun Çekirdekli İzolatör kullanılarak deprem yalıtımı yapılmıştır.18 Nisan 1906 yılında meydana gelen San Francisco depremi gece saat 05.12’de merkez üssü Kaliforniya’nın kuzeyindedir. Bu depremde yaklaşık 3.000 kişi ölmüş ve San Francisco’daki binaların %80’i yıkılmış veya hasar görmüştür. 18 Nisan 1906 San Francisco depremi büyüklüğünün 7.8 ile 8.3 arasında olduğu hakim görüştür. San Francisco depreminin merkez üssü şehre 3 km mesafede Pasifik Okyanusu içinde bulunan Mussel Kayalıklarıdır ve deprem nedeniyle San Andreas fay hattında kuzey-

güney yönünde 477km uzunluğunda ikiye ayrılmıştır. Bu deprem ABD tarihinde kayıtlara göre bu depremde 3000 kişi ölmüş ve 400.000 kişi evsiz kalmıştır.

Diğer bir taban yalıtımı uygulanmış olan bina ise Berkeley şehrinde hükümet binası olan "Martin Luther King Jr. Civic Center" ve Kaliforniya Üniversitesi Berkeley kampüsündeki "Hearst memorial Mining Building" binasıdır.

Japonya'da ilk olarak bir binada deprem yalıtımı uygulaması 1986 yılında yapılmıştır. 1990'lı yıllardan itibaren Japonya'da binalarda deprem yalıtımı Bayındırlık Bakanlığı onayı ile uygulanmaya başlamıştır. 30 Haziran 1998 tarihi itibariyle, Japonya'da taban yalıtımı yapılmış bina 550 adettir, bugüne kadar bu sayı çok artmıştır. Japonya'da her geçen gün, HDRBr tipi doğal kauçuk deprem izolatörü kullanımı artmaktadır. Birçok büyük binanın taban yalıtımı HDRBr tipi kauçuk izolatörlerle yapılmıştır. Örneğin, Tohoku Electric Power Company için yapılan Sendai, Miyako Province "Computer Center" binasıdır ve bu bina 6 katlı olup toplam 10.000 m^2 kapalı alana sahiptir. Bu binanın deprem yalıtımında, Bridgestone üretimi olan ve izolatör çapları 90cm, 100cm ve 120cm olan üç farklı tip 40 adet kauçuk izolatör kullanılmıştır. Burada her bir kolon başına gelen düşey yük 400 ton ile 800 ton arasında değişmektedir. Bu binaın yapımı Mart 1990 yılında tamamlanmıştır. Binanın toplam inşaat maliyeti 20 milyon dolar ve 40 adet kauçuk izolatörün maliyeti 1 milyon dolar olmuştur.

Dünya'da deprem yalıtımı uygulanan en büyük bina, Japonya'da Kobe kentinde Sanda da inşa edilen "The west Japan Postal Computer Center" binasıdır. Bu bina 6 katlı, 47.000 m^2 kapalı alan ve 7.834 m^2 taban oturma alanına sahiptir. Bu binanın deprem yalıtımında 120 adet kauçuk izolatör kullanılmıştır, ayrıca ilave olarak çelik-kurşun damperler kullanılmıştır. Bu bina, Kobe'de 1995'te meydana gelen depremin fay hatına 30km uzaklıkta olup bu binanın izolasyon periyodu 3,95sn. olacak şekilde deprem yalıtımı yapılmıştır. Bu binada kullanılan kauçuk deprem izolatörleri sayesinde 400cm/s^2 (0,41g) olan depremin ürettiği en yüksek ivme, binanın altıncı katında(0,13g) seviyesine düşürülmüştür. Taban yalıtımı sayesinde bina tabanına yerleştirilen kauçuk deprem izolatörlerinin deplasman miktarı 12 cm olarak

gerçekleştirilmiştir. Bu deprem nedeniyle bu binada herhangi hasar meydana gelmemiştir, ancak bu binaya bitişik taban yalıtımsız ankastre olarak yapılan bilgisayar merkezi binasında ciddi hasarlar oluşmuştur. Kobe depreminin sebep olduğu kötü sonuçlar sebebiyle Japonya'da taban yalıtımı uygulaması artarak devam etmektedir.

The west Japan Postal Computer Center binasının taban yalıtımı sayesinde depreme karşı göstermiş olduğu süper dayanım performansı Japonya'da birçok apartman, rezidans ve konutta kauçuk deprem izolatörlerinin taban yalıtımında kullanılmasını teşvik etmiştir. Japonya'da son zamanlarda yılda ortalama yüz civarında taban yalıtımlı bina yapılmaktadır.

2007 yılı itibariyle, Japonya'da yapılmış olan ve depreme karşı taban yalıtımı uygulanmış olan bina sayısı 1.500 adet civarındadır (kamuda ve Fujita, 2007). Ancak bu sayıya müstakil kişisel konutlar dahil değildir ve taban yalıtımlı müstakil evlerin sayısı da 3.000 civarındadır.

Çin'de, 1994, kauçuk esaslı deprem izolatörleri kullanılarak yapılmış olan apartman binası "Guangdong Province" binasıdır. Bu bina bitişik iki blok ve her bir blok 8 kattan ibarettir. Ancak blokların biri geleneksel ankastre tabanlı ve diğeri HDRB tipi tabii kauçuk deprem izolatörleri ile taban yalıtımı yapılmıştır.

The United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) kuruluşu bir çok deprem yalıtım projesine kısmen destek vermektedir. Örneğin, UNIDO "The Malaysian Rubber Producers' Reserch Association (MRPRA, Şimdiki adı The Tun Abdul Razak Research Center) Kaliforniya'daki Berkeley Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, "The Earthquake Engineering Research Center (EERC)" gibi kuruluşlar, gelişmekte olan ülkelerde doğal kauçuk esaslı deprem izolatörleri kullanılarak binaların taban yalıtımını teşvik etmekte ve araştırmalarda destek olmaktadırlar.

1994 yılında, Endonezya'nın Java adasında ilk olarak 4 katlı betonarme bir binada taban yalıtımı uygulanmıştır, bu bina UNIDO tarafından desteklenmiştir. Bu bina 7,2x18,0m taban oturma alanına ve 12,8m yüksekliğe sahiptir ve de taban yalıtmı için 16 adet HDRB doğal kauçuk deprem izolatörü kullanılmıştır.

Nükleer Elektrik Santrallerde deprem yalıtımı çok önemlidir, ilk taban yalıtımlı Nükleer Güç Santrali, Güney Africa'da 1980 yılında yapılan "The Koeberg Power Plant" binasıdır.

Bu santral binası "Electricite de France" tarafından dizayn edilmiş ve "Spie Batignolles" tarafından inşa edilmiştir. Bu nükleer santral, 900MWe gücünde 2 adet standart elektrik üretim santraline sahiptir. Santral binası 0,2 değerinde deprem ivmesi girdisine ve 5cm gibi küçük bir deplasmana göre taban yalıtımı yapılmış ve deprem yalıtımında 1,829 adet sentetik Neopren esaslı Deprem İzolatörü kullanılmıştır. Bir sonraki taban yalıtımı uygulanan nükleer santral "The Cruos Nukleer Power Plant", 4 adet 900 MWe PWR ünitesine sahiptir ve 3.600 adet Neopren esaslı deprem izolatörü ile taban yalıtımı yapılmıştır, bu projede de deprem ivme girdisi olarak 0,2g alınmıştır.

İngiltere'de nükleer santral taban yalıtımı uygulaması 1980'li yılların sonlarında gerçekleştirilmiş olup, Kuzey İngiltere'de yapılan bu deprem yalıtımlı proje binası, doğal kauçuk izolatörlerin ve viskoz damperlerin birlikte kullanılması ile taban yalıtımı yapılmıştır.

Günümüz dünyasında, binaların deprem güvenliğini sağlamada göstermiş olduğu iyi performans ve sağladığı deprem izolasyonu nedeniyle, kauçuk esaslı deprem izolatörleri ile yapıların taban yalıtımı uygulamaları her geçen gün artmaktadır.

1.7 Taban Yalıtımı Ana Prensipleri

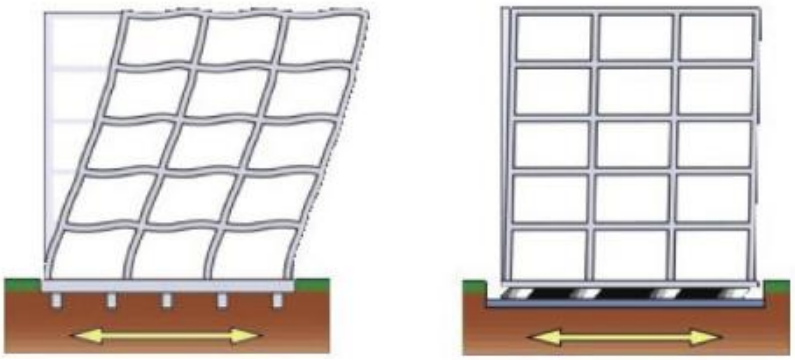
1.7.1 Esnekliğin Periyot Üzerindeki Etkisi

1.7.1.1 Elastomer Deprem İzolatörlerinin Yatay Yöndeki Esnekliklerinin Periyot Üzerindeki Etkisi

Çok tabakalı kauçuk esaslı deprem izolatörleri, düşey yönde oldukça, rijit ve yatay yönde ise istenildiği kadar esnek olarak dizayn edilip üretilirler ve elastomer esaslı deprem izolatörleri taban yalıtımında bu amaç için geliştirilip uygulanmaktadır. Bilindiği gibi geleneksel ankestre tabanlı binalar zemin üzerinde rijit olarak inşa edilirler ve bu nedenle geleneksel yapılar depremlere karşı yeterli dayanıma sahip değildir. Oysa taban yalıtımlı yapıların tabanına yerleştirilen kauçuk esaslı deprem izolatörleri sayesinde üst yapıya deprem kesme kuvvetleri, deprem ivmesi ve deplasman oldukça azaltılarak aktarılır.

Özellikle, deprem izolatörleri sayesinde deprem enerjisi yutularak sönümlenir. Üst yapının altındaki taban yalıtım seviyesinde yapı zemininin yatay deprem kuvvetler yönündeki hareketine kontrollü bir şekilde izin verilerek üst yapı bu deplasmandan çok az etkilenir veya çok etkilenmez.

Taban yalıtımlı üst yapılar, azaltılmış deprem girdileri nedeniyle, depremden zarar görmeden ayakta kalabilmektedirler. Yatay yönde esnek olan elastomer esaslı deprem izolatörleri, yatay yöndeki esnekliği sayesinde periyodu büyütmekte ve deprem ivmesini oldukça azaltarak üst yapıya çok az bir ivme transfer etmektedir. Böylece, taban yalıtımı üstündeki yapı, deprem nedeniyle hareket etmez ve izolatör ile birlikte zemin yatay yönde hareket eder.



(a) *(b)*

Şekil 1.6 (a) Depremde geleneksel ankastre tabanlı yapının davranışı, (b)Depremde taban yalıtımlı bir yapının davranışı, (Holmes Consulting Group Ltd, (2010).

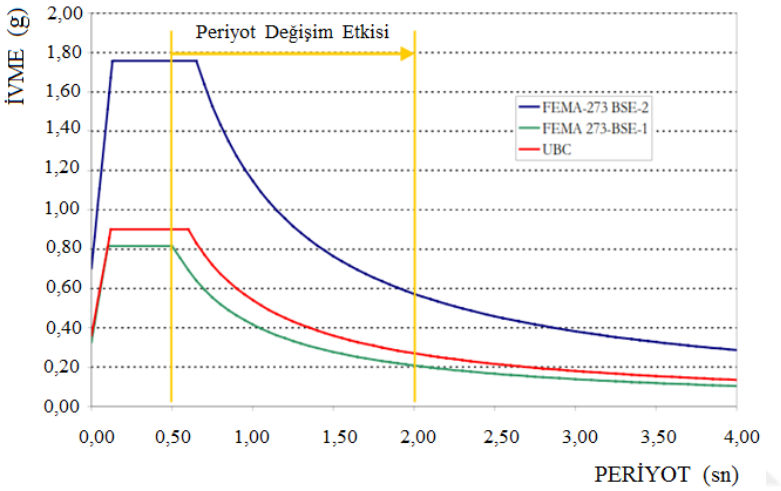
1.7.1.2 Deprem Hareketi Karakteristikleri

Deprem hareketi sonucunun bir karakteristiği olarak periyot uzadığında deprem ivmesinde azalma meydana gelir. Yapısal tasarımlarda, genellikle deprem ivmeleri veya depremin sebep olduğu deplasmanlar yaklaşımı kullanılmasına rağmen, deprem yalıtımının etkilerini en iyi gösteren parametre ise deprem hızıdır. Yapılara gelen deprem enerjisi girdisi, hızın karesi ile orantılıdır. Standart kodlarda, taban yalıtım uygulaması, orta frekans aralığı üzerinde ve periyodun 0,5sn ile 4sn aralığında ve enerji girişinin sabit bir değerde olduğu, yani hızın sabit olduğu varsayımına dayanır. Sabit bir hız değeri için deplasman, periyot ile doğru orantılı ve ivme ise periyot ile ters orantılıdır. Eğer periyot iki katına çıkarsa, deplasman da iki kat olacak, fakat bu durumda ivme yarıya düşecektir.

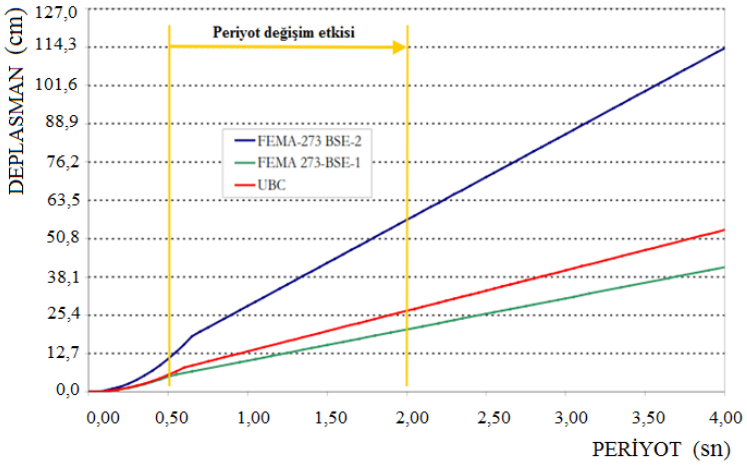
1.7.1.3 Standart Kodlarda Deprem Yükleri

Depremin neden olduğu periyot değişim etkisi, deprem yüklerini tanımlayan standart kodlardan doğrudan hesaplanabilir. Kod tanımlamaları, taban kesme kuvveti katsayısını *C*, genellikle periyodun bir fonksiyonu olarak verirler. Bu katsayı spektral ivmenin göstergesi olup, yer çekimi ivmesinin, g, *C* katsayısı katı kadarlık (m/sn²) biriminde spektral ivmeyi gösterir. Şekil-1.7 ve Şekil-1.8'te verilen eğriler periyot

değişiminin ivmeler ve deplasmanlar üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu şekillerdeki eğriler yüksek deprem hareketliğine sahip bölgeler için geçerlidir ve FEMA-273 (Federal Emergency Management Agency) ile UBC (Uniform Building Code) standart tanımlamalarında verilen katsayılar esas alınarak elde edilmiştir. Eğer kısa periyotlu yapılar (T<1sn), 2sn ve daha uzun periyotlara yalıtılırsa, periyot değişiminin çok etkin olduğunu bu şekillerdeki eğriler açık bir şekilde göstermektedir.



Şekil 1.7 Periyot değişiminin ivme üzerindeki etkisi**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.8 Periyot değişiminin deplasman üzerindeki etkisi**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Yapılarda depremin neden olduğu Şekil 1,8'teki deplasmanlar standart kodlarda verilen *C* kesme katsayısından hareketle hesaplanabilir. Pek çok standart kod için, minimum bir periyodun üzerinde taban kesme katsayısı sabit olup, hızın sabit olduğu ve taban kesme katsayısının T ile ters orantılı olduğu varsayılır.

Tablo 1.1 Taban kesme katsayısı C'ye karşılık gelen deplasman değerleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Taban Kesme Katsayısı (*C*)	Max Deplasman **Δ** (mm)	Periyot ***T*** (sn)
1,20	85	0,53
1,10	93	0,58
1,00	102	0,64
0,90	113	0,71
0,80	127	0,80
0,70	145	0,91
0,60	170	1,07
0,50	204	1,28
0,40	254	1,60
0,35	291	1,83
0,30	339	2,13
0,25	407	2,56
0,20	509	3,20
0,15	679	4,27

Çoğu standart kodlarda *C* katsayısı, %5 sönümleme esas alınarak verilir ve bu hususta Tablo 1.1' deki veriler esas alınır. Yukarıdaki örnek UBC Standrt Koduna dayanmasına rağmen benzer bir formül, periyot fonksiyonuna ters olarak belirli bir katsayı için herhangi bir standart koddan elde edilebilir:

Geçiş periyodunun ötesindeki herhangi bir periyotta *T, C* katsayısını hesapla. Bu periyotta 248.5 deplasman $\Delta = 248.5 \times CT^2$ mm formülü ile hesaplanır. $C\Delta$ çarpımından elde edilen sonuç, herhangi bir diğer taban kesme katsayısı C_1 için $\Delta_1 = C\Delta / C_1$ olarak deplasmanı hesaplamak için bir sabit olarak kullanılabilir.

1.8 Deprem İzolatörleri Tarafından Yutulan Enerji ve Ek Sönümleme

Sönümleme, harekete karşı yapısal sistemlerin bir davranış karakteristiğidir. Deprem yalıtım sistemleri için sönümleme, genellikle viskoz (hıza bağlı) veya histerik (deplasmana bağlı) olarak kategorize edilir. Eşdeğer lineer analizler için, histerik sönümleme eşdeğer viskoz sönümlemeye dönüştürülür. Oysa periyot değişim etkisi ile genellikle ivme azalır fakat deplasman artar. Sönümleme daima hem ivmeyi ve hem de deplasmanı azaltır. Burada, bir konuyu vurgulamak yerinde olacaktır. Şöyle ki; şönümlemenin artırılmasıyla ve birinci mod tepkisiyle basklınanan taban kesme kuvvetine karşılık gelen ivmeler azalır. Bununla beraber, yapılarda yüksek sönümleme, daha yüksek modlarda ivmeleri artırabilir. Bu nedenle çok katlı binalar için 'daha fazla sönümleme daha iyidir' şeklindeki yaklaşım her zaman doğru olmayabilir. Standart kodlarda verilen spektral tepki %5 sönümleme için hemen hemen hiç değişmez. %5'ten daha büyük sönüm oranları için spektral değişimi kullanan birkaç standart prosedür vardır. Örneğin; Eurocode EC8, %5 sönümleme, ξ, oranındaki ivmeye karşılık gelen söz konusu sönümleme oranındaki ivmeler için formüler verir. Burada ξ kritik sönümleme yüzdesini ifade eder. UBC ve AASHTO kodları *B* katsayısını Tablo 1.3'teki gibi vermektedir. FEMA-273 ise, kısa ve uzun periyotlar için farklı bir sönümleme faktörünü liste halinde verilmiştir. Genellikle B_1 faktörü tüm taban yalıtımı yapılmış yapılar için uygulanır. Bu faktör, UBC ve

AASHTO standart kodlarında ise Tablo 1.2'deki aynı değerlere sahiptir (American Association of State Highway Transportation Officials [AASHTO], 1991 ve 1999).

Tablo 1.2 UBC ve AASHTO sönümleme katsayıları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

	Eşdeğer Vizkoz Sönümleme						
	< %2	5%	10%	20%	30%	40%	< %50
B	0,8	1	1,2	1,5	1,7	1,9	2

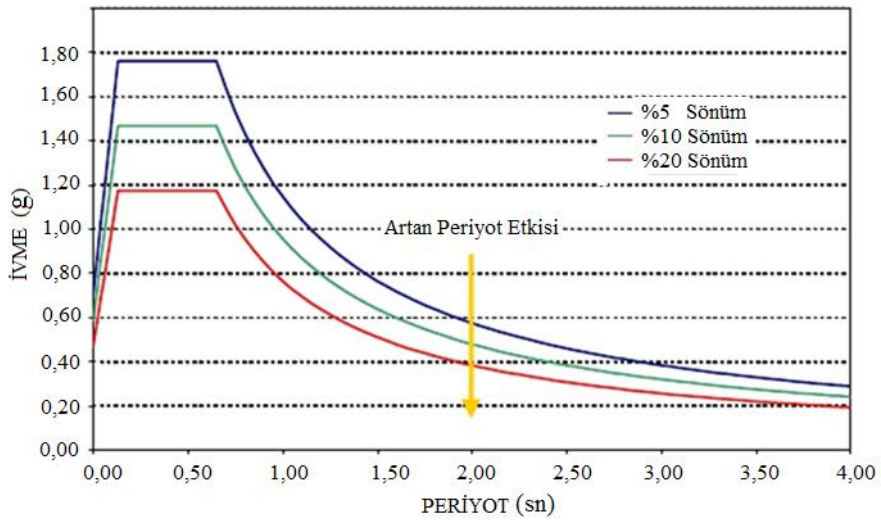
Tablo 1.3'te EC8 değerinin karşılığı olarak FEMA-273'ten eşdeğer faktörlerin yanında listelenmiştir. EC8 diğer kodlara göre sönümlemeye bağlı olarak daha büyük azalmalar sağlar ve FEMA-273 standart kodunda, kısa periyot B_s ile ilişkili olduğu görülür.

Tablo 1.3 FEMA-273 sönümleme katsayıları**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Etkin Sönüm (*B*) Kritik %'si	B_s Periyod <=T0	B_1 Periyod>=T0	EC8
< 2	0,8	0,8	0,75
5	1,0	1,0	1,00
10	1,3	1,2	1,31
20	1,8	1,5	1,77
30	2,3	1,7	2,14
40	2,7	1,9	2,45
> 50	3,0	2,0	2,73

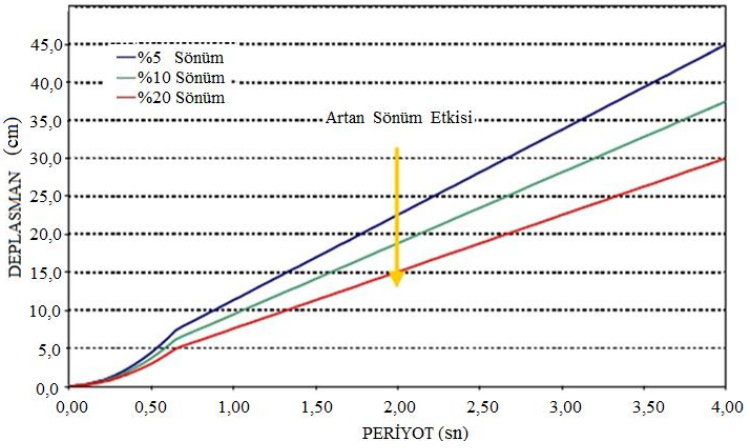
Tablo 1.4 Sönümleme faktörlerinin karşılaştırılması, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

	%10 Sönümleme		%30 Sönümleme	
	İvme	Deplasman	İvme	Deplasman
El Centro Depremi	0.84	0.81	0.65	0.49
Sepulveda Depremi	0.83	0.80	0.70	0.47
UBC	0.83	0.83	0.59	0.59
EC	0.76	0.76	0.47	0.47

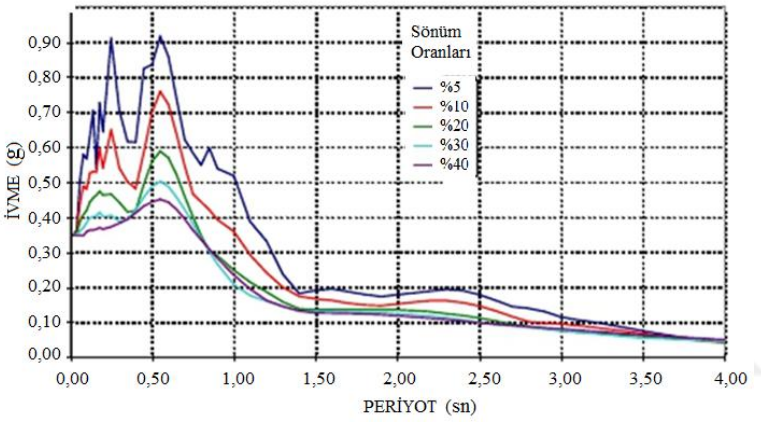


Şekil 1.9 Sönümlemenin ivmeler üzerindeki etkisi**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

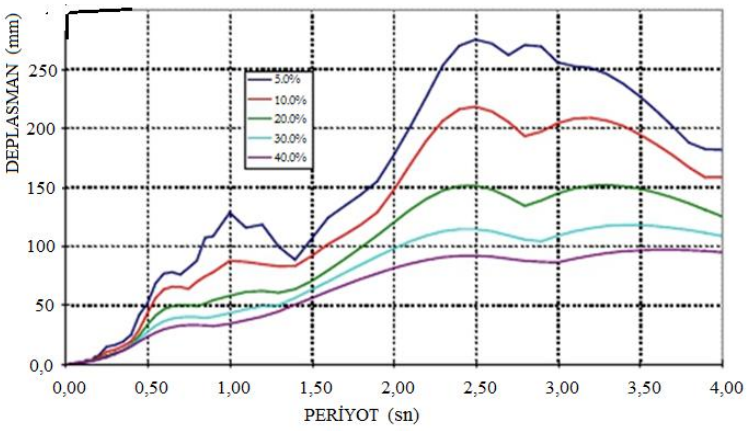
Şekil 1.9 ve Şekil 1.10 UBC/AASHTO'da verilen *B* değerleri kullanılarak sırasıyla yalıtılmış ivmeler ve deplasmanlar üzerinde sönümlemenin etkilerini eğrisel olarak göstermektedir.



Şekil 1.10 Sönümün deplasmanlar üzerinde etkisi**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



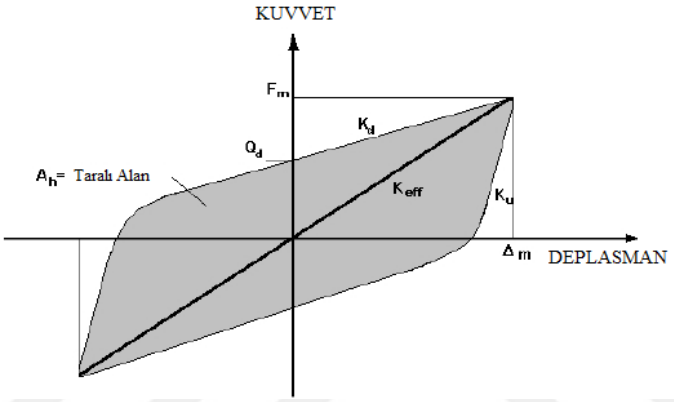
Şekil 1.11 El Centro 1940 depremi, farklı sönüm oranlarına göre ivme spektrumu**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



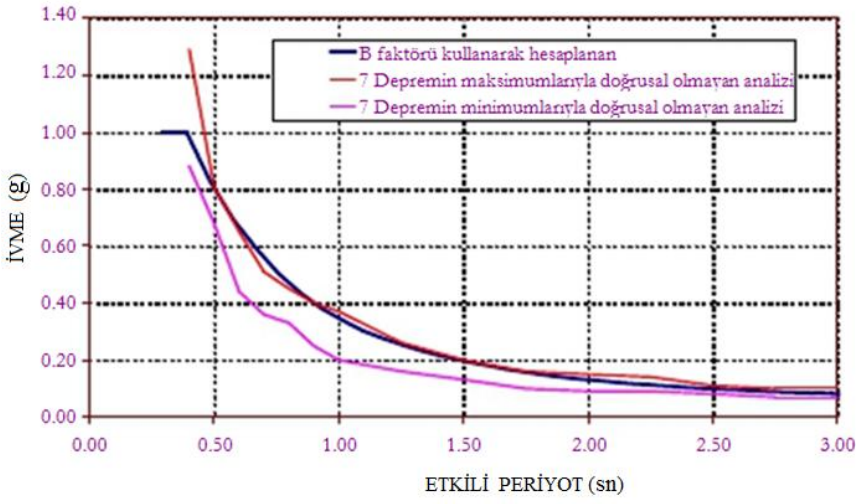
Şekil 1.12 El Centro 1940 Depremi, farklı sönüm oranlarına göre N-S yönündeki deplasman spektrumu**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.9 Deprem İzolatörü Sönümleme Tipleri

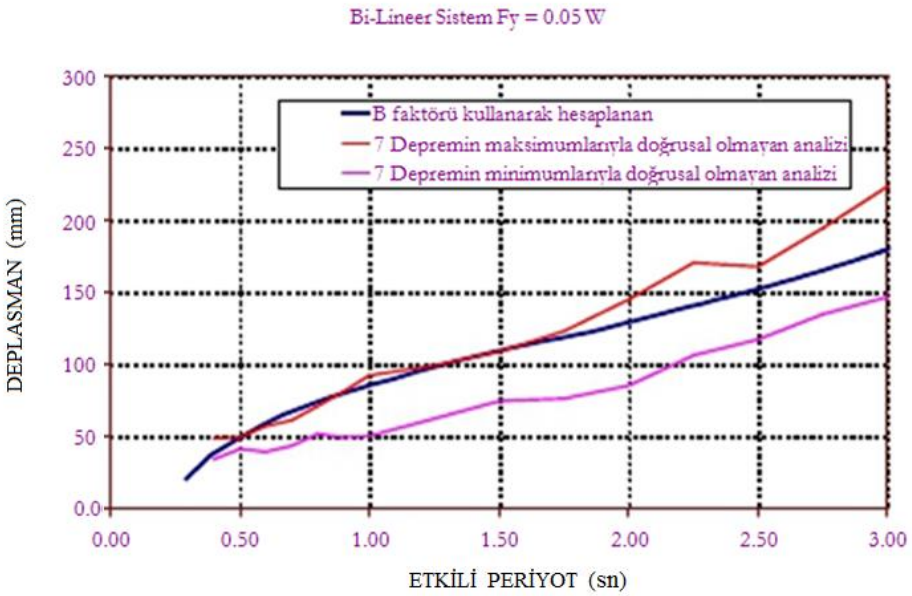
Deprem taban yalıtım standart kodları bütün kaynaklarından ortaya çıkan sönümlemeyi eşdeğer viskoz bir sönümleme olarak temsil eder, ki bu da, hızın bir fonksiyonudur. Çoğu tip deprem izolatörleri sönümleme sağlar. Histerik sönümleme olarak sınıflandırılan bu tip bir sönümleme ise, deplasmanın bir fonksiyonudur. Burada, A_h histerik eğrinin alanıdır ve K_{eff} de deprem izolatörünün **Δ** deplasmandaki etkili rijitliğidir. Şekil 1.13 bu durumu gösterir.



Şekil 1.13 Eşdeğer Vizkoz Sönüm**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.14 Doğrusal olmayan ivme spektrumu**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.15 Doğrusal olmayan deplasman spektrumu**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Şekil 1.14 ve Şekil 1.15, yedi farklı deprem verisi kullanılarak, her bir tasarım spektrumuna bir frekansa karşılık gelecek şekilde ve eşdeğer elastik analizden elde edilen sonuçlar ile bir dizi lineer olmayan analizlerden elde edilen sonuçları karşılaştırmaktadır. Bütün deprem yalıtımı uygulamalarında, periyot T>1sn'lik bir yaklaşım prosedürü ile üretilen sonuçlar, doğrusal olmayan analizlerden hareketle elde edilen maksimum ve minimum değerler arasına denk düşmektedir. Etkili periyot T>2sn'nin üstüne doğru yükseldikçe, yaklaşım prosedürü, doğrusal olmayan analiz sonuçlarının ortalamasına yakın sonuçlar verme eğilimindedir. Verilen örnek, tek bir deprem yalıtım sisteminin akma seviyesi ve tasarım spektrumu şekli için geçerli bir yaklaşımdır. B faktörü yaklaşımının, doğrusal olmayan bir analiz programı kullanmak yerine, bir hesap çizelgesi yardımı ile Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'de verilen eğrileri elde edilebilme gibi bir avantajı vardır.

1.10 Deprem Yalıtımında Esneklik ve Sönümleme

Esneklik ve sönümleme, deprem yalıtım sisteminin iki ana bileşenidir. Özellikle, göreceli olarak çok kısa periyotlu, yani 0,7sn'den daha düşük periyoda sahip deprem yalıtım sistemi üzerine bina edilen yapılarda, genellikle esneklik en büyük etkiye

sahiptir. Tablo 1.5 yakın fay hattı etkilerine sahip, yüksek deprem riski olan bölgelerdeki bir yapı için taban kesme katsayılarını ve deplasmanları verir.

Deplasmanlarla ilgili olarak şunları söyleyebiliriz: Geleneksel ankastre tabanlı, periyodu 0,5sn olan bir yapıda, 1,76 olan taban kesme katsayısı, %5 sönümlü taban yalıtımı yapılmış ve periyodu 2sn olan bir yapıya dönüştürüldüğünde taban kesme katsayısı üç kat azalarak 0,57'ye düşmektedir. Eğer taban yalıtım sisteminin sönümleme oranı, %5'ten %20'ye çıkartılırsa, taban kesme katsayısı %5 sönümlemedeki değeri olan 0,57'den 0,38 değerine düşer.

Tablo 1.5 Esneklik ve sönümlemenin etkisi**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

	Taban kesme kuvveti katsayısı	Toplam deplasman
A- Ankastre tabanlı yapı.		
Periyot T=0,50 sn	1,76	109 mm
Periyot T=1,00 sn	1,15	285 mm
B- Deprem yalıtımı T=2,00 sn periyoda göre uygulanmış yapı		
%5 sönüm	0,57	570 mm
%10 sönüm	0,48	475 mm
%20 sönüm	0,38	380 mm

Geleneksel ankastre tabanlı, periyodu 1sn olan biraz daha esnek bir yapıda 1,15 olan taban kesme katsayısı, %5 sönümlü taban yalıtımı yapılmış ve periyodu 2sn olan bir yapıya dönüştürüldüğünde taban kesme katsayısı iki kat azalarak 0,57'ye düşmektedir. Eğer taban yalıtım sisteminin sönümleme oranı %5'ten %20'ye çıkartılırsa, taban kesme katsayısı %5 sönümlemedeki değeri olan 0,57'den 0,38 değerine düşer.

Taban yalıtım sisteminin esnekliğinden kaynaklı ivme tepkisindeki azalma, binanın rijitliğine bağlıdır, ancak sönümleme kaynaklı ivme azalması bina rijitliğinden bağımsızdır. Deplasmanlar açısından konuya bakıldığında, periyodu 2sn'ye çıkması nedeniyle oluşan esneklik etkisi deplasmanları artırır, fakat sönümleme bu deplasmanları azaltır. Geleneksel ankastre tabanlı yapı için deplasman, binanın kütle merkezinde ve yaklışık bina yüksekliğinin üçte ikisinde oluşur. Taban yalıtımı yapılmış binalarda çoğunlukla deplasman yalıtım düzlemi boyunca yalıtım katında oluşur. Böyle taban yalıtımlı yapılarda daha az miktarda deplasmanlar olabilir.

1.11 Taban Yalıtımlı Rijit Bir Yapının Tasarım Prensipleri

Bir deprem izolasyon sistemi üzerine inşa edilmiş rijit bir yapının performansını değerlendirmek için ivme ve deplasman spektrumu kullanılır. Eğer üst yapı rijitse, bu durumda, toplam deplasman izolasyon düzlemi boyunca ve izolasyon katı seviyesinde meydana gelir. Bu durumda üst yapının yukarı kısımlarında oluşan tüm ivmeler taban kesme kuvveti katsayısına C, eşit olacaktır. Taban kesme katsayısı C ve deplasman Δ tarafından tanımlanan rijit bir yapının performansı, tasarım tepki spektrumu, izolasyon sisteminin rijitliği ve sönümleme oranı ile doğrudan değerlendirilebilir. Şöyle ki;

1- Toplam sismik ağırlık W'yi ve izolasyon sisteminin etkili rijitliği K_{eff}, kullanılarak izolasyon sisteminin periyodu T_e, hesaplanabilir. Bir ön tasarımda, etkili periyot T_e için 1,5sn ile 2,5sn arasında bir değer kabul edebilir ve bu değerler gerekli olan etkili rijitliği tanımlamak için kullanılabilir.

2- Periyot, T_e ve sönüm faktörü, B'den yolu çıkararak taban kesme katsayısı C hesaplanabilir. Sabit C_v, tasarım spektrumunun bir fonksiyonudur.
3- Periyot, T ve taban kesme katsayısı, C'den hareketle deplasman hesaplanabilir. Yalnız bu formülde yerçekimi ivme sabitinin doğru birimi olan g = 9810 mm/sn² değeri kullanılmalıdır.

Şayet bir yapının deprem yalıtımı ile ilgili bir ön tasarımını yapılıyorsa, yukarıdaki eşitlikte ufak tefek değişiklik yapmak gerekebilir. Örneğin, eğer maksimum taban kesme katsayısı belirlemek isterseniz, bu durumda BT_e 'yi belirlenebilir ve varsayılan bir periyot için sönümlemenin de hesaplanması gerekir. 4. bölgede yakın fay hattı faktörü Na = 1,2 ve Nv = 1,6 olarak ve toprak profili S_B olan önceki UBC tasarımını göz önünde bulundurulacak olursa, Sismik katsayılar Ca = 0,48 ve Cv = 0,64'tür. ütün deprem yalıtım sistemlerinde kullanılan yukarıdaki periyot T_s formülü 0,533sn'den daha büyük periyot değerleri için ve tüm yalıtım sistemleri için kullanılabilir. Genellikle, bu durumda, periyot en az 1,5sn'dir. Bu periyot veya daha az büyüklükteki ankastre tabanlı bir yapı için taban kesme katsayısı 0,64/0,533 = 1,2 olur.

1.11.1 Maksimum Taban Kesme Katsayısı Tasarımı

Taban kesme katsayısına %20 gibi bir limit koyduğumuzu farz edersek, bu durumda ankastre tabanlı yapıdaki değer = 1,2/5 = 0,240 olur. BT'nin Cv/C = 0,64/0,24 = 2,67 değerinden daha büyük veya eşit olması gerekir. Eğer periyot T = 2sn ise bu durumda B = 1,33 olmalıdır, ki bu da %12,6 veya daha büyük sönümlemedir. Tablo 1.2, Tablo 1.6'da görüldüğü gibi etkili periyot, T_e = 2.0sn ile T = 3.5sn değerindeki periyot aralığında tasarım geliştirmek için yukarıdaki formül kullanılabilir. Sabit bir kuvvet katsayısı için daha uzun periyotlara ve daha az sönüm oranlarına ihtiyacımızın olduğunu unutmamalıyız. Bununla birlikte periyot ne kadar uzarsa taban yalıtım sistemlerindeki deplasman da o kadar artar. Etkili periyot T_e, 2sn'den 3sn'ye yükseldiğinde sönüm oranları %24'ten %6'ya düşer, fakat deplasman 199mm'den 447mm'ye yükselir. T_e = 2sn için %6,1 sönüm oranına karşılık gelen B = 2x0,522 = 1,044 değeri gereklidir. Sabit taban kesme kuvveti katsayısında olduğu gibi, Tablo 1.6'da verildiği gibi T = 2sn ile T = 3sn aralığında bir etkin periyot değeri için gerekli olan sönümlemeyi elde edebiliriz. Bu durum ise, deplasmanı 305mm değerinde sabit tutmak için, daha büyük periyotlara karşılık daha fazla sönümlemenin gerekli olduğu durumdaki sabit taban kesme kuvveti katsayısının tersidir. Periyot 2sn'den 3sn'ye çıktığında sönümleme %6'dan %23'e yükselir, taban kesme kuvveti katsayısı da C = 0,307'den C = 0,136'ya düşer.

Tablo 1.6 Sabit taban kesme kuvveti katsayısı tasarımı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Etkin Periyot T_e	Sönüm Faktörü B	Eşdeğer Sönüm	Taban Kesme Kuvveti Katsayısı C	Deplasman (mm)
2,00	1,60	24%	0,200	199
2,10	1,52	21%	0,200	219
2,20	1,45	18%	0,200	241
2,30	1,39	16%	0,200	263
2,40	1,33	14%	0,200	286
2,50	1,28	12%	0,200	311
2,60	1,23	11%	0,200	336
2,70	1,19	9%	0,200	362
2,80	1,14	8%	0,200	390
2,90	1,10	7%	0,200	418
3,00	1,07	6%	0,200	447

Tablo 1.7 Sabit deplasman tasarımı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Etkin Periyot T_e	Sönüm Faktörü B	Eşdeğer Sönüm	Taban Kesme Kuvveti Katsayısı C	Deplasman (mm)
2,00	1,04	6%	0,307	305
2,10	1,10	7%	0,278	305
2,20	1,15	8%	0,253	305
2,30	1,20	10%	0,232	305
2,40	1,25	11%	0,213	305
2,50	1,31	13%	0,196	305
2,60	1,36	15%	0,181	305
2,70	1,41	16%	0,168	305
2,80	1,46	18%	0,156	305
2,90	1,51	20%	0,146	305
3,00	1,57	23%	0,136	305

1.12 Taban Yalıtımında, Uygun Periyot Değeri ve Makul Sönüm Oranı Ne Olmalıdır?

Yapıların deprem yalıtım tasarımında, buraya kadar vermiş olduğumuz formüllerin ve değerlerin seçiminde deprem yalıtım mühendisleri özgürce seçim yapamazlar. Ayrıntılı olarak yapılacak bir deprem yalıtım tasarımında, taban yalıtım sistemi tasarım prosedürleri takip edilir ve özellikle, her bir proje için deprem izolatörlerinin rijitliği ve sönüm oranlarının hesaplanması ve belirlenmesi çok ciddi

bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, izolatör tasarımında ve seçiminde kullanılabilecek temel krıterler kısaca aşağıda verilmiştir.

a-Etkili periyot, T_e;

1- Çoğu deprem izolatörü için, üzerinde taşıdığı ağırlık azaldıkça etkin periyot da azalır. Periyot,T_e, $\sqrt{M}/\sqrt{K}$ ile orantılıdır. Eğer M küçük bir değerde ise o halde K da küçük olmalıdır. Çok düşük rijitlikler için çoğu izolatörün tasarımı zordur. Çok hafif ağırlıklı tek katlı veya 2-3 katlı hafif ağırlıklı çelik yapılarda, taban yalıtımının 1,0sn-1,5sn'den daha büyük periyotlara yalıtılması zordur.

2- Aksine, çok ağır binaların taban yalıtımında periyodu daha uzun bir periyot aralığı olan 2,5sn ile 3,0sn değerlerine yalıtmak göreceli olarak nispeten daha kolaydır.

3- Çoğu yapıların taban yalıtımında etkili periyot, T_e genellikle 1,5sn ile 2,5sn arasında bir aralıkta olması hedeflenir.

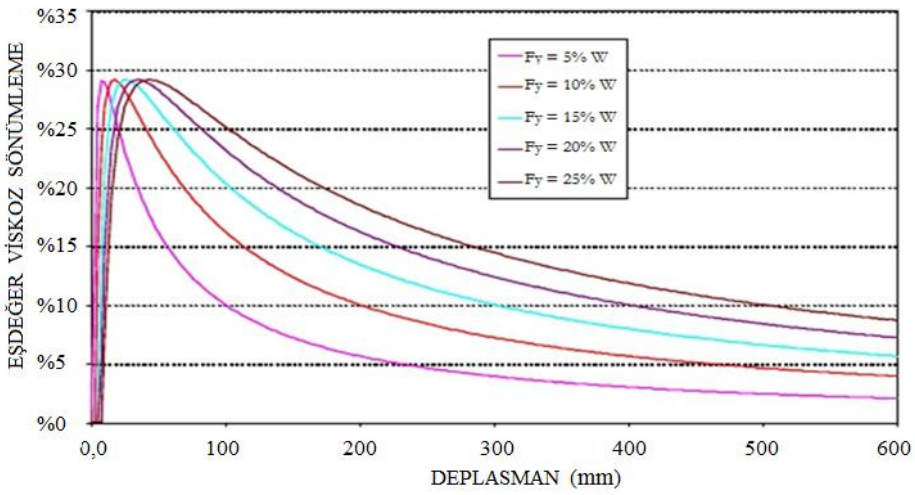
b-Sönüm

Uygulamada kullanılan çoğu izolatör tipleri, histerik özellik gösterir ve bunların başlangıçta elastik rijitliğe sahip, sonrasında oluşan gerilme sertleşmesi nedeniyle, bi-lineer kuvvet-deplasman eğrilerine sahip olması beklenir. Eğer elastikliğin akma rijitliğine oranını bir değer olarak kabul edersek, bu durumda Şekil 1-18'de gösterildiği gibi deplasmana karşılık sönümlemenin fonksiyonu, K_u/K_r = 12/1 tipik bir değeri elde edilir. Bu da bize önemli bazı eğilimleri gösterir:

1- Göreceli olarak küçük bir deplasmanda pik noktaya ulaşıldıktan sonra, deplasman arttıkça sönümleme azalır.
2- Akma seviyesinin düşmesi ile sönümleme azalır. Akma seviyesi bina ağırlığı ile ilişkilidir. Ne yazık ki bu eğilimler bizim ideal bir izolatörden beklentilerimizin tersinedir.
3- Daha büyük depremlerde daha büyük deplasmanlar söz konusudur. Böyle durumlar ise deplasmanları ve kuvvetleri kontrol etmek için maksimum sönümlemeye ihtiyacımızın olduğu durumlardır.

4- Daha yüksek akma noktalı izolatörler, küçük şiddetli depremlerden, orta şiddetli depremlere kadar olan aralıkta daha az etkilidir. Bu da, izolasyon sisteminin akma noktası sınırını aşıncaya kadar çalışmaya başlamamasından kaynaklıdır. Eğer izolasyon sisteminin akma sınırı, çok yüksek değerlere ayarlanırsa sistem daha büyük şiddetli depremlerde bile çalışmaz. Bu karakteristikler, iki ayrı şiddetteki depreme göre tasarlandığı zaman, örneğin UBC standartlarında tanımlanan DBE ve MCE seviyeleri çok daha problemli hale gelir. Uygun sönümlemeler için yaklaşık bir hesap yapılarak aşağıdaki sönüm oranlarına ulaşılabilir:

1-Deprem DBE seviyelerinde genellikle %15 ile %20 aralığındaki sönümleme oranlarına ulaşılabilir.
2-Yüksek deprem hareketliliği olan bir bölgede, yükün MCE seviyelerindeki sönümü %10 ile %12 değerlerini geçemez.



Şekil 1.16 Deplasmana karşılık gelen histerik eşdeğer viskoz sönüm oranları**, (**Holmes Consulting Group Ltd,2010).

MCE hareketlerinin çok büyük olduğu bazı deprem yalıtım projelerinde, büyük deplasmanlar için destekleyici ek sönümleyiciler sönüm oranını artırmak için gerekli olur. Ancak bu genellikle, çok pahalı bir seçenektir. Şekil 1.16. Deplasmana karşılık gelen histerik eşdeğer vizkoz sönüm oranları verilmiştir ve bu sönüm oranları rijit

yapı kabulüne dayanır. Esnek yapılarda düşük sönümleme sistemleri yerine, yüksek sönümleme sistemleri kullanılması yüksek katlarda ivme artışına neden olabilir.

1.13 Rijit Yapı Kabulünün Uygulanabilirliği

İzolatörler üzerine inşa edilmiş rijit bir yapı durumu pek nadir görülür. Hemen hemen bütün yapılar, izolasyon sistemi ve binanın tepkilerini azaltacak bir esnekliğe sahiptir. Yapılarda ve izolasyon sistemlerinde rijit elemanlar bulunmaktadır ve çoğu binalar ve köprüler bu gerçek göz önünde tutularak değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, rijit yapı kabulü bir izolasyon sistemi tasarımı geliştirmede ilk adımdır. Esnekliğin etkileri, binalar ve köprüler için farklı ve kendine özgüdür. Binalar için esneklik, taban yalıtım sistemi üzerindeki yapıdadır ve taban yalıtımında kullanılan izolatörler deprem kaynaklı hareketleri üst yapıya azaltarak aktarırlar.

1.14 Deprem İle İlgili Olmayan Yükler

Tanım olarak; Taban yalıtım sistemi, yapı ile yeri birbirinden ayırır ve aynı zamanda yapıdan gelen tüm yükleri yere iletir. Deprem izolatörleri deprem yüklerine göre tasarlanmış olmasına rağmen, başka bazı kaynaklardan oluşabilecek bazı yüklere karşı da dayanıklı olmak zorundadırlar. Bu yükler, kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1- Yerçekimi: Deprem izolatörleri sabit yükleri ve geçici dinamik yükleri destekleme kabiliyetinde olmalıdır.

2- Rüzgar: Bütün izolatör sistemleri yatay yöndeki rüzgar yüklerine dayanıklı olmalıdır. Hemen hemen bütün izolasyon sistemleri rüzgar yükleri altında sabit kalacak rijitlikte tasarlandıkları için yanal rüzgar yüklerini sönümlemezler.

3- Isıl genleşme hareketleri: Bu hareketler köprülerin tasarımında çok yaygın bir tasarım kriteridir. Bu kriter bazı büyük bina yapılarının tasarımında da oldukça önemlidir. Sıcaklık farklılıkları, deprem izolatörlerinde harekete neden olacaktır. Bu sıcaklık farklılıkları göreceli yükler oluşturdukça, deprem izolatörleri çok

sayıda pozitif ve negatif deplasman döngülerine dayanıklı olmalıdırlar. Eğer izolatörler, ortalama sıcaklık döngüsünün altında veya üstünde bir sıcaklıkta yerlerine montajlanırsa, bu durumda izolatör deplasmanları sıfırdan farklı bir değerde olacaktır.

4- Sünme ve büzülme: Sıcaklık nedeni ile oluşan yükler daha ziyade köprü deprem yalıtım sistemleri üzerinde etkilidirler. Deprem izolatörlerinin yatay yöndeki esnekliği sayesinde, izolatör destekli yapılarda eksiz mono blok daha geniş kat alanlı betonarme binaların yapımı mümkündür. İzolatörlerin sünme deformasyonu ve büzülmeleri çok yönlü ve tersinmez olarak gerçekleşir. Uzun kemerli köprülerde bu durum baskın yük haline gelebilir. İnşaat yapımından bir süre sonra hasar görmüş, sünme deformasyonuna uğramış izolatörlerde özel ölçümler yapılması gerekebilir.

5- Şok ve çalışma yükleri: Bazı izolatörler, çalışma şartları veya aşırı koşullar nedeni ile oluşan bazı yüklere maruz kalabilirler.

1.15 Bir Deprem Yalıtım Sistemi için Olmazsa Olmazlar

Pratik bir deprem yalıtım sistemi tasarımında ve uygulamasında, yukarıda bahsedilen performans kriterlerini karşılaması için gereksinimler aşağıda ana başlıklar halinde verilmiştir:

1. Esneklik,
2. Sönümleme,
3. Çalışma yüklerine karşı dayanım,

Dayanıklılık, maliyet, montaj kolaylığı ve projeye özel ek gereksinimler izolatör seçimini etkiler, ancak bütün taban yalıtım uygulama sistemleri yukarıda sıralanan üç temel özelliğe sahip olmalıdır ve olmak zorundadır.

1.16 Deprem İzolatör Tipleri

Bir çok izolasyon sistemi geliştirilmiştir, ancak çoğu konsept çalışmasından ileri gidememiştir. Başarılı çalışmaların uygulama projeleri ile ilgili birçok örnek uygulama mevcuttur. Taban yalıtımında kullanılan izolatör sistemlerinin tipleri ile ilgili bilgi aşağıda verilmiştir.

1.16.1 Elastomer Esaslı Kauçuk Deprem İzolatörleri

Elastomer esaslı deprem izolatörleri, doğal veya sentetik kauçuk tabakaların ince çelik levhalar arasına yapıştırılarak lamine edilmesiyle çok katmanlı kompozit bir yapıda üretilirler. Güçlendirmeye yarayan ince çelik plakalar, deprem izolatörünün düşey rijitliğini artırır ve izolatörü oluşturan elastomer tabakaların yatay yönde dışa doğru şişmesini engeller ve böylece, izolatörlerin küçük deformasyonlar altında daha büyük düşey yükleri taşımasına olanak tanır. Yatay yük altında ise, izolatörler olması gerektiği kadar esnektir. Yalnız elastomer esaslı izolatörler esneklik sağlarlar, ancak yeterli derecede sönümleme sağlamazlar ve rüzgar yükü gibi küçük servis yükleri altında bile hareket ederler ki, bu da çok istenen bir durum değildir. Bu durumun giderilmesi için izolatörlerin içinde kurşun çekirdek kullanılmış ve yüksek sönümleme kabiliyeti olan elastomer esaslı izolatörler HDRBr, geliştirilmiştir.

1.17 Binalarda Deprem Yalıtımı Uygulaması Yapımı

1.17.1 Yapılarda Deprem Yalıtımı Ne Zaman Uygulanır?

Basitçe cevap vermek gerekir ise deprem yalıtımı uygulaması, deprem güvenliğini sağlayan diğer metodlara göre daha etkili ve daha güvenli bir alternatif olduğunda yapılmalıdır. Yapı tasarımı, deprem yüklerine dayanım gerektiriyor veya diğer yük şartları açısından detaylandırmaya gerek duymuyorsa, bu durumda birinci ve öncelikli dikkate alınması gereken kriter, deprem riski seviyesi açısından inşaatın yapılacağı bölgenin değerlendirilmesidir. Bu temel kriterleri karşılayan bir yapıyı,

taban yalıtımı açısından değerlendirdiğimizde, izolasyonun sisteminin etkinlik derecesi hakkında bilgi sahibi olmanın en iyi yolu, düşünülen taban yalıtım sistemi ile ilgili bir uygulama kontrol listesinin hazırlanması olacaktır.

1.17.1.1 Taban Yalıtımı Uygulanacak Yapının Ağırlığı

Çoğu taban yalıtım sistemi uygulaması ağır yükler altında en iyi çalışma performansına sahiptir. Etkili bir deprem yalıtımında, uzun tepki periyotlarına ulaşmaya ihtiyaç vardır. Periyot M kütlenin karekökü ile doğru orantılı ve K rijitliğin karekökü ile ters orantılı olmalıdır. Verilen izolasyon periyodunu elde etmek için düşük bir kütle, düşük bir rijitlik ile ilişkilendirilmelidir. Deprem yalıtımında kullanılan izolatörler, sonsuz aralıkta bir rijitliğe sahip değillerdir. Örneğin, elastomer esaslı deprem izolatörlerinin deprem deplasmanları altında stabil kalabilmesini sağlamak için minimum çapta olmaları gerekmektedir. Bu minimum kesit ölçüsü minimum rijitlik demektir.

Kaymalı deprem izolatörlerinin ağırlık gibi bir kısıtlaması yoktur. Bu yüzden düşük ağırlıklı binaların taban yalıtımı kaymalı tip deprem izolatörleri ile yapılabilir. Bununla beraber, hafif binalar için değişik sebepler nedeni ile maliyet açısından çok ekonomik değildir.

Etkili bir periyot için binanın ağırlığından bağımsız olarak deplasman aynıdır ve yine bu tip izolatörlerin en pahalı parçası olan kayma levhası yüzeyinin büyüklüğü de ağırlığa bağlı değildir. Bu durum da hafif kütleli binaların bu tür izolatörler ile yalıtımını yüksek maliyetli kılar.

1.17.1.2 Yapının Periyodu

En uygun yapılar, doğal periyodu T < 1 sn'den daha düşük kısa periyotlu olan yapılardır. Bu yapılar, genellikle 10 kattan daha az katlıdır ve çelik konstrüksiyonlu daha esnek yapı tiplerinde 5 kattan daha az katlı yapılardır. Pratikte deprem yalıtım uygulamaları sonsuz periyot seçeneği vermez, taban yalıtımlı yapılan yapılarda

periyot, T = 1,5 sn ile T = 3,5 sn aralığındaki bir değere sahiptir. Buna rağmen, bazı durumlarda, yalıtım sistemi yapılan üst yapının temelindeki enerji sönümlemesi işe yarayabilir. Bu tür sönümleme, sıklıkla uzun periyotlu köprüler için ve bazen de daha az bir 0randa olmak üzere binalar için de kullanılabilir.

1.17.1.3 Uzun Periyotlu Dalgalara Neden Olan Sismik Şartlar

Bazı binaların deprem merkez üssünden kendine doğru deprem ilerleme yolu vardır. Böyle bir durumlarda, binalardaki deprem hareketinin uzun bir periyodu olur. Bu durum, genellikle alüvyonlu zeminlerde meydana gelir ve yalıtılmış periyot aralığında rezonansa neden olabilir. Böyle bir durumda deprem yalıtım sistemi, binanın tepkisini iyileştirme yerine rezonansa katkı sağlayarak daha da kötü hale getirebilir. Bu tip hareket örneklerini Mexico City ve Budapeşte depremleri gibi geçmiş depremlerde görmek mümkündür.

1.17.1.4 Bina Zemin Şartları

Yapılara uygulanan taban yalıtımı, en iyi sonucu kaya zeminler ve sıkı toprak zeminler üzerine yapılan yapılarda verir. Yumuşak topraklı zeminler, alüvyonlu zeminlere benzer etkilere sahiptirler. Böyle zeminler, sıkı, rijit zeminlere kıyasla uzun periyotlu hareketi artıracak şekilde deprem dalgalarını değiştireceklerdir. Yumuşak toprak zeminler, deprem yalıtımını tamamen reddetmezler, ancak deprem yalıtım etkinliğini ve verimini azaltırlar.

1.17.1.5 Yakın Fay Etkileri

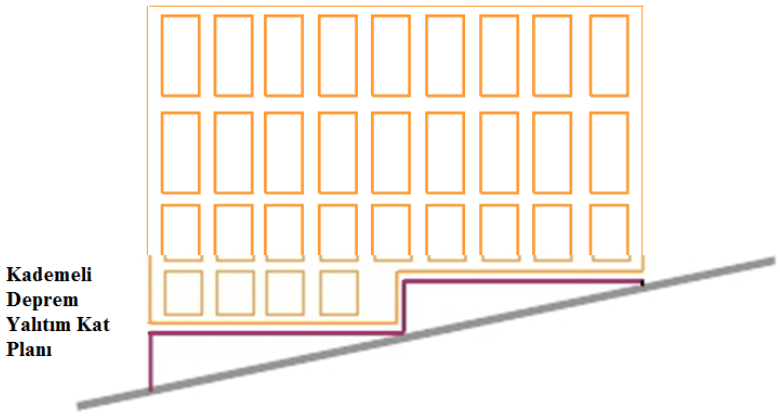
En tartışmalı konulardan birisi de, deprem yalıtım sisteminin deprem merkez üssüne 5 km veya daha yakın olduğu durumda en iyi işe yaradığı konusudur. Deprem fay hattına yakınlık beklenen bir yıkılmaya neden olabilir. Bu durum yer ivmesi kaydında uzun periyotlu ve yüksek hızlı bir atım ile karakterize edilir. Deprem fay hattına yakın bölgelerde yalıtım uygulaması yapılabilir, ancak genellikle böyle bir durumda maliyet daha yüksektir ve deprem yalıtım projesi değerlendirmesi daha

karmaşıktır. Fay hattına yakın herhangi bir yapı, devrilme etkisi açısından değerlendirilmelidir ve bu konu, taban yalıtımına özgü bir durum değildir.

1.17.1.6 Yapısal Düzenleme

Eğer dinamik özellikler ve yapının özellikleri taban yalıtımına uygunsa, üzerinde düşünülmesi gereken en önemli konu, deprem yalıtımı uygulanacak binanın yapısal tasarımıdır. Taban yalıtımı için binada bağımsız ayrı yalıtım katına ihtiyaç vardır. Deprem sırasında, yalıtım katında büyük yatay hareketler meydana gelir. Bu nedenle, deprem hareketleri nedeniyle oluşan deplasman hareketlerine izin verecek şekilde, binanın dört tarafında boşluklar bırakılmalıdır. Bu boşluk, düşük şiddetli deprem bölgelerinde 100 mm'den az, orta şiddetli deprem bölgelerinde 1000mm'ye kadar, deprem fay hattına yakın yüksek şiddetli deprem bölgelerinde 1000mm'den daha büyük olmalıdır.

Eğer deprem nedeniyle oluşan zemin hareketleri, taban yalıtımı yapılan bina etrafında yeterli boşluk bırakılmaz veya bir şekilde yapının hareketi engellenirse, bu durumda izolasyon sistemi sağlıklı çalışmaz. Diğer yapılarla çarpışma veya harekete engelleyici duvarlar izolasyon kullanımına engel olarak, daha büyük çarpma ivmelerine neden olacaktır. Ancak, bu durum, yeni tasarımı yapılan binalarda genellikle bir problem teşkil etmez. Aralarında boşluk olmayan binalarda deprem yalıtım uygulaması ve güçlendirme yapmak da faydalı değildir. İzolasyon sistemi tek bir yatay düzlemde olmalıdır. Teorik olarak kademeli yapılmasında bir sakınca olmasa da, pratik uygulamada pek çok probleme sebep olabilir. Şekil 1.17'de de görülebileceği gibi kademeli yalıtım katında hem yatay hem de düşey düzlemde deplasman boşluğu bırakılmalıdır (Holmes Consulting Group Ltd., 2010). Mevcut önceden yapılmış olan binalarda deprem taban yalıtım uygulaması, yeni yapılmakta olanlara göre daha zordur ve maliyetlidir



Şekil 1.17 Eğimli bir zeminde yapılan binanın deprem yalıtım kat planı**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.17.1.7 Yapısal Sistemlerin En-Boy Oranı

Çoğu deprem izolatörü basınç yükleri altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Elastomer esaslı deprem izolatör sistemleri, gerilme yüklerine karşı da mukavemetli olmalıdır. Gerilme durumunda, kabul edilebilir yüklere kıyasla göreceli olarak düşük gerilmelerde kavitasyon oluşur, bu da izolatörün rijitliğini azaltır.

Birinci kural olarak sistem, tasarım seviyeli depremler için, izolatörün herhangi bir yerinde anlamlı büyüklükte gerilim oluşturmayacak şekilde yalıtıma uygun olmalıdır. Öngörülen maksimum deprem için gerilmeler kabul edilebilir, fakat bu analizi daha da karmaşık hale getirebilir. Elastomer esaslı deprem izolatörlerinde çekme gerilmesi, binanın yatay hareketi için öngörülen boşluk sınırlarını geçiyorsa, azaltılmış eksenel rijitlik değerlendirmesine ihtiyaç olabilir. Kaymalı yataklı izolatörlerde, bu bölgelerde yukarı kalkmalar oluşacaktır ve bu durum da ayrıca değerlendirilmelidir.

Tablo 1.8 Deprem yalıtım sistemi için kontrol listesi**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Konu Başlığı	Kontrol Kalemleri
A-Deprem yalıtım gereksinimleri	
Deprem risk seviyesi	Deprem tasarımına ihtiyaç var mı?
Sismik tasarım ihtiyaçları	Sismik tasarım maliyetleri artıyor mu?
B-Bölge zemin uygunluğu	
Jeolojik koşullar	Rezonans potansiyeli var mı?
Bölge zemin koşulları	Sıkı topraklı bir zemin mi?
Deprem fay hattına olan mesafe	Fay hattına mesafe 5km'den fazla mı?
C-Yapının uygunluğu	
Yapının ağırlığı	Ağır yapı
Yapının periyodu	T < 2 sn
Yapının düzenlenmesi,	Zemin kat
	Uzun olmayan kolonlar
	Güçlendirme, zeminden ayrı yapılabilir mi?

1.18 Binaların Deprem Yalıtımı İle İlgili Standart Kodlar

Deprem yalıtımı konusunda en detaylı standart kod ABD'ye ait UBC (Uniform Building Code) sistemidir ve UBC, uluslararası IBC (International Building Code) standart kodu yerine geçmiştir. Taban yalıtımı standart kuralları ilk olarak 1991

yılında UBC kodunun ekindeki 23. bölümde sismik tasarım gereklilikleri başlığı altında yayınlanmıştır (Uniform Building Code, 1999).

Birçok deprem yalıtımı uygulamacısı izolatörlerin daha yaygın kullanımının önündeki engel olarak UBC standart kodu gereksinimlerini görmektedir. Çünkü, bu kod gereksinimleri yakın fay hattı bölgesine göre hazırlanmış olup, diğer yapısal gereksinimlere göre çok daha sıkı olması ne yazıktır ki uygulamayı zorlaştırmaktadır. Buradaki teknik şartname hükümleri, hem izolatör tasarım mühendisliği maliyetini hem de nihai deprem izolatörü maliyetini artırır. 1991-UBC kodu, deprem yalıtım izolatörlerinin 150mm'den 200mm'ye kadar bir araklıkta deplasmana sahip olmalarını öngörür.

En son 1999 yılında revize edilmiş olan UBC-1999 kodu ise, deprem yalıtım izolatörlerinin deplasmanlarının 300mm olmasını öngörmüştür. Hatta bazı durumlarda, bu deplasmanın 600mm'ye kadar yükseltilmesini öngörmektedir. Daha büyük deplasmanlarda, esnekliği temin edebilmek için daha büyük ölçülerde deprem izolatörlerine gereksinim vardır. Tasarım deplasmanın iki katına çıkarılması, genellikle izolatör maliyetinin en az iki katına çıkması, aynı zamanda yalıtım sistemi servis maliyetlerinin artması anlamına gelmektedir.

1.18.1 Mekanik Enerji Sönümleyici Cihazlar İçeren Yapılar

Esnek elemanlar ve enerji sönümleyici cihazlar içeren yapılar aşağıdaki kriterleri tam olarak karşıladığı durumlarda kabul edilebilirler:

1- Kullanılacak deprem izolatörlerinin performansı testlerle doğrulanır.

2- Tam bir deprem tasarımı seçimi için gerekli çalışmalar yapılır.

3- Yapısal elemanların akmaya karşı korunma derecesi, en az deprem yalıtım sistemi olmaksızın yapılan geleneksel deprem tasarımı yaklaşımında olduğu kadar iyi olması sağlanmalıdır.

4- Yapı, tasarım depreminden daha büyük bir deprem ile karşılaştığında, yapıda meydana gelebilecek deformasyonlar kontrol edilebilecek şekilde detaylandırılmalıdır.

Bu gereklilikler, daha düşük şiddetli deprem kuvvetlerinde avantaj sunacak yapısal tasarımlara izin verirler. Özellikle, sismik yoğunluğu en yüksek olan Japonya, ABD, Türkiye, Filipinler ve Yeni Zelanda gibi ülkelerin belirli bölgeleri için, deprem yalıtımı yapılan binalarda, yalıtım yapılmayan geleneksel binalara göre daha fazla veri girişi gerekmektedir. Tam tersine, yapıya özel deprem çalışmaları, sık sık düşük deprem bölgelerinde, standart kod seviyelerinden daha düşük sismik yükler üretilmesine neden olurlar.

1.19 Deprem Taban Yalıtım Uygulaması

1.19.1 Başlangıç Taban Yalıtım Tasarımı

Eğer taban yalıtım sistemi projesi, deprem yalıtım ihtiyaçları kontrol listesini, bölge uygunluğu ve yapı uygunluğunu başarıyla geçtiyse, bu durumda artık kavramsal başlangıç tasarımına geçiş yapılabilir:

1- Deprem yalıtım amaçları tanımlanır. Projenin tam bir deprem taban yalıtımı sistemine mi yoksa sadece enerji sönümleme çözümüne mi daha uygun olduğu tespit edilir.
2- Deprem yalıtım düzlemine ve izolatörlerin yapının neresinde olacağına karar verilir. Bu husus genel olarak çok açık bir konudur. Örneğin; Taşıyıcı kafes sistemli yapılarda deprem izolatörleri her bir kolonu destekleyecek şekilde zemin katına yerleştirilir. Diğer yapılarda ayrım her zaman bu kadar açık olmayabilir ve birden fazla seçenek bulunabilir.
3- Deprem taban yalıtımı sistemine uygun deprem izolatörleri seçilir. Bu ise deprem riskine ve ölçü kısıtlamalarına bağlıdır. Örneğin, bazı deprem izolatörleri küçük deplasmanlar için daha uygundur ve bazı izolatörler ise yüksek sönümleme kapasitelerinden dolayı daha uygundur. Genellikle, böyle bir durumda birkaç farklı seçim ihtimali vardır.

4- Her bir izolatör tipi için deprem yalıtım sistemi performansı değerlendirilir. Konsept aşamasında tek bir kütle yaklaşımı ile deplasmanlar ve taban kesme katsayıları elde edilir. Eğer yer ivmeleri kritik değerlerde ise bu aşamada bazı analizler yapılması uygun olabilir.
5- Bir veya daha fazla tip izolatör tercih edilir.

Her bir deprem yalıtım projesi için deprem yalıtım sisteminin avantajlarını ve maliyetlerini değerlendirmek önemlidir. Bunu yapabilmek için taban yalıtımında kullanılması düşünülen deprem izolatörlerinin maliyetini hesaplamak için üreticilere ulaşacak yeterli bilgiye sahip olmalısınız.

1.19.2 Deprem Yalıtım Elemanları Satın Alma Stratejileri

Eğer belirlenen deprem yalıtımının etkin ve ekonomik olduğu ortaya konulabilirse, artık ayrıntılı tasarım aşamasına geçilebilir. Bu aşamadaki süreç, taban yalıtım sisteminin satın alma aşamasıdır. Bu da, satın alma yaklaşımının kuralcı veya performans bazlı olmasına veya her ikisinin de karışımı şeklinde olmasına bağlıdır. Kuralcı yaklaşım, detaylandırılmış cihaz gereksinimlerine ihtiyaç duyan yaklaşımdır.

Bu yaklaşım, genellikle her bir terkip için maksimum düşey yükleri, tasarım seviyesini, maksimum deprem deplasmanlarını, etkin rijitliği ve bu deplasman seviyelerinin her biri için sönümleme oranlarını içerir. Burada, satın alma yöntemini kullanmak için, deprem izolasyon cihazlarının özellikleri ile ilgili detaylı bilgi sahibi olmaya gerek vardır. Ancak, elde edilmesi çok zor ve hatta imkansız olan bazı gereksinimleri belirlemeye gerek duyulmayabilir. Performansa bağlı satın alma yaklaşımında, elde edilmek istenen performans belirlenir ve geriye izolatör özelikleri ile ilgili karar kalır ve bu da tedarikçiye bırakılır.

Tablo 1.9 Deprem izolatörü satın alma stratejileri**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Yaklaşım Yöntemi	**Tanım**	**Avantajlar**	**Dezavantajlar**
Kuralcı yaklaşım	Rijitlik ve sönümleme dahil izolatörün karakteristiklerini detaylı tanımla Olçüleri ver	Inşaat mühendisi kontrol eder.	Deprem yalıtım tasarımında bir yapı mühendisi uzmanı gerektirir.
Performans yaklaşımı	Periyot, deplasman, sönümleme gibi izolasyon sisteminin performans ihtiyaçlarını tanımla İzolasyon cihazı satıcıları	Izolatör tasarımında uzman mühendise ihtiyaç yoktur. Daha geniş bir tedarikçi grubu Tasarım aşamasında daha az mühendislik çabası	Teklifleri değerlendirme zorluğu Çok çeşitli sistemlerin analizlerinin kontrolüne ihtiyaç duyması
Karma yaklaşım	Kuralcı yaklaşımla uyumlu bir sistem tanımlayın Bu sistemin performans listesini yap ve bu listeyi de izolasyon cihazlarının performansı ile karşılaştır.	Çok geniş bir tedarikçi ağı Çok uygun tasarım geliştirme cazibesi	Izolasyon tasarım uzmanı mühendise ihtiyaç vardır. Teklifleri değerlendirmek zordur. Birçok sistem için analiz kontrolüne ihtiyac vardır

Örneğin, etkin bir periyot, maksimum deplasmanlar, tasarım seviyesinde ve maksimum deprem şiddetinde maksimum taban kesme katsayıları belirlenebilir. Bu varyasyonda, tedarikçinin hedeflenen performans ile ilgili analiz sonuçlarına ihtiyaç

duyulabilir. Hatta bu sonuçları doğrulama adına bazı ek analizler yapmak gerekebilir. Bazen bu iki yaklaşım karıştırılır ve özellikle istenen sistem performansını elde edecek cihaz karakteristikleri detaylandırılır. Böylece, tedarikçiler en az olacak şekilde belirlenen performansı sağlayabilecek olan alternatif cihazlar seçilebilir. Bu iki yaklaşım, tedarik sürecinde izolatörleri sadece bir emtia olarak gören (kuralcı yaklaşım) veya bir mühendislik sistemi olarak gören (performansa bağlı yaklaşım) ikircikli yaklaşımı temsil eder.

1980'lerin başlarında taban yalıtımı tam manası ile bir mühendislik sistemi idi ve tedarikçiler projenin ilk aşamalarında tasarım sürecine dahil olurdu. Patent süreleri doldukça piyasaya daha fazla sayıda deprem izolatörü üreticisi dahil oldu ve bu tür ürünler, son yıllarda daha çok birer ticari mal şekline dönüştü. Şüphesiz ki en nihayetinde, Japonya'da standart izolasyon cihaz tabloları ve bununla ilgili süreçler yapılmıştır. ABD'de sismik gerekliliklerdeki çok değişkenlik, özellikle yakın fay hattı etkileri bu tür bir yaklaşımı imkansız kılmaktadır

1.19.3 Ayrıntılı Deprem Yalıtım Tasarımı

Konsept çalışma onaylandıktan ve satın alma stratejisi belirlendikten sonra detaylı tasarım süreci herhangi bir başka yapısal tasarım süreci gibi ilerler:

1- Yapı incelenir ve belirlenen sistem için detaylı yapısal performans değerlendirilir.
2- Proje teknik detayları için hem cihaz özellikleri hem de performans kriteri geliştirilir.
3- Yapının altında yer alan izolatörlerin motaj bağlantılarının tasarımı yapılır ve detayları belirlenir.
4- Teknik şartname ve teknik özellikler için tüm taban yalıtım işleri veri tablosu haline getirilerek takibi yapılır.

1.19.4 İnşaat Yapım Aşamasında Deprem Yalıtım Sisteminin Uygulanması

Detaylı tasarım ile ilgili olarak inşaat fazı diğer tüm yapılarda olduğu gibi ilerler, ancak deprem yalıtım sistemleri yapımı için bazı ek gereklilikler vardır:

1- Standart kodlar izolatörlerin prototiplerine ve kalite kontrol testlerine ihtiyaç duyarlar. Bu testlere nezaret etmek ve sonuçların teknik şartları karşılayıp karşılamadıkları noktasında değerlendirilmesi gereklidir. İzolatörlerin üretimi, test edilmesi ve prototip izolatörlerin değerlendirilmesi,inşaat sürecini 2 ile 3 ay kadar daha uzatabilir.
2- Montaj aşamasında, özellikle de sismik güçlendirme çalışmalarında ek gereksinimler olabilir.
3- Bakım, tamir ve deprem sonrası denetleme için bir servis programına ihtiyaç vardır.

1.19.5 Deprem Taban Yalıtım Sistemi Maliyeti

Niçin ve nasıl sorularına verilen cevaplardan bağımsız olarak, maliyet, deprem yalıtımı düşünen mühendislerin ilk sorduğu sorulardan birisidir ve deprem yalıtım maliyetinin değerlendirilmesi her zaman önemli bir konudur. Hem doğrudan hem de dolaylı değerlendirilmesi gereken maliyet kalemleri ve maliyet tasarruf konuları vardır. Çoğu durumda, taban yalıtım maliyeti, yalımtımsız geleneksel ankastre tabanlı binanın maliyetinden yüksektir ve genellikle taban yalıtım maliyeti, toplam bina maliyetinin yaklaşık %5'i kadardır. Deprem yalıtım sistemli binalar, deprem izolatörlerine sahip olmayan taban yalıtımsız binalara kıyasla daima ilave bir ilk maliyete sahip olacaklardır. Deprem yalıtımı yapılan binalar, deprem yalıtımı yapılmamış geleneksel binalara göre depreme daha dayanıklı olacaklardır. Mevcut binalara deprem yalıtım sisteminin uygulanması sıklıkla bu tür yalıtım sistemi uygulanmadan yapılan diğer güçlendirme çalışmalarından daha az maliyetli olacaktır.

1.20 Deprem Girdi Şekli

Deprem yükleri, zamanla değişen yüklerde artışa neden olan yer hareketlerine bağlı dinamik bir olaydır. Her deprem hadisesi, farklı zemin hareketleri üreteceğinden bu deprem yükleri belirsizdir ve bu hareketler kat edip geçtikleri yerin özellikleri tarafından değişikliğe uğratılır. İnşaat mühendisleri az sayıda tanımlanmış yükleri tercih ederler ki, bu nedenle standart kodlar, tasarım şartlarına daha uygun bir formatta olan deprem yüklerini temsili olarak verirler. Standart kodlar genel olarak, deprem yüklerini artan karmaşıklık ve karmaşıklık sırasına göre üç şekilde tanımlar:

1-Eşdeğer statik yükler;

Bu eşdeğer statik yükler, meydana gelme ihtimali olan bir deprem tarafından üretilen, kat kesme kuvvetleri toplamını temsil eden yüklerdir. Çoğu standart kodlar bu yükleri, yapının periyodu tarafından tanımlanan binanın inşa edildiği zeminin toprak tipinin ve inşaat zeminin deprem riski bölge faktörü ile tanımlanan bir fonksiyonu olarak elde eder. Statik yük, genellikle yükseklikle lineer olarak artan atalet yüklerine bağlı bir kabule dayanır ve belirlenmiş bir dağılımda uygulanır. Atalet yüklerindeki bu dağılım birinci mod tepkisine bağlıdır ve yapısal özellikleri hesaplayabilmek için değiştirilebilir. Taban yalıtımı, yapının dinamik özelliklerini belirler ve genellikle ek sönümleme sağlar. Bu etkilerin statik yük prosedürü limitleri dahilinde düzenlenmesi zordur ve çoğu standart kodlar, yapılarda ciddi sınırlamalar getirir ki bu prosedür sadece taban yalıtımlı yapılar için geçerlidir.

2-Tepki spektrumu;

Tepki spektrumu, belirli bir deprem hareketinin periyot değişimini, serbest salınım tepkisini gösteren bir eğridir. Tepki spektrumu, ivmeyi, hızı veya deplasman tepkisini grafik olarak gösterir. Spektrumlar, osilatördeki değişik seviyeler için viskoz sönümlemeler varsayılarak elde edilebilir. Standart kodlar, tepki spektrumlarını karma, belli bir çerçevede veya toprak tipi ve bölge faktörü ile

tanımlanan bölgedeki tüm depremlerin spektrumuna tepki olarak belirlerler. Tepki spektrumları düzgündür ve tek bir olayı temsil etmezler.

Bir tepki spektrum analizi, yapının tepkisinin ayrı modlara ayrıştırılabileceği varsayımına dayanır. Her bir mod tepkisi, spektral ivme kullanılarak hesaplanabilir.

Modların ayrıştırılması, lineer elastik yapılar için uygulanabilir ve tepki spektrumu analiz metodu, çoğu deprem taban yalıtımlı yapılar için uygulanamaz. Halbuki, teorik olarak bu kısıtlama aynı zamanda, deprem taban yalıtımı yapılmamış yapıların akmasına karşı uygulanabilir. Çoğu standart kodlar, pek çok deprem taban yalıtımlı bina için statik yük metodundan daha çok tepki spektrum analizine izin verirler. Uygulamada deprem taban yalıtımı sistemi, eşdeğer bir elastik sistem olarak modellenir ve sönümleme, izole edilmiş modlar için uygun sönümleme spektrumu kullanarak uygulanırlar. Bu prosedürün lineer olmayan sistemlerde, kat ivmelerinde ve burkulma devrilmesi etkisiyle normalin altında ve geniş bir aralıkta sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, lineer olmayan sistemlerde, tasarım çözümleri için bahsedilen prosedürün kullanılmaması tavsiye edilir.

3-Zaman-tanım;

Bir binada deprem yükleri, zemindeki deprem ivmeleri tarafından üretilir ve teorik olarak zaman tanımlı yer ivmeleri ile belirlenmiş yükler, deprem hareketlerini en doğru olarak temsil ederler. Analiz prosedürleri bu tip bir yüke sahip yapının tepkisini hesap etmek için elverişlidir. Bu prosedürün uygulamasındaki zorluk ise, zaman tanımlı ivmenin formunun bilinmemesidir.

Geçmiş depremlerin kayıtlı hareketleri, olası yer ivmesi formu hakkında bize bilgi verebilir, ancak her bir olay kendine özgü olduğundan, bölgede daha sonra oluşabilecek depremlerde olması muhtemel hareket hakkında bize kesin bir bilgi veremez. Standart kodlar deprem hareketlerinin ölçeklendirilmesinde ve seçilmesinde bize yol gösterir, ancak henüz belirli bir toprak türü ve belirli bir

deprem bölgesi için ölçeklendirme faktörü olan depremlerin listesini veremez, ancak her bir proje için farklı ve uygun deprem kaydı seçimi gereklidir.

1.21 Taban Yalıtımının Binalar Üzerindeki Etkisi

Daha önce bahsedildiği gibi, servis yükleri altında gerekli esneklik, sönümleme ve rijitlik sağlayacak belirli sayıda yalıtım sistemi vardır. Geri kalan sistemler, bu özelliklerin sadece bazılarını sağlar ve tam fonksiyonlu bir deprem yalıtım sistemi için, bu yalıtım sisteminin beraberinde diğer bazı ek bileşenler kullanılabilir. Belirli bir projede sistem seçiminde rehberlik etmesi adına, her birinin karakteri farklı olan beş ayrı deprem yalıtım sistemi tipinin, deprem yükleri altındaki tepkilerini değerlendirmek üzere üç bina prototipi seçilmiştir. Belirli bir bina için deprem yalıtım sistemi özelliklerini iyileştirme amaçlı yapılan parametrik çalışmalardan bir örnek elde edilir.

1.21.1 Prototip Binalar

Bu bölümde verilen prototip binaların değerlendirilmesi, her sistem tipinin tepki karakteristiklerini elde etmeye yönelik olarak yapılmıştır. Kullanılan binaların doğrusal elastik olduğu ve değerlendirmenin sadece standart kodlara uygun olarak yapılmadığı varsayılmıştır. Değerlendirme prosedürü, her bina tipi ve deprem yalıtım sistemi için tutarlıdır. Bu şekilde sistemler arasında makul bir kıyaslama yapmak mümkün olmaktadır. Ne var ki, bu değerlendirme prosedürü belirli bir deprem bölgesine ait nihai tasarım deplasmanlarını ve kesme kuvvetlerini elde etmeyi amaçlamaz. Nihai tasarımda üç boyutlu analiz, istisnai faktörler (MCE) ve eksantriklik gibi faktörler dahil edilmelidir.

1.21.1.1 Bina Konfigürasyonu

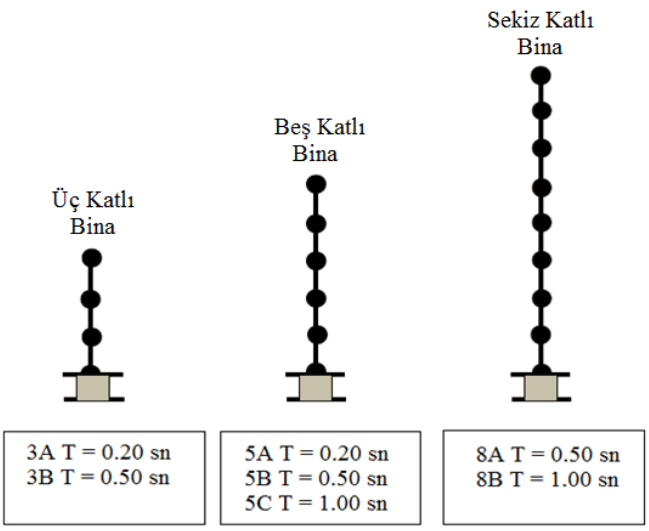
Şekil 1.18'de gösterildiği gibi, değerlendirme için üç basit bina prototipi kullanılmıştır. Her binanın 5000kN toplam sismik ağırlığa sahip olduğu ve bu ağırlığın zemin kat dahil tüm katlara eşit olarak dağıldığı varsayılmıştır. Toplam

sismik ağırlığın aynı olması varsayımı, her üç binada da aynı deprem taban yalıtım sisteminin kullanılmasına müsaade eder. Binaların aynı zamanda bütün kat seviyelerinde aynı rijitliğe sahip olduğu varsayılmıştır. Her bir bina için, kat rijitliği sabit zemin periyodu hedefi elde edilecek şekilde ayarlanmıştır;

1- Üç katlı bina için sırasıyla 0.20sn ve 0.50sn periyotlu iki ayrı varyasyon kullanıldı. Daha kısa periyotlu varyasyon, hemen hemen kalın duvarlı ve yüksek kat rijitliğine sahip olan güçlendirilmemiş tarihi bir taş yapı bina (URM) tipine denk gelmektedir. Diğer 0.50sn periyotlu üç katlı varyasyon ise sağlam karkaslı veya belki de duvar taşıyıcı yapılı sisteme karşılık gelir.

2- Beş katlı bina için periyotlar 0.20sn, 0.50sn ve 1.00sn olarak belirlenmiştir. Bu periyot aralığı böyle bir yüksekliğe sahip bir binada karşılaşılabilecek periyotları içerir. Bu aralık 0.20sn periyotlu güçlendirilmemiş taş yapılardan (URM), 1.00sn periyotlu güçlendirilmiş yapılara kadar olan yapı aralığıdır.

3- Sekiz katlı bina 0.50sn ve 1.00sn periyotlu olarak modellenmiştir. Bu da sırası ile rijit taş yapı ve rijit güçlendirilmiş (kolon kiriş sistemli betonarme bina) binaya denk gelir.



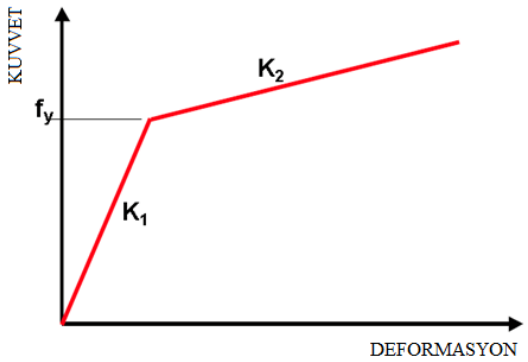
Şekil 1.18 Deprem taban yalıtımı bina prototipleri**,** **(**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Prototiplerin boyları ve periyot aralıkları, boyuna göre göreceli olarak kısa periyotlu orta yükseklikteki binaların düşük değerleri ile sınırlandırılmıştır. Orta yükseklikteki bu bina tipi deprem taban yalıtımı sistemi uygulaması için en olası adaydır (Holmes Consulting Group Ltd., 2010).

1.21.1.2 Deprem İzolatörlerinin Tasarımı

Bir deplasman varsayımı yapılır, bu deplasmandaki periyot ve sönümleme hesaplanır, bu periyot ve sönümlemedeki spektral deplasman, varsayım olarak alınan deplasmandan çıkartılır. Bu durumda spektral deplasman deneme deplasmanına eşit olana kadar deplasman ayarlanır. Her bir sistem, Şekil 1.18'de gösterildiği gibi değerlendirme için gerekli rijitlik ve mukavemet özelliklerine göre tasarlanır.

İzolasyon sistemi tasarımı için baz oluşturan UBC tasarım faktörleri listesi Tablo 1.10'de verilmiştir. İzolasyon sisteminin uygulanacağı binanın inşa edileceği bölge en yüksek sismik bölge özelliğinde olduğu, Z = 0.4, A tipi faya 10km'den daha az mesafede olduğu varsayılmıştır. Bu da Şekil 1.20'de gösterilen tasarım spektrumunu verir.

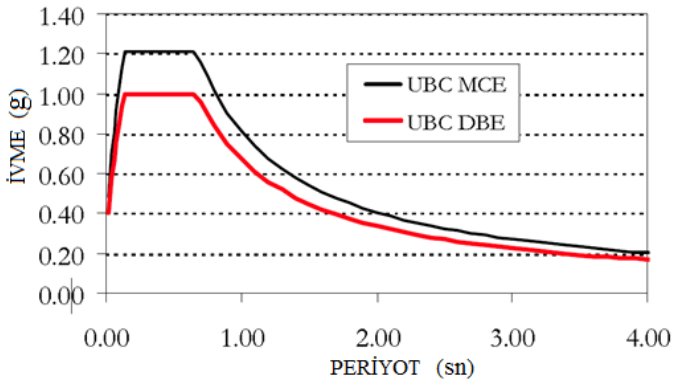


Şekil 1.19 İzolatör sistemin karakteristik tanımı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

UBC standart kodu yapıyı değerlendirmek için tasarım bazlı deprem (DBE-Design Basis Earthquake) ve maksimum izolatör deplasmanlarını elde etmede kullanılan maksimum deprem kapasitesi (MCE-Maximum Capable Earthquake) olmak üzere iki ayrı yük seviyesine gereksinim duyar.

Tablo 1.10 UBC tasarım faktörleri , (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Deprem Bölgesi Faktörü, Z	0,4	Tablo 16-I
Toprak Profili Tipi	S_C	Tablo 16-J
Deprem Katsayısı, C_A	0,400	Tablo 16-Q
Deprem Katsayısı, C_V	0,672	Tablo 16-R
Yakın Kaynak Faktörü, N_a	1000	Tablo 16-S
Yakın Kaynak Faktörü, N_v	1200	Tablo 16-T
MCE Sarsıntı Yoğunluğu M_MZN_a	0,484	
MCE Sarsıntı Yoğunluğu M_MZN_v	0,581	
Deprem Kaynağı Tipi	A	Tablo 16-U
Bilinen Deprem Kaynağına olan Uzaklık (km)	10,0	
MCE Tepki Katsayısı, M_M	1,21	Tablo A-16-D
Yanal Kuvvet Katsayısı, R_I	2,0	Tablo A-16-E
Ankastre Tabanlı Yanal Kuvvet Katsayısı, R	3,0	Tablo 16-N
Önem Faktörü, I	1,0	Tablo 16-K
Deprem Katsayısı, C_{AM}	0,484	Tablo A-16-F
Deprem Katsayısı, C_{VM}	0,813	Tablo A-16-G



Şekil 1.20 UBC Tasarım spektrumu, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Kaymalı yataklı deprem yalıtım sistemi hariç her bir deprem yalıtım sistemi, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0sn etkin periyotlu olarak tanımlanmıştır, ki bu değerler deprem yalıtım sistemi için alışılmış periyot değerlerini kapsamaktadır. Genellikle, daha uzun periyotlu yalıtım sistemleri esnek yapılar ile beraber kullanılacaktır.

1.22 Taban Yalıtımının Binalar Üzerinde Etkisi

Daha önce bahsedildiği gibi servis yükleri altında gerekli esneklik, sönümleme ve rijitlik sağlayacak sınırlı sayıda yalıtım sistemi vardır. Geri kalan sistemler, bu özelliklerin sadece bazılarını sağlar ve tam fonksiyonlu bir deprem yalıtım sistemi için, bu yalıtım sisteminin beraberinde diğer bazı ek bileşenler kullanılabilir. Belirli bir projede sistem seçiminde rehberlik etmesi adına, her birinin karakteri farklı olan beş ayrı deprem yalıtım sistemi tipinin, deprem yükleri altındaki tepkilerini değerlendirmek üzere üç bina prototipi seçilmiştir.

Belirli bir bina için deprem yalıtım sistemi özelliklerini iyileştirme amaçlı yapılan parametrik çalışmalardan bir örnek model bina oluşturularak işe başlanır.

1.22.1 Prototip Binalar

Bu bölümde verilen prototip binaların değerlendirilmesi her sistem tipinin tepki karakteristiklerini elde etmeye yönelik olarak yapılmıştır. Kullanılan binaların doğrusal elastik olduğu ve değerlendirmenin sadece standart kodlara uygun olarak yapılmadığı varsayılmıştır. Değerlendirme prosedürü her bina tipi ve deprem yalıtım sistemi için tutarlıdır. Bu şekilde sistemler arasında makul bir kıyaslama yapmak mümkün olmaktadır. Ne var ki, bu değerlendirme prosedürü belirli bir deprem bölgesine ait nihai tasarım deplasmanlarını ve kesme kuvvetlerini elde etmeyi amaçlamaz. Nihai tasarımda üç boyutlu analiz, istisnai faktörler (MCE) ve eksantriklik gibi faktörler dahil edilmelidir.

1.22.1.1 Bina Konfigürasyonu

Şekil 1.18'de gösterildiği gibi, değerlendirme için üç basit bina prototipi kullanılmıştır. Her binanın 5000kN toplam sismik ağırlığa sahip olduğu ve bu ağırlığın zemin kat dahil tüm katlara eşit olarak dağıldığı varsayılmıştır. Toplam sismik ağırlığın aynı olması varsayımı, her üç binada da aynı deprem taban yalıtım sisteminin kullanılmasına müsaade eder. Binaların aynı zamanda bütün kat seviyelerinde aynı rijitliğe sahip olduğu varsayılmıştır. Her bir bina için, kat rijitliği sabit zemin periyodu hedefi elde edilecek şekilde ayarlanmıştır;

1- Üç katlı bina için sırasıyla 0.20sn ve 0.50sn periyotlu iki ayrı varyasyon kullanıldı. Daha kısa periyotlu varyasyon, hemen hemen kalın duvarlı ve yüksek kat rijitliğine sahip olan güçlendirilmemiş tarihi bir taş yapı bina tipine denk gelmektedir. Diğer 0.50sn periyotlu üç katlı varyasyon ise sağlam karkaslı veya belki de duvar taşıyıcı yapılı sisteme karşılık gelir.

2- Beş katlı bina için periyotlar 0.20sn, 0.50sn ve 1.00sn olarak belirlenmiştir. Bu periyot aralığı böyle bir yüksekliğe sahip bir binada karşılaşılabilecek periyotları içerir. Bu aralık 0.20sn periyotlu güçlendirilmemiş taş yapılardan (URM), 1.00sn periyotlu güçlendirilmiş yapılara kadar olan yapı aralığıdır.

3- Sekiz katlı bina 0.50sn ve 1.00sn periyotlu olarak modellenmiştir. Bu da sırası ile rijit taş yapı ve rijit güçlendirilmiş (kolon kiriş sistemli betonarme bina) binaya denk gelir.

Prototiplerin boyları ve periyot aralıkları, boyuna göre göreceli olarak kısa periyotlu orta yükseklikteki binaların düşük değerleri ile sınırlandırılmıştır. Orta yükseklikteki bu bina tipi deprem taban yalıtımı sistemi uygulaması için en olası adaydır.

1.22.1.2 Deprem İzolatörlerinin Tasarımı

Değerlendirme için, beş ayrı tip deprem yalıtım sisteminin toplam 32 ayrı varyasyonu kullanılmıştır. Pek çok deprem yalıtım sistemi için çözüm prosedürü tekrarlayan bir yapıya sahiptir; Bir deplasman varsayımı yapılır, bu deplasmandaki periyot ve sönümleme hesaplanır, bu periyot ve sönümlemedeki spektral deplasman, varsayım olarak alınan deplasmandan çıkartılır. Bu durumda spektral deplasman deneme deplasmanına eşit olana kadar deplasman ayarlanır.

Her bir sistem, Şekil 1.19'da gösterildiği gibi değerlendirme için gerekli rijitlik ve mukavemet özelliklerini tanımlayan verilere göre tasarlanır. İzolasyon sistemi tasarımı için baz oluşturan UBC tasarım faktörleri listesi Tablo 1.10'de verilmiştir. İzolasyon sisteminin uygulanacağı binanın inşa edileceği bölge en yüksek sismik bölge özelliğinde olduğu, Z = 0.4, A tipi faya 10km'den daha az mesafede olduğu varsayılmıştır.

UBC standart kodu yapıyı değerlendirmek için tasarım bazlı deprem (DBE-Design Basis Earthquake) ve maksimum izolatör deplasmanlarını elde etmede kullanılan maksimum deprem kapasitesi (MCE-Maximum Capable Earthquake) olmak üzere iki ayrı yük seviyesine gereksinim duyar (UBC, 1999)

Kaymalı yataklı deprem yalıtım sistemi hariç her bir deprem yalıtım sistemi, 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 sn etkin periyotlu olarak tanımlanmıştır, ki bu değerler izolasyon

sistemi için alışılmış periyot değerlerini kapsamaktadır. Genellikle, daha uzun periyotlu izolasyon sistemleri esnek yapılar ile beraber kullanılacaktır.

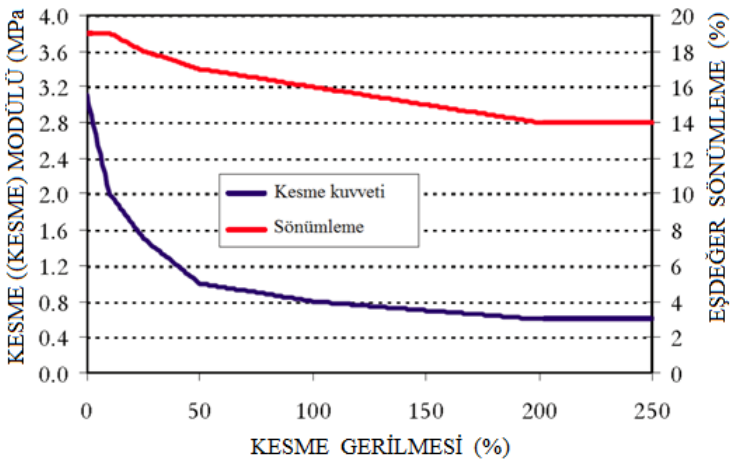
1- Elastik yalıtım sistemi sönümlemesi olmayan elastik bir yay gibi davranır. Bu tip bir sistem, tamamlayıcı sönümleyici sistemler ile beraber uygulanmadıkça, deplasmanlar büyük olacağı için ve de yapı servis yükleri altında hareket edeceği için tek başına kullanılmaları uygun değildir. Ne var ki, diğer sistemlerdeki sönümlemenin etkisini değerlendirmek için karşılaştırmalı bir değerlendirme sunar. Bu da akma seviyesi çok yüksek olarak ayarlanmış doğrusal elastik yay olarak modellenmiştir.

2- LRB kurşun çekirdekli kauçuk izolatördür. Q_d büyüklüğünün üç ayrı değeri olan 0.05W, 0.075W ve 0.010W için LRB izolatörlerin değişik varyasyonları tasarlanmıştır. Q_d, deplasmanın sıfır olduğu andaki kuvvettir ve izolatörün akma seviyesini belirler. Bu tip bir izolatör için etkin sönümleme periyot ve Q_d'nin bir fonksiyonudur ve burada bahsedilen izolatör için %8 ile %37 değerleri arasında değişir.

3- HDRBr yüksek sönümlemeli kauçuk bir izolatördür. Oldukça fazla sayıda uygulanabilir formülasyonlar vardır ve üreticiler değişik sertlik ve değişik sönümleme değerleri olan bir dizi elastomer esaslı izolatör üretebilirler. Özellikler uygulanmış kesme kuvvetinin bir fonksiyonudur. Bu tasarım için kullanılan özellikler Şekil 1.21'te gösterilmiştir.Bu özellikler, çok düşük gerilmelerde 3MPa kesme modülüne sahip, %250 gerilme için kesme 0.75 MPa kesme modülü değerine düşen orta ayarlı elastomer esaslı bir izolatörü temsil eder. Eşdeğer sönümleme düşük gerilmelerde maksimum %19'luk bir değerde iken, %250'deki gerilmede %14'e düşer. Çoğu elastomer esaslı izolatörler %250'yi aşan gerilmelerde gerilme sertleşmesi karakteristiği gösterir. Eğer izolatörlerin belirtilen aralıkta çalışması gerekiyorsa, bu sertleşme tasarım ve değerlendirmeye dahil edilmek zorunludur.

Şekil 1.21'te gösterilen, gerilime bağlı sönümleme izolatörün tasarımında kullanılır. Analiz için bu bir eşdeğer histerisiz eğrisi şekline dönüştürülür. Nihai

tasarım için kompleks şekillere ihtiyaç duyulmasına rağmen, analizler FEMA-273 şartnamesi yaklaşımına dayanan basit bi-lineer temsil kullanır. Akma deplasmanı, elastomer kalınlığının 0.05 ile 0.10 katı kadar olduğu varsayılmıştır. Bu tür elastomer esaslı izolatörler için ve burada verilen periyotlarda, sönümleme %15 ile %19 dar aralığında değişkenlik gösterir.



Şekil 1.21 HDRBr tip izolatör özellikleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

4- PTFE bir kaymalı yatak sistemidir. Kaymalı yatak sistemli izolatörler genellikle karşılıklı iki yüzeyden oluşur. Yüzeylerin biri paslanmaz çelik gibi, pürüzsüz, sert ve paslanmaz bir yüzey iken diğer kendi kendine yağlayan poli tetra flor etilen, PTFE, esaslı kayma özellikli bir yüzeydir. PTFE'nin ticari ismi Teflon'dur. Sürtünme katsayıları aralığı, m, elde edilmiştir. 0.06, 0.09, 0.12 ve 0.15 değerleri sürtünme katsayılarının normal aralığını kapsar. Gerçek kaymalı yataklı sistemli izolatörlerde sürtünme katsayıları, normal basıncın ve kayma hızının bir fonksiyonudur.

Nihayi analiz için, bu değişkenliği içeren ve özel olarak hazırlanmış ANSR-L kullanmanız uygun olacaktır. Bu izolatör tipinde sürtünme katsayısı tek değişkendir ve tasarım spesifik bir periyodu hedefleyemez. Tasarımı yapılan periyotlar, hesaplanan sismik deplasmanlardaki sürtünme yüzeyi rijitliğine bağlıdır.

5- Sürtünme sarkaçlı sistem, FPS, PTFE izolatörüne benzer patentli bir sistemdir. Ancak PTFE'deki gibi paralel kayma yüzeyi yerine küresel bir kayma yüzeyine sahiptir. Bu tür izolatör özellikleri, periyodu belirleyen çanağın eğrilik yarıçapı ve sürtünme katsayısı ile tanımlanır. Sırası ile 0.06 ve 0.12 sürtünme katsayılarını kullanıldığı iki ayrı konfigürasyon değerlendirilmiştir. Çanak yarıçapları diğer izolatör tiplerinde olduğu gibi, aynı periyot aralığını verecek şekilde ayarlanır.

Eşdeğer viskoz sönümleme, LRBr izolatörlerindekine benzer %9 ile %40 aralığındadır. Bu izolatörler, rijit gerilme sertleşmesi elemanları ($K_1 = \infty$, $K_2 > 0$) olarak modellenir. PTFE izolatörlerine gelince, değerlendirme prosedürü yaklaşıktır ve basınca ve de kayma hızına bağlı sürtünme katsayısındaki değişiklikleri dikkate almaz. Nihai tasarım ve değerlendirmede bu durum göz ardı edilmemelidir.

Tablo 1.11'de verilen değerlendirmedeki varyasyonları göz önünde tutmuştur ve modelleme için histerisiz şekil parametreleri kullanılmıştır. Şekil 1.22 tüm izolatör tipleri için histerisiz eğrilerini ve bu değerlendirmedeki varyasyonları gösterir. Elastik izolatörler histerisiz eğrisi altındaki alanın sıfır olduğu ve dolayısı ile sıfır eşdeğer viskoz sönümlemeye sahip tek izolatör tipidir. LRBr ve HDRBr tipi izolatörleri elastik rijitlikli ve akma rijitlikli bi-lineer kuvvet-deplasman fonksiyonu üretir. PTFE ve FPS türü izolatörler kayma kuvvetine ulaşana dek rijittirler ve sonrasında (PTFE)'de rijitlik sıfıra veya (FPS)'de ise pozitif bir değere düşer.

Belirli bir izolatör sistemi tipi için bu tasarımların yeterince optimum olmadığını not etmek önemlidir ve doğrusu optimum da değillerdir.

İzolatörlerin hesaplanan deplasmanın üç katı olacak şekilde göre tasarlanmalıdır. Geri getirme kuvveti olan sistemler, tasarım deplasmanındaki kuvvetin, tasarım deplasmanının yarısındaki kuvvetten en az 0.025W daha büyük olduğu sistemlerdir. Bu durum Tablo 1.11'den kontrol edilebilir. Geri getirme kuvveti olmayan izolatörler Qd=0.100 olan ve 3sn'ye izole edilmiş periyotlu LRBr izolatörler ve tüm kaymalı tip (PTFE) izolatör sistemleridir.

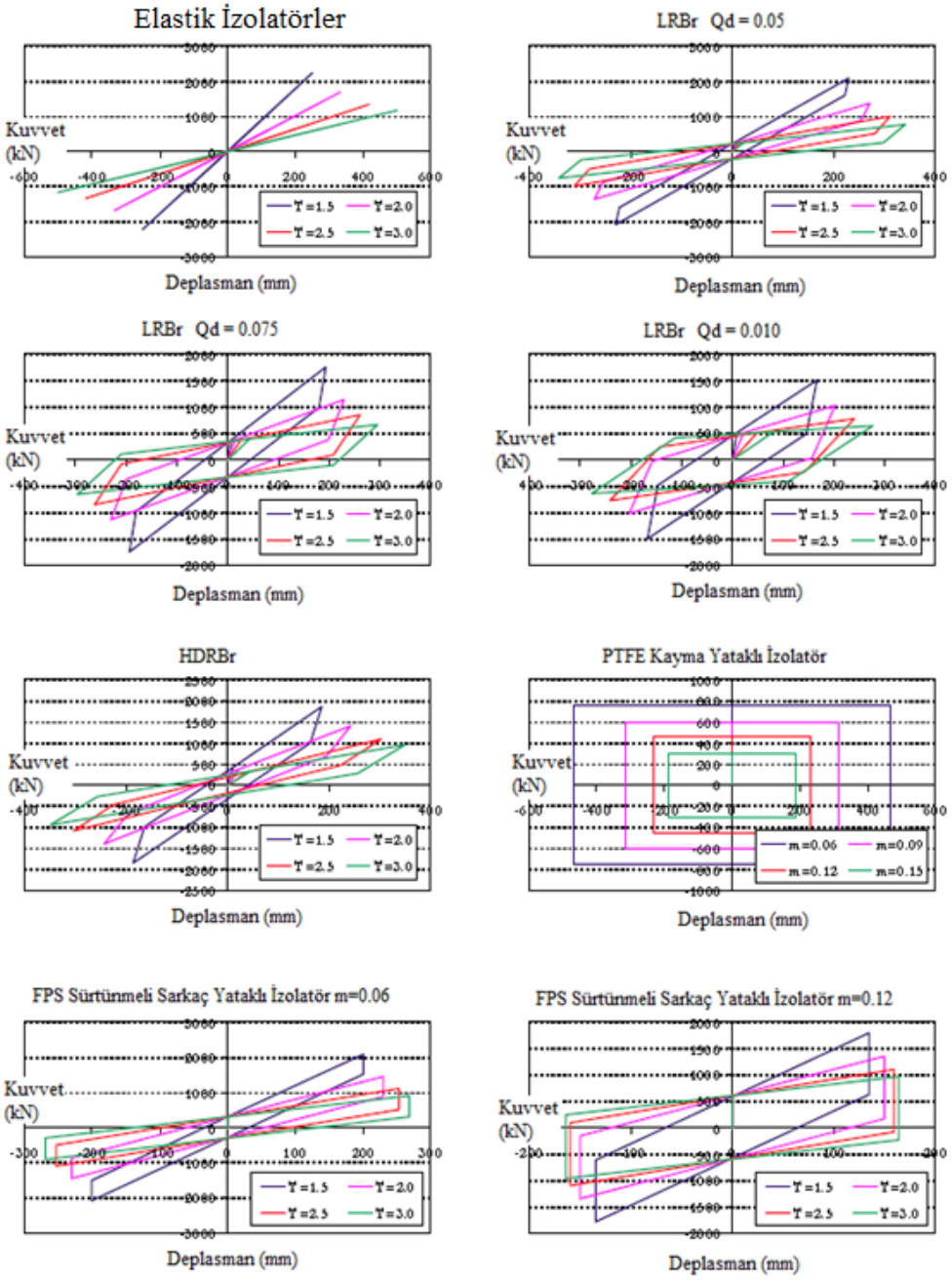
Tablo 1.10 İzolasyon sistemi varyasyonları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Sistem	Varyasyon	İzolasyon Periyodu (Saniye)	® (%)	– (mm)	C	kı k₂ (KN/mm)	(KN/mm)	f_y
HİÇBİRİ		0.0	0%	0		100000	0	100000
ELASTİK		1.5	5%	250	0.447	8.94	8.94	100000
ELASTİK		2.0	5%	334	0.336	5.03	5.03	100000
ELASTİK		2.5	5%	417	0.269	3.22	3.22	100000
ELASTİK		3.0	5%	501	0.234	2.34	2.34	100000
LRB	Q_d=0.050	1.5	8%	230	0.417	62.83	7.98	287
LRB		2.0	11%	272	0.273	32.82	4.10	287
LRB		2.5	15%	310	0.199	19.87	2.40	287
LRB		3.0	20%	342	0.153	12.82	1.49	287
LRB	Q_d=0.075	1.5	13%	194	0.349	60.52	7.05	426
LRB		2.0	20%	229	0.227	28.94	3.30	426
LRB		2.5	26%	262	0.168	15.96	1.77	426
LRB		3.0	31%	295	0.134	9.81	0.96	426
LRB	Q_d=0.100	1.5	20%	167	0.299	55.10	5.96	562
LRB		2.0	28%	203	0.206	24.72	2.60	562
LRB		2.5	33%	240	0.156	11.56	1.14	562
LRB		3.0	37%	276	0.128	6.83	0.41	562
HDR		1.5	15%	186	0.184	45.28	7.62	514
HDR		2.0	16%	242	0.140	20.06	4.28	462
HDR		2.5	17%	303	0.110	10.34	2.60	414
HDR		3.0	19%	348	0.094	9.02	1.74	414
PTFE	∝=0.06	5.6	64%	467	0.060	500	0	300
PTFE	∝=0.09	3.7	64%	312	0.090	500	0	450
PTFE	∝=0.12	2.8	64%	234	0.120	500	0	600
PTFE	∝=0.15	2.2	64%	187	0.150	500	0	750
FPS	∝=0.06	1.5	9%	200	0.417	500	8.94	300
FPS		2.0	13%	231	0.292	500	5.03	300
FPS		2.5	17%	253	0.223	500	3.22	300
FPS		3.0	21%	269	0.180	500	2.24	300
FPS	∝=0.12	1.5	21%	135	0.359	500	8.94	600
FPS		2.0	28%	150	0.270	500	5.03	600
FPS		2.5	34%	159	0.222	500	3.22	600
FPS		3.0	40%	164	0.193	500	2.24	600

1.22.1.3 Deprem Yalıtım Sistemi Değerlendirme Prosedürü

Daha sonra belirtileceği üzere deprem yalıtımı değerlendirme prosedürleri basitten karmaşığa doğru (1) statik analiz, (2) tepki spektrum analizi ve (3) zaman-tanım analizi şeklindedir. Statik analiz prosedürü çok kısıtlı bina ve izolasyon sistemleri için uygun iken, tepki spektrum analizi prosedürü ve zaman-tanım analizi prosedürü genel olarak daha çok kullanılan prosedürlerdir. Çok genel olmasa da bazı bina ve/veya izolasyon sistemleri için tepki spektrum analizi kullanımında kısıtlamalar vardır. Zaman-tanım analizi prosedürü ise herhangi bir kısıtlama

olmaksızın kullanılabilir. Kısıtlamanın olmadığı durumlarda kullanılan her iki analiz prosedürünün de beraber kullanılması tercih edilmelidir.



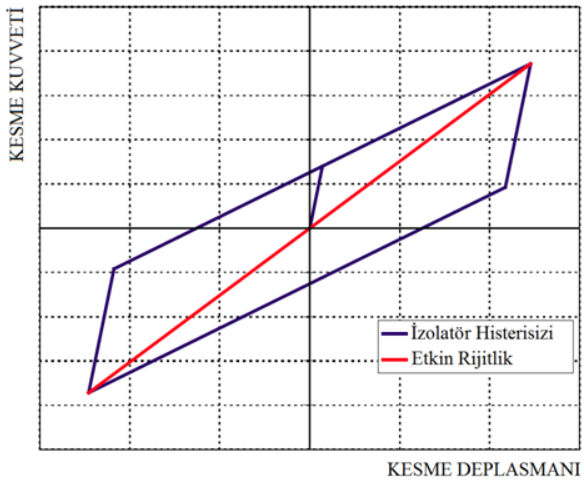
Şekil 1.22 İzolasyon sistemi histerisizleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Bu şekilde her iki prosedür ile elde edilen tepki öngörülerini karşılaştırmak mümkün olacaktır. Teorik olarak, her bir deprem seviyesi ve eksantriklik için tek bir

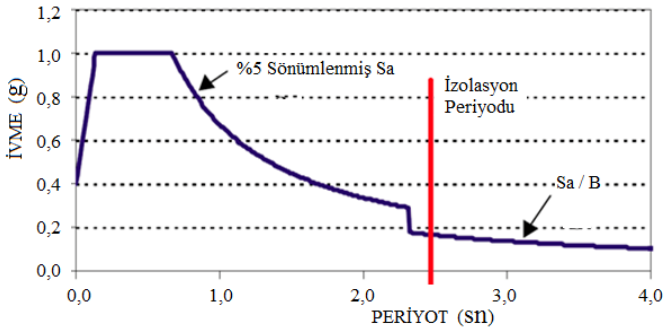
spektruma ait sadece bir dizi sonuçlar verdiği için tepki spektrum analizini değerlendirme için kullanmak daha basittir. Zaman-tanım analiz metodu en az üç ve sıklıkla yedi deprem kaydı için her bir zaman adımının bir dizi sonuçlarını verir. Aynı zamanda tepki spektrum prosedürü etkin rijitlik formülüne bağlıdır ve genellikle tekrarlayan bir prosedürü vardır.

Etkin rijitlik deplasman tahminlerine göre öngörülmeli ve daha sonra analiz sonuçlarına bağlı olarak ayarlanmalıdır. Buradaki değerlendirmeler hem tepki spektrum metodu analizi hem de zaman-tanım metodu analizi ile yapılmıştır, ki bunlar FEMA-273 standart kodunda sırası ile Lineer Dinamik Prosedür (LDP) ve Non-Lineer Dinamik Prosedür (NDP) olarak adlandırılırlar.

1.22.1.3.1 Tepki Spektrum Analizi. Tepki spektrum analizi, bu metot için alışılmış prosedürü izolasyon sistemini hesaplamak üzere iki ayrı değişiklik dışında aynısıdır: Yaylar yapının temel seviyesinde yere bağlanması için tasarlanmışlardır. Bu yaylar izolatörlerin etkin rijitliğine sahiptir. Çoğu izolatör sistemi için bu rijitlik deplasmanın bir fonksiyonudur. Tepki spektrum analizi izole edilmiş modlarda elde edilen sönümlemeyi hesaplamak için yeniden düzenlenmiştir. Bazı analiz programları (örneğin, ETABS) elde edilen sönümlemenin değişimi için spektrumlarına izin verir. Aksi durumda izole edilmiş modlarda B faktörü ile azaltılan kompozit spektrumlar kullanmak için, %5 sönümlenmiş spektrum modifiye edilebilir.

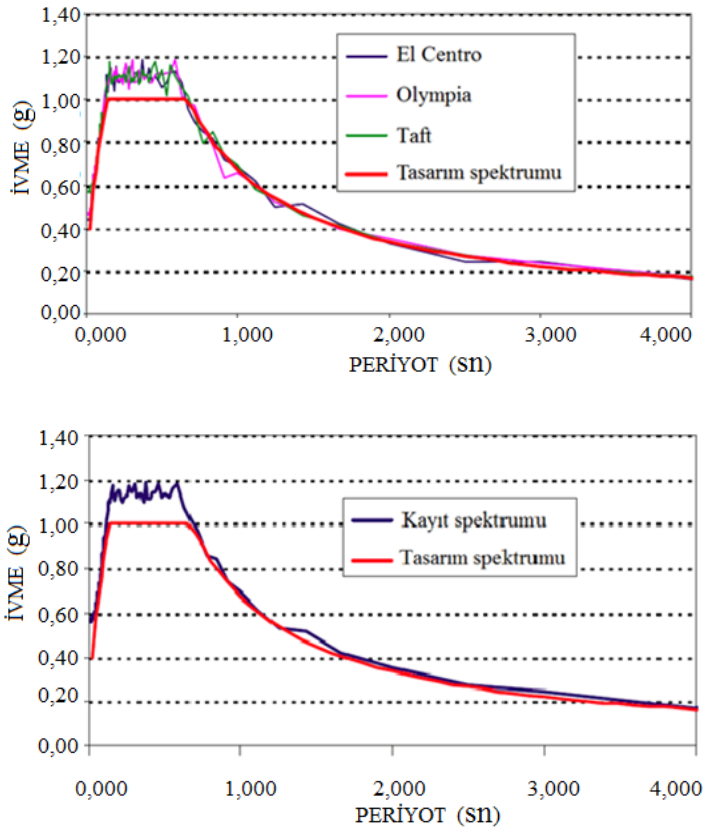


Şekil 1.23 Etkin rijitlik**, (**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.24 Periyot-ivme ilişkisi**,** **(**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.22.1.3.2 Zaman-Tanım Analizi. Her bir bina ve izolasyon sistemi kombinasyonu, üç deprem farklı kaydı için değerlendirilir ki bu, çoğu standart kodda gerekli olan minimum deprem kaydı sayısıdır. Deprem kaydı seçimi, standart kod ile tam uyumlu değildir. Deprem kaydının bir bileşeni iki boyutlu modele uygulanır ve seçilmiş kayıtlar tasarım spektrumu ile örtüşsün diye Şekil 1.25'de gösterildiği gibi frekansa göre ölçeklendirilir.



Şekil 1.25 Üç deprem kaydının %5 sönümlenmiş ivme spektrumları**,** **(**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.22.1.4 Tasarım Prosedürü ile Karşılaştırma

İzolatör performans parametreleri kesme kuvveti katsayısı, C ve izolatör deplasmanıdır. Tasarım prosedürü bu büyüklükleri tek bir kütle kabulüne dayanarak tahmin eder

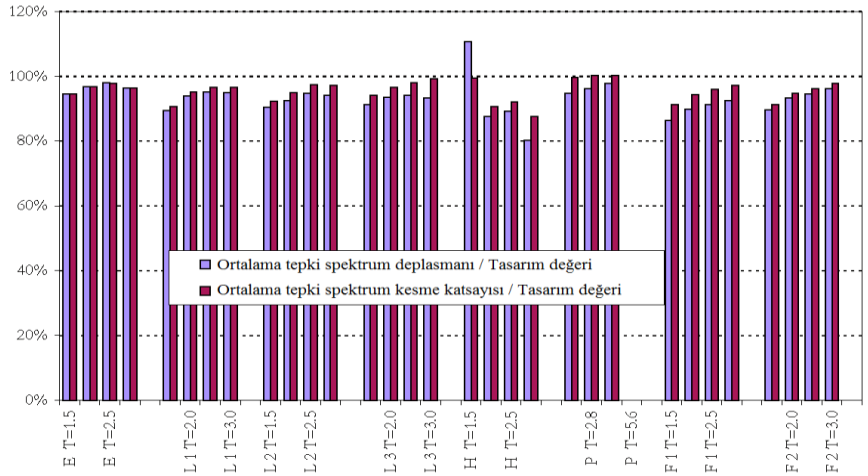
1.22.1.4.1 Tepki Spektrum Analizi. Tasarım tahminleri ile bölünmüş tepki spektrum sonuçları Şekil 1.26'da gösterilmiştir. Bu değerler tüm binaların ortalamasıdır.

Şekil 1.26'daki değerlerin tamamı analiz sonuçlarının tasarım prosedürü ile örtüştüğünü, ancak zaman-tanım prosedürü ile elde edilen verilerin tasarım prosedüründen daha büyük olduğunu gösterir. Tepki spektrum analizi deplasmanları ve kesme katsayıları bir istisna hariç, tasarım prosedürü sonuçlarından tutarlı olarak daha düşüktür. Sonuçlar göreceli olarak biraz daha düşüktür. Hem kesme katsayıları hem deplasmanlar genellikle öngörülen değerlerden %0 - %10 daha düşüktür. Farkların +%10 ile -%20 olduğu Tip H (HDRBr) bir istisnadır. Bunun nedeni bu tipler için tablolanmış viskoz sönümleme için tasarımdır, ki burada analiz eşdeğer bir histerisiz şekline bağlıdır.

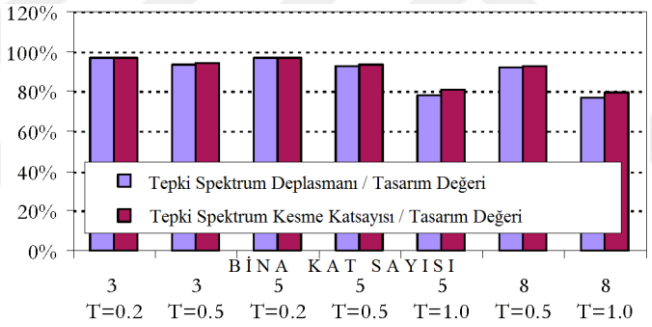
Her iki metot, etkin rijitlik ve eşdeğer viskoz sönümleme konseptine dayandığından aralarında yakın bir korelasyon olması sürpriz değildir. İki prosedür arasındaki temel fark, tasarım prosedürü izolatörler üzerinde rijit bir yapı olduğunu varsayarken, tepki spektrum analizi binanın esneklik etkisini de hesaba katar.

Şekil 1.27'de binanın esneklik etkisi gösterilmiştir. Bu şekilde 1.5sn periyotlu kurşun çekirdekli kauçuk esaslı deprem izolatörü (LRB-1) için tepki spektrum sonuçlarının tasarım prosedürü değerlerine oranını verilmiştir.

Şekil 1.26, bu sistem için ortalama oranın tasarım değerlerinin %90'ı olduğunu göstermektedir. Oysaki Şekil 1.27, gerçekte bu oranın 0.2sn periyotlu binalar için %97 değerinden, 1.0sn periyotlu binalar için %77 değeri arasında değişmekte olduğunu belirtmektedir.



Şekil 1.26 Tasarım ile tepki spektrum analizi izolatör sonuçlarının karşılaştırılması**,** **(**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.27 LRB -1, Periyot T = 1.5sn için spektrum sonuçları, **(**Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Bina periyodu arttıkça binanın esneklik etkileri daha önemli hale gelir ve böylece tepki spektrum değerleri tasarım prosedürü değerlerinden uzaklaşır. Şekil 1.27'de gösterilen etkiler, tüm sistemlerde daha uzun periyotlu binalar için deplasman ve taban kesme katsayısı daha düşük olacak şekilde tutarlı olma eğilimindedir. Bunun tek istisnası kayma yataklı izolatör sistemleridir (PTFE), ki burada kesme katsayısı izolatörlerin sürtünme katsayısına eşit bir değerdedir ve sabittir.

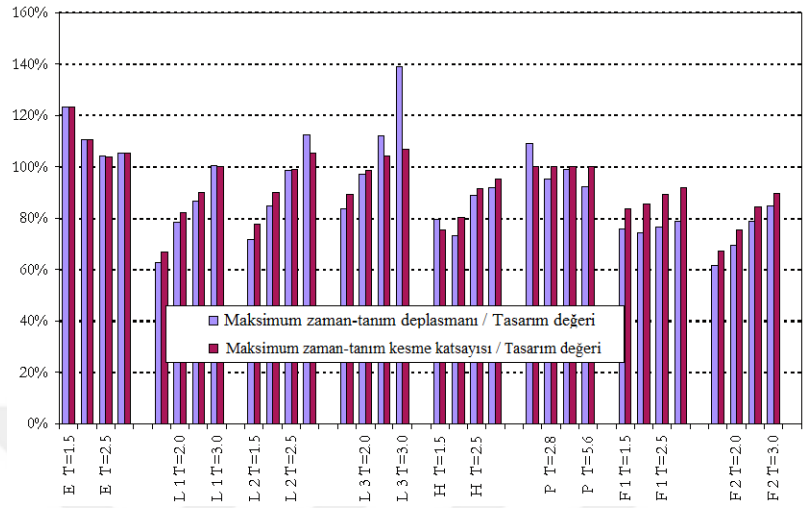
Tablo 1.112 İzolasyon sistemi performansı (tüm depremler için maksimum), (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

			Tasarım Prosedürü		Tepki Spektrum Analizi		Zaman-tanım 3 depremin maksimumu	
Sistem	Varyasyon	Periyot (sn)	Δ (mm)	C	Δ (mm)	C	Δ (mm)	C
YOK					0	0.678		1.551
ELAST		1.5	250	0.447	236	0.423	309	0.552
ELAST		2.0	334	0.336	323	0.325	369	0.371
ELAST		2.5	417	0.269	409	0.263	434	0.279
ELAST		3.0	501	0.234	483	0.225	528	0.247
LRB	Q_d=0.050	1.5	230	0.417	206	0.379	144	0.280
LRB		2.0	272	0.273	256	0.260	213	0.225
LRB		2.5	310	0.199	295	0.192	269	0.180
LRB		3.0	342	0.153	325	0.148	344	0.153
LRB	Q_d=0.075	1.5	194	0.349	175	0.322	140	0.272
LRB		2.0	229	0.227	212	0.216	195	0.204
LRB		2.5	262	0.168	248	0.164	258	0.167
LRB		3.0	295	0.134	278	0.130	332	0.141
LRB	Q_d=0.100	1.5	167	0.299	152	0.282	140	0.267
LRB		2.0	203	0.206	190	0.199	197	0.203
LRB		2.5	240	0.156	226	0.153	269	0.163
LRB		3.0	276	0.128	258	0.127	384	0.137
HDR		1.5	186	0.184	206	0.366	148	0.277
HDR		2.0	242	0.140	212	0.254	177	0.225
HDR		2.5	303	0.110	270	0.202	269	0.202
HDR		3.0	348	0.094	279	0.165	320	0.179
PTFE	α=0.15	2.2	187	0.150	177	0.149	204	0.150
PTFE	α=0.12	2.8	234	0.120	225	0.120	223	0.120
PTFE	α=0.09	3.7	312	0.090	305	0.090	309	0.090
PTFE	α=0.06	5.6	467	0.060			430	0.060
FPS	α=0.06	1.5	200	0.359	179	0.328	124	0.280
FPS		2.0	231	0.270	216	0.255	160	0.221
FPS		2.5	253	0.222	239	0.213	199	0.188
FPS		3.0	269	0.193	259	0.188	228	0.162
FPS	α=0.12	1.5	135	0.328	117	0.381	103	0.301
FPS		2.0	150	0.255	135	0.277	111	0.231
FPS		2.5	159	0.213	145	0.214	122	0.198
FPS		3.0	164	0.188	152	0.176	130	0.178

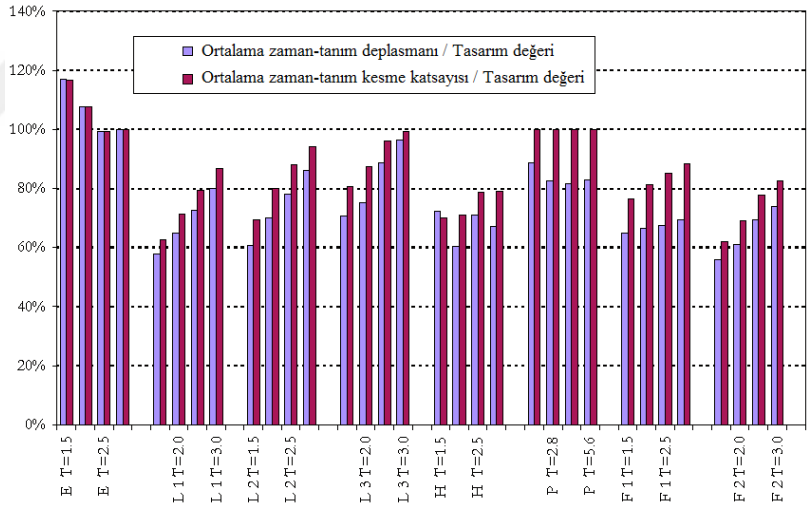
1.22.1.4.2 Zaman-Tanım Analizi. Zaman-tanım analizi, deplasman ve kesme katsayılarının, tasarım prosedürü tarafından öngörülen değerlere oranı Şekil 1.28'de verilmiştir. (a) Üç zaman-tanıma ait maksimum değerler ve (b) üç zaman-tanıma ait ortalama değerler grafikte gösterilmiştir. Her durumda değerler, 7 adet farklı bina konfigürasyonunun ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Zaman-tanım sonuçları, tasarım prosedürü öngörülerinden tepki spektrum sonuçlarına göre daha fazla değişkenlik göstermektedir. Bu farklılıklar maksimum

değerdeki sonuçlarda +%40 ile -%40 arasında, ortalama değerlerde +%20 ile -%42 arasında değişmektedir.



(a)



(b)

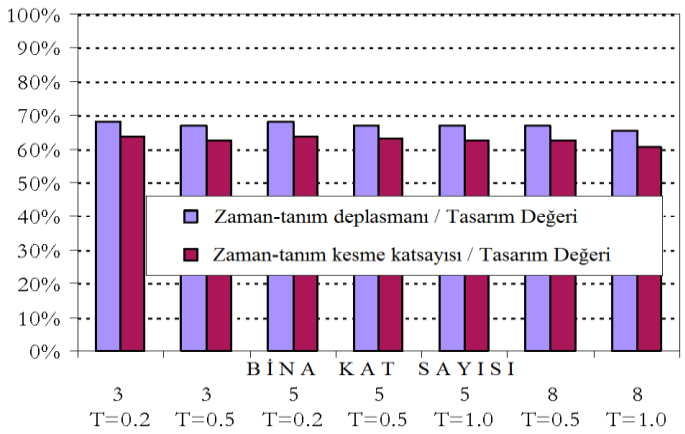
Şekil 1.28 (a) Zaman-tanım analizi maksimum sonuçları ile tasarım değerleri karşılaştırması, (b) Zaman-tanım analizi ortalama sonuçları ile tasarım değerleri karşılaştırması, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Elastik sistemler için periyot arttıkça zaman-tanım analizi sonuçları tasarım prosedürü sonuçlarına yakın olma eğilimindedir. Fakat bu eğilim, tüm diğer izolasyon sistemi tipleri için tam tersi yöndedir. Elastik sistem, eşdeğer viskoz sönümleme kullanmayan tek sistemdir. Bu da, histerik sönümleme ile eşdeğer viskoz

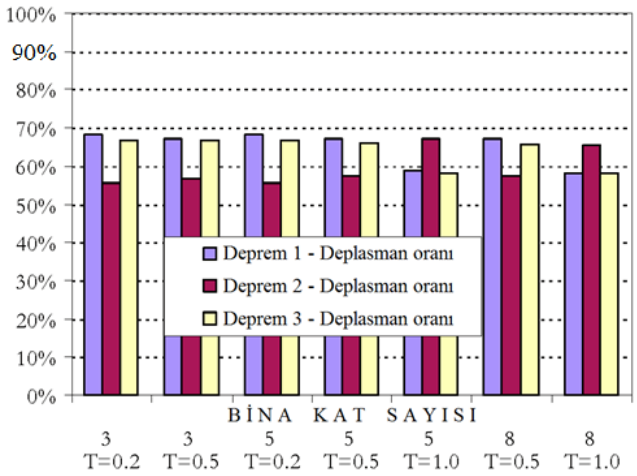
model kullanımı arasında farklılıklar olduğunu göstermektedir. Histerik sistemde periyot arttıkça, deplasman da artar ve eşdeğer viskoz sönümleme azalır. Şekil 6.11a ve Şekil 6.11b'deki sonuçlar, viskoz sönümleme ile ilgili formüllerin küçük deplasmanlardan ziyade büyük deplasmanlarda daha hassas olduğunu göstermektedir.

Şekil 1.29, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör (LRBr-1) ve T = 1.5sn için, üç depremin maksimum değerlerinin, tasarım prosedürleri değerlerine oranını gösterir. Bu şekildeki verilerin Şekil 1.27'de tepki spektrum analizinden elde edilen benzer sonuçlarla karşılaştırınız ve Şekil 1.29'da verilen sonuçların, göreceli olarak izolatör üzerindeki yapının periyoduna duyarlı olmadığı görülecektir.

Ne var ki, her bir deprem sonuçlarını gösteren Şekil 1.30, tepki spektrum analizinde olduğu gibi, Deprem-1 ve Deprem-3 sonuçları için T = 1.0sn periyotlu yapıların değerleri daha rijit binaların değerlerinden daha küçüktür. Bununla birlikte, bu etki diğer binalara göre T =1.0sn periyotlu yapılar için daha büyük tepki üreten Deprem-2 tarafından maskelenmiştir. Bu durum, zaman-tanım tepkisinin, benzer tepki spektrumları veren deprem kayıtları için bile bir hayli farklı olduğunu resmeder.



Şekil 1.29 LRB 1 için periyot T = 1.5sn için zaman-tanım sonuçları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.30 Depremler arası farklılıklar, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Ortalama zaman-tanım sonuçları, tasarım prosedürünün elastik izolasyon sistemi dışında genellikle iyimser bir izolasyon sistemi performansı tahmini verdiğini gösterir. Elastik izolasyon sistemlerinde tasarım prosedürü, deplasmanları ve kesme kuvvetlerini, özellikle kısa periyotlu izolasyon sistemleri için daha düşük değerlerde tahminler öngörmektedir (Holmes Consulting Group Ltd., 2010).

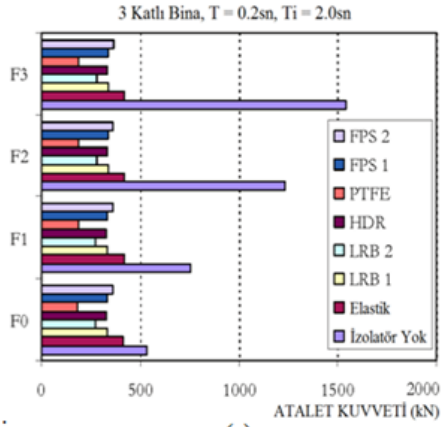
1.23 Bina Atalet Yükleri

İzolasyon sistemi tepkisi, yalıtım katı seviyesi üzerindeki tüm seviyelerin eşzamanlı atalet kuvvetleri toplamı demek olan maksimum taban kesme katsayısını verir. Bu atalet kuvvetlerinin yapının yüksekliği içindeki dağılımı, her seviyedeki tasarım kesme kuvvetlerini ve toplam yapının devrilme momentlerini tanımlar.

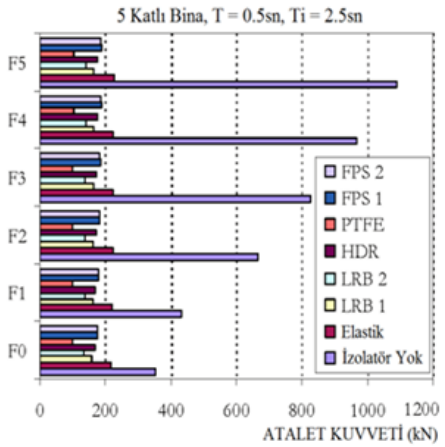
1.23.1 Tepki Spektrum Analizi

Atalet kuvvetleri, tepki spektrum analizinden elde edilir ki burada, tipik atalet kuvvetleri, bu moddaki ivme ile katılım faktörünün kütle ile çarpımının bir sonucudur. Şekil 1.31 (a), (b) ve (c)'de her bir izolatörün etkin periyodu ve üç ayrı bina konfigürasyonu için dağılımları gösterilmektedir. Şekil 1.31, hiçbir izolatörün binalarda, pek çok standart kodun öngördüğü üçgensel dağılım ile kıyaslandığında,

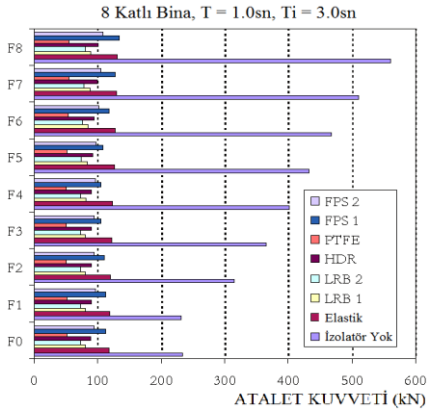
izolasyonsuz binalardaki atalet kuvveti dağılımlarının ağırlığa bağlı olarak yaklaşık lineer olarak arttığını gösterir (Holmes Consulting Group Ltd., 2010).



(a)



(b)



(c)

Şekil 1.31 Atalet kuvvetleri tepki spektrumları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Sabit tabanlı ankastre yapıların zemin seviyesinde bir atalet kuvveti olduğunu da hatırda tutmak gerekir. Bunun da nedeni, bu modellerde izolasyon sistemi yerine rijit bir yayın kullanılmış olması ve zemin ağırlığının dahil edilmesidir. Tüm modlar çıkartıldığında bu yay modu, yer ivmesine eşit bir ivmeye sahip olur ve böylece bir atalet kuvveti üretir.

Tüm izolasyon sistemleri, izolasyonsuz her bina için hemen hemen yüksekliğe bağlı olarak sabit olan atalet kuvvetlerinden farklı olan dağılımlar sergiler. Bazı sistemlerde, atalet kuvvetinde yükseklikle beraber bir miktar yükselme görülebilir, fakat bu etki çok küçüktür ve bu yüzden tepki spektrum sonuçları, atalet kuvvetlerini en iyi temsil şeklinin nizami yani düzgün dağılımlı olduğunu göstermektedir. Takip eden bölüm, zaman-tanım analizinden elde edilen sonuçların bu öngörülerle farklılıklar gösterdiğini anlatmaktadır.

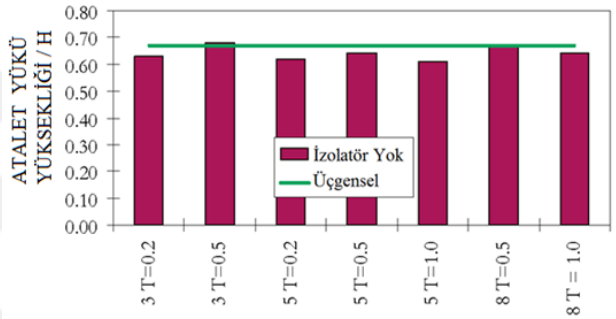
1.23.2 Zaman-Tanım Analizi

Yukarıda belirtildiği üzere, sabit tabanlı ankastre bir yapı için çoğu standart kodlar atalet yükü dağılımının bina yüksekliğine bağlı lineer olduğunu, ilk mod etkilerinin tepkiyi domine edeceği varsayımına dayanan bir üçgensel dağılımı öngörürler. Bu dağılım üçgeni kütle merkezinde etkin bir yüksekliğe sahiptir, ki bu yükseklik sabit kat kütleli yapılar için zeminin üzerindeki bina yüksekliğinin üçte ikisi kadar olduğu kabul edilmektedir. Atalet yüklerinin düzgün dağılımında ise kütle merkezi bina yüksekliğinin yarısında olduğu varsayılır.

Etkin yük hesaplamasında, analiz edilen her bir konfigürasyon için tabanda en yüksek devrilme momentini üreten deprem seçilmiş ve atalet yükleri uygulamasının etkin yüksekliği H_c = M/VH şeklinde hesaplanmıştır. Burada M moment, V taban kesme kuvveti ve H binanın yüksekliğidir. Şekil 1.32 her bir bina modelinin sabit tabanlı ankastre konfigürasyonu için H_c değerlerini grafik olarak göstermektedir.

Bir deprem yalıtım sistemi, izolatörlerin içinde meydana gelen neredeyse tüm deformasyonları ve izolatör üzerinde yer alan rijit bir cisim gibi hareket eden yapıda

oluşan küçük deformasyonları da kapsayan modlar üretir. Yukarıda tepki spektrum analiz sonuçları için gösterildiği gibi, bu tip mod şekli ile belirli bir yüksekliğe sahip olan atalet yükü dağılımının, esasen uygulamanın etkin yüksekliği ile lineer olması beklenir ki bu etkin yükseklik de toplam yüksekliğin yarısı kadardır. Deprem taban yalıtım sistemi olmayan binalarda kat ivmeleri, tabanda maksimum yer ivmesine eşit bir değerden (0.4g), çatı katında bunun yaklaşık 2.5-3 katı değere (1.0g - 1.2g) çıkacak şekilde yükseklikle beraber lineer olarak artar. Tüm durumlarda izolasyon deplasmanı 0.4g değerindeki yer ivmesinden daha düşüktür ve yüksekliğe bağlı olarak hemen hemen hiç artış göstermez.



Şekil 1.32 Atalet yükleri yüksekliği, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

İzolasyon sistemleri arasında farklar olmasına rağmen, her bir sistem her bir bina için aynı trende sahiptir.

1- Elastik izolatörler (E) en düzgün ivme dağılımını sağlarlar. İzolatörlerin periyodu arttıkça ivmeler de azalır. En uzun periyot, T = 3sn, yapıda yer ivmesinin yaklaşık yarısı kadar büyüklükte ivmeler üretir ve periyot 1.5sn'ye düştüğünde yapıdaki ivmeler yaklaşık yer ivmesine eşit olur. Bina periyodu arttıkça küçük periyotlu izolatörler yükseklikle beraber bir miktar amplifikasyona neden olurlar fakat bu çok önemli değildir.

2- Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler (L) genellikle elastik izolatörlere benzer dağılımlar sergiler, ancak binanın üst katlarında daha yüksek amplifikasyona neden olurlar. İzolasyon sisteminin akma seviyesi arttıkça amplifikasyon da artar.

3- %10'u kadardır). Tekrar etmek gerekirse, elastik izolatörler için en kısa izolasyon periyotlarına karşılık gelen ivmeler maksimum büyüklüktedir.
4- Kaymayı yataklı PTFE izolatörleri (T) zemin kattan itibaren yükseklikle amplifiye edecek şekilde yer ivmelerini artırmaya meyillidirler. Sürtünme katsayısı arttıkça ivmeler artar ve izolasyon periyotları azalır.

5- Sürtünmeli sarkaçlı FPS izolatörleri (F) diğer tip izolatörlerden farklı olarak izole edilmiş periyottan göreceli olarak bağımsız bir ivme profiline sahiptirler. Bu tip izolatörler 0.12 sürtünme katsayısı (F2) için olan ivmelerden ziyade, 0.06 sürtünme katsayısı (F1) için olan ivmeleri azaltmada daha etkilidirler. İvmeler genel olarak, elastik veya kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerden daha yüksektir.

1.24 Uygun İzolasyon Sistemleri

Daha önceki bölümlerde verilmiş olan sonuçlar, sistemler arasında performans açısından çok fazla farklılıklar gösterdiğini ve aynı yalıtım sisteminin farklı özellikler sergilediğini göstermektedir. Farklı deprem yalıtım sistemleri izolasyon deplasmanı, kesme kuvveti, kat ivmeleri üzerinde farklı etkileri vardır ve hiçbir izolatör tipi bu kriterlere bağlı muhtemel hedeflerin tümünü karşılamada yeterli değildir.Tablo 1.13 her üç potansiyel performans hedefi açısından etkinlik sıralamasına göre en iyi 15 (32 tanesi içinden) sistemi vermektedir:

1-Minimum kesme kuvveti katsayısı: PTFE kaymalı sistem izolatörler en küçük kesme kuvveti katsayısını sağlar ki bu da sürtünme katsayısına eşittir. Bunu yüksek akma seviyesi (Q_d = 0.10) ile ve 3sn periyot ile kurşun çekirdekli izolatörler takip eder. Ne var ki bu 4 sistemin hiç birisi geri getirici kuvvet sağlamaz ve bu yüzden tasarın deplasmanı UBC teknik şartname gerekliliklerine göre üç kat büyüklükte hesaplanır. Konu kesme kuvveti katsayısı olduğunda bu dört sistem içinde en optimum sistemler LRB ve FPS sistem varyasyonlarıdır.

2-Minimum izolasyon sistem deplasmanı: 0.12 sürtünme katsayısı olan ve göreceli olarak kısa periyotlu FPS tip izolasyon sistemleri, izolasyon deplasmanını kontrol

etmek için en etkili sistemdir ve en düşük beş deplasman değerinin tamamı FPS tipi izolatörler ile elde edilmiştir. Bunlardan sonra en düşük deplasmanlar sırası ile 3 LRB varyasyonu, HDR ve FPS ile elde edilmiştir. Minimum deplasmanları olan sistemlerin çoğu göreceli olarak düşük kesme kuvveti katsayılarına ve kat ivmelerine sahiptir.

3-Minimum kat ivmeleri: Üç farklı bina periyodu için ivmeler Tablo 1.13'te listelenmiştir ve üç binanın maksimumuna göre sıralanmıştır. Bazı sistemler belirli bir bina periyodu için daha üst sıralarda olacaktır. Elastik (esnek) izolasyon sistemleri en düşük kat ivmelerini üretirler ve bunları sırası ile LRB ve HDR takip eder. FPS ve PTFE tip izolatörler kat ivmeleri açısından ilk 15 en iyi sistemde yer almazlar.

Hiçbir sistem aynı anda tüm üç kategoride de en iyi ilk 15 sistem sıralamasında yer almaz, ancak bazı sistemler bu üç kategorinin ikisinde en iyi ilk 15'e girmektedir:

1- Sürtünme katsayısı 0.12 ve periyodu 2.5sn, 3.0sn olan FPS sistemleri minimum kesme kuvveti katsayısı ve deplasmanları üretir. Ancak kat ivmeleri oldukça yüksektir.

2- 2 sn periyotlu ve akma seviyesi $Q_d = 0.05$, 0.075 veya 0.1 olan LRB tip izolatörler hem minimum deplasman hem de minimum ivme listesinde yer aldığı görülmüştür. Bu sistemler kesme kuvveti katsayısı açısından ilk 15'te yer almamaktadır, ancak 0.203 (en iyi 15 için bu değer 0.06 ile 0.198 arasındadır) değeri ile kabul edilebilir bir kesme kuvveti katsayısına sahiptir.

3- Beş LRBr varyasyonu ve iki HDRBr varyasyonu hem kesme kuvveti katsayısı hem de kat ivmeleri açısından en iyi 15 sıralamasında yer almaktadır. Bunların minimum izolasyon deplasmanı 258mm'dir ki en iyi 15 izolasyon deplasmanı değeri 103mm ile 213mm arasındadır.

Bu sonuçlar, izolasyon sistemi tercihini belirlemede izolasyonun amaçlarını ve deprem yalıtımı sistemi uygulanacak yapının özelliklerini hesaba katmak gerektiğini göstermiştir.

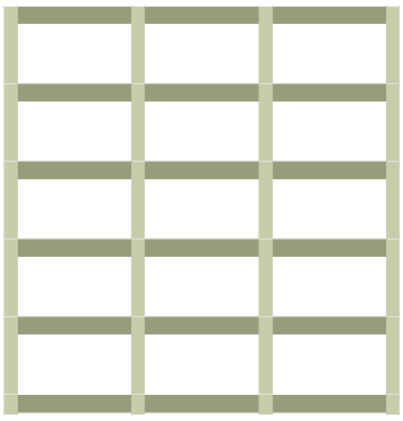
Tablo 1.13 Optimum izolasyon sistemleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

					Maksimum Kat İvmesi (g)		
Sistem	**Varyasyon**	**Periyot**	**Δ (mm)**	**C**	**T = 0.2 s**	**T = 0.5 s**	**T = 1.0 s**
Minimum Kesme Kuvveti Katsayısı, C							
PTFE	α=0.06	5.6	1291	**0.060**	0.58	0.89	1.09
PTFE	α=0.09	3.7	926	**0.090**	0.65	0.99	1.45
PTFE	α=0.12	2.8	669	**0.120**	0.75	1.02	1.48
LRB	Qd=0.1	3.0	1152	**0.137**	0.15	0.25	0.42
LRB	Qd=0.075	3.0	332	**0.141**	0.15	0.27	0.43
PTFE	α=0.15	2.2	613	**0.150**	0.83	1.07	1.32
LRB	Qd=0.05	3.0	344	**0.153**	0.16	0.31	0.39
FPS	α=0.06	3.0	228	**0.162**	0.50	0.83	1.08
LRB	Qd=0.1	2.5	269	**0.163**	0.18	0.33	0.58
LRB	Qd=0.075	2.5	258	**0.167**	0.19	0.33	0.55
FPS	α=0.12	3.0	130	**0.178**	0.77	1.03	1.38
HDR		3.0	320	**0.179**	0.19	0.25	0.41
LRB	Qd=0.05	2.5	269	**0.180**	0.20	0.34	0.62
FPS	α=0.06	2.5	199	**0.188**	0.46	0.80	1.13
FPS	α=0.12	2.5	122	**0.198**	0.77	1.05	1.33
Minimum İzolasyon Sistemi Deplasmanı, Δ							
FPS	α=0.12	1.5	**103**	0.301	0.75	1.01	1.11
FPS	α=0.12	2.0	**111**	0.231	0.75	1.07	1.23
FPS	α=0.12	2.5	**122**	0.198	0.77	1.05	1.33
FPS	α=0.06	1.5	**124**	0.280	0.53	0.86	0.94
FPS	α=0.12	3.0	**130**	0.178	0.77	1.03	1.38
LRB	Qd=0.075	1.5	**140**	0.272	0.35	0.70	0.85
LRB	Qd=0.1	1.5	**140**	0.267	0.33	0.74	1.01
LRB	Qd=0.05	1.5	**144**	0.280	0.35	0.53	0.77
HDR		1.5	**148**	0.277	0.33	0.50	0.79
FPS	α=0.06	2.0	**160**	0.221	0.49	0.83	1.14
HDR		2.0	**177**	0.225	0.26	0.38	0.70
LRB	Qd=0.075	2.0	**195**	0.204	0.27	0.41	0.68
LRB	Qd=0.1	2.0	**197**	0.203	0.28	0.51	0.76
FPS	α=0.06	2.5	**199**	0.188	0.46	0.80	1.13
LRB	Qd=0.05	2.0	**213**	0.225	0.24	0.36	0.56
Minimum Kat İvmeleri, A							
ELASTIC		3.0	528	0.247	**0.25**	**0.26**	**0.29**
ELASTIC		2.5	434	0.279	**0.29**	**0.30**	**0.34**
LRB	Qd=0.05	3.0	344	0.153	**0.16**	**0.31**	**0.39**
HDR		3.0	320	0.179	**0.19**	**0.25**	**0.41**
LRB	Qd=0.1	3.0	1152	0.137	**0.15**	**0.25**	**0.42**
LRB	Qd=0.075	3.0	332	0.141	**0.15**	**0.27**	**0.43**
ELASTIC		2.0	369	0.371	**0.40**	**0.42**	**0.49**
HDR		2.5	269	0.202	**0.20**	**0.27**	**0.51**
LRB	Qd=0.075	2.5	258	0.167	**0.19**	**0.33**	**0.55**
LRB	Qd=0.05	2.0	213	0.225	**0.24**	**0.36**	**0.56**
LRB	Qd=0.1	2.5	269	0.163	**0.18**	**0.33**	**0.58**
LRB	Qd=0.05	2.5	269	0.180	**0.20**	**0.34**	**0.62**
LRB	Qd=0.075	2.0	195	0.204	**0.27**	**0.41**	**0.68**
HDR		2.0	177	0.225	**0.26**	**0.38**	**0.70**
LRB	Qd=0.1	2.0	197	0.203	**0.28**	**0.51**	**0.76**

1.24 Tepki Spektrum Metodu İle İlgili Sorunlar

1.24.1 Devrilmenin Yetersiz Tahmini

Daha önceki bölümlerdeki değerlendirme sürecinin rahatsız edici bir tarafı da, tepki spektrumundaki ve zaman-tanım analizi metotlarındaki atalet kuvveti ve ivme dağılımları arasındaki büyük uyuşmazlıklar içermesiydi. Atalet kuvveti dağılımı bir yapıdaki devrilme momentlerini tanımlar ve tepki spektrum analizi dağılımları, zaman-tanım analizi metodu dağılımlarına kıyasla daha küçük devrilme momentleri üretir. Yukarıda kullanılan binalar direkt olarak tepki spektrum analizine göre devrilme momenti üretmese de, 5 katlı bina örneği Şekil 1.33'de karkas olarak gösterilmiştir. Betonarme karkas elemanları daha önce kullanıldığı üzere 0.50sn periyot üretecek şekilde seçilmiştir.



Şekil 1.33 Beş katlı bina grafik şeması, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

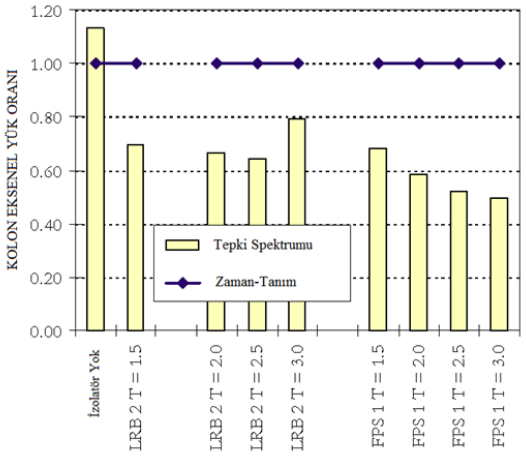
Prototip yapılar için olduğu gibi tepki spektrum analizi ve zaman-tanım analizi için de aynı süreçler uygulanmıştır ve ek olarak dış kolonlardaki maksimum düşey yükler, P, devrilme momenti hesaplaması için ayrıca hesaplanmıştır. Bu yükler M = P x L 'de moment hesaplamalarında kullanılmıştır. Burada L bina rijitlik merkezine olan yatay uzaklıktır. Moment yoluyla, atalet yüklerinin etkin yükseklikleri H_c=M/V olarak hesaplanabilir, burada V kesme kuvvetidir.

Tepki spektrum analizleri ve zaman-tanım analizleri (1) izolatörün kullanılmadığı, (2) LRBr-2 (Qd = 0.075, 4 etkin periyot) ve (3) FPS2 4 etkin periyot konfigürasyonları için tekrarlanmıştır. Bu izolasyon sistemlerinin kullanıldığı binalarda zaman-tanım analizi, LRB-2 için 0.61H ile 0.66H arasında ve FPS2 için 0.70H ile 1.09H arasında etkin atalet yükleri yüksekliğini vermektedir. Tersine tepki spektrum analizi özünde lineer atalet yük dağılımları vermektedir. Mesela her iki sistem için etkin atalet yük dağılımı yaklaşık 0.50H'tır.

Bu şekilde zaman-tanım analizi ve tepki spektrum analizine göre hesaplanmış olan etkin yükseklik değerleri, H_c, Tablo 1.14'de verilmiştir. Bu rakamlar tüm izole edilmiş sistemler için yapılan tepki spektrum analizlerinin 0.52H ile 0.54H dar aralığında değerler verdiği, ancak zaman-tanım analizlerinin sistem spesifik olarak 0.65H ile 1.06H aralığında değerler verdiğini göstermektedir.

Tablo 1.12 Binalarda atalet yükleri yükseklikleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

	Hc Tepki Spektrumu	Hc Zaman Geçmiş
İzolatör Yok	0.72	0.63
LRB 2 T = 1.5	0.53	0.76
LRB 2 T = 2.0	0.52	0.78
LRB 2 T = 2.5	0.52	0.80
LRB 2 T = 3.0	0.52	0.65
FPS 2 T = 1.5	0.54	0.79
FPS 2 T = 2.0	0.53	0.91
FPS 2 T = 2.5	0.53	1.01
FPS 2 T = 3.0	0.53	1.06



Şekil 1.34 Kolonlarda eksenel yükler, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Bu farklılığın tasarımdaki etkisi, ancak eksenel kolon yüklerin kıyaslanması ile değerlendirilebilir. Tepki spektrum analiz değerleri, eşdeğer zaman-tanım analizindeki aynı taban kesme kuvvetini elde edecek şekilde normalize etmek için bir katsayı ile çarpılmıştır. Sonuç oranlar, Şekil 1.34'de grafik olarak gösterilmiştir. Tüm izole edilmiş konfigürasyonlar için eksenel kolon yükleri olması gerekenin altında, en kötü durumda olması gerekenin yarısı değerinde tahmin edilmiştir.

1.25 Deprem İzolatörü Özellikleri ve Örnek İzolatör Uygulaması

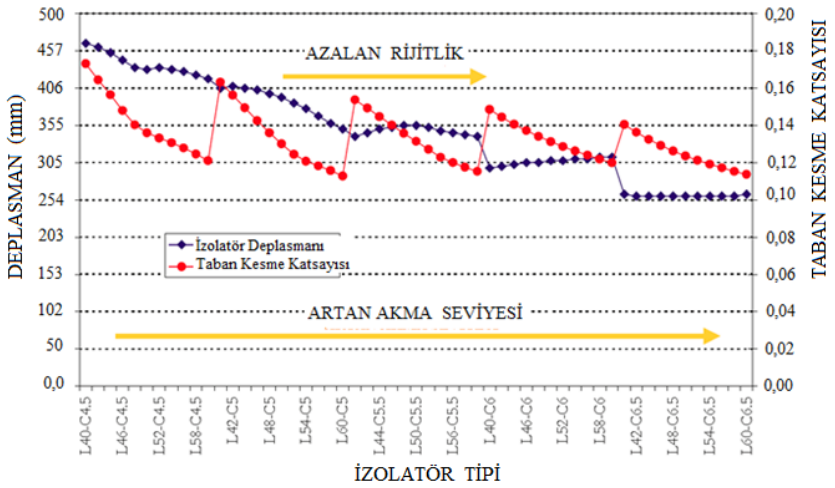
Yukarıda tartışılan sınırlı çalışmalar, tüm yönleri açısından veya tüm sistem parametreleri açısından mükemmel bir performans sağlayan tek izolasyon sistemi olmadığını göstermiştir. Projelerde yapılara en uygun sistemi uyarlamak için bir dizi çalışmanın yapılması tavsiye edilmektedir. Takip eden örnek, bunun bir bina projesine nasıl uygulandığını göstermektedir. Bu projede göreceli olarak yüksek sönümleme ihtiyacını karşılamak üzere, izolatör tipi olarak, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör seçilmiştir. LRBr özellikleri pek çok özellikleri açısından performans değerlendirmesi yapılarak tercih edilmiştir. İzolatör boyutları düşey yüklere bağlı olarak belirlenmiştir. Rijitlik ve dolayısı ile etkili periyot, izolatörün yüksekliği değiştirilerek, yani kauçuk tabaka sayısının değiştirilmesi yolu ile ayarlanır. Sistemin akma seviyesi ise, izolatörün merkezindeki kurşun çekirdeğin çapının değiştirilmesi ile belirlenir.

Bu projede, kauçuk tabaka sayısının 40'tan 60'a yükseltilmesi (rijitlik değişimi %50) ve kurşun çekirdek çapının 115mm'den 165mm'ye yükseltilmesi (akma seviyesi değişimi %100) ile izolatör performansı belirlenmiştir.

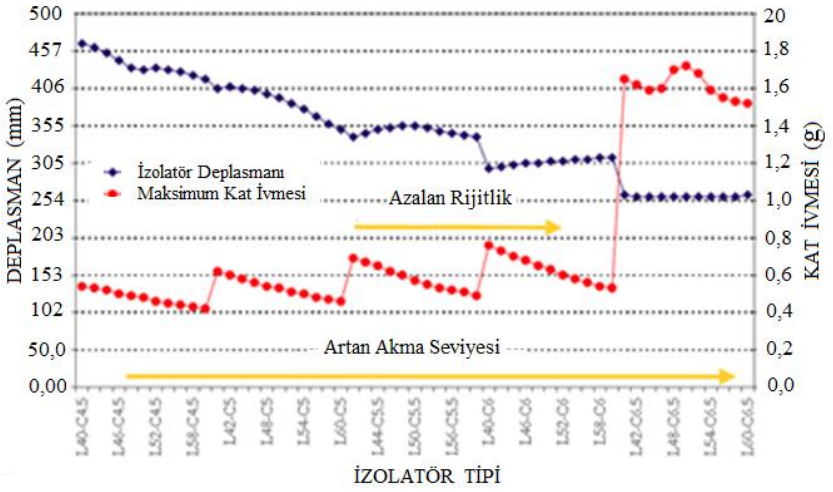
Bir dizi analiz için 3D-BASIS yazılımı kullanılmıştır. Her bir varyasyonda gerekli rijitlik ve akma seviyesi için program giriş değerlerini değiştirilerek analizi gerçekleştirir ve çıktı dosyasından tepki çıktılarını verir. Şekil 1.35 ve Şekil 1.36'daki grafikler bu analizlerin sonuçlarından elde edilmiştir. İzolatör isimlendirmesinde ilk rakam, kauçuk tabaka sayısını, ikincisi de inch cinsinden

kurşun çekirdek çapını belirtmektedir. Örneğin, L40-6'da 40 tabaka kauçuk, 152.4mm kurşun çekirdek çapıdır.

Bu grafikler, izolatör deplasmanlarındaki, kesme kuvvetlerindeki ve maksimum kat ivmelerindeki trendi belirlemede kullanılır. Bu yapı ve sismik girdiler özelinde, izolatör deplasmanı ve taban kesme katsayısı azalışı, ya rijitliğin azaltılması ya da akma seviyesinin artırılması ile ayarlanmıştır. Ne var ki, deplasmanlar ve taban kesme katsayıları azaldığında maksimum kat ivmeleri artmaktadır. Bu durumda, kurşun çekirdek çapı 52.4mm üstü bir çapa çıkarılır ki böylece kat ivmeleri aşırı artar. Bu tip analiz sonucundan her bir kat ivmesi, kat sürüklenmeleri, izolatör taban kesme katsayılarını minimuma indirecek şekilde izolatör seçimi yapılabilir. Tablo 1.15'da listelendiği gibi 60 kauçuk tabakalı yüksek ve 4.5inch (114.3mm) küçük bir kurşun çekirdeğe sahip izolatörde minimum ivmeler ve minimum sürüklenmeler oluşur. Kurşun çekirdek çapının 4.5inch'ten (114.3mm) 5inch'e (127mm) çıkartılması ile (akma seviyesinde %23'lük artış) izolatör deplasmanı 16.5inch'ten (420mm) 13.8inch'e (350mm) ve taban kesme katsayısı 0.121'den 0.113'e düşürülebilir. Bunun kat ivmelerini ve kat sürüklenmelerini %10 artırmasına rağmen elde edilen avantajlar nedeniyle denemeye değer olduğu düşünülür.



Şekil 1.35 Taban kesme katsayılarına karşılık deplasmanlar, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.36 Kat ivmelerine karşılık deplasmanlar, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

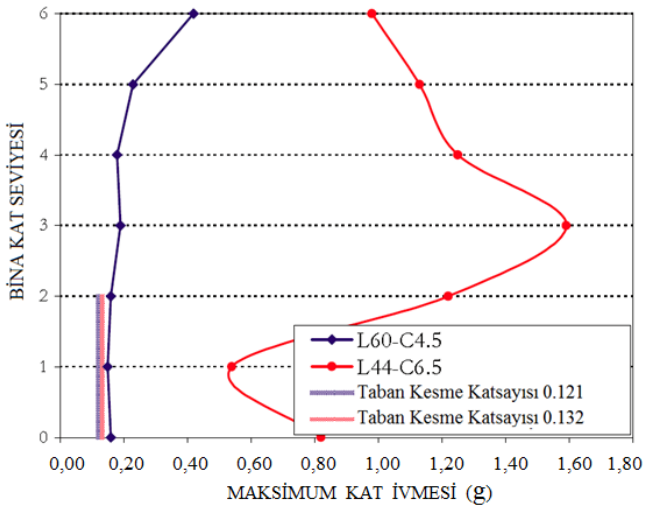
Tablo 1.135 Optimum izolatör konfigürasyonu, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

	İzolatör Deplasmanı mm (İnch)	Taban Kesme Katsayısı (g)	Maksimum Kat İvmesi (g)	Maksimum Sürüklenme
Minimum Kat İvmesi L60-C4.5	420 (16.5)	0.121	0.420	0.0032
Minimum Sürüklenme L60-C4.5	420 (16.5)	0.121	0.420	0.0032
Minimum Taban Kesme Katsayısı L60-C5	350 (13.8)	0.113	0.460	0.0035
Minimum İzolatör Deplasmanı L44-C6.5	260 (10.2)	0.132	1.590	0.0071

Minimum izolatör deplasmanları 6.5inch (165.1mm), ancak büyük bir çapı olan 44 kauçuk tabakalı rijit bir izolatör ile sağlanır, fakat bu izolatörün taban kesme katsayısında küçük sayılabilecek ve buna bağlı olarak da ivmelerde büyük kusuru vardır.

Bu örnek projede, deprem yalıtımı yapılan binanın en iyi performansını elde etmek için izolatör tasarımı izolatör deplasmanlarını 350mm'ye müsaade etmelidir.Bu analizler, daha önce tartışılan zaman-tanım analiz metodu ile elde edilen, düzgün dağılımlı olmayan ivme dağılımı konusunu da aydınlatır. Şekil

1.37'daki eğriler sırası ile minimum kat ivmeleri ve minimum izolatör deplasmanlarını veren sistemler için ivme profillerini göstermektedir. Hatta bu sistemler, benzer bir taban kesme katsayısı için kat ivmelerini üç kattan daha fazla artıran yüksek sönümlemeli bir rijitlik sistemi sağlar.



Şekil 1.37 Kat ivmesi profilleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

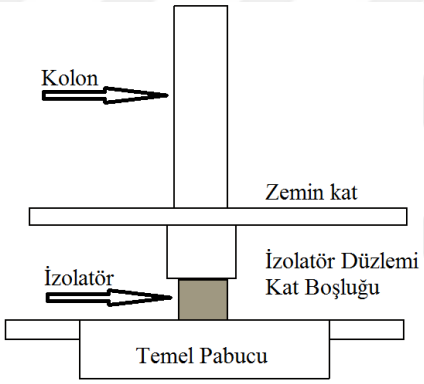
1.26 Deprem İzolatörü Montaj Yerleri ve Montaj Tipleri

1.26.1 İzolasyon Düzlemi Seçimi

1.26.1.1 Binalar

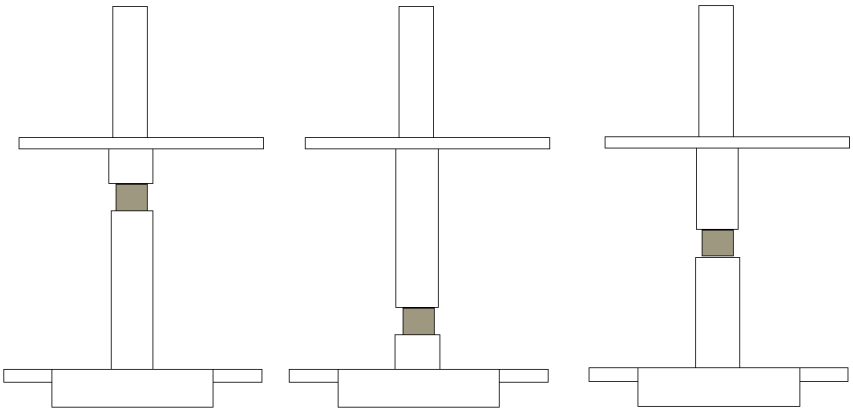
Deprem yalıtım sisteminin en önemli montaj kriteri, taban yalıtımı yapılan binanın en az 100mm ve bazı özel durumlarda ise, 1000mm'ye kadar zemine paralel yatay yönde hareket edebilmesidir. Bu harekete izin verecek bir yalıtım düzlemi seçilmelidir. Bu düzlemin nihai yeri, yapıya göre değişir, fakat bu süreçte dikkate alınması gereken birkaç önemli kriter vardır. İzolasyon düzlemi yeri seçiminin deprem yalıtım tasarımını ilgilendiren çok önemli sonuçları vardır. Eğer binada izolatörler bodrum katı ile zemin katı arasındaki kolonun altına, ortasına veya kolon üst kısmına Şekil 1.39 da gösterildiği gibi montajlanır.

En yaygın kullanılan konfigürasyon, izolatörlerin hemen üzerine bir diyafram yerleştirmektir. Bu konfigürasyon, deprem yüklerine izolatörler rijitliklerine göre dağılımına izin verir. Bodrum katı olmayan binalarda izolatörler binanın temel pabuçları üzerine monte edilirler ve Şekil 1.39'de gösterildiği gibi yapı bu izolatörlerin üzerine inşa edilir. İzolatör düzlemi kat boşluğu yüksekliği, izolatörleri kolayca kontrol etmeye ve izolatörleri değiştirmeye uygun olmalıdır. Bu söz konusu izolatör düzlemi boşluğu yüksekliği, en az 1.2m ile 1.5m kadar olmalıdır. İzolatörlerin kolonların veya duvarların üstüne ve altına yerleştirildiği durumlarda, maksimum izolatör kesme kuvveti nedeniyle oluşan kolon momentleri için ek eleman tasarımına ihtiyaç vardır. Bu da sıklıkla dayanıklı kolon ebatları ve cephe yüklerine dayanım için duvar içinde gömme ayakların yerleştirilmesini gerektirir.



Şekil 1.38 Bodrum katı olmayan binada izolatör montaj yeri ve şekli, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

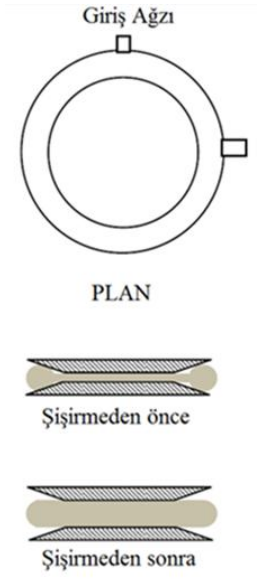
İzolatörlerin kolonların veya duvarların ortasına yerleştirildiği durumlarda ise, toplam momentlerin izolatörün altına ve üstüne bölüştürme avantajı vardır. Bununla birlikte daha sonra anlatılacağı gibi, kolonlarda veya duvarlarda izolatörün hemen altı ve üstünde P-Δ momentleri oluşacağı dikkate alınmalıdır. Bodrum kat yapısal eleman ihtiyaçları ancak dikkatli bir izolatör tipi seçimiyle ve izolatör rijitliğinin değiştirilmesi ile azaltılabilir. Örneğin, kurşun çekirdekli bir deprem izolatör sistemi kullanılırsa, bu durumda yanal yüklere yüksek direncin olduğu duvar kesişim bölgeleri gibi yerlerde daha geniş çaplı kurşun çekirdekli izolatöeler kullanılabilir.



Şekil 1.39 Binalarda izolatör montajı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

İç kolonlar gibi daha dayanıksız elemanların kullanıldığı yerlerde küçük çaplı kurşun çekirdekli izolatörler veya çekirdeksiz izolatörler kullanılabilir. İzolasyon diyaframı tüm izolatörlerde eşit deplasmanlar sağladığından, iç kolonlara binen kuvvetleri azaltacaktır.

İzolasyon ara yüzeyi altındaki yapısal elemanlar esnek ise, izolatörden daha çok yapısal elemanlarda bazı deplasmanlar oluşacağından izolasyon sistemi performansını değiştirebilir. Yapısal modele ara yüzey altındaki yapısal elemanların bu esneklikleri dahil edilmelidir. Esnek altyapı elemanlarının yaygın olduğu yer köprü yalıtımlarıdır.



Şekil 1.40 Tablalı kriko, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Mevcut binalardaki güçlendirme çalışmalarındaki uygulamalar, yeni binalar için olan uygulamalar ile aynı süreci takip eder, ancak güçlendirme çalışmalarında daha fazla kısıtlamalar vardır. Aynı zamanda, ikincil momentler, izolatör üzerindeki yalıtım katı diyafram düzlemi hareketi ve maksimum izolatör kuvvetlerine altyapının dayanım kapasitesi gibi, yeni montaj tasarım sürecinde çözüme kavuşturulacak bir çok problem, bu tür mevcut binalarda da yalıtım sürecine dahil edilmelidir.

Şekil 1.41 herhangi bir izolasyon sisteminin güçlendirme montajında karşılaşılabilecek bazı kavramsal montaj şekillerini göstermektedir.

Pek çok güçlendirme çalışmasının kendine özgü şartları olduğundan bunlar sadece şematik olarak gösterilmiştir. Bu konuların bazıları ile karşılaşılabilir ve aynı zamanda büyük bir ihtimal ile diğer bazı konularla da baş etmek gerekecektir:

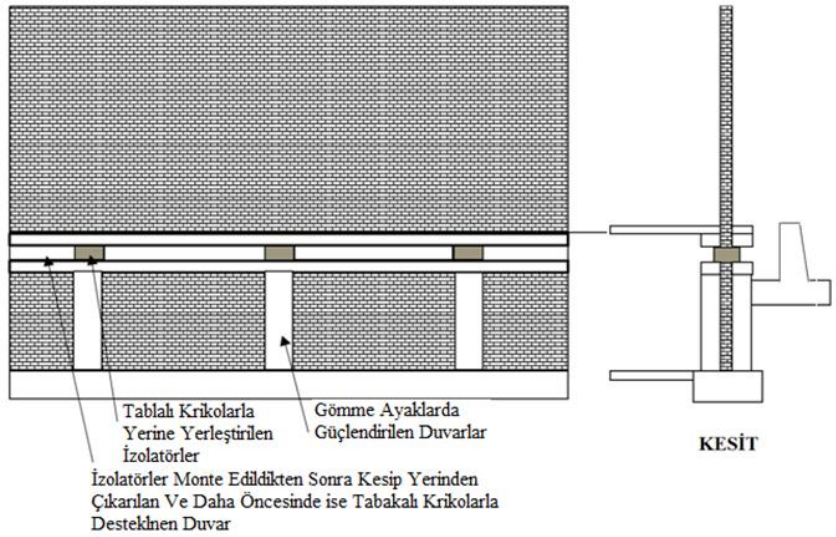
1- İzolatörler mevcut yapıya montajı yapılmalıdır. Mevcut yapıda kolonlar ve duvarlar izolatörün montajına müsaade edecek şekilde kesilip çıkartılmalıdır. İzolatörlerin kolonlara montajında kolon yükleri için geçici desteklere ihtiyaç duyulur. İzolatörlerin duvara montajında kesip çıkarılmayan duvar kısımları yükleri taşıyacağından geçici destekler kullanılmayabilir. Ancak izolatörlerin montajı tamamlandığında kesip çıkarılmayan duvarlar tamamen kesilip alınır.

2- Yerçekimi yükü izolatörlere dağıtılmalıdır. Bu genellikle çift çanak şeklindeki hidrolik kapsüllü tablalı krikolarla yapılır. Emniyet levhaları Şekil 1.40'da gösterildiği gibi alt ve üste yerleştirilir. Hidrolik kapsül şişirildiğinde alt ve üst levhalar birbirinden ayrılır. Hidrolik kapsül yağ ile şişirilebilir ancak çoğu izolasyon projesinde şişirmek için epoksi sıvı kullanılır ve levhalar kalıcı olarak yerinde bırakılır.

3- Duvarlı yapılarda montajda, duvarların birincil ve ikincil momentlere dayanımı için izolatörlerin altında ve üstünde duvarlar güçlendirilmelidir.

4- Sıklıkla prekast beton yatay askı kirişleri izolatörün altındaki ve üstündeki mevcut duvarların iki yüzeyine mengene ile tutturulur. Bu askı kirişleri germe çubukları ile bağlanır.

5- Mevcut duvar genellikle temel elemanlarına izolatörün uyguladığı kuvvetten meydana gelen eğilme momentini iletebilecek şekilde güçlendirmeye ihtiyaç duyar. Bu da gömme duvar ayakların kullanımını gerektirir.



Şekil 1.41 Kavramsal güçlendirme montaj şekli, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

6- İzolatörler üzerindeki yapı maksimum deplasmanlarda serbestçe hareket edebilmelidir. Bu genellikle 150mm ile 500mm aralığında veya daha yüksektir. Bunun için binanın etrafında bir hendek yapılmalıdır ve izolatörlerin bodrum katında kolonların ve duvarların altına yerleştirildiği konfigürasyonda harekete izin verecek derin istinat duvarları yapılmalıdır.

1.26.1.2 Taban Yalıtımım Mimari Özellikleri ve Bakımı

Yapısal bakış açısından farklı olarak, deprem taban yalıtım sistemi, mimari özelliklerde değişiklikler yapılmasına ve hareketlere uyumlu olması için de bakım hizmetlerine ihtiyaç duyar. Bu mimari değişiklikler, başlıca izolasyon düzleminden geçen merdivenler, asansörler, su tesisatı, iletişim hattı, atık su ve enerji hatları ilgili

yapılacak olan yalıtım düzlemindeki değişiklikleri kapsar. Bu değişiklikler, izolasyon kat alanının ileriki zamanlarda meydana gelecek olan depremler esnasında herhangi bir şekilde bloke edilmesinin önüne geçmek için gereklidir. Esnek servis bağlantıları sağlayacak malzemeler mevcuttur ve bunlar ile genellikle tamir ve bakım hizmetini verecek mühendisler ilgilendiğinden, izolasyon düzlemini keseceği yer konusunda ve maksimum hareketler için uzman mühendislerden danışmanlık hizmeti alınmalıdır.

Asansörlerin en alt seviyesi genellikle izolasyon düzleminin altında yer alır. İzolasyon düzlemi altında kalan asansör çukurunun da yatay yönde her tarafından harekete müsaade edecek şekilde yapılandırılması gerekmektedir. Merdivenler izolasyon düzleminin üzerinde kayma yataklı izolatörler yalıtılabilirler. Pek çok izolasyon projesi, merdivenler, şaft duvarları, vb. düşey olarak desteklenmesi gereken, fakat aynı zamanda yatay yönde hareket etmesi gereken bazı elemanlara sahiptir. Bu gibi durumlarda en yaygın destek küçük kayma yataklı izolatörler ile sağlanır. Bu izolatörlerin sürtünmeleri toplam izolasyon kuvvetine göre ihmal edilebilir bir büyüklüktedir. Sürtünmeli yataklı izolatörün taşıdığı yük ne kadar hafif ve sürtünmeli yataklı izolatör ne kadar küçük olursa olsun, izolatörün deplasmanı maksimum deplasman kadar olacağından, izolatörün sürtünme levhası büyüklüğü ağır yüke uygun olacak şekilde yapılmalıdır.

Bir izolasyon projesinde karşılaşacağınız pek çok problem daha önceki izolasyon projelerinde çözülmüştür. Bu nedenle, daha önceki taban yalıtımı montaj uygulamaları kontrol edilmelidir ve bunun için önceki projelerin mühendisleri ile müzakere edilip yayınlanmış dünya çapındaki örnek uygulama projelerine müracaat edilmesi yararlı olacaktır.

1.26.2 İzolatör Tipi Seçimi

Hiçbir izolatör tipi tek başına mükemmel değildir. Eğer öyle olsaydı, tüm projelerde aynı tip izolatörler kullanılırdı. İzolatör tipi uygunluğu ile ilgili takip eden bölümde izolatörlerin karakteristikleri, avantajları ve dezavantajları ile ilgili özet

bilgiler verilmiştir. Her bir projenin kendine özel hedefleri ve kısıtlamaları vardır ve de izolatör seçimi bu özel kriterleri karşılayacak şekilde yapılmak zorundadır.

1.26.2.1 Karışık İzolatör Tipleri ve Boyutları

Pek çok deprem yalıtım projesinde tek tip izolatör kullanılırken, özellikle kayma yataklı izolatörler, sıklıkla kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler veya yüksek sönümlemeli kauçuk izolatörler ile beraber kullanılırlar. Aşağıda belirtildiği gibi, kayma yataklı izolatörler iyi bir enerji dağılımı sağlarlar, yüksek basınç yüklerine dayanıklıdırlar ve yukarı yönlü hareketlere müsaade ederler, fakat sürtünme yapışması ve geri çağırıcı kuvvete sahip olmaması gibi dezavantajları vardır. Geri çağırıcı kuvvet sağlayan izolatör tipleri ile beraber kullanıldıklarında, kayma yataklı izolatörlerin dezavantajı olmaksızın avantajlarından yararlanılabilir. Bu iki tip izolatörlerin kullanım oranlarını belirlemek için UBC standart kodu teknik şartnameleri kullanılabilir. Ana kural, kullanılan kayma yataklı izolatörlerin, deprem yalıtım yapılacak toplam üst yapı kütlesinin %30'undan fazlasını taşımaması, kalan kütlenin de LRBr veya HDRBr tipi izolatörler tarafından taşınmasıdır. En yaygın kayma yataklı izolatör kullanımı, kesme kuvvetinin yüksek devrilme momenti kuvvetleri oluşturduğu yerlerdir. Bir kayma yataklı izolatör, yüksek basınçlara çok dirençlidir ve duvar bitişindeki gerilimin yukarı yönlü aktarımına izin verir. Pek çok izolatör tipinde, düşey yük arttıkça izolatör boyutları da artar, fakat LRBr ve HDRBr tipi izolatörlerde yükseklik ve FPS izolatörlerinde çap, tüm izolatörler aynı deplasmana maruz kalacağından, düşey yükten bağımsız olarak sabittir. Bu nedenle, izolatörler, taşıdıkları düşey yüklere göre ölçülendirilirler. Uygulamada, belirli bir projede tek ölçülü veya iki ayrı ölçülü izolatör kullanılır. Bunun iki nedeni vardır:

1- Pek çok uygulamalarda her bir izolatör ölçüsü için, birisi test için kullanılan iki ekstra prototip izolatör üretmek gereklidir. Yapının daha düşük yüklerinin olduğu bazı bölgelere yerleştirilecek izolatörler için, maliyet kaygısı ile daha küçük ölçüde izolatörler üretilirse, buradaki maliyet kazancı genellikle ilave iki adet prototip üretiminden ve yeni ölçülü izolatörün test maliyetinden daha az olacaktır. Bu nedenle 20'den daha az sayıda küçük özel ölçülü izolatör

üretmek yerine mevcut ölçüdeki izolatörleri kullanmak daha ekonomik olacaktır.

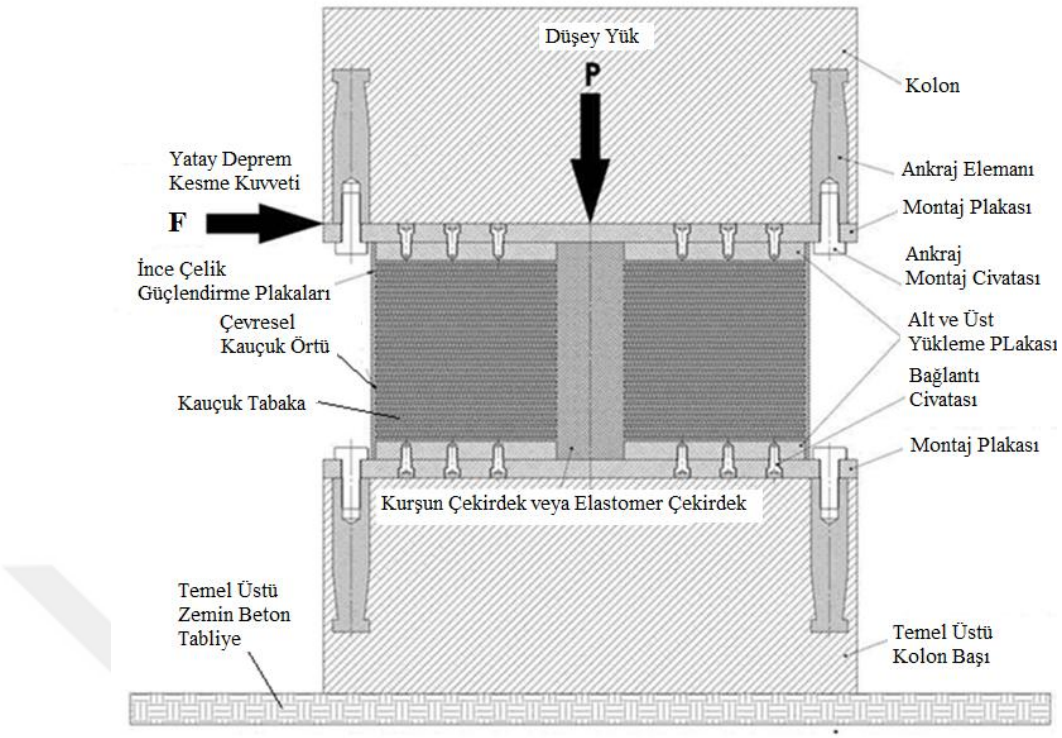
2- Yüksek deprem riski olan bölgelerde, maksimum yatay deplasmanlar altında stabiliteyi sağlamak için LRBr veya HDRBr tipi izolatörlerde minimum bir üretim ölçüsüne ihtiyaç duyulur. Tüm izolatörler aynı deplasmana sahip olduğundan, azalan düşey yük izolatör ölçülerinde de her zaman azalma anlamına gelmemektedir.

   Farklı ölçülerde izolatör kullanımının ekonomik olup olmadığının belirlenmesi için tasarım prosedürleri değerlendirilebilir. Öncelikle maksimum düşey yüklere göre izolatör yerlerini belirleyin ve toplam izolatör sayısına göre izolatörleri 2, 3 veya daha fazla grup şeklinde yalıtım düzleminde yerleştirin. Önce, tüm gruplar için aynı ölçülerdeki izolatörleri tasarlayın ve sonra da minimum izolatör ölçülerine göre tasarlayın.

Her bir seçenek için, prototipler de dahil gerekli izolatör miktarını hesaplayın. Fiyat genellikle toplam miktar ile orantılı olduğundan, bu yöntem en ekonomik izolatör gruplamasını belirleyecektir.

1.26.2.2 Elastomer Esaslı Deprem İzolatörleri

Elastomer esaslı izolatörler, birbirini izleyen kauçuk tabakalar ve ince çelik sac levhalarının birbirine yapıştırılarak tek bir kompozit gövde oluşturmasından ibarettir. Kauçuk tabakalar, tipik olarak 4mm ile 20mm arasında ve bunları ayıran çelik sac levhalar da 1.5mm ile 3.5mm arasında farklı kalınlıklara sahiptir. Çelik sac levhalar düşey yükler nedeniyle kauçuk tabakaların yanal olarak şişmesini, yani bel vermesini engeller ve böylece izolatör yüksek düşey yükleri çok küçük çökmelerle yani, tüm yerçekimi yükleri altında 1mm ile 3mm arasında meydana gelen düşey deplasmanlarla taşıyabilir. Kauçuk tabakalar arasındaki ince çelik saclar, kauçuk tabakaların yatay deformasyonunu kısıtlamadığı için, izolatör yatay yükler altında düşey yüklere göre daha esnektir, bu nedenle elastomer esaslı deprem izolatörleri, düşey yükün en az iki kat yatay yüke dayanıklıdırlar.



Şekil 1.42 Bir inşaat kolonu altına yerleştirilmiş olan elastomer esaslı deprem izolatörünün kesit resmi

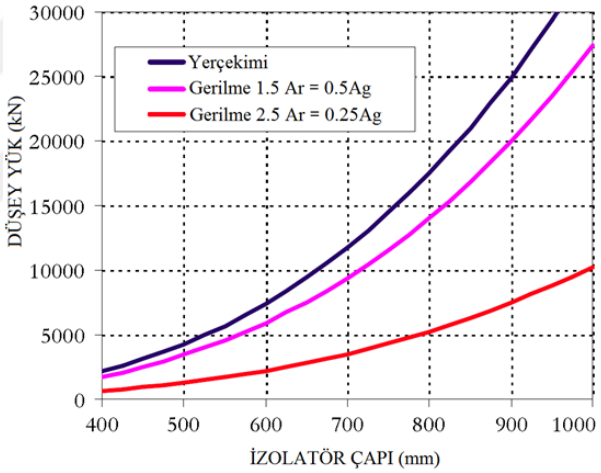
Elastomer esaslı izolatörler, özellikle köprülerde uzun yıllardır yoğun olarak kullanılmaktadır ve bu örnekler 50 yılllık kullanım süresinden sonra bile, izölatörlerin iyi performansta olduklarını göstermektedir. Elastomer esaslı izolatörler, deprem taban yalıtımı için gerekli olan yatay esnekliği iyi bir şekilde temin ederler.

Elastomer esaslı izolatörlerin yapımında doğal kauçuk veya viskoz sönümlemenin %2'si ile %3'ü kadar doğal sönümlemeye sahip olan neopren gibi sentetik kauçuk kullanılır. Aynı zamanda, tüm gerilim düzeylerinde, elastomer esaslı izolatörler esnektir ve böylece servis yükleri altında harekete direnç göstermezler. Bu yüzden, deprem yalıtımı için genellikle elastomer esaslı izolatörler kullanılırlar veya kurşun çekirdekli izolatörlerde olduğu diğer cihazlar ile kombine kullanılırlar.

Elastomer esaslı bir izolatörün deforme olmadan önce sahip olduğu yük kapasitesi, kesit ölçülerine ve tabaka kalınlıklarına bağlıdır. İzolatörlere kesme deplasmanları uygulandığında yük kapasitesi, elastomere uygulanan kesme gerilimine ve izolatörün alt-üst yükleme plakalarının herhangi bir anda kesişen

izdüşüm alanı olan etkin yükleme alanı azalmasına bağlı olarak düşer. Şekil 1.43, orta sertlikte kauçuk kullanılan ve 10mm tabaka kalınlığı olan elastomer esaslı izolatörlere bir örnek olarak verilmiştir.

Şekil 1.43'de verilen grafikte yanal deplasmanın sıfır olduğu farz edilerek yerçekimi yüklerini gösteren eğriye ek olarak iki ayrı deprem koşulana göre bu eğriler verilmiştir. Birincisi, %150 kesme gerilmesi üreten bir deplasman ve toplam izolatör tabanının %50'si kadar etkin yükleme alanının olduğu ortalama bir deprem durumudur. İkincisi, %250 kesme gerilmesi üreten ve toplam izolatör tabanının %25'i kadar etkin yükleme alanının olduğu ciddi bir deprem durumudur. Bahsedilen son durum bu tip bir izolatör için aşırı tasarım limitlerini temsil etmesi etmesi için verilmiştir.



Şekil 1.43 Elastomer esaslı izolatörlerin yük kapasitesi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Şekil 1.43'de gösterildiği gibi, sismik deplasman arttıkça, izolatörün taşıyabileceği emniyetli düşey yük aniden azalır. Bu da yüksek deprem riski olan bölgelerde izolatör ölçü tayinini daha karmaşık hale getirir. Bu ölçü tayini, artan deplasmana bağlı düşey yük artışıyla daha da karmaşık hale gelir, örneğin, dış kolonlar altındaki veya perde duvarlar altındaki izolatörlerde olduğu gibidir.

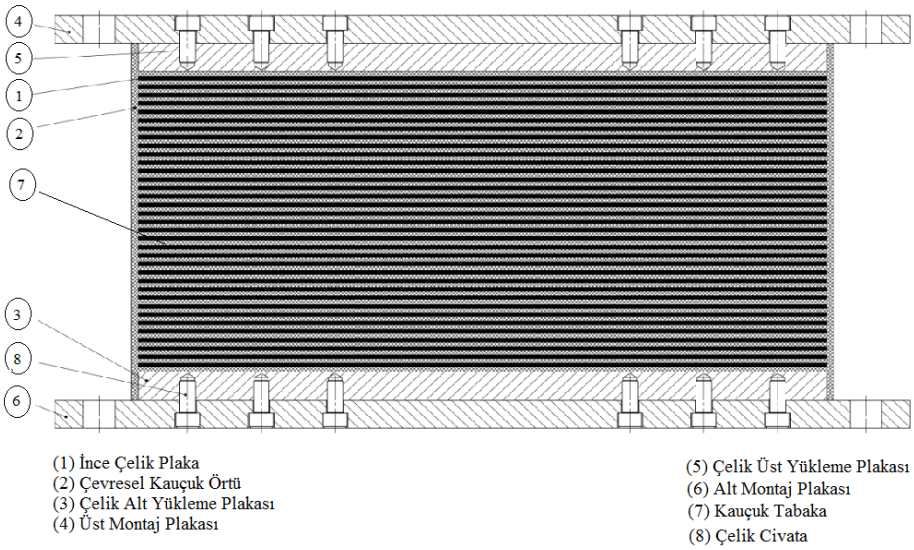
1.26.2.3 HDRBr Yüksek Sönümlemeli Kauçuk İzolatörler

Yüksek sönümlemeli izolatör söz konusu olduğunda %8 ile %15 arasındaki miktarda sönümleme sağlayan, ya doğal ya da sentetik kauçuk mamul elastomer esaslı kauçuk izolatörler akla gelir. %2 civarında sönümleme sağlayan sıradan kauçuk izolatörlerle kıyaslandığında bu değerler oldukça iyidir.Şekil 1.44'de HDRBr tipi deprem izolatörü kesit resmi verilmiştir.

Ek sönümleme, kauçuk bileşiminin oranlarını değiştirerek ve kauçuk içinde histerisiz eğrileri elde etmek için moleküllerin çapraz bağ yoğunluğunu değiştirerek sağlanabilir. Bu yüzden elde edilen sönümleme tabiatında histeriktir (deplasmana bağlıdır). Çoğu HDRBr bileşeni için, sönümlemenin viskoz bileşeni (hıza bağlı) göreceli olarak küçük kalır (kritik sönümlemenin %2'si ile %5'i arasındadır).

Kauçuk histerisizi tarafından sağlanan sönümleme, LRB izolatörlerinde yapıldığı gibi, histerisiz alanından hesaplanan "Eşdeğer viskoz sönümleme" yaklaşımını uyarlayarak tasarımda kullanılabilir. Bugüne kadar kullanılan HDRBr tipi izolatörlerde Şekil 1.44 etkin sönümleme, %25 ile %50 arasındaki düşük gerilmelerde %15 civarında iken, %100 üzerindeki yüksek gerilmelerde %8 ile %15 arasındadır. Fakat bazı sentetik kauçuk bileşimleri yüksek gerilmelerde %15 veya daha fazla sönümleme sağlayabilirler (Kelly J. M., Dynamic and Failure Characteristics of Bridgestone Isolation Bearings, 1991).

Yalıtım tasarımlarında, belirli elastomer kauçuk karışımları için sönümleme miktarları tablolaştırılmış eşdeğer viskoz sönümleme oranlarından elde edilebilir. Bu izolatörler için yük kapasitesi, elastomer esaslı izolatörler için kullanılan aynı formüllere bağlı olarak elde edilebilir.



Şekil 1.44 HDRBr tipi izolatör kesit resmi

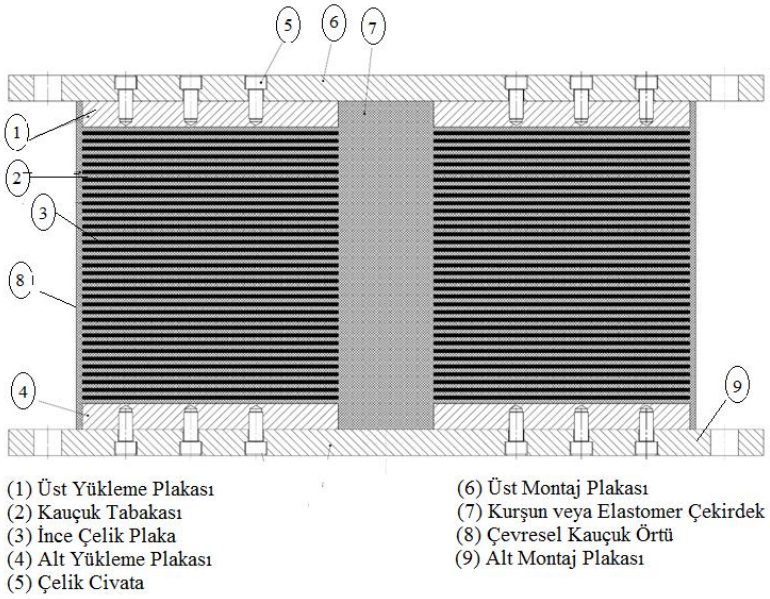
1.26.2.4 LRBr Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör, Şekil 1.45, izolatörün ortasında daha önceden oluşturulmuş deliğe zorlayarak yerleştirilmiş kurşun çekirdekten oluşur. Bu kurşun çekirdek servis yükleri altında rijitliğini ve yüksek yatay yükler altında enerji sönümlemeyi sağlar. Üst ve alt yükleme plkaları, ara celik sac levhalardan daha kalın olup, izolatörün monte edilmesi için kullanılır.

İzolatör bütün olarak çevresel şartlardan korumak için kauçuk bir kılıf ile kaplanmıştır. Düşük yanal yüklere (örneğin küçük depremler, rüzgar veya trafik yükleri) maruz kalındığında kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler yatay ve düşey yükler altında rijittir.

Yanal rijitlik kurşun çekirdeğin yüksek elastik rijitliğinden ve bütün yük seviyelerinde düşey rijitlik izolatörün çelik-kauçuklu yapısından kaynaklanır. Daha yüksek deprem yükü seviyelerinde kurşun akar ve izolatörün yanal rijitliği ciddi olarak azalır. Bu deprem taban yalıtımının periyot değişim etki karakteristiğini oluşturur. İzolatör büyük deplasmanlı döngüsel hareketler yaptığında, örneğin orta ve büyük depremlerde olduğu gibi, kurşun çekirdek plastik deformasyona uğrayarak

histerik sönümleme şeklinde enerjiyi emer. Bu histerisiz tarafından üretilen eşdeğer viskoz sönümleme, deplasmanın bir fonksiyonudur ve genellikle %15 ile %35 arasında bir değerdedir.



Şekil 1.45 Kurşun çekirdekli izolatör kesiti

Kurşun çekirdekli izolatörlerin esas avantajı, servis yükleri altında rijitlik, deprem yükleri seviyelerinde esneklik ve tek bir kompakt izolatörde sönümleme fonksiyonlarını toplamasıdır. Bu özellikler kurşun çekirdekli izolatörleri, yüksek seviyeli sönümlemenin gerekli olduğu yüksek depremsel bölgelerde veya servis yükleri altında rijitliğin önemli olduğu köprü, vb. yapılarda en yaygın kullanılan izolatör yapmıştır. Elastomer esaslı izolatörün tasarımında kullanılan formüller, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler için de uygulanabilir.

1.26.3 Cihazların Avantajları ve Dezavantajları

Tablo 1.16 çok yaygın olarak kullanılan izolatör tiplerinin avantaj ve dezavantajlarını özet olarak vermektedir. Genel bir tipte bazı dezavantajlar bulunsa bile, bazı deprem izolatörü üreticilerinin bu dezavantajı azaltacak özel yöntemleri vardır.

Tablo 1.146 Deprem izolatörlerinin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırması, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

İzolatör Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
Elastomer esaslı	Yapı içi ivmeler-Düşük Düşük maliyet	Büyük deplasmanlar Düşük sönümleme Servis yüklerine direnç yok Alt ve üste P-Δ momentleri
HDRBr	Yapı içi ivmeler-Orta Servis yüklerine dayanıklı Orta ve yüksek sönümleme	Gerilmeye bağlı rijitlik ve sönümleme Karmaşık analiz Sınırlı rijitlik ve sönümleme seçeneği Yük altında özelliklerin değişimi Alt ve üste P-Δ momentleri
LRBr	Yapı içi ivmeler-Orta Rijitlik ve sönümlemede çok seçenek	Özelliklerde döngüsel değişim Alt ve üste P-Δ momentleri
PTFE	Zayıf profil Servis yüklerine dayanıklı Yüksek sönümleme Altta veya üstte P-Δ momentleri Azaltılmış burulma tepkisi	Yapı içi ivmeler-Yüksek Basınç ve hızın fonksiyonu özellikler Yapışma Geri çağırıcı kuvvetin olmaması
FPS	Zayıf profil Servis yüklerine dayanıklı Orta-Yüksek sönümleme Altta veya üstte P-Δ momentleri Azaltılmış burulma tepkisi	Yapı içi ivmeler-Yüksek Basınç ve hızın fonksiyonu özellikler Yapışma
Silindirik	Ticari olarak piyasada yoktur.	
Manşonlu kazıklar	Muhtemel düşük fiyat Esneklik sağlamada etkinlik	Uygun montaj gerekliliği Düşük sönümleme Servis yüklerine direnç yok
Histerik sönümleyicile	Kontrollü deplasmanlar Pahalı değil	Sisteme ilave kuvvet
Viskoz sönümleyiciler	Kontrollü deplasmanlar Histerik sönümleyicilerden daha az ek kuvvet	Pahalı Sınırlı bulunulabilirlik

Örneğin genel olarak, kaymalı yataklı izolatörlerde statik sürtünme, bu tür izolatöre ait potansiyel bir dezavantaj iken, üreticiler statik sürtünmenin azaltıldığı yeni kaymalı yüzeyler ile FPS türü izolatörlerde ile bu dezavantajın üstesinden gelmişlerdir. Bu nedenle, Tablo 1.16'de listelenen bazı faktörler, bizzat izolatörün dezavantajı olmayıp, bazı projeler için tasarım dezavantajı olabilir. Örneğin, LRBr ve HDRBr tipi izolatörler, izolatörün alt ve üst yükleme plakalarında eşit olarak dağılan birincil ve ikicil (P-Δ) momentler üretirler. Ancak, bu momentler, izolatörler

üzerindeki yapı ve temel için ayrıca tasarlanmalıdır. Kaymalı yataklı sistemler için toplam (P-Δ) momenti aynıdır, fakat tüm moment, temel tarafından veya üst yapı tarafından mukavemet gösterilecek şekilde kaymalı yüzey yönlendirilebilir.

Tablo 1.16'deki avantaj ve dezavantajlar geneldir ve çok kapsamlı değildir. Her projede bazı karakteristikler diğerlerinden daha önemli olabilir. Bu nedenlerle, tasarım geliştirme safhasında, belirli cihazları tamamen değerlendirme dışı bırakmak tavsiye edilmez. Ön projelendirmede, genellikle herhangi bir sistemin uygunluğunun netleşmesine kadar, pek çok değişik izolasyon sistemi tipini değerlendirmek faydalı olacaktır. Erken proje safhasında, destek almak ve en güncel bilginin kullanımını temin etmek için cihaz üreticileri ile iletişim kurulması tavsiye edilmektedir.

1.27 Deprem İzolatörleri

1.27.1 Bilgi Kaynakları

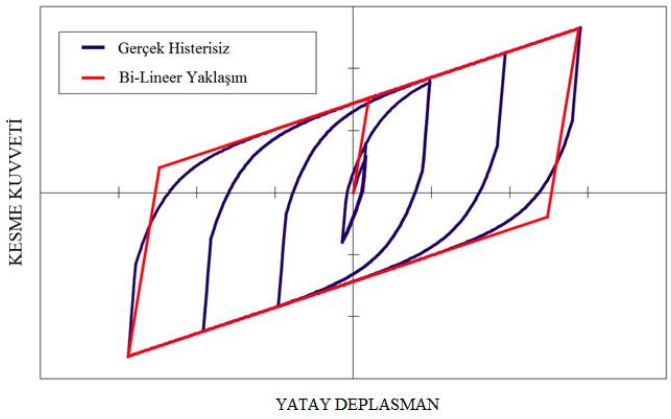
Normal kauçuk esaslı deprem izolatörleri, yüksek sönümlemeli kauçuk esaslı deprem izolatörleri ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin tamamı elastomer esaslı izolatörlerdir. Takip eden bölümlerde, bu tip doğal kauçuktan endüstriyel olarak üretilen standart izolatörlerin özellikleri daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Yüksek sönümlemeli kauçuk izolatörler, tescilli elastomer karışımları kullanılarak üretilirler ve üreticiden üreticiye bu karışım formülleri değişkenlik gösterir. Bu izolatörlere bazı örnekler verilmiştir, fakat bu tip bir izolatör kullanmak istenirse, rijitlik ve sönümleme verileri ile ilgili üreticilerden daha fazla bilgi alınması uygun olacaktır.

Bu bölümdeki pek çok veri, birçok taban yalıtım projesinde olduğu gibi, Skellerup firmasının yapmış olduğu deprem yalıtım projelerinden alınmıştır. LRBr tipi izolatörlerin verileri de Dynamic Isolation firmasının yapmış olduğu taban yalıtım sistemleri projelerinden aldık ve izolatörlerin özellikleri Skellerup projesinde kullanılan izolatörlerinkine benzer olarak seçilmiştir.

1.27.2 Kurşun Çekirdekli İzolatörlerin Mühendislik Özellikleri

Yatay deplasmanlar altında kurşun çekirdekli izolatörler, kauçuk izolatördeki lineer-elastik kuvvet deplasman ilişkisi ve kesme kuvveti altındaki kurşun çekirdeğin mükemmel-elastik- plastik histerisizi bileşimi olan bir histerisiz eğrisi üretirler. Kurşun çekirdek, ara ince çelik levhaların sınırlama etkisinden kaynaklanan yatay kayma gecikmesine bağlı olarak tam bir dikdörtgensel histerisiz üretmez. Bu konu, tasarım prosedürleri bölümünde, yani 9. bölümde detaylı olarak ele alınacaktır.

Şekil 1.46 'da gösterilen sonuç histerisiz eğrisinde, yükleme ve boşaltma arasında eğrisel bir geçiş vardır. Tasarım ve analiz için, sönümlemeyi belirleyen histerisiz eğrisi altındaki alan ile ölçülen alan eşit olacak şekilde, bir eşdeğer bi-lineer yaklaşım tanımlanır. Bir izolatörü sürekli yumuşaklık öğesi ile modellemek mümkündür, ancak bu sadece DRAIN-2D programında iki boyutlu modellerde uygulanabilir ve bu yüzden sık kullanılmamaktadır.



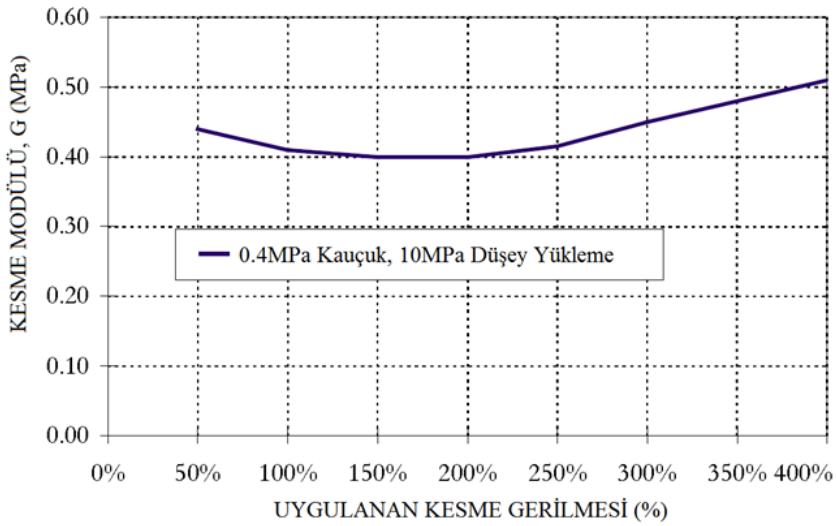
Şekil 1.46 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör histerisizi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.2.1 Kesme Modülü

Elastomer esaslı ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, genellikle %100 gerilmede yaklaşık 0.40MPa'dan 1.20MPa'a kadar bir aralıkta yayılan kesme

modülüne sahip, kauçuk esaslı malzeme karışımları kullanılarak üretilirler. Bu tür kurşun çekirdekli izolatörlerde LRBr, kullanılan kauçuğun, uygulanan gerilmeye bağlılığı azdır. Bundan farklı olarak, yüksek sönümlemeli kauçuk HDRBr izolatörlerde, kauçuk gerilmeye oldukça fazla bağlı olacak şekilde özel olarak formüle edilmiştir.

Şekil 1.47 nominal kesme modülü 0.40MPa olan kauçuğun, kesme modülündeki değişimini kesme gerilmesine bağlı olarak gösterir. Kesme modülü, %50 kesme gerilmelerinde nominal değerlerden takriben %10 daha yüksektir. %250'nin üzerindeki kesme gerilmelerinde kauçuk %400 kesme gerilmesindeki kadar sertleşir ve kesme modülü nominal değerden %30 daha yüksek olur. Tüm elastomer esaslı izolatörlerde kesme modülü, düşey yüke bir miktar bağlıdır. Bununla birlikte, düşey yük çok yüksek olmadıkça, düşey yüke bağlı kesme modülü değişimi genellikle %10'dan azdır ve sıklıkla da %5 kadar daha az olacak şekilde küçüktür.



Şekil 1.47 Kauçuk kesme modülü, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.2.2 Kauçuk Sönümlemesi

Elastomer özellikleri üzerine yayınlanmış çoğu teknik yayın kayıp açısına atıfta bulunur. Kauçuk kayıp açısı, gerilme ve basma kuvveti arasındaki faz açısıdır ve

kauçuk teknolojisinde kayıp faktörünü, yani kayıp tanjantı tanımlamak için kullanılır, ki bu da, kayıp modülü ve depolama modülü oranı olarak tanımlanır:

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'}$$

Burada **G''** faz dışı kesme modülü ve de **G'** faz içi kesme modülüdür. Bu malzeme içindeki sönümlemenin bir ölçümüdür. ASTM D2231-94 malzeme standardı 'Yük altındaki titreşimlerde kauçuk özellikleri standart uygulaması'nı verir, ancak deprem yalıtım sistemlerinden ziyade, bunun küçük gerilme seviyeleri ile ilgili olduğu için, genellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmamaktadır.

Elastomer esaslı izolatörlerin sönümleme özelliklerini elde etmek için, genel olarak ASTM D2231 standardında belirtilen tek kat kauçuk tabakadan ziyade, deprem yalıtımında kullanılacak gerçek tam ölçüdeki izolatörün test sonuçları kullanılır. Bunun nedeni, izolatör üretiminde kullanılan inceiç levhaların esnekliği, sistemin toplam enerji kaybı üzerine olan etkisidir. Histerisiz eğrisi alanının "kayıp modülü" benzeri, elastik gerilme enerjisine "depolama modülü" benzeri oranı kullanılarak bu test sonuçlarından sönümleme hesaplanır.

Çoğu kurşun çekirdekli izolatörlerde, kauçuk malzemenin histerisizi tarafından önemli viskoz sönümleme sağlamayan kauçuk bileşimdeki, orta ve düşük modüllü doğal kauçuk kullanılır ve böylece, bütün sönümlemenin kurşun çekirdek tarafından sağlandığı varsayılmaktadır.

1.27.2.3 Özelliklerde Tekrara Bağlı Değişim

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerde etkin rijitlik ve sönümleme hem düşey yük hem de döngüsel tekrar sayısının bir fonksiyonudur. İlk birkaç döngüsel tekrarda, kurşun çekirdeği olmayan elastomer esaslı kauçuk izolatörlere kıyasla, LRBr tipi izolatörlerde bu değerlerde daha bariz bir değişim vardır.

Deprem yalıtım sistemi tasarım prosedürleri ve izolatör prototip test gereklilikleri, tasarım histerisiz döngü alanı ve etkin rijitlik, tasarım deplasmanındaki üç döngü

testlerinin ortalamasına denk olacak şekildedir. Bu testin depremlerde, izolatörlerden beklentiyi karşılayan en iyi test olduğu düşünülmektedir. İlk 10 döngüsel tekrar için, histerisiz alanındaki maksimum azalma, her bir döngü için yaklaşık %1'dir, fakat sonraki döngüsel tekrarlarda bu alan sabit hale gelir. Histerisiz alanındaki gerçekleşen küçülme, izolatörün ve kurşun çekirdeğin boyutları ile ve kauçuğun özellikleri ile yakından ilişkilidir. Gerçekte beklenen tepki frekansında test edildiklerinde, artan döngü tekrar sayısı ile etkin rijitlik değişiminin ve histerisiz alanı değişiminin izolatör boyutlarına bağlı olduğu görülmektedir. Uygulama kaynaklı nedenlerle, beklenen gerçek yükleme frekansında, tasarım deplasmanında çoklu döngüsel tekrara maruz kalmış büyük boyutlu deprem izolatörlerinin bazı test sonuçları Tablo 1.17'de verilmiştir.

Tablo 1.157 Benecia-Martinez Köprüsü izolatörleri karekteristikleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

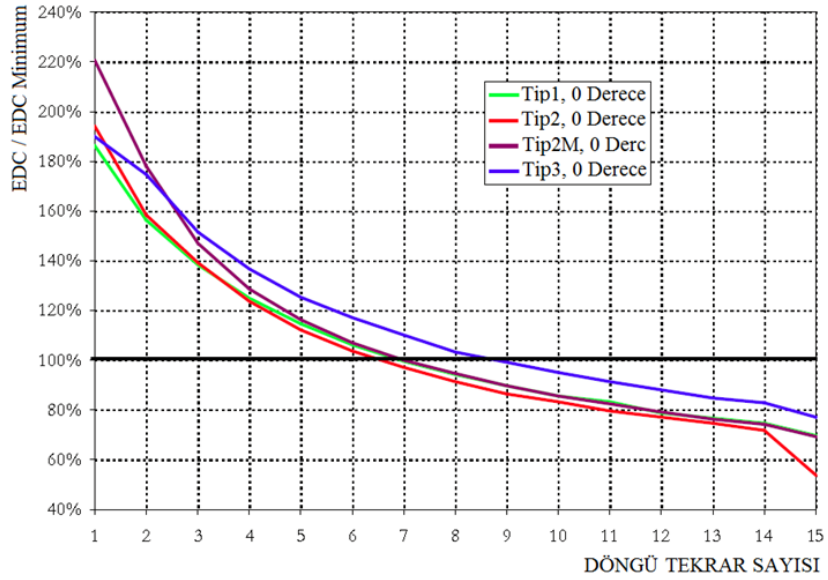
İzolatör Tipi	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Çekirdek Çapı (mm)	Uygulanan Deplasman (mm)	Kesme Gerilmesi
Tip-1	820	332	168	254	%139
Tip-2	870	332	184	305	%167
Tip 2M	1020	332	188	305	%167
Tip-3	102	349	241	280	%163

Örneklerden birisi de Benecia-Martinez Köprüsü izolatörlerinin, Skellerup Industries firması tarafından yapılmış testlerdir. Bunlar kurşun çekirdekli izolatör tipinde olabilecek maksimum ölçüdeki çok büyük boyutlu kurşun çekirdekli izolatörlerdir. Aynı şekilde, artan döngü sayıları ile ölçülen değişimler, bu tip izolatörlerde elde edilebilecek en büyük değişimlerdir. Şekil 1.48'de verilmiş olan her bir döngü için ölçülen histerisiz eğri alanının (EDC=Her döngüde sönümlenen enerji), teknik özelliklerde verilen minimum eğri alanına oranını gösterir. Grafikler 2sn'lik izolasyon periyoduna denk gelen 0.5Hz frekansta uygulanmış, her bir 15 döngü değerine göre çizilmiştir (Skellerup Industries, 1992).

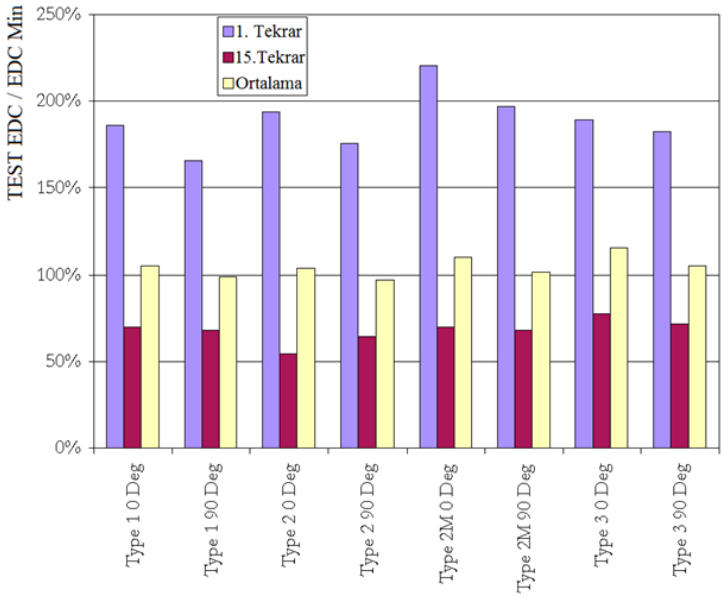
Şekil 1.48, başlangıç histerisiz alanının belirlenmiş minimum alanın üzerinde olduğunu, 6. ve 8. döngüler arasında da büyük kalmaya devam ettiğini göstermektedir. 15 döngüden sonra ise her bir döngü başına sönümlenen enerji miktarı (EDC) belirlenmiş değerin yaklaşık %60'ına kadar düşer. Şekil 1.50'deki

1. döngüden 15. döngüye kadar oranlar, tüm döngülerdeki ortalama oranları vermektedir. Bu da ortalama değerlerin, belirlenmiş minimum değere oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

Tasarım deplasmanlarında uygulanan 15 tekrar sayısı, gerçek depremlerde nadiren karşılaşılacak bir durumdur. Çoğu zaman-tanım analizleri, 1 ile 3 tekrarların maksimum deplasmanda ve sonraki çok sayıdaki tekrarların ise daha küçük deplasmanlarda olduğunu göstermektedir. Yakın fay etkisi varsa, maksimum deplasman, sıklıkla tek bir tekrarda olur. Şekil 1.50, LRBr tipi izolatörlerde bu tekrar sayıları için en azından, tasarım sönümleme seviyesinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.48 Histerisiz alanındaki döngüsel tekrara bağlı değişim, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.49 Histerisiz alanındaki ortalama tekrara bağlı değişim, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.2.4 Özelliklerin İzolatör Ömrüne Bağlı Değişimi

LRBr tip izolatörlerde kullanılan kauçuk bileşenleri için ısı yaşlandırması ile sertleşmenin 3 Shore A değeri kadar arttığını göstermiştir. Sertlikteki bu artış, kesme modülündeki %10 artışa tekabül eder. Kesme modülündeki bu artış, kurşun çekirdeğin akma mukavemetinin zamanla stabil olması nedeniyle, bunun toplam izolatör rijitliği üzerinde daha az bir etkiye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Deprem izolatörü dış yüzey kaplamasının oksijen gibi zayıflatıcı dış etkenlerin elastomere difüzyonuna engel olması nedeni ile izolatörlerdeki servis şartları altındaki sertlik değişimi sınırlıdır. Bu yüzden, ortalama etki %10 değerinden daha az olacaktır. Yüzeyi kaplama ile korunmamış doğal kauçuk izolatörlerin 100 yıl kullanımından sonra (örneğin Avustralya, Melbourne, tren viyadüğündeki izolatörlerde olduğu gibi), yüzeydeki bozulma yaklaşık 1.5mm ile sınırlıdır.

Yük altındaki elastomer izolatörlerin zamana bağlı rijitlik özellikleri değişiminin direkt ölçümüne ait ciddi bir kayıtlı veri yoktur. Bir örnek de, 1953'te İngiltere'de üretilmiş ve o tarihten beri hizmet veren vibrasyon izolatörleridir. 30 yıl sonra,

1983'te makine ile beraber depolanmış iki test izolatörü tekrar test edilmiş ve rijitliğin %15.5 ve %4.5 arttığı görülmüştür. Kent otoyol köprüsünden sökülen doğal kauçuk izolatör, 20 yıl hizmet verdikten sonra kesme rijitlik artışının %10 kadar olduğu görülmüştür.

Yukarıda bahsedilen izolatörlerin üretiminden bu yana, izolatörlerin çevresel zararlardan korunması ile ilgili ciddi gelişmeler olmuştur. Elastomer izolatörlerin rijitliklerindeki değişimlerin tasarım ömrü sonunda %10'dan daha fazla olmadığı tahmin edilmektedir. Deprem deplasmanları altında, izolatör etkin rijitliğine olan etki bu değerin yarısı kadardır. LRBr tipi izolatörlerde kauçuk tarafından sağlanan sönümleme, kurşun çekirdeğin sağladığı sönümleme yanında ihmal edilebilir olduğundan, bu tip izolatörlerde sönümleme yaşlanmadan etkilenmez.

1.27.2.5 Basma Gerilmesi Tasarımı

Düşey yük kapasitesini hesaplamak için kullanılan tasarım prosedürleri, AASHTO ve BS5400 standart kodlarında olduğu gibi oransal yük yaklaşımına dayanır. İzin verilen etkin basma gerilmesi, (1) kauçuğun nihai uzama miktarının, (2) nihai uzamaya uygulanan emniyet faktörünün, (3) izolatör kesit ölçüsünün, (4) izolatör şekil faktörünün ve (5) uygulanan kesme gerilmesinin bir fonksiyonudur.

Uzun dönem deplasman yükleri için (deplasman = 0), kauçuk kopmasındaki uzamaya 0.33 çarpanı uygulanır. Kısa dönem deprem yükleri için (deplasman > 0), kauçuk uzamasına DBE yükleri için 0.75 çarpanı, MCE yükleri için 1.0 çarpanı uygulanır.

İzolatörlerin verimli çalışmasının temini için, tecrübeye bağlı ek kurallar kullanılır. Örneğin, maksimum deplasmanda etkin izolatör alanının yani, izolatör alt yükleme plakasının üst yükleme plakasını karşılama oranı, izolatör brüt alanının en az %20'si kadar olması gereklidir. Bu prosedürün sonucu, izin verilen basma gerilmesinin izolatör ölçüsünün ve uygulanan deplasmanın bir fonksiyonu

olduğudur. Kauçuk kopmasındaki uzamaya uygulanan 1.0 çarpanı dışında, yük kapasitesini tayin etmedeki nihai basma gerilmeleri aynı prosedür ile hesaplanır.

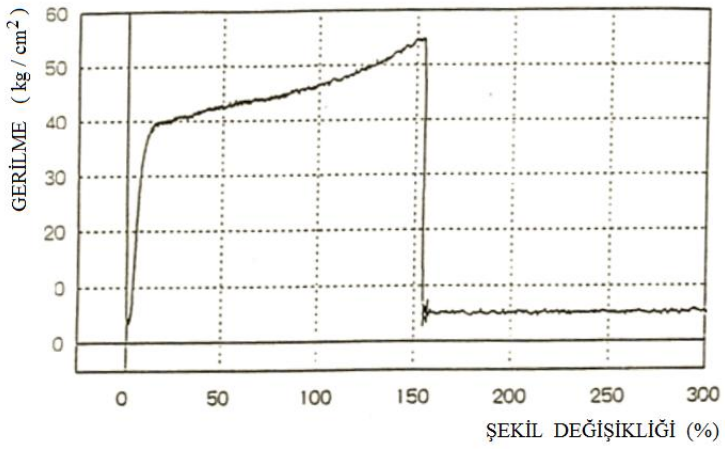
1.27.2.6 Tasarım Çekme Gerilmesi

LRBr ve HDRBr izolatörleri gibi, elastomer esaslı izolatörler, geçmişte çekme olmayacakmış gibi tasarlanırlardı. Bunun nedeni, bu tip yük altındaki kauçuk izolatörler için tasarım bilgisinin azlığıdır. Ardı ardına yapılan revizyonlar, sismik yükleri artırdığından, hiç çekmenin olmadığı izolasyon tasarımlarını tamamlamak zor hale gelmiştir. Bazı tasarımlar izolatör üzerinde çekmelere izin verir. Elastomer esaslı izolatörlerin yüksek çekmelere karşı kopma olmaksızın dayanabilmesi için, üretim esnasında yüksek kaliteli ciddi kontrollerin yapılması gereklidir. Skellerup Industries firması üretimi izolatörler (kurşun çekirdeksiz olanlar için) kopmada %150 çekme gerilmesi şekil değiştirmesinde test edilmiştir (bknz.Şekil 1.50). Gerilme rijitliği, %15 zorlama ve yaklaşık olarak 4MPa gerilmeye kadar hemen hemen elastiktir. Daha sonra kavitasyon oluştukça rijitlik düşer ve %150 şekil değişikliği zorlamasına kadar düşük rijitlikte olmaya devam eder.

Şekil 1.50'de kullanılan kauçuğun kesme modülü G = 1.0MPa'dır. İzolatör tasarım prosedürü 3G kadar nihai basınç gerilmesine müsaade eder, ki bu da 3MPa (30 kgf/cm^2) çekme gerilmesine izin verir demektir. Şekil 1.50'de gösterildiği gibi bu gerilme seviyesi, kavitasyon oluşmadan önceki uygun bir çarpanın elde edilmesini sağlar. Yukarıdaki testler, eksenel çekme gerilmesi altındaki silindirik kesitli izolatörler içindir. Berkeley Civic Center projesi için kullanılan Skellerup firması üretimi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, hem kesme gerilmesi, hem de çekme gerilmesi (2.4G'ye karşılık 3G), %225 kesme gerilmesi olan tasarım limitlerine yakın bir değerde test edilmişlerdir, (Tablo 1.18).

Tablo 1.18 Bileşik kesme gerilmesi ve çekme gerilmesi testleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

	Tip A	Tip B
İzolatör Çapı (mm)	920	970
Germe Kuvveti (kN)	549	608
Gerilme Zorlaması (MPa)	0.89 (2.4G)	0.88 (2.4G)
Deplasman (mm)	686	686
Kesme Gerilimi	225%	225%



Şekil 1.50 Elastomer esaslı izolatörlerde gerilme-şekil değişikliği testleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.2.7 Maksimum Kesme Gerilmesi

Yukarıda bahsedildiği gibi izin verilen düşey basma gerilmeleri, yani yük kapasitesi, basmaya dayalı gerilme ve uygulanan kesme gerilmesinin bileşimi olan toplam gerilme formüllerine dayanarak hesaplanabilir ve kopma uzamasındaki belirlenmiş değerden daha az olmalıdır.

Bunun zıttı ise, nihai kesme gerilmesi için uygulanabilir ki bu maksimum kesme gerilmesi de o anki düşey zorlamaya bağlıdır. Anlık düşey yüklere göre formüller, maksimum kesme gerilmelerini verseler de, aynı zamanda kesme gerilmelerine deneysel kanıtlara bağlı ampirik limitler uygulanır. Genellikle, kesme gerilmesi zorlama limitleri, tasarım formüllerini daha düşük bir değer ile sınırlandırmadıkça,

DBE yükleri için %150 ve MCE yükleri için %250 olarak alınır. Yüksek kesme zorlaması gerilmelerinde yapılan kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin testi, bu tip izolatörlerin kopmasının %300 ile %350 kesme gerilmesi zorlaması arasında gerçekleştiğini göstermiştir. Kurşun çekirdeği olmayan kauçuk izolatörler %400 kesme gerilmesi zorlamalarına kadar dayanabilmektedir.

Tablo 1.19, Skellerup Indurstries firmasının ürettiği kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin (LRBr), yüksek sönümlemeli kauçuk izolatörlerin (HDRBr) ve kurşun çekirdeği olmayan izolatörlerin (R) test sonuçlarını özet olarak verir.
Tablo 1.19 ile ilgili olarak değerlendirme notları aşağıda verilmiştir:

1-150 kip ve 500 kip HITEC numuneleri kopmuştur.
2-500 kip HITEC izolatörü 381mm deplasmanına kadar döngüsel tekrar yaptırılmıştır, fakat deney yapılan cihaz kopma testi yapılabilecek yeterliliğe sahip değildi. PEL'deki 457.2mm'lik izolatörün %340 gerilmeye kadar kopma olmaksızın döngüsel tekrarı yapılabilmiştir.
3-Japon gerilme testleri, nihai %155'lik çekme gerilmesindeki, eksenel çekme altındaki kopmaya kadar test edilmiştir.
4-Japon bileşik kesme/çekme gerilmesi testleri, %150'deki kesme gerilmesi için 5 döngüsel tekrar ve %250'deki kesme gerilmesi için 5 döngüsel tekrar için yapılmıştır ve kopma oluşmamıştır.
5-Hiçbir bileşik Japon kesme/basma gerilmesi testlerinin herhangi birinde kopma oluşmamıştır.
6-LRBr kurşun çekirdekli kauçuk izolatörü, HDRBr yüksek sönümlü kauçuk izolatörü ve R düşük sönümlü kauçuk izolatör ise kurşun çekirdeği olmayan izolatörleri gösterir.

Tablo 1.16 Yüksek kesme gerilmesi test sonuçları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

	İzolatör Tipi	Çap (mm)	Düşey Gerilme (MPa)	Maksimum Deplasman (mm)	Kesme Gerilmesi	Etkin Alan	Toplam Gerilme	
HITEC 150 kip	LRB	450	4.7	335	%320	0.11	%925	(1)
HITEC 500 kip	LRB	620	8.0	434	%339	0.16	%795	(2)
HITEC 750 kip	LRB	620	12.0	381	%190	0.24	%614	(3)
PEL	HDR	450	8.8	305	%340	0.22	%762	(2)
JQT Gerilim	R	350	-5.5	84	%155	Düşey	Gerilme	(3)
JQT Kesme/Gerilme	R	350	-2.7	140	%250	0.61	%363	(4)
JQT Kesme/Basma	R	500	2.5	250	%250	0.40	%282	(5)
	R	500	7.5	250	%250	0.40	%347	
	R	500	10.0	400	%400	0.11	%854	
	R	500	15.0	250	%250	0.40	%444	
	R	500	20.0	250	%250	0.40	%509	

1.27.2.8 Yapışma Dayanımı

Yapışma dayanımı, kauçuk tabakalar ile ara çelik levhalar arasındaki yapışmayı tanımlar. ASTM D429 tarafından tanımlanan 90^0 deki soyulma testi, Metod B ile ölçüldüğünde, kauçuk ve çelik levhalar arasındaki yapışma dayanımı en az 7.14 kg/cm kadar olmalıdır. Kopma %100 kauçuğun yırtılmasını gerektirir. LRBr için kullanılan tüm bileşenler bu gereklilikleri karşılamalıdır.

1.27.2.9 Düşey Yönde Bel Vermeler ve Çökmeler

Yerçekimi yükleri altında başlangıç düşey bel vermeler elastomer esaslı izolatörlerin standart tasarım prosedürlerinden hesaplanabilir. Yüksek şekil faktörüne sahip izolatörler için hacim modülü (bulk modülü) önemlidir ve bel verme hesaplarının temelini oluşturan düşey rijitliğin hesaplamasına da dahil edilmelidir. Elastomer esaslı izolatörler, düşey yükler altında rijittirler, ölü ve dinamik yükler altında bel vermeler ve çökme ise genellikle 1mm ile 3mm arasında değişim gösterir.

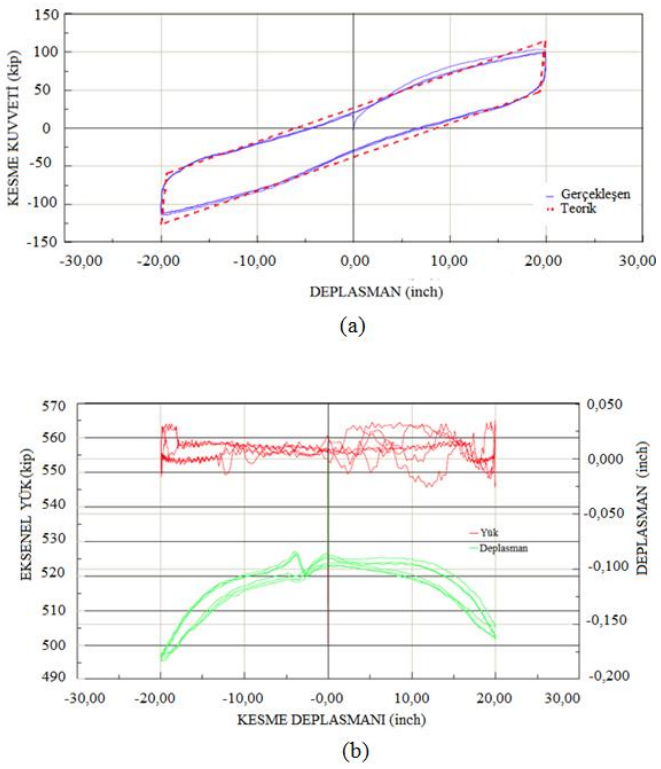
1.27.2.10 Uzun Dönem Düşey Yönde Bel Vermeler

Akma sürünmesi, sabit bir kuvvet altında zamanla deformasyondaki artış olarak tanımlanır ve bu kısa dönem ve uzun dönem bel vermeler ve çökmeler arasındaki farktır. Kauçukta akma sürünmesi, hem moleküler zincir kopmasına bağlı kimyasal

ve hem de moleküler zincir kaymasına bağlı fiziksel sürünmeler içerir. Yapıların taban yalıtımında kullanılan deprem izolatörlerinde fiziksel deformasyonlar baskındır. Kauçuğun yanal şişmesinin kimyasalların kolay difüzyonunu engellemesi nedeniyle oksitlenme gibi kimyasalların etkileri minimumdur bu yüzden, kimyasal etkiler ihmal edilebilir. Doğal kauçuk, diğer kauçuklara kıyasla akma sürünmesine karşı en iyi direnç gösteren malzemedir. Gerçek değerler, kauçuk içeriğin tipine, miktarına ve aynı zamanda kauçuk üretiminde kullanılan vulkanizasyon sistemine bağlıdır. Akma sürünmesi, yük altındaki ilk birkaç haftada oluşan başlangıç deformasyonunun %20'sinden daha fazla değildir ve en fazla yıllarca sonra deformasyondaki ek artış en fazla %10 kadar olabilir. İhtiyatlı bir tasarım için alınan uzun dönem maksimum bel vermeler ve çökmeler, kısa dönem değerlerin 1.5 katı olarak alınır. 15 yılı aşkın bir süre ve bir dizi izolatör için detaylı bir örnek vaka çalışması yapılmıştır. Londra'daki Albany Adalet Sarayı binası 540kN'dan 1800kN'a kadar kapasiteye sahip 13 izolatör tarafından desteklenmiştir ve 15 yılın sonunda akma sürünmesi orijinal bel vermenin %20'sinden daha az olarak gerçekleşmiştir.

1.27.2.11 Yanal Yük Altında Düşey Yönde Bel Verme

Yanal yük altında, izolatör yanal deplasmanlara maruz kaldıkça ek düşey bel vermeler olacaktır. Genellikle, bu tür bir deformasyon göreceli olarak küçüktür. Şekil 1.53, düşey deformasyonların ölçüldüğü basma ve kesme gerilmesinin ikisinin beraber yapıldığı duruma örnektir.



Şekil 1.51 Birleştirilmiş basma ve kesme testleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Gerilim yükleri için referans olarak yukarıda bahsedilen Bekeley Civic Center test serisinden alınmıştır. Burada İzolatör 2.500kN düşey yük altında, 508mm kesme deplasmanına maruz bırakılmıştır. Yük uygulandığındaki başlangıç düşey bel verme yani çökme 2.5mm'dir. Bu bel verme, 508mm yatay deplasman uygulandığında yaklaşık maksimum 4.6mm'ye kadar artar. Ölçülen en ciddi toplam düşey bel verme 686mm deplasman uygulandığındadır ve 12.4mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar ışığında, izolatör tasarımı maksimum deplasmanlarda düşey yönde hareket 15mm civarı bel vermeye müsaade edecek şekilde olmalıdır.

1.27.2.12 Rüzgâr Deplasmanı

LRBr tipi izolatörlerde rüzgâr direnci kurşun çekirdeklerin elastik rijitliği tarafından sağlanır. Projelerde rüzgârdan kaynaklanan deplasmanlar 0.01W rüzgâr yükü altında 3.5mm'den, 0.03W rüzgâr yükü altında 11mm'ye kadar olan aralıkta değişkendir. Kurşun çekirdekler genellikle maksimum tasarım rüzgâr gücünün %50 daha üzerindeki rüzgârlarda akma seviyesi olacak şekilde ölçülendirilirler.

1.27.2.13 Test Sonucu Özelliklerinin Teori ile Karşılaştırılması.

Yukarıda tartışılan tasarım prosedürleri LRBr tipi izolatörlerin tasarımında teorik formüllere dayanır. 9 farklı projenin test sonuçlarının bir özeti, teorik değerlerin gerçekte elde edilebilen değerler ile kıyaslanması Tablo 1.20'de verilmiştir. 19 izolatör testinde 17 izolatör histerisiz döngü alanı (EDC) değerleri tasarım değerlerinin üzerinde, 3'ünde tasarım değerinin maksimum %4 olmak üzere düşük olduğu görülmüştür. Şartnameler genellikle EDC değerinin tasarım değerinin en az %90'ı ve üzerinde olması gerektiğini belirtmektedir.

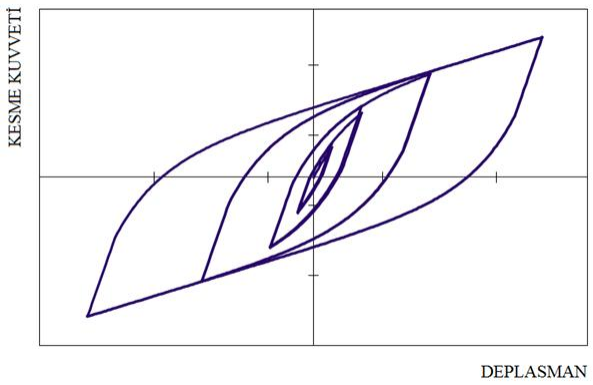
Tablo 1.20 Skellerup Industries üretimi LRBr izolatörleri test sonuçları, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Proje	Kesit Ölçüsü mm	Δ mm	Tasarım K_{eff} kN/mm	Tasarım EDC kN-mm	Test K_{eff} kN/mm	Test EDC kN-mm	K_{TEST} / $K_{TASARIM}$	EDC_{TEST}/ $EDC_{TASARIM}$
Hutt Health	662	264	1.42	115720	1.41	143425	99%	124%
Taiwan C347	875	58.2	11.51	640	12.02	741	104%	116%
Taiwan C258	420	158	0.91	220	0.922	286	101%	130%
	365	104	0.91	90	1.008	117	111%	130%
	1100	113	9.51	1240	10.336	1712	109%	138%
	1000	125	11	1790	11.406	2381	104%	133%
Arik Bridge	686	76	6.00	511	5.04	542	84%	106%
	686	76	6.85	407	6.00	397	88%	98%
Three Mile	686	206	12.69	127102	14.17	184823	112%	145%
	686	185	15.09	136246	14.65	167792	97%	123%
	686	261	12.57	202082	12.11	266662	96%	132%
Maritime Museum	500	169	1.27	81870	1.20	97425	94%	119%
Benecia Martinez	813	254	13.28	166764	13.97	201625	105%	121%
	864	305	14.14	233058	14.32	303581	101%	130%
	1016	305	19.63	240030	20.44	346672	104%	144%
	1016	279	28.76	369989	29.44	554355	102%	150%
St John's	1219	406	13.95	500748	13.43	482803	96%	96%
Berkeley Civic	914	508	6.81	240259	7.16	294894	105%	123%
	965	508	7.45	241059	7.89	307124	106%	127%

1.27.3 HDRBr'nin Mühendislik Özellikleri

Yüksek sönümlemeli HDRBr tipi kauçuk izolatörler %10 ile %20 arasında eşdeğer sönümleme sağlayacak şekilde elastomer bileşenlerinden üretilmiştir. Bu tür kauçuğun histerik davranışı Şekil 1.52'de verildiği gibidir. Son yıllarda, yüksek sönümlemeli kauçuk bileşenlerinde sürekli gelişmeler olurken, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerde durum göreceli olarak sabittir. Bu bileşenler kauçuk bileşimine ve kürleme işlem sürecine bağlı olduğundan üretici firmadan firmaya göre değişkenlik gösterirler.

Teknik literatür HDRBr'ler hakkında çok genel bilgi içermesine rağmen, tasarımların tamamlanmasına yetecek kadar özel teknik bilgi yoktur. HDRBr kullanmak istiyorsanız, en iyi yaklaşım özelliklere bağlı performans yaklaşımıdır. Bu yaklaşım için kalifiye üreticilerden nihai analiz özellikleri alınabilir.



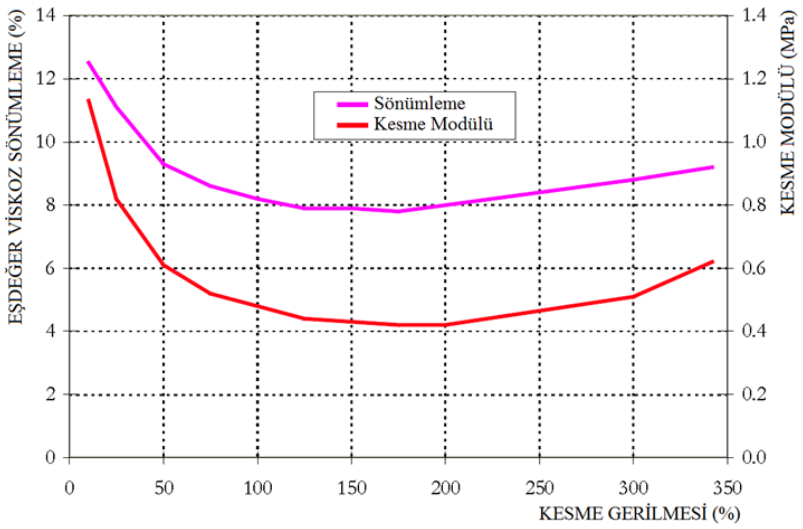
Şekil 1.52 HDRBr histerisiz eğrisi, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.3.1 Kesme Modülü

HDRBr izolatörünün kesme modülü Şekil 1.53'de gösterildiği gibi uygulanan kesme gerilmesinin bir fonksiyonudur. %10 ve daha az düşük gerilme seviyelerinde, kesme modülü 1.2MPa veya daha fazladır. Kesme gerilmesi arttıkça kesme modülü azalır. Grafikteki durumda %150 ve %200 kesme gerilmesinde kesme modülü minimum seviyededir. Kesme gerilmesi artmaya devam ettikçe kesme gerilmesi

tekrar artar. Örneğin bu bileşen için %340 kesme gerilmesi için kesme modülü 0.6MPa kadardır.

Başlangıç yüksek kesme modülü HDRBr'nin bir özelliğidir ve aşırı hareket olmadan rüzgar gibi servis yüklerine karşı izolatörün direnç göstermesine yarar. Gerilmeler yaklaşık %200'ün üzerine doğru arttıkça kesme rijitliğindeki artış, bu büyüklükte gerilmelere neden olabilecek MCE yük seviyelerindeki deplasmanların kontrol edilmesinde yararlı olabilir ne var ki, kuvvet seviyelerinde artışa neden olma gibi bir dezavantajı vardır ve bu da HDRBr izolatörleri ile deprem yalıtımı yapılmış yapıların analizini daha da karmaşık hale getirir.



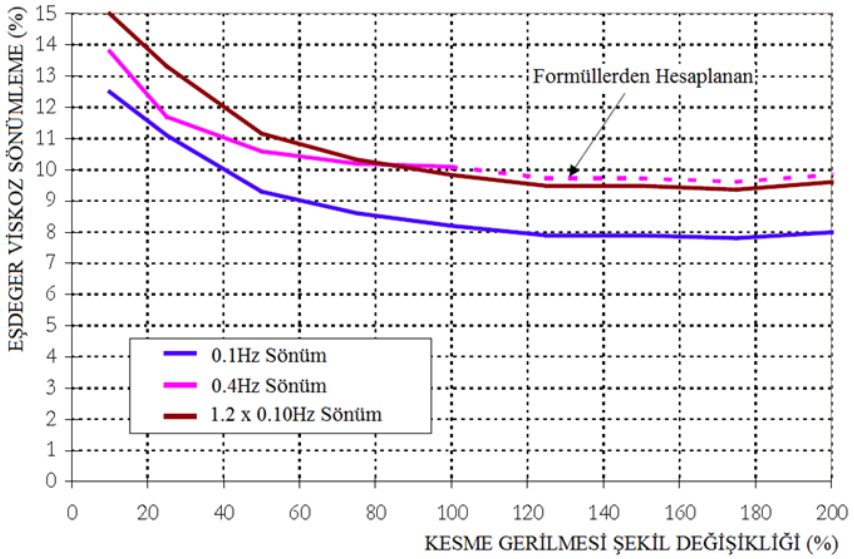
Şekil 1.53 HDRBr kesme modülü ve sönümü, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.3.2 Sönümleme

HDRBr izolatörleri tarafından sağlanan sönümlemenin önemli bir kısmı, doğası gereği histerik yapıda olmasına rağmen, frekansa bağlı bir viskoz sönümleme bileşeni de vardır. Bu viskoz bileşeni, toplam sönümlemeyi %20'ye kadar artırabilir ve hesaplanabilirse tasarımda da kullanılabilir. Sabit bir yük frekansı için deplasmanlar arttığında güç gereklilikleri de arttığından tüm deplasman değerlerine göre viskoz sönümlemeyi hesaplamak zordur. Bu nedenle, viskoz sönümleme

etkileri, genellikle ortalama bir deplasman değerine göre hesaplanır ve elde edilen sonuçlar daha büyük deplasmanlardaki değerleri hesaplayacak şekilde formül oluşturmada kullanılır.

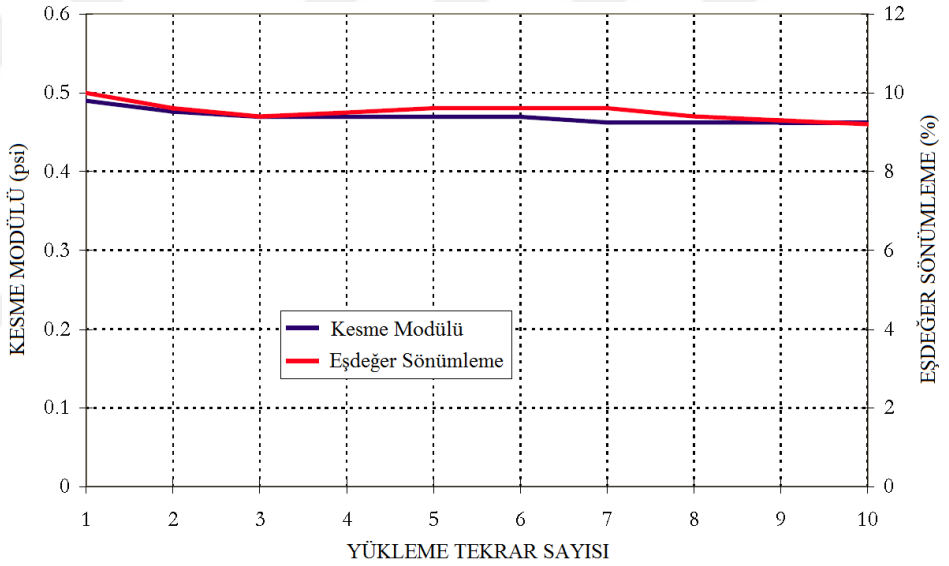
Şekil 1.54, 0.1Hz yükleme frekansındaki eşdeğer viskoz sönümlemeyi göstermektedir. Bu düşük yükleme oranında viskoz etkiler ihmal edilebilir olarak kabul edilir. %100'e varan gerilmelerde, bu sonuçları geliştirmede kullanılan testler, aynı zamanda izolasyon sisteminin çalışacağı şekilde tasarlanan ve ortalama bir frekans olan 0.4Hz yükleme hızında da (2.5sn periyot) kullanılmıştır. 0.4Hz frekansındaki sönümleme 0.1Hz frekansındaki sönümlemeden gerilmeyle artan bir çarpan kadar daha büyüktür. %25'te bu çarpan 1.05 iken, %100'de ise 1.23'tür. Frekansa bağımlılık elastomerde hıza bağlı bir viskoz sönümlemenin göstergesidir. Hız frekans ile oransal olarak artar ve böylece yüksek frekanstaki testler, daha yüksek viskoz kuvvetleri artışını verir. Aynı frekansta, çeşitli gerilme seviyelerinde testler yapılmıştır ve hız gerilme ile artar. %100 gerilmedeki hızlar, %25 gerilmedeki hızın 4 katıdır. Bunun nedeni, 0.4Hz ile 0.1Hz arasındaki sönümleme çarpanının artmasıdır. %100 gerilmeler için ilave viskoz sönümleme, toplam sönümlemenin yaklaşık %20'si kadar veya daha fazlasıdır. Böylece bu kauçuk bileşeni için sönümleme %8'den %9.6'ya çıkar.



Şekil 1.54 HDRBr'de viskoz sönümleme etkileri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.3.3 Özelliklerde Yükleme Tekrarına Bağlı Değişiklikler

HDRBr tip izolatörlerde, ilk birkaç yükleme tekrarından sonra "Boyun sıkma" diye adlandırılan olay nedeniyle izolatörün özellikleri değişir, bknz Şekil 1.55. HDRBr izolatörleri bir veya daha fazla sayıda büyük genlikli deplasmanlara zorlandığında, kauçuğun moleküler yapısı değişir. Bu moleküler değişiklik "boyun sıkma" durumuna göre daha düşük gerilme seviyelerinde, daha stabil histerisiz eğrilerine neden olur. Kauçuğun bir kısmının bölgesel olarak eski haline tekrar dönmesi mümkündür. Bu eski hale dönmenin boyutu kauçuk karışımına bağlıdır.



Şekil 1.55 "Boynu sıkılmış" HDRBr izolatörlerde tekrarlı yüklemeye bağlı özelliklerdeki değişim, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.27.3.4 İzolatör Özelliklerinde Zamana Bağlı Değişimler

Diğer doğal kauçuk formülasyonlarına kıyasla, pek çok HDRBr tipi izolatörlere ait kauçuk bileşenine ait daha az servis kaydı vardır. Elastomer esaslı izolatörler de en az diğer izolatörler kadar zararlı dış etmenlerden korunduğu için, elastomer esaslı izolatörlerin daha az ömürlü olacaklarını düşünmek için hiçbir neden yoktur. Bununla beraber, kauçuk bileşenleri üreticilere bağlı olduğundan, üreticilerden bu

konuda veri almak faydalı olacaktır. Standart şartnameler, hızlandırılmış yaşlandırma testleri (ısıtma ve soğutma testleri) ile ilgili olarak kurşun çekirdekli izolatörler ile aynı prosedürleri vermektedirler.

1.27.3.5 Tasarım Basma Gerilmesi

HDRBr tipi izolatörler, genel olarak LRBr tipi izolatörler ile aynı formülleri kullanacak şekilde tasarlanmışlardır. Bu yüzden LRBr izolatörleri ile ilgili bölümlerdeki yorumlar HDRBr tipi izolatörler için de geçerlidir.

1.27.3.6 Maksimum Kesme Gerilmesi

LRBr tipi izolatörler için maksimum kesme gerilmelerinin deneysel bir sınırı vardır ki bu sınır tasarım formülleri tarafından izin verilen değerden daha düşük bir değerde kesme gerilmesini sınırlar. Bu sınırlar, kurşun çekirdeğin performansı ile ilişkilidir ve bu nedenle HDRBr tipi izolatörlere tatbik edilemez; maksimum kesme gerilmesi, gerilme formüllerinin sınırlandırılmasına bağlıdır ve LRBr tipi izolatörlerde %250 ile sınırlı iken MCE yüklerinde %300'e yaklaşabilir. Daha yüksek kesme gerilmesi limitleri için HDRBr tipi izolatörler, LRBr tipi izolatörlerde olduğundan daha küçük ölçülerde ve daha düşük profilde kullanılabilir ki bu da, daha az toplam izolatör hacmi demektir. Ne var ki bu durum, aynı zamanda iki sistemde deplasmanların farklı olması nedeni ile farklı olan sönümleme seviyelerine de bağlıdır.

1.27.3.7 Yapışma Dayanımı

Yapışma dayanımı gereklilikleri, daha önce verilen LRBr tipi izolatörler için olan gereklilikler ile aynıdır.

1.27.3.8 Deprem İzolatöründe Düşey Yönde Bel Vermeler ve Çökmeler

Düşey rijitlik ve düşey yükler altındaki bel vermeler ve çökmeler, LRBr tipi izolatörlerde kullanılan formüllerle aynıdır. Bu yüzden, bazı belirli elastomer

özellikleri farklılıklara neden olsa da genel olarak, her iki tip izolatölerde benzer yapılar altında benzer bel vermeler çökmeler oluşur.

1.27.3.9 Uzun Dönem Düşey Bel Vermeler

HDRBr tipi izolatörler LRBr tipi izolatörlerden daha farklı bir şekilde ısıl işlem ve kürlemeye tabi olurlar ve daha fazla sürünme deplasmanlarına sahiptir. Düşük sönümlemeli kauçuk bileşenlerindeki %20'den daha az olan basınç altındaki ezilme ile kıyaslandığında, 70 ^{0}C'deki 22 saatlik yükleme sonrası ezilme %50'ye kadar yükselebilir. Bu uzun dönem bel vermelerin artışına neden olabilir ve bu tasarım yaklaşımı ile ilgili olarak üreticiden tavsiye alınmalıdır.

1.27.3.10 Rüzgâr Deplasmanları

HDRBr tipi izolatörler, rüzgar yüklerine direnmede, genellikle yüksek başlangıç kesme modülüne dayanır ve ek rüzgar güçlendirmesine ihtiyaç duymaz. Rüzgar deplasmanı, kesme gerilmesine karşılık kesme modülü grafiğindeki kauçuk bileşenine ait eğriler kullanılarak hesaplanabilir. HDRBr izolatörleri ile deprem yalıtımı yapılmış binalarda, rüzgar hareketinin neden olduğu büyük hareketler bugüne kadar rapor edilmemiştir.

1.28 İzolasyon Sistemi Tasarımı

1.28.1 Tasarım Prosedürü

Yapısal deprem yalıtım sistemleri için performans gereklilikleri ve toplam hareketlere ait limitler, optimum etkin periyot ve sönümleme seviyesini belirlemede kullanılabilir. Ne yazık ki, bu parametreleri elde etmek için gerekli ekipmanın seçimi kolay değildir. Pek çok izolasyon sistemi histerik sönümleme üretir. Hem etkin periyot hem de sönümleme deplasmanın bir fonksiyonudur. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör için bu durum Şekil 1.56'da verilmiştir. Bu deplasmana bağlılık yüzünden tasarım süreci tekrarlıdır. Bu durum Şekil 1.57'de elastomer esaslı

izolatörlü sistemler için (LRBr ve HDRBr) gösterilmiştir. Bu tip izolatörler için bir başka problem ise, periyot ve sönümlemenin deplasmana bağlı olmasının yanında, izolatör kesit ölçüsünün de deplasmanın bir fonksiyonu olmasıdır. Tekrarlı süreç şunları içerir:

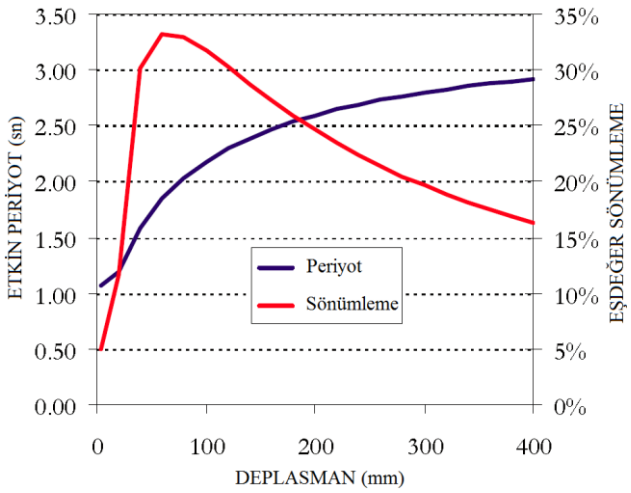
1-Her bir izolatörün binadaki lokasyonu için, düşey yüke bağlı bir kesit ölçüsü seçin ve hedef periyot ve sönümleme için bir deplasman öngörüsü yapın.
2-Öngörülen deplasmanda, etkin rijitlik, periyot ve eşdeğer viskoz sönümlemeyi hesaplayın.

3-Sismik yük parametrelerini kullanarak, bu rijitlik ve sönümleme için gerçek deplasmanı hesaplayın.

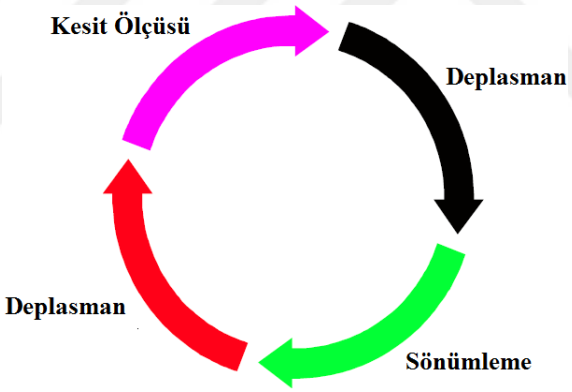
4-Gerçek deplasman için sönümlemeyi tekrar hesaplayın. Gerekli olursa 3. adımı tekrarlayın.

5-Gerekli olursa bu deplasmandaki düşey yüklerin desteklenmesi için minimum kesit ölçüsünü kontrol edin ve ayarlayın. Yakınsama sağlanana kadar bu adımlar tekrar edilmelidir.

Genellikle, elastomer esaslı izolatörler üzerinde ne kadar çok düşey yük olursa, uzun etkin periyotlar elde etmek de o kadar kolay olur. İzolatör tasarımının kompleks olması ve tasarımın deneysel yönü nedeni ile, pek çok izolatör tipi için üreticiden destek almak olağandır.



Şekil 1.56 İzolatör Performansı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).



Şekil 1.57 İzolatör tasarımı için tekrarlı prosedür, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

1.28.3 Kauçuk Özellikleri Aralığı

Deprem yalıtım izolasyonunda kullanılan kauçuk bileşenlerinin sertlik aralığı Tablo 1.21'de verilen özellikler ile beraber ve genellikle 37 ile 60 değerleri arasındadır. Bileşik yapma süreklilik arz ettiği için liste olarak verilen değerlerin arasındaki değerler de elde edilebilir. Son 10 yılda sismik talepler arttığından, yumuşak kauçuklar daha sık kullanılır oldu. Bazı üreticiler 0.30 MPa kadar düşük G

kesme modülüne sahip kauçuk üretebilmelerine rağmen, en düşük rijitlikli kauçuk yaklaşık 0.40 MPa G kesme modülüne sahiptir.

Ticari olarak 1000MPa ile 2000MPa aralığında sunulan bulk modülünün, K_∞, uygun değeri hakkında belirsizlik vardır. AASHTO-1999 standart şartnamesi 1500MPa gibi bir değeri uygun görür ve tasarım için bu değer tavsiye edilir.

Tablo 1.17 Vulkanize doğal kauçuk bileşenleri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Sertlik IRHD ±2	Young Modülü E (Mpa)	Kesme Modülü G (Mpa)	Malzeme Sabiti k	Kopma Uzaması (Min, %)
37	1.35	0.40	0.87	650
40	1.50	0.45	0.85	600
45	1.80	0.54	0.80	600
50	2.20	0.64	0.73	500
55	3.25	0.81	0.64	500
60	4.45	1.06	0.57	400

1.28.4 Düşey Rijitlik ve Yük Kapasitesi

Elastomer esaslı kauçuk izolatörde düşey rijitliği ve düşey yük kapasitesini etkileyen baskın parametre şekil faktörüdür. Ara bir kauçuk tabakanın şekil faktörü, Si, yükleme yüzey alanı ve kauçuk tabaka kalınlığı cinsinden ifade edilir:

Kare ve dairesel kesite sahip izolatörler için,

$$S_i = \frac{B}{4t_i} \tag{1.1}$$

Kurşun çekirdek için bir deliği olan, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler için.

$$S_i = \frac{A_b - A_{pl}}{\pi B_b t_i} \tag{1.2}$$

Ara bir kauçuk tabakanın düşey rijitliği aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K_{vi} = \frac{E_c A_r}{t_i} \tag{1.3}$$

Burada Ec sıkıştırma modülüdür ve aşağıdaki ifade edildiği gibi şekil faktörünün bir fonksiyonudur :

$$E_c = E\left[1 + 2kS_i^2\right] \tag{1.4}$$

Düşey rijitlik eşitliğinde Δ deplasmanında, izolatörün alt ve üstünün çakışma alanı olan, azaltılmış bir kauçuk alanı, A_r, kullanılır, bakınız Şekil 1.58;

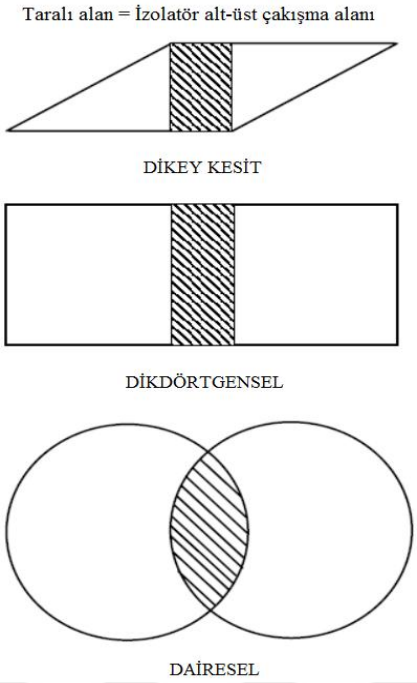
$$A_r = A_b\left(1 - \frac{\Delta}{B_b}\right) \tag{1.5}$$

Kare kesitli izolatörler için

Dairesel kesitli izolatörler için. Burada **ς,** aşağıdaki şeklinde ifade edilir.

$$A_r = 0.5\left\{B^2 \sin^{-1}\left(\frac{\varsigma}{B_b}\right) - \Delta\varsigma\right\} \tag{1.6}$$

$$\varsigma = \sqrt{\left(B_b{}^2 - \Delta^2\right)} \tag{1.7}$$



Şekil 1.58 İzolatörlerde etkin çakışma (sıkıştırma) alanı, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Etkin sıkıştırma modülü, E_c, bulk modülü, E_∞ , değerine kıyasla büyükse, düşey rijitliği hesaplamak için bulk modülüne bağlı düşey deformasyon E_c'yi $1+(E_c/E_\infty)$ bölümü şeklinde dahil edilir.

Düşey rijitliğin, izolatörlerin içindeki düşey deformasyonların hesaplanmasında kullanıldığı, ancak düşey yüke bağlı kesme gerilmelerinin kullanılmadığı durumlarda, bulk modülü etkileri kullanılır. AASHTO-1999 standart kodu bu durum için bir istisnadır.

1.28.5 Sıkıştırma Dereceli Yük Kapasitesi

Düşey yük kapasitesi, elastomer içindeki tüm kaynaklardan gelen tüm kesme gerilmelerinin toplanması ile hesaplanır. Daha sonra toplam gerilme, elastomerin nihai kopma uzamasının, yük koşuluna uygun emniyet faktörüne bölümü ile sınırlandırılır.

Düşey yüklerden, E_{sc}, gelen kesme gerilmesi şu şekilde hesaplanır:

$$\varepsilon_{sc} = 6S_i\varepsilon_c \tag{1.8}$$

Ki burada ε_c şöyle ifade edilir:

$$\varepsilon_c = \frac{P}{K_{vi} t_i} \tag{1.9}$$

İzolatör rotasyonlara zorlanırsa, buna bağlı kesme gerilmesi :

$$\varepsilon_{sr} = \frac{B_b^2 \theta}{2 t_i T_r} \tag{1.10}$$

Yanal yüklere bağlı kesme gerilmesi:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\Delta}{T_r} \tag{1.11}$$

Sabit ve hareketli yük gibi servis yükleri için AASHTO 14.5.1P ile belirlenmiş gerilme sınırlandırma kriteri:

$f\varepsilon_u \geq \varepsilon_{sc}$ ki burada, f = 1/3 (Emniyet faktörü 3)

Deprem deplasmanlarının da dahil edildiği nihai yükler:

$f\varepsilon_u \geq \varepsilon_{sc} + \varepsilon_{sh}$ ki burada, f = 0.75 (Emniyet faktörü 1.33)

Bu iki denklemi birleştirirsek, Δ deplasmanındaki, P_γ maksimum düşey yükü:

$$P_\gamma = \frac{K_{vi} t_i (f\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{6 S_i} \tag{1.12}$$

UBC gibi Standard kodlar, binalar ve diğer köprü dışı yapılarda, elastomer esaslı yük kapasitesinin hesaplanması ile ilgili özel gereklilikler içermez. Yük kapasitesi hesabında genellikle, f = 1.0 değerinin kullanıldığı maksimum deprem deplasmanı tasarımı istisnası ile, AASHTO standart kodu toplam gerilme formülü kullanılır.

1.28.5.1 AASHTO-1999 Teknik Şartnamesi Gereklilikleri

AASHTO-1999 standart kodları genellikle aynı formülleri kullanır ancak iki ayrı düzenleme içerir:

1.Toplam gerilim, nihai uzamanın bir fonksiyonu olmaktan daha çok herhangi bir yükleme kombinasyonu için sabit bir değerdir. AASHTO-1999 şartnamesi, depremsel olmayan deformasyonlar, $\varepsilon_{s,s}$ nedeniyle oluşan bir gerilimi ve depremin sebep olduğu desplasmanlar, $\varepsilon_{s,eq}$ yüzünden oluşan bir gerilimi tanımlar. Bu tanımların sınırları şöyledir;

$$\mathcal{E}_{sc} \leq 2.5$$
$$\mathcal{E}_{sc} + \mathcal{E}_{s,s} + \mathcal{E}_{sr} \leq 5.0$$
$$\mathcal{E}_{sc} + \mathcal{E}_{s,eq} + 0.5\,\mathcal{E}_{sr} \leq 5.5$$

2.Basınç nedeniyle oluşan kesme gerilmesi, ε_{sc} maksimum şekil faktörünün bir fonksiyonudur.

$$\varepsilon sc = \frac{3SP}{2ArG(1+2kS^2)} \tag{1.13}$$

S≤15 için,

$$\varepsilon sc = \frac{3P(1+\frac{8GkS^2}{E\infty})}{4GkSAr} \tag{1.14}$$

veya S>15 için, S≤15 için kullanılan formül S>15 için E=4G kabulü kullanılarak tekrar düzenlenir. S>15 için düzenlenen bu formül $(1+2kS^2)=2kS^2$ yaklaşımına sahiptir ve bulk modülü(hacim modülü) etkileri için düşey rijitliğe ayarlıdır.

Deprem izolatörü yük kapasitesinin hesaplamalarında bulk modülü konusunda yaygın genel bir mutabakat yoktur ve bu durumda ilgili özellikleri tanımlamak gerekirse AASHTO-1999 standart şartnamesinde kullanılan formüllerin kullanımı önerilmektedir**.**

1.28.6 Yükleme Kapasitesi Hızına Bağlı Çekme

Çekme yükleri altındaki deprem izolatörleri için gerilme altında rijitlik, basınç altında olduğu gibi şekil faktörüne bağlıdır ve basınç rijitliğine benzer bir yaklaşıma sahiptir. Bu yüzden aynı formüller gerilmelerin mutlak değerler toplamı hariç basınç yüklerinde olduğu gibi kullanılır.

Kauçuk 3G hidrostatik bir gerilmeye maruz kaldığında kavitasyon oluşur. Bu durumda rijitlik hızlı bir şekilde düşecektir. Oluşan ciddi boyuttaki boşluklar nedeniyle zayıf yırtılma dayanımlı kauçuklar genellikle aniden kopmazlar. Bununla birlikte sonraki mukavemet bileşeni ve kauçuğun rijitliği bu durumdan etkilenir. Böylece deprem izolatörü tasarımı herhangi bir yük koşulu altında çekme gerilmeleri 3G'yi aşmayacağından emin olunarak yapılmalıdır.

1.28.7 Burkulma Yük Kapasitesi

Kesit ölçüsüne kıyasla yüksek kauçuk kalınlığına sahip deprem izolatörleri için elastik burkulma yükü çok kritik bir öneme sahiptir. Burkulma yükü, aşağıda verilen Harings denklemi kullanılarak hesaplanır.
Atalet momenti, I, şu formüllerle hesaplanır;

Kare kesitli deprem izolatörleri için atalet momenti formülü,

$$I = Bb^4 / 12 \tag{1.15}$$

Dairesel kesitli deprem izolatörleri için atalet momenti formülü,

$$I = \pi Bb^4 / 64 \tag{1.16}$$

burkulmanın olmadığı durumlarda, deprem izolatörlerinin alt ve üst montaj plakaları arasında kalan yükseklik şu formülle hesaplanır;

$$H_r = (nt_i) + (n-1)t_{sh} \tag{1.17}$$

Etkili elastik bir burkulma modülü, deprem izolatörü iç kauçuk tabakalarının şekil faktörünün ve elastik modülünün bir fonksiyonu olarak tanımlanır:

$$E_b=E(1+0.742S_i^2) \tag{1.18}$$

T, R ve Q aşağıdaki formüllerle hesaplanır;

$$T=E_bIH_r/T_r \tag{1.19}$$

$R=K_rH_r$

$$Q=\pi/H_r \tag{1.20}$$

0 deplasmandaki burkulma yükünden hareketle Pcr^0 şöyle hesaplanır;

$$P^0_{kritik}=\frac{R}{2}\left[\sqrt{1+\frac{4TQ^2}{R}}-1\right] \tag{1.21}$$

Uygulanan bir kesme kuvveti deplasmanı için 0 deplasmandaki kritik burkulma yükü deprem izolatörünün üst yükleme plakasının alt yükleme plakasını karşılayan etkili iz düşüm alanının azalmasına bağlı olarak azalır.

$$P^V_{kritik}=P^0_{kritik}\frac{A_r}{A_g} \tag{1.22}$$

Deprem izolatörü üzerine gelen izin verilebilir düşey, yük nominal yük P'den veya burkulma yükünden daha küçüktür.

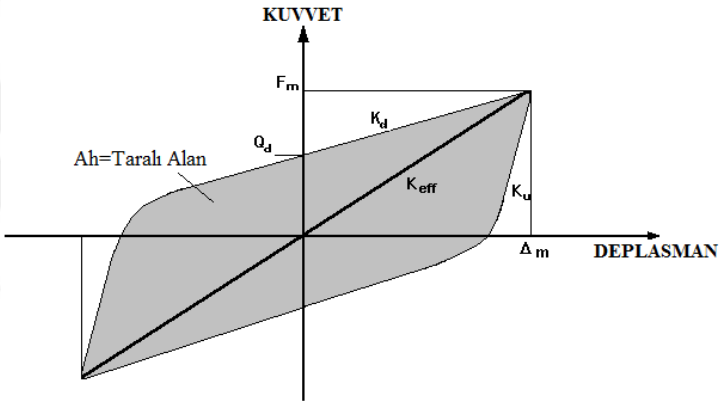
1.28.8 Deprem İzolatörleri İçin Yatay Rijitlik ve Histeresiz Parametreleri

Yüksek sönümleyicili kauçuktan üretilmiş olan kurşun çekirdekli ve kauçuk esaslı deprem izolatörleri doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisine sahiptir. Bu ilişki tanımlı bir deplasmandaki ortalama etkin rijitlik ve sistem tarafından sağlanan histerik sönümlemeyi tarif eden bir histeresiz döngüsü ile tanımlanır. Kurşun çekirdekli bir deprem izolatörü için tipik bir histeresiz döngüsü şekil 1.59'da gösterilmiştir.

Tasarım ve analiz için bu 1.59'da verilen şekil histeresiz döngü şekli, genellikle yüklemenin olmadığı durumdaki elastik rijitlik K_u ve elastiklik ötesi akma rijitliği K_d'nin bir sonucu olan bilineer eğri ile gösterilir. Elastiklik ötesi rijitlik K_d elastomer esaslı izolatörlerinin rijitliğine eşittir. 0 deplasmandaki durdurucu kuvvet Q_d karakteristik mukavemet olarak tanımlanır;

$$Q_d=\sigma_y A_{pl} \tag{1.23}$$

Teorik olarak kurşun çekirdeğin akma seviyesi, σ_y, 10.5 MPa'dır. Fakat deprem izolatörünün kullanılan akma mukavemeti düşey yüke ve kurşun çekirdek çapına bağlı olarak genellikle 7 MPa ile 8 MPa arasında varsayılır.



Şekil 1.59 Kurşun çekirdekli deprem izolatörleri için histeresiz döngüsü, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Elastiklik ötesi rijitlik K_d, elastomer esaslı deprem izolatörünün kesme rijitliğine eşittir.

$$K_r=\frac{G_\gamma A_r}{T_r} \tag{1.24}$$

Yüksek sönümlemeli kauçuk esaslı izolatörler HDRBr için kesme modülü G_γ, kesme gerilmesi γ'nin bir fonksiyonudur. Fakat tabii kauçuktan üretilmiş olan ve standart kür uygulanmış olan kurşun çekirdekli deprem izolatörleri için bunun gerilmeden bağımsız olduğu farz edilir.

Elastik (veya yüksüz) rijitlik aşağıdaki gibi tanımlanır;

Elastomer esaslı deprem izolatörleri için;

$$K_u=K_r$$

$$K_u = 6.5K_r\left(1+\frac{12A_{pl}}{A_r}\right) \tag{1.25}$$

Kurşun çekirdekli kauçuk

$$K_{u=}25K_r \tag{1.26}$$

Kurşun çekirdekli deprem izolatörleri için K_u ile ilgili birinci formül yüksüz döngülerin başlangıç kısmı için doğru bir rijitlik yaklaşımı sağlamaya dönük, K_u 1980'lerde taralı alana karşılık gelen histeresiz döngüsünü hesaplamak için amprik bir formül olarak geliştirildi. Orijinal formülleri geliştirmek için kullanılan deprem izolatörlerinde genellikle kauçuk tabaka kalınlıkları 12.7mm olarak alındı. Daha sonraki K_u formülünde gösterilen çoğu yeni deprem izolatörü projelerinden elde edilmiş test sonuçları, çoğu kurşun çekirdekli LRBr için K_u için olan değerden daha gerçekçi bir tahmini değer verir.

Belirli bir deplasmanda izolatörlerdeki kesme kuvveti şu formüllerle hesaplanır;

$$F_m = Q_d + K_r\Delta \tag{1.27}$$

Buradan hareketle etkin rijitlik, K_{eff} şu formülle hesaplanır;

$$K_{eff} = \frac{F_m}{\Delta} \tag{1.28}$$

Bütün izolatörlerin etkin rijitliğinin toplamı, etkin tepki periyodu aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$T_e = 2\pi\sqrt{\frac{W}{g\Sigma K_{eff}}} \tag{1.29}$$

Deprem tepkisi periyot ve sönümlemenin bir fonksiyonudur. Yüksek sönümlemeli (HDRBr) ve kurşun çekirdekli LRBr deprem izolatörleri histerik sönümleme sağlarlar. HDRBr deprem izolatörleri için histeresiz döngü alanı γ gerilme seviyeleri için testlerden ölçülür ve viskoz sönümleme β aşağıda verilen formülle hesaplanır.

LRBr deprem izolatörleri için ise histeresiz alanı, Δ_m deplasman seviyesinde aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$A_h = 4Q_d(\Delta_m - \Delta_y) \tag{1.30}$$

Bu eşitlikten viskoz sönümleme β aşağıdaki formülle bulunur;

$$\beta = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{A_h}{K_{eff}\Delta^2}\right) \tag{1.31}$$

İzolatör deplasmanı etkili periyot, eşdeğer viskoz sönümleme ve spektral ivme cinsinden şöyle hesaplanabilir;

$$\Delta_m = \frac{S_a T_e^{\,2}}{4\pi^2 B} \tag{1.32}$$

Burada S_a, T_e etkin periyodundaki spektral ivmedir ve AASHTO veya UBC standart şartnamelerinden elde edilen β'nın bir fonksiyonu olan B sönümleme faktörüdür. Bu yüzden maksimum deplasmanlar için çözüm tekrarlı bir prosedür içerir.

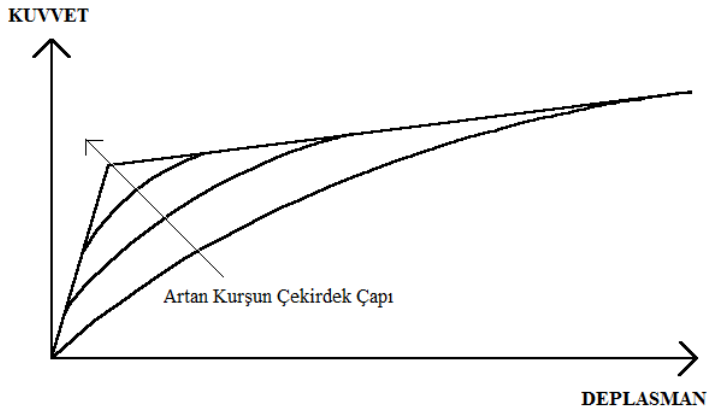
1.28.9 Kurşun Çekirdeğin Deprem İzolatörü İçine Yerleştirilmesi

Bir elastomer deprem izolatörünün düşey eksende içine silindirik bir kurşun çekirdek yerleştirmenin etkisi elastomer deprem izolatörü için histeresiz döngüye sahip bir elasto-plastik sistem ilave etmek demektir. Kurşun çekirdek, teorik olarak 10.5 MPa'lık akma seviyesine sahip olan kurşunun kesme kuvveti etkisi altında akmasının bir fonksiyonudur ve kurşunun kesitine bağlıdır. Kurşun çekirdeğin kesiti arttıkça çekirdeğin histeresiz alanı Şekil 1.60'ta gösterildiği gibi daha çok elasto-plastik bir sisteme doğru hareket edecektir. Kurşun çekirdeğin izolatör içine yerleştirilmesi üç farklı mekanizma ile olur;

1-Deprem izolatöründeki iç çelik plakaların dayandığı ve kauçuk tabakalarının şişmesinin engellendiği izolatör içine çakılmış bir kurşun çekirdekten ibarettir.2-Kurşun çekirdek, izolatörün üst ve alt plakaları arasına hapsedilerek sabitlenmiş olarak yerleştirilir.

3-İzolatör üzerinde düşey basınç yüklerini taşıyacak şekilde kurşun çekirdek izolatöre monte edilir.

Kurşun çekirdeğin izolatör iç plakaları tarafından sınırlanması izolatör kauçuk tabakalarının kalınlığının düşmesiyle artırılır ki bu iç çelik plakalarının artışı kurşun çekirdeğin daha iyi bir şekilde sınırlandırılıp hapsedilmesini sağlar. Kurşun çekirdeği izolatörün içine monte etmek için kurşun çekirdek izolatörlerin alt ve üst montaj plakalarına cıvatayla sabitlenerek montajlanır, ancak bugünkü tecrübe ise, kurşun çekirdeğin izolatör montaj plakalarına yapıştırılarak kullanımının daha uygun olduğu noktasındadır. Etkin rijitlik ve histeresiz döngü alanı döngü tekrar sayısıyla azalır. Etkin rijitlik eksenel yük seviyesinden görünür şekilde ana hatlarıyla bağımsızdır. Fakat düşey yüke oranla histeresiz alanı düşey yükle orantılı olarak değişir. Bazı deprem izolatörlerinde deprem sırasında depremin ürettiği yüklerin artışına bağlı olarak histeresiz döngü alanı azalacaktır. Bununla birlikte, aynı zamnada diğer deprem izolatörlerinde anlık olarak depremin ürettiği ve deprem etkilerinin sebep olduğu basınç yüklerinde artış olacaktır ve böylece histeresiz döngü alanı artacaktır. Net etki, ortalama ölü bir yüke bağlı olan toplam histeresiz alanında küçük bir değişiklik olacaktır.



Şekil 1.60 Kurşun çekirdek çapının etkileri, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

Kurşun çekirdeğin deprem izolatörün içine yerleştirilmesi, kurşun çekirdeğin deprem sırasındaki deformasyonu plastik bir şekilde akması gibi ve elastomerin sıkıştırılabilir bir katı olması kabulü gibi karmaşık bir mekanizmadır. Üreticiler genellikle kendi geliştirmiş oldukları protiplerden elde ettikleri verilere ve test

sonuçlarına güvenirler. Bu daha sonra prototip testler ile kanıtlanır. Uzun süreli yüklemeler için kurşun çekirdek sürünecektir ve çekirdek üzerindeki maksimum kuvvet, aniden tatbik edilen yükler altındaki akma kuvvetinden daha az olacaktır.

Depremsel olmayan deplasmanların olduğu köprü gibi yapılar için bu tip izolatörler kullanılabilir. Bu özellik, genleşmenin, büzülmenin, sürünmenin ve sıcaklık etkilerinin sebep olduğu maksimum kuvvetlerin oluştuğu deprem izolatörleri için uygun olacaktır. Yavaş yükleme hızlarında yapılan deprem izolatörü testler, ani yüklemede kurşun çekirdekte meydana gelen kuvvetlerin yaklaşık dörtte biri maksimum kuvvetleri oluşturacağını ve kurşun çekirdekte meydana gelen gerilim gevşemesinin saniyelerce olan sürelerden daha çok saatleri aşan sürelerde izolatöre yük uygulanabileceğini göstermektedir. Bu yüzden, izolatöre yavaş yavaş uygulanan yükler için kurşun çekirdeğe gelen maksimum kuvvetin $F=0.25Q_d$ olduğu kabul edilmektedir.

1.28.10 Tasarım Prosedürü

Başlangıç izolatör ölçüleri, deformasyona uğramamış izolatörde maksimum düşey yükler altında, emniyet faktörünün üç olduğu prensibine dayanarak belirlenir. Bu durumda, kauçuk tabakalarının sayısı ve kurşun çekirdeğin ölçüleri izolatörden beklenen gerekli sismik performansı elde etmek için deneme yanılma prosedürü ile belirlenir. Sönümleme deplasmanın bir fonksiyonu olduğu için tasarımlar tekrarlı bir prosedürü gerekli kılar, bu prosedür için ana başlıklar aşağıda verilmiştir:

1-Başlangıç noktası olarak toplam kauçuk kalınlığı kullanılarak bir deplasman farz edilir.

2-Öngörülen bu deplasman için izolatörün etkin rijitliği hesaplanır.

3-Toplam sismik kütle ve sismik periyot kullanılarak etkin periyot hesaplanır.

4-Eşdeğer viskoz sönümleme histeresiz döngü alanı kullanılarak hareketle hesaplanır. HDRBr için sönümleme ve kesme modülü, kesme gerilmesine karşılık gelen bu miktarların tablolaştırılmış değerlerinden hesaplanır.

5-Sönümleme faktörü B, eşdeğer viskoz sönümleme için hesaplanır.

6-Spektral deplasman, sönümleme fakötürü B tarafından modifiye edilmiş etkili periyottaki ivme-tepki spektrumundan hesaplanır.

7-Bu elde edilen spektral deplasman, yukarıdaki birinci adımda farz edilen deplasmanla kıyaslanır. Eğer fark önceden belirlenen sınırları aşıyorsa, hesaplanan deplasman yeni bir başlangıç deplasmanı tanımlar ve bu prosedür bir noktada birleşinceye kadar tekrar edilir. Sismik performans, hem tasarım seviyesi ve hem de maksimum sismik parametreler için değerlendirilir.

1.28.11 Deprem Yalıtımı Uygulanmış Bazı Örnek Projeler

Tablo 1.18 Deprem yalıtımı uygulanmış bazı örnek projelere ait değerlendirmeler, (Holmes Consulting Group Ltd, 2010).

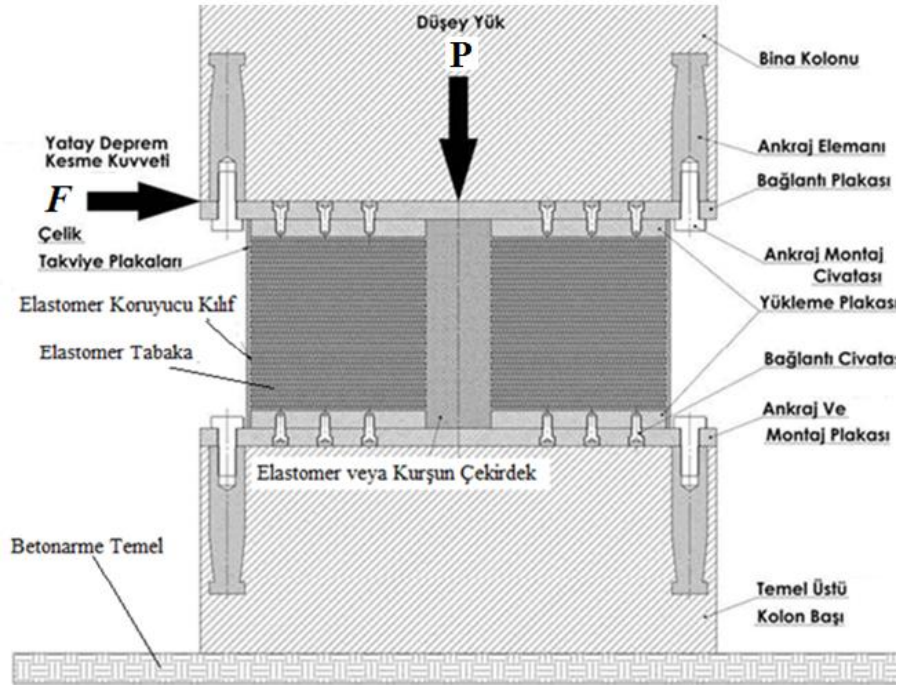
			İVME		
Yalıtılmış Yapı	**İzolatör Tipi**	**Deprem Adı**	**Serbest Saha (g)**	**Yapı (g)**	**Değerlendirme**
USC Hastanesi	LRBr	1994 Northridge	0.49	0.21	Tahmin edilen hareket 45mm'ye kadar. Binada hasar yok, binanın kullanımı devam ediyor.
LA Eyalet Yangın Komuta Merkezi	HDBr	1994 Northridge	0.22 E-W 0.18 N-S	0.35 E-W 0.09 N-S	Az taban hasarı. Binanın kullanımı devam ediyor.
Seal Sahil Binası	LRBr	1994 Northridge	0.08	0.15	Hasar yok, sistem aktif değil.
Foothills Adalet Sarayı	HDBr	1994 Northridge	0.05	0.10	Hasar yok, sistem aktif değil.
Batı Los Angeles Rezidansı	Yay	1994 Northridge	0.44	0.63	Yapısal hasar yok, diletasyon yerlerinde biraz hasar var. Alışılmadık bir yalıtım sistemi.
Tohuku Elektrik Santrali	LRBr Altına Çelik Damper	1995 Kobe Depremi	0.31	0.11	Hasar yok, tahmin edilen hareket 120mm.
Matsumura Gumi Laboratuvarı	HDBr	1995 Kobe Depremi	0.28	0.27	0 C derecede izolatörler sertleşti.
Stanford Doğrusal Hızlandırıcı	LRBr	1989 Loma Prieta	0.29	0.14	Cihazsız, tahmin edilen tepki. Tahmin edilen hareket 100mm.
Bai-Ho Köprüsü	LRBr PTFE	1989 Tayvan Depremi	0.7 L 0.18 T	0.18 L 0.26 T	Sadece boyuna yalıtım.
Matsunohama Köprüsü	LRBr	1995 Kobe Depremi	0.15 L 0.14 T	0.20 L 0.36 T	Sadece boyuna yalıtım.
Bolu Viyadüğü	PTFE Hilal Ay Enerji Yutucusu	1999 Kocaeli, Türkiye	+1.0		Deplasmanlar 500mm'lik izolatör limitlerini aştı ve hasara sebep oldu.
Eel Nehri Köprüsü	LRBr	1992 Cape Mendocino	0.55 L 0.39 T	Ölçüm Yok.	Tahmin edilen ivme gerçekleşti. Tahmin edilen hareket boyuna 200mm,enine 100mm. Birleşim yerlerinde az hasar oluştu.
İzlanda'da dört köprü	LRBr	Haziran 2000, M6.6 ve M6.5	0.84	Ölçüm Yok.	Hasar yok.
Te Teko Köprüsü, Yeni Zelanda	LRBr	1987 Edgecumbe	0.33		Tahmin edilen ivme. Tahmin edilen deplasman 100mm. Köprü kenar ayakları yerinden oynadı, küçük hasar oluştu.

Günümüzde taban yalıtımı uygulanmış olan sismik izolasyon yapılmış örnek projeler Tablo 1.22'de verilmiştir.

BÖLÜM İKİ
BASINÇ YÜKÜ ALTINDA DEPREM İZOLATÖRLERİNE GELEN KUVVETLER

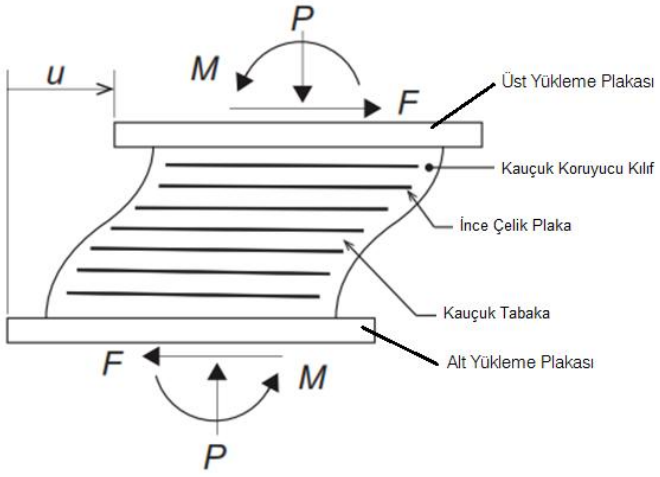
2.1 Çok Tabakalı Elastomer Esaslı Deprem İzolatörleri

Bir taban yalıtım sisteminin düşey frekansı, deprem yalıtım projelerinin hazırlanmasında bir yapının titreşim yalıtımı için en önemli tasarım krıteridir. Bu söz konusu düşey frekans, taban yalıtım sistemini oluşturan deprem izolatörlerinin düşey rijitliği tarafından kontrol edilmektedir. Deprem yalıtımı sistemini tasarlayan mühendisler belirli bir ölü yük altındaki izolatörlerin düşey rijitliğini tahmin edebilmeleri için sadece hesap yapmaya gereksinim duyarlar ve bu tür hesaplamalar için doğrusal analiz yöntemleri yeterlidir.



Şekil 2.1 Bina kolonu altına yerleştirilmiş elastomer esaslı bir deprem izolatörünün düşey ve yatay yükler altındaki kesit resmi

Düşey yük altındaki bir deprem izolatörünün başlangıç tepkisi tamamen doğrusal olmayan bir tepkidir ve birkaç farklı faktöre bağlıdır. Normal olarak, deprem izolatörleri düşey rijitliklerinden önce yan yana ve üst üste tabaka tabaka dizilişleri sayesinde dayanıklı bir yapıya sahiptirler. İzolatörlerin ince çelik plakaların kauçuk tabakalarla ardışık olarak üst üste dizilişleri nedeniyle deprem izolatörleri düşey yönde oldukça rijit olarak ve yatay yönde istenilen kadar esnektirler. Deprem izolatörlerinin düşey yönde rijit oluşlarının nedeni ince çelik plakalardır ve yatay yönde esnek olmalarının sebebi de kauçuğun özellikleridir(Şekil 2.1 ve 2.2'ye bknz.). Deprem izolatörlerinin tasarım için izolatörlerin burkulma davranışlarının analiz edilebilmesi de diğer bir önemli özelliğidir. Bu tür analizleri yapabilmek için basınç altındaki deprem izolatörünün eğilme momentine tepkisi bilinmesi gereklidir.



Şekil 2.2 Düşey (P) Yükü ve Yatay (F) yükü altında elastomer esaslı deprem izolatöründe oluşan momentin (M) şematik gösterimi

2.2 Sıkıştırılamaz Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altında Davranışı

Yük altındaki elastomer esaslı bir deprem izolatörünün düşey rijitliği K_V, aşağıda verilen formülle hesaplanır;

$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \tag{2.1}$$

Burada *A* izolatörün yükleme kesit alanıdır, *t* ise çok tabakalı bir deprem izolatöründe kauçuk tabakalarının toplam kalınlığıdır ve *Ec*, belirli bir seviyede düşey yük altındaki kauçuk çelik tabakalarının üst üste dizilmesiyle oluşan elastomer esaslı izolatörlerde meydana gelen anlık sıkıştırma modülüdür. Tek bir kauçuk tabakası için hesaplanan Ec modulü, şekil faktörü S, tarafından kontrol edilir.

S= yüklü alan / yüksüz alan (2.2)

oranı olup tek bir kauçuk tabakası için hesaplanır ve boyutsuz bir büyüklüktür.

Örneğin;

1- Genişliği 2b ve kalınlılğı t, olan sonsuz bir kauçuk şerit için *S* şekil faktörü hesabı;

$$S = \frac{b}{t} \tag{2.3}$$

2- Yarıçapı *R*, kalınlığı *t*, olan dairesel bir elastomer esaslı deprem yastığı için şekil faktörü,*S*,

$$S = \frac{R}{2t} \tag{2.4}$$

3-Kenar uzunlukları 2*b* ve *l* ,kalınlığı *t* olan dikdörtgen bir deprem yatsının şekil faktörü, *S*, ise,

$$S = \frac{bl}{(l + 2b)t} \tag{2.5}$$

4- İç çapı, *a*, dış çapı, *b*, ve kalınlığı *t* olan dairesel bir deprem yastığının şekil faktörü,*S*, ise,

$$S = \frac{b - a}{2t} \tag{2.6}$$

Basınç rijitliğini ve eğilme rijitliğini önceden hesaplayabilmek için doğrusal elastik teori (lineer elastik teori) kullanılır. Basınç rijitliğnin ilk analizi, Recard (1937) tarafından enerji yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır ve daha ileri geliştirmeler ise, Gent ve Lindley (1959) ve Gent ve Meinecke (1970) tarafından yapıldı. Burada verilen teori, bu analizlerin bir modelidir ve şekil faktörü, S'in 5'ten daha büyük olması koşulu ile deprem izolatörlerine uygulanabilir.

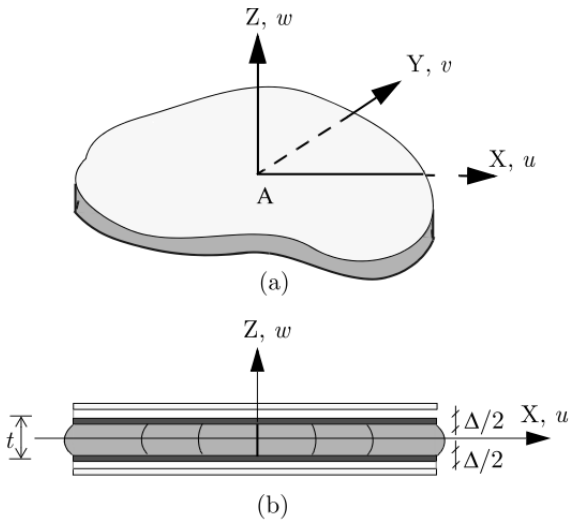
Basınç ve eğilme rijitliği için yapılan analizler, iki grup faraziyeye dayanan bir yaklaşımdan ibarettir; birinci grup yaklaşım deformasyonun kinematiğine dayanır ve ikinci grup yaklaşım ise stres durumuna dayanır. Doğrudan basınç ve kinematik yaklaşımlar aşağıdaki gibidirler:

a-Yüklemeden sonra, bir parabol üzerinde, düşey bir hat üzerindeki noktalar, deformasyondan önceki basınç ve kinematik yaklaşımı temsil ederler.

b-Yatay düzlemler yatay kalırlar.

Gelişi güzel şekilli ve kalınlığı t olan tek bir kauçuk tabakasını göz önüne alalım ve bu kauçuk tabaka Şekil 2.3 (a) da gösterildiği gibi yerleştirilsin, kauçuk tabakanın tam ortasında dikdörtgen bir kartezyen koordinat sistemi (x,y,z) yerleştirildiğini farzedelim; Yukarıda tanımlanan kinematik kabuller doğrultusunda Şekil 2.3 de gösterildiği gibi koordinat doğrultularındaki *(u, v, w)* deplasmanları aşağıdaki formüllerle ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$u(x,y,z) = u_0(x,y)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)$$
$$v(x,y,z) = v_0(x,y)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)$$
$$\omega(x,y,z) = \omega(z) \qquad (2.7)$$



Şekil 2.3 (a)Gelişigüzel seçilmiş bir kauçuk tabakası üzerinde kartezyen koordinat sistemi, (b)Gelişigüzel seçilmiş bir kauçuk tabakasında meydana gelen deplasman alanı,(Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Burada deplasman alanı, iki rijit çelik levha arasına yapıştırılmış olan elastomer tabakasını alttan ve üstten zorlamaktadır. Buradan kauçuğun sıkıştırılamazlık kabulü ile üç ayrı gerilme zorlaması bileşeni üzerinde oluşan daha ileri seviyede zorlama gerilmelerini aşağıdaki gibi yazılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\mathcal{E}_{xx} = \partial u/\partial x,\ \mathcal{E}_{yy} = \partial v/\partial y,\ \mathcal{E}_{zz} = \partial w/\partial z\ ,$$

$$\mathcal{E}_{xx} + \mathcal{E}_{yy} + \mathcal{E}_{zz} = 0 \tag{2.8}$$

Yukarıdaki (2.7) deki eşitlikte bu verilen değerlerden hareketle aşağıdaki düzenleme yapılabilir;

$$\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y}\right)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right) + \frac{d\omega}{dz} = 0 \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} = \frac{1}{1 - \dfrac{4z^2}{t^2}}\,\frac{d\omega}{dz} \tag{2.10}$$

Bu denklemin her iki tarafı k gibi bir sabite eşitlenirse, bu eşitlikten k sayısı hesaplanabilir;

$$\frac{d\omega}{dz} = -k\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right) \tag{2.11}$$

Bu denklemden hareketle,

$$\omega(z) = -k\left(z - \frac{4z^3}{3t^2}\right) + c$$

$$\omega(t/2) = -\Delta/2, \omega(-t/2) = \Delta/2 \tag{2.12}$$

$$c = 0, k = 3\Delta/2t = 3\varepsilon_c/2$$

Burada ***c*** integral sabitidir, sınır şartları olarak yukarıda verilen değerler yazılırsa, aşağıdaki formülden basınç gerilmesi $\boldsymbol{\varepsilon_c}$, hesaplanabilir, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$\varepsilon_c = \frac{\omega(t/2) - \omega(-t/2)}{t} -, (\varepsilon_c > 0) \tag{2.13}$$

Yukarıdaki formülde, basınç zorlaması altındaki kauçuk tabaksının deplasmanı ω ile ifade edilmiştir.

Kauçuk tabaka içindeki gerilmenin, normal gerilme bileşenleri σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , olacak şekilde yazılır ve bu iç gerilmelerin ***p*** iç basınç tarafından domine edildiği farz edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_{xx} \simeq \sigma_{yy} \simeq \sigma_{zz} \simeq -P\left(1 + O\left(\frac{t^2}{l^2}\right)\right) \tag{2.14}$$

Bu gerilim kabulü faraziyesi, bize "basınç çözümü" adında bir çözüme ulaştırır. Deprem izolatörüne ait tek bir kauçuk plakasının alt ve üstünde üretilen kesme gerilmesi bileşenleri, τ_{xz} ve τ_{yz}'nun $(t/l)p$ zorlaması ile oluştuğu farz edilir, yatay kesit düzlemindeki kesme gerilmesi, τ_{xy}'nin ise, $(t^2/l^2)p$ zorlaması ile olduğu kabul edilmektedir. Bu gerimler altında eşitlik denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \tag{2.15}$$

Yukarıda verilen ilk iki eşitlikte, eğer σ_{xx} , σ_{yy} yerine (-*p*) yazılırsa bu kabuller altında ilk iki formül değişikliğe uğrar.

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial y} \tag{2.16}$$

Yukarıdaki denklemlerden üçüncüsü olan eşitlikte z'ye göre tüervi alınırsa ve denklem (2.16)da yerleştirilse bu denklem (2.17) de verilen denkleme dönüşmüş olur.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \nabla^2 p = \frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial z^2} \tag{2.17}$$

Burada elastomer malzmenin lineer elastik olduğu kabul edilmiştir ve kesme gerilmeleri τ_{xz} ve τ_{yz}'nun, kayma gerilmeleri γ_{xz} ve γ_{yz} cinsinden yazılmasıyla denklem (2.18) deki eşitlik elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\tau_{xz} = G_1 \gamma xz, \tau_y z = G\gamma_{yz} \tag{2.18}$$

Buradan hareketle (2.19) da aşağıda verilen kauçuğun *G* kayma modülü eşitliği elde edilir, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y}$$

$$\tau_{xz} = \frac{8G}{t^2} z u_0, \tau_{yz} = \frac{8G}{t^2} z v_0 \tag{2.19}$$

Böylece, yukarıdaki (2.19) eşitliğinden de (2.20) denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{8G}{t^2}u_0, \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{8G}{t^2}v_0 \tag{2.20}$$

Kauçuğun sıkıştırılamazlık şartları göz önüne alınarak u_0 ve v_0 eşitliklerde yerlerine yazılarak (2.21) de verilen denklem bulunur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{t^2}{8G}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}\right) = -\frac{3\varepsilon_c}{2} \tag{2.21}$$

ve bu denklemden (2.22) deki eşitlik elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \nabla^2 p = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \tag{2.22}$$

Şekil 2.3 de gösterilen elastomer tabakası alanı üzerinde *p(x, y)* tarafından kısmi diferansiyel denklem elde edilir.

Sınır şartları olarak, tüm kauçuk tabakası kenarlarında *p(x, y) için*, $p = 0$ alınır ve E_c'yi elde edebilmek için bu sınır değerler kullanılarak kauçuk tabakasına uygulanan P normal yükü ve bu yükün uygulandığı alan A cinsinden aşağıdaki sıkıştırma modülü $\boldsymbol{E_c}$ ile ilgili aşağıdaki denklem elde edilir;

$$E_c = \frac{P}{A\varepsilon_c} \tag{2.23}$$

Yukarıda verilen (2.22) deki denklemde bu üçüncü eşitlikteki değerler yerlerine yerleştirilerek bir kauçuk tabakası kalınlığı üzerindeki normal gerilme dağılımları cinsinden aşağıda (2.24)' deki denklem bulunur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial z^2} = \frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \tag{2.24}$$

2.2.1 Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Analizi

Şekil 2.4 de verilen *R* yarıçaplı dairesel kesitli ve elastomer esaslı deprem izolatörüne ait bir kauçuk tabakanın *P* yükü altındaki davranışı aşağıda (2.25) de verilen denklemle ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2 p = \frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{ldp}{rdr} = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2}, r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2.25}$$

ve (2.25) de verilen genel denklem aşağıdaki gibi olur;

$$p = A \ln r + B - \frac{3G\varepsilon_c}{t^2} r^2 \tag{2.26}$$

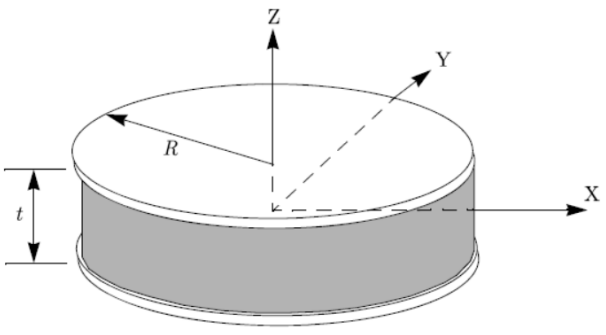
ve elastomer esaslı tek bir izolatör kauçuk tabakasının analatik çözümü $r = R$, de p ve $r = R$ de $p = 0$ sınırları için yapılır.

$$p = \frac{3G\varepsilon_c}{t^2}\left(R^2 - r^2\right) \tag{2.27}$$

$$p = 2\pi \int_0^R p(r) r dr = \frac{3G\varepsilon_c \pi R^4}{2t^2} \tag{2.28}$$

Yukarıda verilen denklemlerde $S=R/(2t)$ ve $A=\pi R^2$ yazılarak (2.29) formülü ile E_c'yi elde ederiz, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = 6GS^2 \tag{2.29}$$



Şekil 2.4 R yarıçaplı dairesel bir izolatör kauçuk tabakası için koordinat sistemi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

2.2.2 Dikdörtgen veya Kare Kesitli Deprem İzolatörünün Analizi

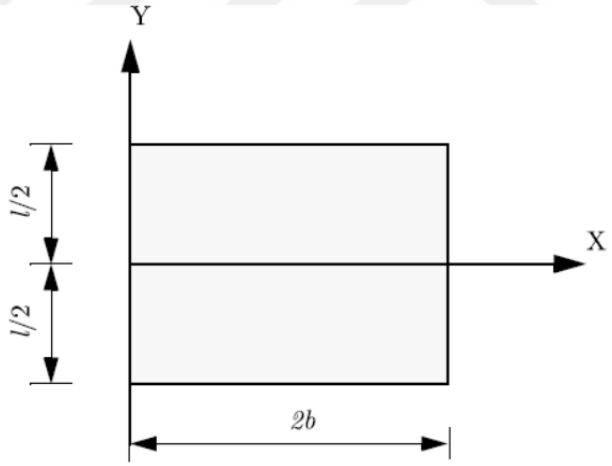
Şekil 2.5 de gösterildiği gibi, genişliği *2b* ve uzunluğu *l* olan dikdörtgen kesitli deprem izolatörünün bir adet kauçuk tabakası için (2.22) no'lu denklem Fourier Serisi kullanılarak aşağıda verilen (2.30) eşitliği olarak tekrar düzenlenir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(y) \sin\left(\frac{m\pi x}{2b}\right)$$

$$\frac{d^2 P_m}{dy^2} - \left(\frac{m\pi}{2b}\right)^2 p_m = \frac{12G\varepsilon_c}{t^2} a_m \tag{2.30}$$

$$a_m = \begin{cases} 4/m\pi; m=1,3,5\ldots \\ 0; m=2,4,6\ldots \end{cases} \tag{2.31}$$

ve buradan da, $-l/2 \leq y \leq +l/2$ simetri ötesi ve $y = \pm l/2$ de $P_m = 0$ sınır şartına göre P_m denklemi (2.32)'deki eşitlik elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).



Şekil 2.5 Uzunluğu 2b ve genişliği l olan dikdörtgen kesitli deprem izolatörü kauçuk tabakası için koordinat sistemi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p_m = \frac{12G\varepsilon_c}{t^2} a_m \left(\frac{2b}{m\pi}\right)^2 \left(1 - \frac{\cos\left(\frac{m\pi y}{2b}\right)}{\cos\left(\frac{m\pi l}{4b}\right)}\right) \tag{2.32}$$

ve böylece bu eşitlikten hareketle (2.33)'de verilen denklem yazılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(x,y) = \frac{12\,G\varepsilon_c}{t^2}\sum_{m=1}^{\infty} a_m \left(\frac{2b}{m\pi}\right)^2 \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{m\pi y}{2b}\right)}{\cosh\left(\frac{m\pi l}{4b}\right)}\right)\sin\left(\frac{m\pi x}{2b}\right) \tag{2.33}$$

(2.33)'deki eşitlikte parentez içindeki birinci terim ile bağlantılı olarak Fourier Serisi birleştirilerek (2.34) de verilen çözüme ulaşılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{d^2p(x)}{dx^2} = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \tag{2.34}$$

ve $0 \le x \le 2b$ değerlerinde ayrı ayrı toplanarak (2.35) de verilen denkleme ulaşılır;

$$p(x) = \frac{12G\varepsilon_c}{t^2}\,2b^2\left(\frac{x}{2b} - \frac{x^2}{4b^2}\right) \tag{2.34}$$

ve böylece *p(x,y)* denkleminde nihai düzenleme yapılarak (2.35) deki eşitlik elde edilir;

$$p(x,y) = \frac{12\,G\varepsilon_c}{t^2}\left[2b^2\left(\frac{x}{2b} - \frac{x^2}{4b^2}\right) - \sum_{m=1,3,5\ldots}^{\infty} \frac{16b^2}{m^3\pi^3}\frac{\cosh\left(\frac{m\pi y}{2b}\right)}{\cosh\left(\frac{m\pi l}{4b}\right)}\sin\left(\frac{m\pi x}{2b}\right)\right] \tag{2.35}$$

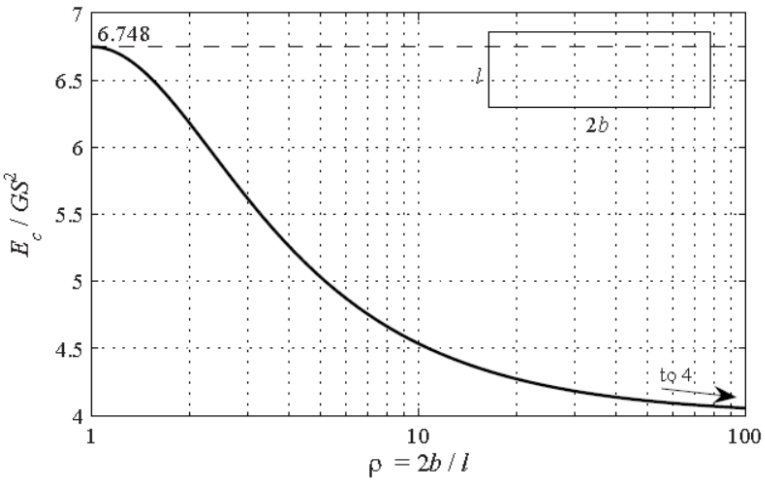
$E_c = P / (A\,\varepsilon_c)$ için sonuç denklem (2.36) da verilen eşitliğe dönüşmüştür, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$E_c = \frac{G(2b)^2}{t^2}\left(1 - \sum_{m=1,3,5\ldots}^{\infty} \frac{192(b/l)}{m^5\pi^5}\tan\left(\frac{m\pi l}{4b}\right)\right) \tag{2.36}$$

Dikdörtgen kesitli izolatöre ait kauçuk tabakası şekil faktörü, $S = bl / (l + 2b)t$ olup bu şekil faktörü S ve $p = 2b / l$ ye karşılık gelen sıkıştırma modülü E_c, aşağıdaki (2.37)'deki formülle hesaplanabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = \frac{384}{\pi^4}GS^2(1+\rho)^2\sum_{m=\text{odd}}^{\infty}\frac{1}{m^4}\left(1 - \frac{2\rho}{m\pi}\tanh\left(\frac{m\pi}{2\rho}\right)\right) \tag{2.37}$$

Şekil 2.6 Sıkıştırma modülünün $E_c / (GS^2)$ oranı olarak verilen bir eğrisini göstermektedir.



Şekil 2.6 Genişliği 2b ve uzunluğu l olan bir izolatöre ait - Dikdörtgen kesitli deprem izolatörü tabakası için sıkıştırma modülü- bir adet kauçuk tabakası için sıkıştırma modülü, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

2.2.3 İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Analizi

Dış çapı *b*, iç çapı *a* ve kauçuk kalınlığı *t* olan dairesel kesitli bir deprem izolatörünü göz önüne alalım. Bu kabuller çerçevesinde şekil faktörü *S*, aşağıda verilen (2.38) no'lu denklem gibidir.

$$S = \frac{\pi\left(b^2 - a^2\right)}{2\pi(a+b)t} = \frac{b-a}{2} \tag{2.38}$$

Denklem (2.30) da verilen eşitliğin p(a) = 0 ve p(b) = 0 için çözümü aşağıdaki gibidir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(r) = \frac{3G\varepsilon_c}{t^2}\left(\frac{\left(b^2 - a^2\right)\ln(r/a)}{\ln(b/a)} - \left(r^2 - a^2\right)\right. \tag{2.39}$$

Toplam yük *P*, denklem (2.40)da verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P = 2\pi\int_a^b p(r)\,r\,dr = \frac{3G\varepsilon_c}{2t^2}\pi(b^2 - a^2)\left(b^2 + a^2 - \frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)}\right) \tag{2.40}$$

Yukarıdaki eşitlikten hareket ederek sıkıştırılabilirlik modülü $E_{c,}$ (2.41) de verilen denklem ile ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = \frac{P}{A\varepsilon_c} = \frac{3G}{2t^2}\left(b^2 + a^2 - \frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)}\right) \tag{2.41}$$

Bu formülde şekil faktörü *S* kullanılarak, E_c'yi (2.42) deki gibi tekrar yazabiliriz;

$$E_c = 6GS^2\lambda \tag{2.42}$$

Burada λ, aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

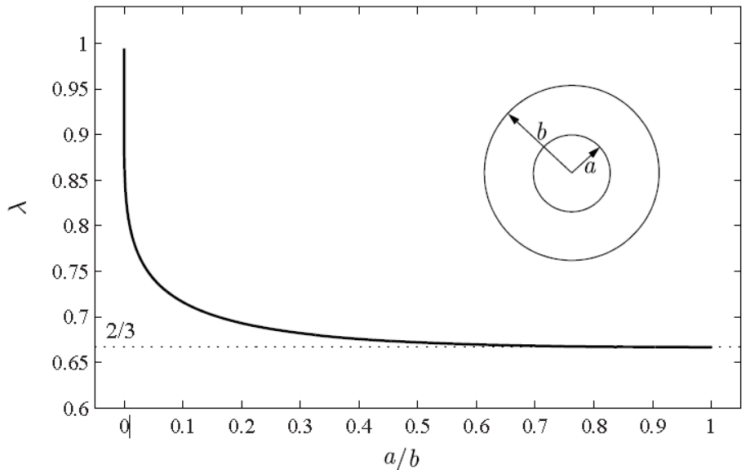
$$\lambda = \frac{b^2 + a^2 - \dfrac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)}}{(b-a)^2} \tag{2.43}$$

Bu λ eşitliğinde *a/b* oranı yazılarak (2.44) de verilen denklem elde edilir;

$$\lambda = \frac{1 + (a/b)^2 + \dfrac{1 - (a/b)^2}{\ln(a/b)}}{(1 - a/b)^2} \tag{2.44}$$

Bu λ'ya karşılık gelen çözüm formülü, $0 \le a/b \le 1$ den a/b oranına kadar olan eğri Şekil 2.7'deki E_c değerinin, dairesel kesitli bir izolatöre ait kauçuk tabakası için $6GS^2$ değerinden aşağıya hızla düşüşünü göstermektedir ve bu değer sonsuz bir şerit kauçık tabakası için düzenlenirse, $4GS^2$ şeklinde ifade edilebilir. Eğer izolatör düşey eksenindeki deliğin yeterince küçük olduğu kabul edilir ve $a=\mathcal{E}b$ ve $\mathcal{E} << 1$ ise, bu durumda E_c ihmal edilebilir. Böylece, (2.44) de verilen eşitlikte $E_c=6GS$ ve şekil faktörü $S=b/(2t)$ yazılırsa, λ denklemi, aşağıdaki (2.45)'deki eşitlikle ifade edilir.

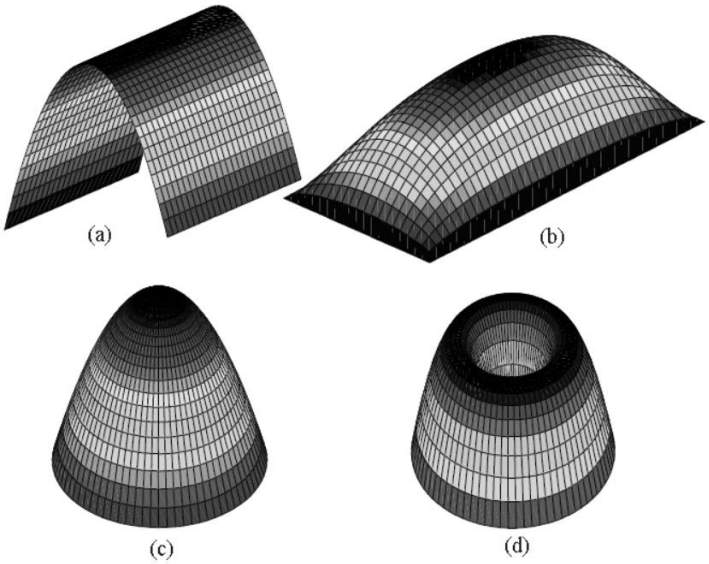
$$\lambda = \frac{E_c}{6GS^2} = 1 + \varepsilon^2 + \frac{1 - \varepsilon^2}{\ln \varepsilon} \tag{2.45}$$



Şekil 2.7 Dairesel kesitli bir deprem izolatörünün sıkıştırma modülü eğrisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Şurası gayet açıktır ki burada, $\mathcal{E} \to 0$ ve $\lambda \to 1$ alınırsa, fakat $\mathcal{E} \neq 0$ *için* E_c modülünde $\mathcal{E}$'na bağlı beklenmedik hızlı bir düşüş meydana gelir. Eğer gerçekten $\lambda = f(\mathcal{E})$ olarak yazılırsa, bu durumda $\mathcal{E}=0$ da f 'in türevi eksi sonsuzdur ve soruna neden olan da budur. Örneğin, dairesel kesitli bir deprem izolatörünün toplam çapının %5'i kadar merkezinde düşey eksende bir delik olsun, işte böyle küçük bir delik nedeniyle E_c modülü üçte bir oranda azalır, $f(\mathcal{E})$ değeri 0,67 olur. Bu durum bize deprem izolatörlerinin merkezinde düşey eksende olabilecek böyle küçük bir deliğin ihmal edilemeyeceğini göstermektedir.

Şekil 2.8 dört farklı geometrik şekle sahip olan kauçuk tabakasına ait basınç dağılımlarını göstermektedir. Diğer bir sınır durum ise, $a/b \to 1$ olduğu zaman, (2.44)'de verilen eşitlikte $a/b=1-\mathcal{E}$ yazılarak $\mathcal{E}=0$ için sonsuz bir kauçuk şerit tabakasına ait $\lambda \to 2/3$ ve $E_c \to 4GS^2$ değerleri bulunur. Eğer a/b >0,10 ise, λ değeri hemen hemen üçte iki daha büyüktür, yani küçük bir deliğin bile mevcudiyeti E_c üzerinde büyük bir etkiye neden olacaktır. Bu yüzden, deprem izolatörlerinin merkezinde delik olması halindeki çoğu durumlarda E_c değeri $6GS$'den daha çok $4GS^2$ olarak gerçekleşecektir.



Şekil 2.8 Çeşitli geometrik şekillere sahip kauçuk tabalarındaki basınç dağılımları: (a) sonsuz şerit; (b) dikdörtgen; (c) dairesel; (d) içi delikli dairesel, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

2.3 Deprem İzolatörü Üzerindeki Basınç Zorlamaları Tarafında Üretilen Kesme Gerilmeleri

Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, rijit iki çelik levha arasına yapıştırılarak alttan ve üstten sınırlandırılmış olan kauçuk tabakası üzerindeki basıncın neden olduğu kesme gerilmeleri veya kesme zorlamaları izolatör tasarımı için çok önemlidir. Denklem (2.19) dan aşağıdaki (2.46) numaralı eşitliği elde ederiz.

$$\tau_{xz} = -\frac{8G}{t^2} z u_{0,}\ \tau_{yz} = -\frac{8G}{t^2} z v_0 \tag{2.46}$$

Fakat (2.16)'da verilen denge eşitliğine sahibiz ve burada (2.22) numaralı denklem kabulünden hareketle aşağıda verilen (2.47) deki eşitliğe ulaşırız, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} \tag{2.47}$$

Verilen bir p değeri için yukarıdaki bu eşitlikler kauçuk tabakası üzerindeki kesme gerilmelerinin veya kesme zorlamalarının dağılımını hesaplamak için ve

özellikle de maksimum kesme gerilmesini ve maksimum kesme zorlamasını bulmak için kullanılabilir.

Örneğin genişliği 2*b* olan sonsuz bir kauçuk tabakası için kesme ve kayma gerilmesinin denklemlerini aşağıdaki gibi saptayalım;

$$p = \frac{6G\varepsilon_c}{t^2}\left(b^2 - x^2\right) \tag{2.48}$$

$$\tau_{xz} = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2}xz \tag{2.49}$$

ve maksimum değerler *x=b, z=t/2* de meydana gelir;

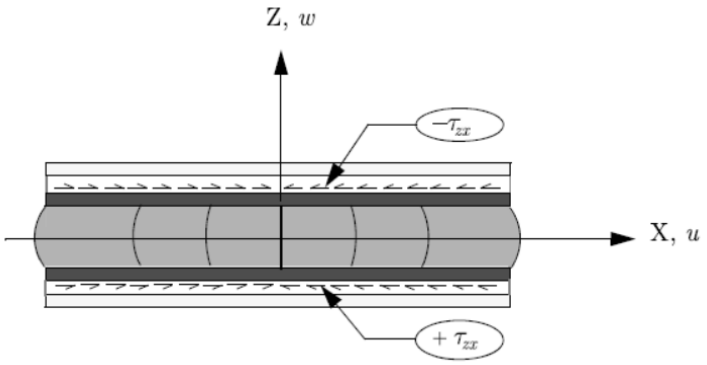
$$\tau_{\max} = 6G\varepsilon_c\left(\frac{b}{t}\right) \tag{2.50}$$

Şekil faktörü *S* ile ilintili olarak maksimum kesme zorlaması, (2.51)'de verilen formülle ifade edilir.

$$\gamma_{\max} = 6S\varepsilon_c = \gamma_c \tag{2.51}$$

Böylece, basınç zorlaması 6S pik değeri kadar daha büyük bir kesme zorlamasına neden olur ve ince bir kauçuk tabakası için şekil faktörü S oldukça büyük bir çarpan faktöre sahiptir. Dairesel kesitli bir deprem izolatörüne ait kauçuk tabaka için;

$$p = \frac{3G\varepsilon_c}{t^2}\left[R^2 - \left(x^2 + y^2\right)\right] \tag{2.52}$$



Şekil 2.9 Bir kauçuk tabakası üzerinde sadece basınç zorlaması tarafında üretilen kesme gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

ve τ_{xz} , τ_{yz} düzenlenir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\tau_{xz} = -\frac{6G\varepsilon_c}{t^2}\,xz, \tau_{yz} = -\frac{6G\varepsilon_c}{t^2}\,yz \tag{2.53}$$

Kauçuk tabakanın çevresinde alt ve üst kenarlarında maksimum kesme gerilmeleri meydana gelir;

$$\tau_{\max} = \frac{3G\varepsilon_c R}{t} \tag{2.54}$$

ve (2.51)'deki eşitlikten $\boldsymbol{\gamma_c}$ elde edilir,

$$\gamma_c = 6S\varepsilon_c \tag{2.55}$$

Yukarıda elde etmiş olduğumuz sonuçlar, elastomer esaslı tabakadaki maksimum zorlama kriterlerini tesis eden eşitliği yazmada kullanılabilir. Örneğin, köprü izolatörlerinin tasarımı ile ilgili teknik şartnameler, böyle maksimum zorlamayı tanımlamak için kullanılan kesme zorlamasının, $\boldsymbol{\gamma_c}$ tarafından üretilen kesme gerilmesine ilave edildiğinde, γ_s'nin kauçuk tabakanın deformasyonuna neden olan kesme zorlamasına işaret etmektedirler.

$$\gamma_s + \gamma_c \leq 0,5\varepsilon_{br} \tag{2.56}$$

Yukarıdaki formülde $\boldsymbol{\varepsilon_{br}}$ kauçuğun kopma uzamasıdır.

İzolatör tasarımcılarını ilgilendiren sadece basıncın neden olan maksimum kesme zorlamasının ne kadar olduğu değildir. Tabii ki aşağıda verilen sebepler için ortalama

bir zorlama tahmini yapabilmek çok önemli ve kullanışlıdır. Basınç altında kauçuk tabaka üzerindeki kesme zorlaması değişimleri pozitiften negatife olacak şekildedir ve basit ortalaması sıfırdır; böylece, uygun ortalama değer, gerilmelerin karelerinin integral olarak yazılması ile aşağıda verilen denklem ile yazılabilir. γ_{ort} değeri integral olarak (2.57)'daki eşitlikteki gibidir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\gamma_{ave} = \frac{1}{At}\int_{vol}\left(\gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2\right)dV \tag{2.57}$$

Diğer taraftan kauçuk tabaka üzerindeki depolanan toplam elastik enerji U, (2.58)'de verilen denklem ile formüle delir, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$U = \frac{1}{2G}\int_A\int_t\left(\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2\right)dzdA \tag{2.58}$$

Böylece ortalama kesme zorlaması $\gamma_{ort,}$ aşağıdaki (2.59) numaralı eşitlikten kolayca hesaplanabilir.

$$U = \frac{1}{2}G\gamma_{ave}^2 At \tag{2.59}$$

Fakat depolanan toplam elastik enerji, *PΔ/2* ile ifade edilen harici işe eşittir.

$$U = \frac{1}{2}G\gamma_{ave}^2 = At = \frac{1}{2}\left(E_c A\varepsilon_c\right)(\varepsilon_c t) \tag{2.60}$$

Böylece, ortalama kesme zorlaması kolayca hesaplanabilir.

$$\gamma_{ave} = \frac{E_c}{G}\varepsilon_c^2 \tag{2.61}$$

Bir kauçuk tabakası şeridi için ortalama kesme zorlaması şöyle yazılabilir;

$$\gamma_{ave} = 2S\varepsilon_c \tag{2.62}$$

ve dairesel kesitli bir kauçuk tabakası için ise ortalama kesme zorlaması (2.63)'de verilen eşitlikteki gibidir.

$$\gamma_{ave} = \sqrt{6} S \varepsilon_c \tag{2.63}$$

Belirli bir dereceye kadar deneme yanılmaya ihtiyaç olmasına rağmen, bu tür hesaplamalar izolatör tasarımcısına uygun bir G değeri tahmin edip öngörmesine izin verir, böylece, tasarımcı düşey ve yatay rijitlikleri tahmin edip hesaplamalarında kullanabilsin. İlk olarak $\mathcal{E}_c$'yi hesaplayabilmek için tasarımcı bir G kesme modülü öngörmelidir ve ortalama bir kesme zorlaması $\gamma_{ave,}$ hesabından modifiye edilen bir G elde edebilsin ve gerektikçe bu işlemi tekrar etsin. Çünkü, modüller ortalama %20'nin üstündeki zorlamalara karşı çok hassas değillerdir ve çok az tekrara gereksinim duyarlar.

2.4 Sıkıştırılabilir Bir Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörüne Ait Tek Bir Elastomer Tabakanın Basınç Altındaki Davranışı

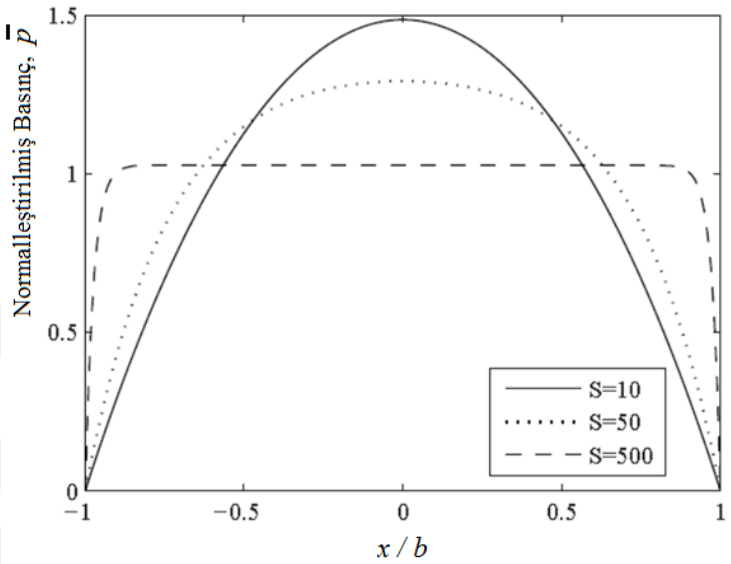
Burada üzerinde duracağımız konu, tek bir kauçuk tabakası üzerinde basınç teorisi uygulanması iki varsayıma dayanmaktadır: bunlardan birincisi, daha önceden (2.7) eşitliğinde verilmiş olan deplasmanlar tanımları; bunlardan ikincisi ise, kauçuk tabaka üzerindeki *p* basıncı tarafından her üç yöndeki normal gerilme bileşenleri yaklaşımıdır.Kauçuk malzemenin sıkıştırılamazlık denklemi elastomer tabakanın kalınlığı boyunca integrasyonu bizi *p(x, y)* için bir denklem bulmaya götürür.Burada sadece, hacim sıkıştırılabilirliğinin etkisi de dahil edilerek sıkıştırılamazlık denklemi ile yer değiştirmeye gereksinim vardır.

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = -\frac{p}{K} \tag{2.64}$$

Burada *K* hacim modulüdür. Kauçuk tabakası kalınlığının entegrasyonu sonucunda aşağıdaki denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2 p - \frac{12G}{Kt^2} p = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \tag{2.65}$$

Şekil 2.10, G = 1,0 MPa ve K = 2000 MPa özelliklerine sahip elastomer esaslı sonsuz uzunluktaki şerit bir kauçuk tabakası için farklı şekil faktörleri (S = 10, 50, 500)'de sadece basınç nedeniyle oluşan normal basınç *p* dağılımını göstermektedir.



Şekil 2.10 Sadece basınç altında bulunan sonsuz bir kauçuk şeritte normal basınç dağılımı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

2.4.1 Dairesel Kesitli Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altındaki Davranışı

Dış çapı *R* ve kalınlığı *t* olan büyük bir şekil faktörüne *S* sahip dairesel bir deprem izolatörünü göz önüne alalım. İzolatördeki basınç eksenel olarak simetriktir; yani, $p = p(r)$, burada $0 \le r \le R$'dir. Böylece, (2.65)'de verilen eşitlikte, r = R için $p = 0$ yazılıarak aşağıda verilmiş olan denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{d^2p}{dr^2} + \frac{1dp}{rdr} - \lambda^2(p - K\varepsilon_c) = 0$$

$$\lambda^2 = \frac{12G}{Kt^2} \qquad (2.65)$$

Bu denklemin genel çözümü değiştirilmiş Bessel denklemi, $r^2p'' + rp' - \lambda^2r^2p = 0$, dizilişi

$p(r) = C_1I_0(\lambda r) + C_2K_0(\lambda r)$, şeklindedir; burada I_0 ikinci dereceden modifiye edilmiş Bessel fonksiyonun dizilişidir. Bunula birlikte $p(0)$ ile sınırlandırılmış kısıtlamalar içindeki tam çözüm aşağıda verilen (2.66) denklemdir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(r) = K\varepsilon_c\left(1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0(\lambda R)}\right) \tag{2.66}$$

Bu eşitlik izolatör alanına etki eden p ile ilişkilendirilirse bir sonraki denklem elde edilir.

$$P = K\varepsilon_c\pi R^2\left(1 - \frac{2I_1(\lambda R)}{\lambda R I_0(\lambda R)}\right) \tag{2.67}$$

Burada I_1, modifiye edilmiş Bessel fonksiyanunun birinci derece dizilişini göstermektedir. Böylece sıkıştırma modülü için nihai eşitlik aşağıdaki gibi olur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = K\left(1 - \frac{2I_1(\lambda R)}{\lambda R I_0(\lambda R)}\right) \tag{2.68}$$

$$\lambda R = \frac{\sqrt{12GR^2}}{Kt^2} = \sqrt{\frac{48G}{K}}S \tag{2.69}$$

ve şekil faktörü $S=R/2t$ dir.

En sonunda $\boldsymbol{E_c}$ basınç modülü için aşağıdaki şekilde verilen bir denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = K\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\frac{48G}{K}}S}\frac{I_1\left(\sqrt{\frac{48G}{K}}S\right)}{I_0\left(\sqrt{\frac{48G}{K}}S\right)}\right) \tag{2.70}$$

$$I_1(x) = \frac{x}{2}\left(+\frac{x^2}{8}+\frac{x^4}{192}+\ldots\right)$$

$$I_0(x) = \left(1+\frac{x^2}{4}+\frac{x^4}{64}+\ldots\right)$$

bu eşitliklerden aşağıdaki ortak eşitliği yazabiliriz;

$$\frac{2}{x}\frac{I_1(x)}{I_0(x)} = 1-\frac{x^2}{8}+\frac{x^4}{48}$$

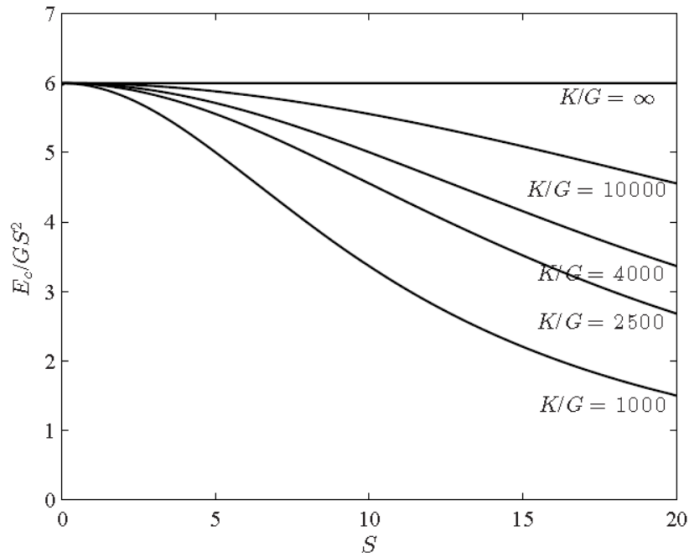
Böylece, küçük şekil faktörü S değerleri için basınç modülü E_c, (2.71) nolu denklemle hesaplanıp tahmin edilebilir.

$$E_c = 6GS^2\left(1-\frac{8GS^2}{K}\right) \tag{2.71}$$

Yukarıdaki eşitlikteki birinci kısım daha önce deklem (2.29) da ver ilen sıkıştırılamazlık analizlerinin standart bir sonucudur ve (2.271)deki denklemin ikinci kısmı ise, ortalama büyüklüğe sahip şekil faktörlerinde sıkıştırılabilirlik için doğru bir yaklaşımdır.

Örneğin, karbon ve kükürt gibi katkı malzemeleriyle özellikleri iyileştirilmiş kauçuk esaslı bir elastomer izolatörlerine ait G ve K değerleri, yani G = 1,0 MPa, K = 2000 MPa ve S = 10 için denklemdeki parentez içindeki kısım %40'ı teşkil eder. Böylece aşağıdaki (2.72)nolu denklemi elde ederiz.

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{6GS^2\left(1-\frac{8GS^2}{K}\right)} - \frac{1}{6GS^2}\left(1+\frac{8GS^2}{K}\right) = \frac{1}{6GS^2}+\frac{4}{3}\frac{1}{K} \tag{2.72}$$



Şekil 2.11 Dairsel kesitli kauçuk esaslı deprem izolatörü İçin Ec üzerinde hacimsel sıkıştırılabilirliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Daha net olan kesin çözüm için, K tecrübeyle elde edilen ampirik bir formülde 3K/4 olarak terleştirilmelidir. Daha büyük bir tartışma yapabilmek için, modifiye edilmiş Bessel fonksiyonlarında asimtotik yaklaşımla çok büyük parametrik değerler yaklaşık olarak tahmin edilebilir.

$$I_1(x) = \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}\left(1 - \frac{3}{8x} - \frac{15}{128}\frac{1}{x^2} - \dots\right)$$

$$I_0(x) = \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}\left(1 + \frac{1}{8x} + \frac{9}{128}\frac{1}{x^2} + \dots\right)$$

Buradan aşağıdaki ortak eşitlik kolaylıkla yazılabilir;

$$\frac{2}{x}\frac{I_1(x)}{I_0(x)} = \frac{2}{x}\left(1 - \frac{1}{2x} - \frac{1}{8x^2}\right)$$

ve nihai E_c denklemi aşağıdaki gibi ortak denklem olarak elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = K\left(1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{12G}{K}}S} + \frac{1}{\frac{48G}{K}S^2}\right) \tag{2.73}$$

Büyük parametrelerde modifiye edilmiş Bessel fonksiyonları için elverişli olmadığı zaman burada (2.73) de verilen denklem kullanışlıdır ve şekil faktörü S, 25'ten daha büyük olduğu zaman ihmal edilebilir bir hata payı ile bu denklem kullanışlıdır. Bu sonuçlarla ilgili olarak burada söylenebilecek iki husus var. Bunlardan birincisi, böyle küçük değerli şekil faktörü S olması durumunda elde edilen basınç modülünde E_c, sıkıştırılabilirlik etkileridir. Hacimsel sıkıştırılabilirlik, şekil faktörünün 10 değerine kadar düştüğü kauçuk esaslı izolatörler için hacimsel sıkıştırılabilirliğin işin içine dahil edilmesi gerektiği aşikardır. Bu günkü uygulamalarda, elastomer esaslı deprem izolatörlerinin, kauçuğun sıkıştırılabilirliğinde çok önemli bir role sahip olan şekil faktörünün 30 ile 40 arasındaki değerlere sahip olmaları gerektiğidir. İkincisi, burada tasarımcı, mutat uygulama olmayan Bessel fonksiyonu çözümünü kullanmalıdır.

Ayrıca daha önemli bir koplikasyon daha vardır, bu da, bu tür yüksek değerlikli şekil faktörüne sahip olan deprem izolatörlerinde, iyi bir hacimsel modül tahminine gereksinim vardır. Fakat, bunun büyüklüğünü ölçmek çok zordur ve literatürde bu hacimsel modül 1000 MPa ile 3500 MPa gibi geniş bir aralıkta tahmin edilmektedir. Düşey frekans veya burkulma yükünün tahminini hassas olarak yapabilmek için kullanışlı olmamasına rağmen daha iyi bir tahmine ihtiyaç vardır.

2.4.2 Dikdörtgen Kesitli Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altındaki Davranışı

Şekil 2.12 de gösterildiği gibi, büyük değerlikli şekil faktörüne sahip olan dikdörtgen kesitli elastomer esaslı bir deprem izolatöründe etkin E_c'yi hesaplamak için öncelikle sıkıştırılamaz kauçuk için daha önce geliştirmiş olduğumuz aşağıdaki tekli yakınsak serisi çözüm kullanılarak (2.65)'de verilmiş olan denklemi çözeriz. Burada Fourier serisi katsayısı $P_m(y)$, tatminkar olmalıdır.

$$p(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(y) \sin\left(\frac{m\pi x}{2b}\right) \tag{2.74}$$

$$\frac{d^2 P_m}{dy^2} - \beta_m^2 P_m = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2} a_m \tag{2.75}$$

Burada tek sayılar için, $a_m = 4/(m\pi)$ ve aksi takdirde sıfırdır ve de

$$\beta_m^2 = \left[\frac{m\pi}{2b}\right]^2 + \frac{12G}{Kt^2}$$

bu ß eşitliği formülde yerleştirilerek P_m için çözümlemeden sonra izolatör üzerindeki basınç dağılımı aşağıdaki eşitlikle formüle edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p = (x,y) = \frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{a_m}{\beta_m^2} \left(1 - \frac{\cos(\beta_m y)}{\cos\left(\frac{\beta_m l}{2}\right)}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{2b}\right) \tag{2.76}$$

İzolatör basınç alanı üzerinde inteğral alarak aşağıdaki (2.77) de verilen eşitlik yazılır.

$$P = \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{2b} p(x,y)dxdy = \frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \sum_{\cdot m=1.3.5\ldots}^{\infty} \frac{ba_m^2}{\beta_m^2} \left(1 - \frac{2}{\beta m} \tan\left(\frac{\beta_m l}{2}\right)\right) \tag{2.77}$$

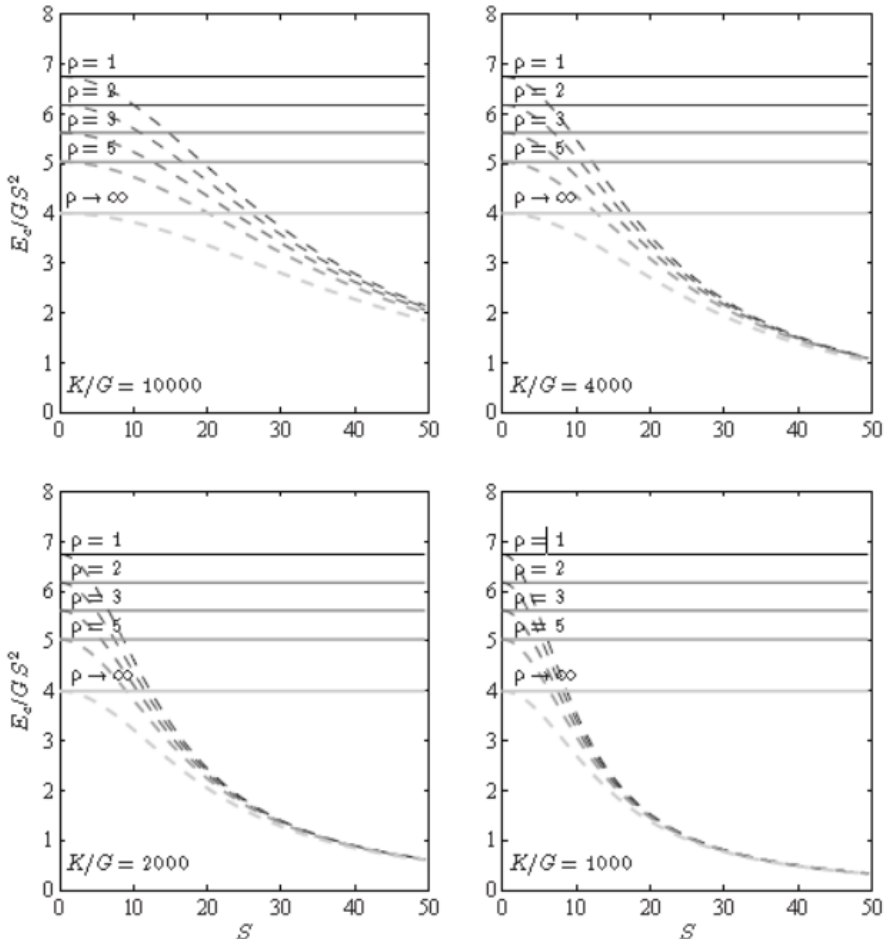
ve bu eşitlikte şekil faktörü *S* yazılırsa,

$$S = lb/[t(l+2b)], E_c = P/(A\varepsilon_c)$$

$$E_c = \frac{384}{\pi^4} GS^2(1+p)^2 \sum_{m=1,3.5,..}^{\infty} \frac{1}{m^4\xi^2} \left(1 - \frac{2p}{m\pi\xi_m} \tan\left(\frac{m\pi\xi_m}{2p}\right)\right) \tag{2.78}$$

ve bu denklemde de dikdörtgen kesitli deprem izolatörünün en-boy oranı olan *p=2b/l* yazılarak (2.79)'da verilen eşitliği buluruz, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\xi_m = \sqrt{1 + \frac{48GS^2(1+p)^2}{K(m\pi)^2}} \tag{2.79}$$



Şekil 2.12 Farklı en-boy oranları p için Ec üzerinde hacimsel sıkıştırılabilirliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Şekil 2.12 farklı *K/G* değerleri için şekil faktörünün *S* bir fonksiyonu olarak E_c / GS^2 oranı ile ilgili grafik eğrileri göstermektedir. Hatta ortalama değerlikli bir şekil faktörüne sahip olan deprem izolatörleri için bile kauçuğun hacimsel sıkıştırılabilirliğinin etkisi belirgindir. Örneğin, en-boy oranı p = 3, S = 20, kesme (kayma) modülü G = 1,0 MPa ve hacim modülü K = 2000 MPa, yani K/G = 2000 olan dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörü için (2.78)'de verilen eşitlik hacimsel sıkıştırılabilirlik hesabını $E_c/(GS^2)$=2,32 olarak verirken, hacimsel sıkıştırılabilirlik etkilerini yok sayan (2.37)'de verilen denklem ise $E_c/(GS^2)$= 5,62 olarak vermektedir.

2.4.3 İçi Delikli Dairesel Kesitli Kauçuk Esaslı Deprem İzolatörünün Basınç Altında Davranışı

Dış çapı b, iç çapı a ve kalınlığı t olan içi delikli halka şeklinde elastomer esaslı bir deprem izolatörü göz önüne alınsın ve p değeri için sınır değerleri aşağıdaki gibi olsun,

$$\frac{d^2p}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dp}{dr} - \lambda^2(p - K\varepsilon_c) = 0$$
$$p(a) = 0, p(b) = 0 \tag{2.80}$$

bu eşitlikte $\lambda^2 = 12G / (Kt^2)$'dir. Bu problem Chalhoup ve Kelly (1987) ve de Constantinou ve arkadaşları tarafından 1992 yılında incelenmiştir (Chalhoub ve Kelly, 1987) ve (Costantinou ve arkadaşları, 1992). Modifiye edilmiş Bessel denkleminin homojen kısmının çözümü $r^2 p'' + r p' - \lambda^2 r^2 p = 0$ için $p(r) = C_1 I_0(\lambda r) + C_2 K_0(\lambda r)$'dir, buradaki I_0 birinci tür sıfır dizilişli modifiye Bessel fonksiyonudur ve K_0 ise, ikinci tür sıfır dizilişli modifiye Bessel fonksiyonudur. Bu da, $p(a) = 0$ ve $p(b) = 0$ sınır şartları ile birlikte tam bir çözüm denklemi olan (2.80) deki eşitliğin aşağıdaki gibi olmasını sağlar, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(r) = K\varepsilon_c(1 + C_1 I_0(\lambda r) + C_2 K_0(\lambda r) \tag{2.81}$$

Burada, C_1 ve C_2 aşağıdaki gibi yazılır,

$$C_1 = \frac{K_0(\lambda b) - K_0(\lambda a)}{I_0(\lambda b)K_0(\lambda a) - I_0(\lambda a)K_0(\lambda b)}$$
$$C_2 = \frac{I_0(\lambda b) - I_0(\lambda a)}{I_0(\lambda b)K_0(\lambda a) - I_0(\lambda a)K_0(\lambda b)} \tag{2.82}$$

deprem izolatörü kauçuk alanı üzerindeki *p*'nin integrali alınarak toplam izolatör yükü *P* ilgili olarak (2.83)'deki denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P = \int_0^{2\pi}\int_a^b p(r)rdrd\theta = 2\pi K\varepsilon_c\left[\frac{b^2 - a^2}{2} + \frac{C_1}{\lambda}\left(bI_1(\lambda b) - aI_1(\lambda a) - \frac{C_2}{\lambda}\left(bK_1(\lambda b) - aK_1(\lambda a)\right)\right)\right] \tag{2.83}$$

Ve daha sonra $E_c = P / (A\mathcal{E}_c)$, aşağıdaki gibi yazılır.

$$E_c = K[1 + \frac{2C_1}{\lambda^2\left(b^2 - a^2\right)}(\lambda b I_1(\lambda b) - \lambda a I_1(\lambda a) - \frac{2C_2}{\lambda^2\left(b^2 - a^2\right)}(\lambda b K_1(\lambda b) - \lambda a K_1(\lambda a))] \tag{2.84}$$

Buradaki I_1 Bessel fonksiyonun birinci 1 dizilişidir ve K_1 ise, modifiye edilmiş Bessel fonksiyonun ikinci 1 dizilişidir. S = (b-a) / (2t) ve η = a / b (izolatör iç çapının dış çapına oranıdır) kullanarak sıkıştırılabilirlik modülü E_c'yi (2.85) deki denklem olarak düzenlenebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = K[1 + C_1'(I_1(v) - \eta I_1(\eta v) + C_2'(K_1(v) - \eta K_1(\eta v))] \tag{2.85}$$

$$v = \sqrt{\frac{48G}{K}}\frac{S}{1-\eta} \tag{2.86}$$

$$C_1' = \frac{1}{\sqrt{\frac{12G}{K}}(1+\eta)S}\ \frac{K_0(v) - K_0(\eta v)}{I_0(v)K_0(\eta v) - I_0(\eta v)K_0(v)}$$

$$C_2\ \frac{1}{\sqrt{\frac{12G}{K}}(1+\eta)S}\ \frac{I_0(v) - I_0(\eta v)}{I_0(v)K_0(\eta v) - I_0(\eta v)K_0(v)} \tag{2.87}$$

Şekil 2.13 Farklı η değerleri ve K / G değerleri için şekil faktörünün S, bir fonksiyonu olarak içi düşey eksende delikli bir deprem izolatörünüm normal basınç dağılım grafiğini göstermektedir. Bu grafik bize, K / G = 2000 MPa gibi gerçek değerler için ve hacimsel sıkıştırılabilirlik modülü etkilerinin ihmal edilebilir olduğunu ve fazlaca değer atfedip gözde büyütülmemesi gerektiğini ve hatta ortalama değerlikli şekil faktörleri için bile böyle olduğunu göstermektedir. Şimdi bu araştırma çalışmasını küçük bir deliği olan elastomer esaslı bir deprem izoltörü üzerinde ne gibi bir etkisinin olduğu üzerine yoğunlaştırmalıyız. İlk olarak sıkıştırılamazlığın olduğu durumdaki, R'ye dayanan, yani $R = b$ oranına dayanan izolatör kauçuk kütlesinin tamamı için elde edilmiş olan E_c büyüklüğü $6GS^2$ ile ilgili

olarak normal değeri bulunur ve (λR)2 = (48 GS2)/K olduğuna dikkat edilmelidir. Böylece (2.88)'de verilen eşitlik elde edilir.

$$\frac{K}{6GS^2} = \frac{8}{(\lambda R)^2} \tag{2.88}$$

Şimdi, küçük bir η değerini yani $\eta < 0.1$ ele alalım ve bunun $\mathcal{E}$ olduğu gibi unutulmamalıdır. $y = E_c / (6GS^2)$ ve $x = \lambda R$ kullanılarak (2.84) de verilen denklem tahmin edilebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$y = \frac{8}{x^2}\left(1 - \frac{2}{x}\frac{(K_0(x) - K_0(\varepsilon x)(I_1(x) - \varepsilon I_1(\varepsilon x))}{I_0(\varepsilon x)K_0(x) - I_0(x)K_0(\varepsilon x)} + \frac{(K_1(x) - \varepsilon K_1(\varepsilon x))(I_0(x) - I_0(\varepsilon x))}{I_0(\varepsilon x)K_0(x) - I_0(x)K_0(\varepsilon x)}\right.$$

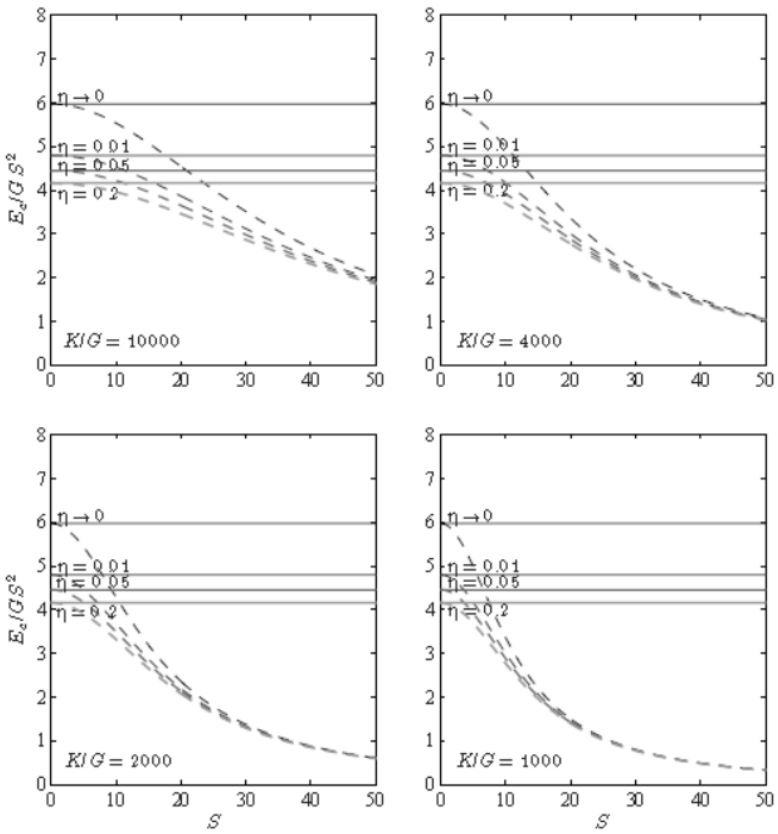
(2.89)

Burada ise, x = 3,098 değeri için G = 1,0 MPa, K = 2000 MPa ve S = 20 değerlerine sahip özel bir deprem izolatörünü dikkate alalım. Şekil 2.13 de gösterildiği gibi, $\mathcal{E}$ = 0 olduğu zaman normal bir y değeri ve $0 < \mathcal{E} \leq 0.10$ aralığında $\mathcal{E}$'nun bir fonksiyonu olarak y eğrisini göstermektedir. Sıkıştırılamaz malzemeler için yürütülen analiz metodlarında, tanjantın eksi sonsuz olduğu yerlerde $\mathcal{E} = 0$ değerinde olduğu gibi, denklemin çözümü bir tekillik sergiler, bununla beraber, basınç modüllerinin değeri sıkıştırılamaz malzemeler için olduğu gibi dramatik bir şekil düşmez. Örneğin, η= 0,1 için denklem (2.85) 0,351 değerini verir ve η = 0 ile 0,716 ve η= 0,1 değerlerinde sıkıştırılamaz malzemeler için E_c / (6GS^2) karşılaştırması 1'den hızla aşağı düşer. Bu nedenle, dairesel kesitli bir deprem izolatöründe bulunan küçük bir deliğin etkisi, sıkıştırılabilirlik artıkça basınç modülü üzerinde artış olacağı şeklinde açıklanabilir.

Şekil 2.14 sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz malzemeler için her iki çözümü göstermektedir. Burada sadece basınç altındaki çok çeşitli elastomer esaslı deprem izolatörlerinin davranışları için sonuçlar elde edilmiştir. Bu bölümde yapılan analiz çalışmalarının en önemlilerinden birisi, önemli bir role sahip olan hacimsel sıkıştırılabilirlik ilgili olarak, hatta şekil faktörünün S = 10 gibi düşük bir değerinde bile beklenmedik sonucudur. Bunun anlamı, izolatörlerin şekil faktörünün S = 30 ve 40 arsında bir değere sahip olduğu deprem yalıtım sistemlerinde kullanılan elastomer

esaslı izolatörlerin kullanılması gerektiğidir ve bunun aynı zamanda, kauçuk esaslı malzemelerin sıkıştırılabilirliğinin ihmal edilemeyeceği anlamına gelir.

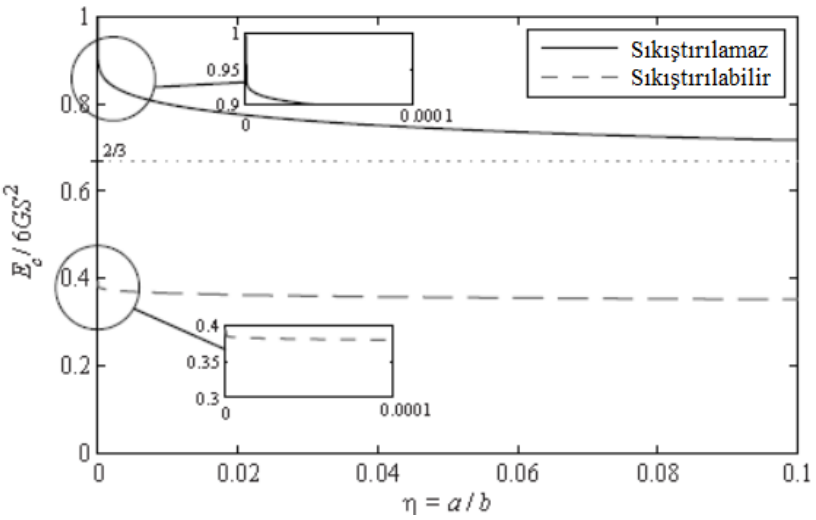
Elastomer esaslı malzemelerin hacimsel modüllerini ölçmek aşırı zor bir iştir. Kauçuk gibi böyle elastomer esaslı malzemeler kesme modüllerinden daha büyük değerde hacimsel modüle sahiptirler böylece bu tür malzemelerde asla mümkün olmasa bile sadece kesme kuvvetleri altında deforme olacaktır. Çoğu diğer tip uygulamalarda deformasyonun yani şekil değişikliğinin sabit bir hacimde olduğu farz edilebilir ve bu tür malzemelerin sıkıştırılamaz oldukları farz edilmelidir, fakat taban yalıtımı tasarımında kullanılan sıkıştırılamaz tip deprem izolatörleri modelleri ciddi şekilde aşırı olarak deprem izolatörünün düşey rijitliğine ve burkulma yüküne göre yapılabilir.



Şekil 2.13 Farklı dış çap-iç çap oranları η için Ec üzerinde hacimsel sıkıştırılabilirliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Örneğin, geniş bir kullanıma sahip ve Malezya Kauçuk Üreticileri Araştırma Enstitüsü, şimdiki ismi; Tun Abdul Razac Research Center, (Lindley, 1978) tarafından yayınlanmış olan kauçukla ilgili elkitabı, kauçuk malzemelerle ilgili olarak 30 dan 75 IRHD'ye kadar çeşitli sertlik değerleri vermektedir ve bu el kitabındaki datalar, IRHD (International Rubber Hardness Degrees) verilerine, yani 1000 ile 1330 MPa değerlerine dayanmaktadır. (Fuller ve arkadaşları, 1988) adlı elkitabı bize bunu 2000 ile 3500 MPa arasında vermektedir. Burada verilen analizler, hacimsel modülü belirmek için mümkün bir yol olduğu gösterir, eğer bunun biraz doğru bir yol olduğu kabul edilirse, bu değeri tahmin etmek için deprem izolatörünün ölçülen düşey rijitliğini kullanmaktır.

Deprem izolatörleri genellikle, doğrusal olmayan ve yüksek histeriz özelliklerine sahip yüksek sönümlü kauçuk malzemelerden üretilirler. Bu histeriz kapasitelerinin zor olan ölçümü de yorumla yapılabilir, fakat bazı deprem yalıtım projelerinde hizterisis özelliği olmayan ve çok büyük kesme zorlamalarına kadar kesmede tamamen doğrusal davranan (LNR) tipi kauçuk malzemeler kullanılır.



Şekil 2.14 Dairesel kesitli deprem izolatörünün sıkıştırma modülü üzerine izolatör düşey eksenindeki küçük bir deliğin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis D. A., 2010).

BÖLÜM ÜÇ
EĞİLME ZORLAMASI ALTINDA ELASTOMER ESASLI DEPREM İZOLATÖRLERİNİN DAVRANIŞLARI

3.1 Sıkıştırılamaz Kauçuk Malzemeden Üretilmiş Olan Deprem İzolatörüne Ait Tek Bir Elastomer Tabakanın Eğilme Rijitliği Davranışı

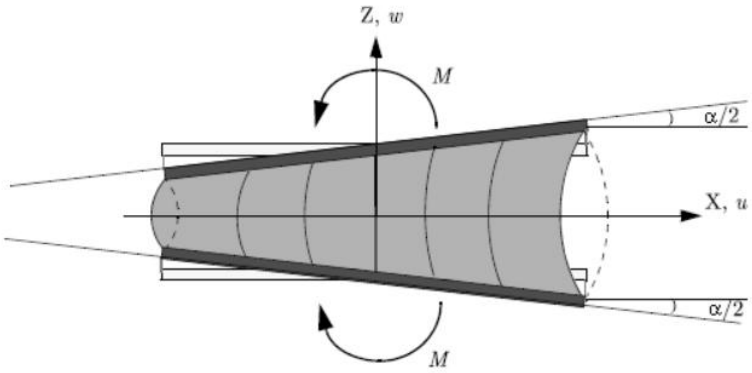
Deprem izolatörlerinin deprem yükü altında analiz edilmesi zorunlu olan önemli bir izolatör özelliği deprem izolatörlerinin burkulma davranışıdır. Bu tür analizler için basınç altında sıkıştırılmış bir izolatörün eğilme momenti tepkisinin incelenmesi gereklidir. İzolatörün eğilme rijitliği olarak isimlendirilmektedir, bu konu, düşey rijitliği tespit etmek için yapılan bazı analizler genişletilerek doğrulanmıştır. Eğilme rijitliği, bir deprem izolatöründe meydana gelen eğilme yüklerinin tahmin edilmesinde önemli bir rol oynar ve aynı zamanda izolatörün yatay yöndeki kesme rijitliği üzerinde düşey yükün etkisinin belirlemek için de eğilme rijitliğine ihtiyaç vardır. Bunlara ilaveten, bir izolatör kesme deformasyonunu maruz kaldığı zaman, deprem izolatörünün alt ve üst yükleme plakalarında dengelenmemiş kesme kuvvetleri tarafından bir eğilme momenti üretilir (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'ye bknz.). Söz konusu bu eğilme momentleri izolatör tasarımında çok önemli olan kauçuk malzemede kesme gerilmesi zorlamalarına neden olur ve aynı zamanda izolatör içindeki ince çelik plakalarda da bu gerilmeler etkili olur. Sadece basınç zorlaması altındaki izolatörün aksine, bu tür gerilmeler zorlayıcıdırlar (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

İzolatöre ait tek bir tabakanın eğilme rijitliği, sıkıştırma rijitliği için olan hesaplamaya benzer bir yaklaşım kullanılarak hesaplanır, bununla beraber, değiştirilmiş konfigürasyon iki adımda elde edilir. Birinci safha, eğer meydana gelen eğilme deformasyonunu basit kiriş teorisi olarak ele almaktır(Şekil 3.1'de nokta nokta olarak belirtilen kısımlara bakınız). Çünkü bu sıkıştırılamazlığı ortadan kaldırmaz, daha ileri bir kesme deformasyonu birleşimidir. Deplasmanlar (3.1)'de verilen eşitliklerle formüle edilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$u(x,y,z) = u_0(x,y)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right) - \frac{az^2}{2t}$$

$$v(x,y,z) = v_0(x,y)\left(1 - \frac{4z^2}{t^2}\right)$$

$$\omega(x,y,z) = \frac{azx}{t} \tag{3.1}$$



Şekil 3.1 Deprem izolatörüne ait iki adet rijit çelik plaka arasındaki kauçuk tabakanın sadece eğilme altındaki davranışı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Burada α, deformasyona uğramış şekildeki (Şekil 3.1 bknz.) iki adet rijit çelik plaka arasındaki açıdır ve eğilme *y*-ekseni etrafında meydana gelmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, deformasyon tarafından üretilen eğrilik yarıçapı *r* ise *α* ile ilişkilidir.

$$\frac{1}{r} = \frac{\alpha}{t} \tag{3.2}$$

Kauçuk tabaka kalınlığı boyunca bütünleşerek entegre olduğu zaman, sıkıştırılamazlık şartı yazılırsa, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0 \tag{3.3}$$

ve aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{3\alpha}{2t}\,x = 0 \tag{3.4}$$

Kesme gerilmeleri**,**

$$\tau_{xz} = G.\gamma_{xz} = G\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}\right)$$

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz} = G\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y}\right) \tag{3.5}$$

Ve buradan hareketle aşağıdaki kesme gerilmesi denklemleri yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\tau_{xz} = -\frac{8G}{t^2} z u_0$$

$$\tau_{yz} = -\frac{8G}{t^2} z v_0 \tag{3.6}$$

Ve bu eşitlikte yerlerine konursa,

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \tag{3.7}$$

Bu eşitlikten aşağıdaki denklem elde edilir.

$$u_0 = \frac{t^2}{8G}\frac{\partial p}{\partial x}, v_0 = -\frac{t^2}{8G}\frac{\partial p}{\partial y} \tag{3.8}$$

ve sıkıştırılamazlık şartları yazılarak (3.9) da ki eşitlik yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \nabla^2 p = \frac{12G\alpha}{t^3} x \tag{3.9}$$

Kauçuk Esaslı Kauçuk tabakanın kenarlarında p = 0 dır. Çözüm tekniği p = 0 için (3.9)'da verilen denklemi çözmektir ve eğilme momentini *M* aşağıda (2.10)'da verilen eşitlikle hesaplamaktır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$M = -\int_A p(x,y)xdA \tag{3.10}$$

Kiriş teorisi ile benzerlik kurarak kullanılırsa, bu takdirde moment M (3.11)'de verilen ifade edilir.

$$M = EI\frac{1}{r} \tag{3.11}$$

Ve buradan hareketle etkili eğilme rijitliği $(EI)_{eff}$, aşağıdaki eşitlikle hesaplanır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$(EI)_{eff} = \frac{M}{\alpha/t} \tag{3.12}$$

3.1.1 Kauçuk Esaslı ve Dairesel Kesitli Deprem İzolatörü İçin Eğilme Momenti Davranışı

Şekil 2.4 de verilen yarıçapı R olan elastomer esaslı bir deprem izolatörünün eğilme zorlaması altındaki davranışını gösteren analatik denklemini çözebilmek için r ve θ polar koordinatları kullanılmıştır (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} = \frac{12G\alpha}{t^3} r\cos\theta \tag{3.13}$$

Bu eşitliğin çözümü Denklem (3.14)'de verildiği gibidir.

$$P(r,\theta) = \left(Ar + B\frac{1}{r} + Cr^3\right)\cos\theta \tag{3.14}$$

ve burada C şöyledir;

$$C = \frac{3G\alpha}{2t^3}$$

Daireyi tamamlamak için, $0 \leq r \leq R$, B ise $r = 0$ değeri ile sınırlandırılmış p için sıfır olmalıdır ve $r = R$'de $p = 0$ yazılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p = \frac{3G\alpha}{2t^3}\left(r^2 - R^2\right) r\cos\theta \tag{3.15}$$

ve buradan etkin atalet momenti M bulunur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$M = -\int_0^{2\pi}\int_0^{R} pr^2\cos(\theta)drd\theta = \frac{G\alpha}{8t^3}\pi R^6 \tag{3.16}$$

Bu durumda Etkin Atalet Momenti M ise, $E = E_c = 6\,GS^2$ ve $I = \pi R^4 / 4$ alınarak, klasik olarak bildiğimiz atalet momentinin üçte biridir ve de aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$(EI)_{eff} = \frac{M}{\alpha/t} = \frac{G}{8t^2}\pi R^6 = 2GS^2\left(\frac{\pi R^4}{4}\right) = 2GIS^2 \tag{3.17}$$

Aynı zamanda dairesel kesitli bir izolatör için $E_c = 6\,GS^2$, $(EI)_{eff} = E_cI\,/\,3$ yazılabilir.

3.1.2 Kauçuk Esaslı ve Dikdörtgen Kesitli Deprem İzolatörü için Eğilme Momenti Davranışı

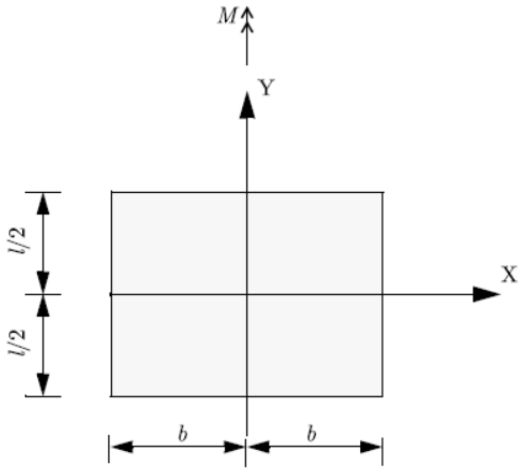
Şekil 3.2'de gösterildiği gibi y ekseninde genişliği $2b$ ve uzunluğu l olan dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörünün eğilmeye zorlandığını düşünelim.

Bu durumda, dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörü için sonuç, tekli Fourier Serisi çözümü kullanılarak bulunur, (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

$$p(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(y)\sin\left(\frac{m\pi x}{b}\right) \tag{3.18}$$

Daha önce (3.9) da verilen eşitlikte yerlerine bu yerleştirilerek (3.18) denklemi elde edilir.

$$\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{d^2P_m(y)}{dy^2} - \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 P_m(y)\right]\sin\left(\frac{m\pi x}{b}\right) = \frac{12G\alpha x}{t^3} \tag{3.19}$$



Şekil 3.2 Eğilme Zorlaması Altındaki Dikdörtgen Kesitli Elastomer Esaslı Deprem İzolatörü, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

sin *(nπx / b)* ile çarpılarak ve –b den +b 'ye kadar integrali alınarak aşağıdaki (3.20)'da verilen denklem bulunur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_n''(y) - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 P_n(y) = \frac{24G\alpha}{t^3}\,\frac{b}{n\pi}\,(-1)^{n-1} \tag{3.20}$$

Simetri ve sınır şartı $p(x, \pm l/2) = 0$ dan $P_n(\pm l/2) = 0$ yazılarak bu basit diferansiyel denkleme bir sonraki çözümü elde ederiz.

$$P_n(y) = \frac{24G\alpha}{t^3}\left(\frac{b}{n\pi}\right)^3 (-1)^n \left(1 - \frac{\cos\left(\frac{nxy}{b}\right)}{\cos\left(\frac{n\pi l}{2b}\right)}\right) \tag{3.21}$$

Basınç altıdaki tam çözüm denklemi ise aşağıda (3.22)'de elde edilen denklemdir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(x,y) = \frac{24Gb^3\alpha}{\pi^3 t^3}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n^3}\left(1 - \frac{\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)}{\cos\left(\frac{nx,l}{2b}\right)}\right)\sin\left(\frac{n\pi x}{b}\right) \tag{3.22}$$

Aynı zamanda şekil faktörü ile ilgili olarak $S = bl / [(2b + l)t]$ bu eşitlik şöyle de ifade edilebilir.

$$p(x,y) = \frac{24GS^2 b\alpha}{\pi^3 t}\left(1+\frac{2b}{l}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^3}\left(1-\frac{\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)}{\cos(\frac{n\pi l}{2b}}\right)\sin\left(\frac{n\pi x}{b}\right) \quad (3.23)$$

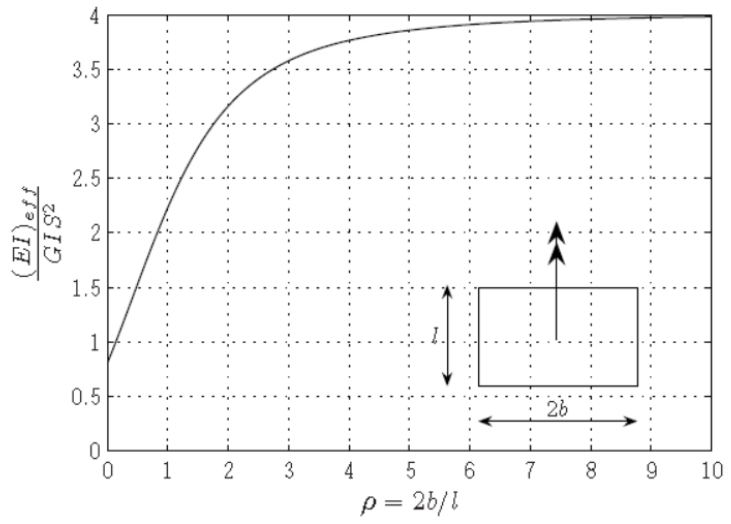
Ve daha sonra bu eşitlikten hareketle aşağıdaki denklem yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$(EI)_{eff} = \frac{M}{\alpha/t} = -\frac{1}{\alpha/t} = \int_{-1/2}^{l/2}\int_{-b}^{b} p(x,y)x\,dx\,dy$$

$$= \frac{48GS^2 lb^3}{\pi^4}\left(1+\frac{2b}{l}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^4}\left(1-\frac{2b}{n\pi l}\tan\left(\frac{n\pi l}{2b}\right)\right) \quad (3.24)$$

$I = 2lb^3/3$ ile etkili eğilme rijitiği (3.25)'de verilen denklemle ifade eidlir.

$$(EI)_{eff} = \frac{72GIS^2}{\pi^4}(1+p)^2 \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^4}\left(1-\frac{p}{n\pi}\tan\left(\frac{n\pi}{p}\right)\right) \quad (3.25)$$



Şekil 3.3 Dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörünün EI etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Burada $P = 2b/l$ dir. Şekil 3.3 ise, p'nin bir fonksiyonu olarak dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörünün EI etkisini göstermektedir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$(EI)_{eff} = \frac{288GIS^2}{\pi^4}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^4}\left(1-\frac{1}{n\pi}\tan(n\pi)\right) \simeq 2,228GIS^2 \tag{3.26}$$

3.1.3 Kauçuk Esaslı İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörü için Eğilme Momenti Davranışı

İçi delikli dairesel kesitli deprem izolatörünün iç yarıçapı, *a,* dış yarıçapı *b* olması durumunda ve $a \le r \le b$ için p ile ilgili denklem (3.27)'deki gibidir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p = \frac{3G\alpha}{2t^3}\left(\frac{a^2b^2}{r}+r^3-\left(b^2+a^2\right)r\right)\cos\theta \tag{3.27}$$

ve eğilme momenti, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$M = -\frac{3G\alpha}{2t^3}\int_0^{2\pi}\left[\int_a^b\left(\frac{a^2b^2}{r}+r^3-\left(b^2+a^2\right)r\right)r^2dr\right]\cos^2\theta d\theta = \frac{G\propto\pi}{8t^3}\left(b^2-a^2\right)^3 \tag{3.28}$$

$$(EI)_{eff} = \frac{\pi}{8}G\frac{\left(b^2-a^2\right)^3}{t^2} = \frac{\pi}{2}GS^2(b-a)(b+a)^3$$

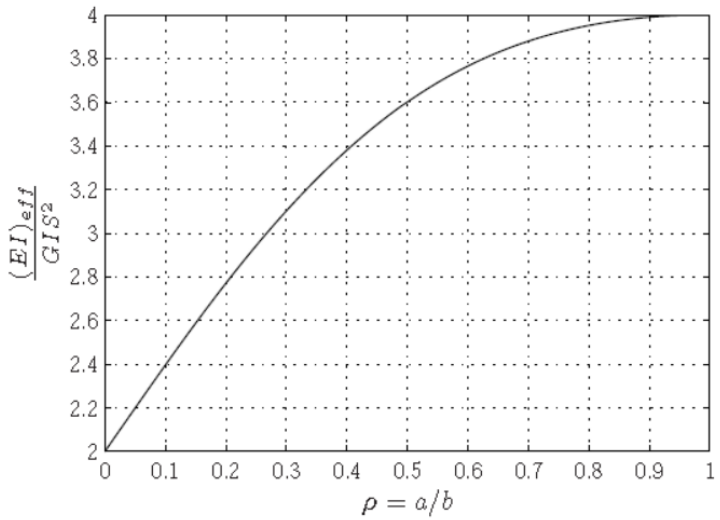
$$= \frac{\pi}{2}GS^2I\left(4\frac{(b-a)(b+a)^3}{\pi\left(b^4-a^4\right)}\right)$$

$$= 2GS^2I\frac{(b+a)^2}{b^2+a^2} = 2GS^2I\frac{(1+p)^2}{1+p^2} \tag{3.29}$$

Bu eşitlikte $p = a / b$ izolatör iç yarıçapınındış çapına oranıdır. Şekil 3.4, *p*'nin bir fonksiyonu olarak $(EI)_{eff} / (2GS^2I)$ ile ilgili bir eğrisel grafiği göstermektedir (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

Bu sonucu ifade edebilmek için iki yol vardır. Bunlardan birisi, *a / b*'nin ortalama olarak 0,1'den daha büyük olduğu kabul edilir ki bu durumda *S = (b- a) / (2t)* olduğu yerde etkili sıkıştırma modülü $4GS^2$'dir.

$$\frac{(EI)_{eff}}{EI} = \frac{1}{2}\frac{\left(1+\frac{a}{b}\right)^2}{1+\left(\frac{a}{b}\right)^2} \tag{3.30}$$



Şekil 3.4 Kauçuk esaslı iç delikl yarıçapı α ve dış yarıçapı b olan dairesel kesitli bir deprem izolatörü için EI etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Diğer taraftan eğer $a \rightarrow 0$ ise, o halde $(EI)_{eff} \rightarrow 6GS^2(I/3)$'tür. Ayrıca, eğer $a = b$ ve $\varepsilon \rightarrow 0$ yazılırsa, $(EI)_{eff} \rightarrow 4GS^2(1+2\varepsilon)(I/2)$ elde edilir. Sıkıştırma modülüne karşılık, izolatör içinde küçük bir eksenel deliğin varlığı izolatörün eğilme rijitliği üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu görülür. Şüphesiz bunun nedeni, delik kenarlarındaki basınçtır, eğer delik küçükse ne olursa olsun basınç sıfıra yakın bir değerdedir ve sıfır basınç sınır şartı hâlihazırda bu durumu karşılar.

3.2 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı Deprem İzolatörüne Ait Tek Bir Kauçuk Tabakanın Eğilme Rijitliği

Eğer eğilme rijitliği tahmini yapıldığı zaman hacimsel sıkıştırılabilirliği işin içine dahil edilirse, aşağıdaki denklem yazılabilir, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$\nabla^2 p - \lambda^2 p = \frac{\lambda^2 K\alpha}{t}\, x \tag{3.31}$$

Burada $\lambda^2 = 12\, G/(Kt^2)$ ve kauçuk tabakanın kenarında $p = 0$ dır.

3.2.1 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı ve Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Eğilme Rijitliği

Dairesel kesitli bir deprem izolatörü için eğilme rijitliği çözüm denklemi aşağıda verildiği gibidir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} - \lambda^2 p = \frac{\lambda^2 K \alpha}{t} r\cos\theta \tag{3.32}$$

ve $p(r = R) = 0$)'dir. $p(r, \theta)$ için sonuç (3.33)'te verilen eşitlikte olduğu gibidir.

$$p = \frac{K\,\alpha\,R}{t}\left(\frac{I_1(\lambda r)}{I_1(\lambda R)} - \frac{r}{R}\right)\cos\theta \tag{3.33}$$

Bu denklemdeki I_2, 1'in birinci dereceden modifiye Besel fonksiyonu dizilişidir. İşte bu bu basınç dağılımı p tarafından eğilme momenti M üretilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\begin{aligned} M &= -\int_0^{2\pi}\int_0^{R} p(r,\theta) r^2 \cos\theta dr d\theta \\ &= \pi K \frac{\alpha}{t}\frac{R^2}{\lambda^2}\left(\frac{(\lambda R)^2}{4} - \lambda R \frac{I_2(\lambda R)}{I_1(\lambda R)}\right) \end{aligned} \tag{3.34}$$

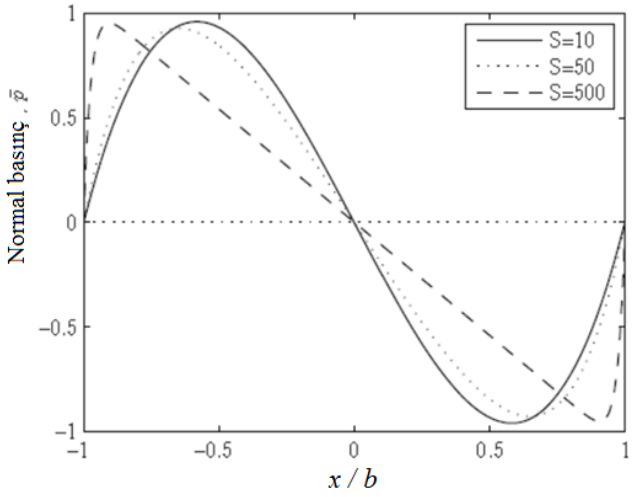
Bu eşitlikteki I_2, 2'nin ikinci dereceden modifiye Besel fonksiyonu dizilişidir. Daha sonra buradan hareket ederek etkili eğilme rijitliği $(EI)_{\text{eff}}$ aşağıdaki eşitlikteki gibi elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$(EI)_{eff} = \frac{\pi K R^2}{\lambda^2}\left(\frac{(\lambda R)^2}{4} - \lambda R \frac{I_2(\lambda R)}{I_1(\lambda R)}\right) \tag{3.35}$$

Az önce (3.35)'deki denklemden elde edilen sonuç, (3.17)'de verilen eşilikteki sıkıştırılamaz durumdaki kauçuk esaslı izolatörlerdeki eğilme rijitliğine oranlıyarak kullanmak çoğu zaman uygun olacaktır.

Yukarıda verilen (3.35)'deki denklem (3.17)!de verilen denkleme bölünerek aşağıdaki oransal eşitlik bulunur.

$$\frac{(EI)_{eff}^{skstrblr}}{(EI)_{eff}^{skstrmaz}} = \frac{24}{\lambda^2 R^2}\left(1 - \frac{4}{\lambda R}\frac{I_2(\lambda R)}{I_1(\lambda R)}\right) \tag{3.36}$$



Şekil 3.5 Sadece eğilme altındaki sonsuz bir kauçuk şeridin normal basınç dağılımı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Veya λR için aşağıdaki eşitlik ilgili denklemde yerine yazılarak (3.37)'de verilen oransal eşitlik elde edilir, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$\lambda R = \sqrt{\frac{48G}{K}}\,S$$

$$\frac{(EI)_{eff}^{skstrblir}}{(EI)_{eff}^{skstrlmaz}} = \frac{K}{2GS^2}\left(1 - \frac{4}{\sqrt{\frac{48G}{K}}\,S}\,\frac{I_2\left(\sqrt{\frac{48G}{K}}\,S\right)}{I_1\left(\sqrt{\frac{48G}{K}}\,S\right)}\right) \tag{3.37}$$

Şekil 3.5'de verilen çeşitli K/G oranları için şekil faktörü S'in bir fonksiyonu olarak yukarıda verile oransal denklem gayet anlaşılır bir eşitliktir ve eğilme rijitliğinin şaşırtıcı bir şekilde düşük şekil faktörü S değerlerinde kauçuğun sıkıştırılabilirliğinden etkilendiği açıkça görülmektedir. Sıkıştırılabilir kauçuk esaslı izolatörler için eğilme rijitliği ile ilgili bir yaklaşım, küçük bir x değeri için aşağıdaki genişletilmiş modifiye Bessel fonksiyonu ile elde edilebilir.

$$I_1(x) = \frac{x}{2} + \frac{x^3}{16} + \frac{x^5}{384} + \ldots$$

$$I_2(x) = \frac{x^2}{8} + \frac{x^4}{96} + \frac{x^6}{3072} + \ldots$$

Ve buradan hareket ederek etkili rijitlik $(EI)_{eff}$ aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\lambda R \frac{I_2(\lambda R)}{I_1(\lambda R)} = \frac{(\lambda R)^2}{4} - \frac{(\lambda R)^4}{96} + \frac{(\lambda R)^6}{1536}$$

$$(EI)_{eff} = 2GIS^2\left(1 - \frac{3GS^2}{K}\right) \tag{3.38}$$

x 'in çok büyük değerleri için, hem I_1 ve hem de I_2 için e^x ve de asimptotik $(EI)_{eff}$ değeri KI'dır, ki burada eğer basınç dağılımı doğrusal ise ve kauçuğun sıkıştırılabilirlik modülü K ise bu beklenebilir bir şeydir. Büyük şekil faktörü S değeleri için basınç dağılımı Şekil (3.33)'de gösterildiği gibi doğrusal olma eğilimindedir ki burada $\lambda \to \infty$ yazılırsa (3.39'da verilen denklemi yazabiliriz.

$$p = -\frac{K\alpha}{t} r\cos\theta \tag{3.39}$$

3.2.2 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı ve Dikdörtgen Kesitli Deprem İzolatörünün Eğilme Rijitliği

Şekil 3.2 'deki dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörü için sonuç, aşağıda (3.40)'da verilen denklemin birinci dereceden Fourier Serisi çözümü göz önüne alınarak saptanabilir.

$$p(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(y)\sin\left(\frac{m\pi x}{b}\right) \tag{3.40}$$

Denklem (3.31)'de yerleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\frac{d^2 Pm(y)}{dy^2} - \left[\left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \lambda^2\right]P_m(y)\right\}\sin\left(\frac{m\pi x}{b}\right) = \frac{\lambda^2 K\alpha}{t}x \tag{3.41}$$

ve $n\pi x$ / b ile çarpılarak ve $-b$ den $+b$'ye integralini alarak (3.42)'de verilen eşitliği elde ederiz.

$$\frac{d^2 P_n(y)}{dy^2} - \beta_n^2 P_n(y) = \frac{2\lambda^2 K\alpha b}{n\pi t}(-1)^{n-1} \tag{3.42}$$

Burada,

$$\beta_n^2 = \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \lambda^2$$

yazılır *ve p(x, ±l/2)* = 0 dan hareket ederek P_n (±l/2) sınır şartları kullanılarak bu kılasik diferansiyel denklem aşağıdaki (3.43)'de verilen eşitlikteki gibi çözülür.

$$p_n(y) = \frac{2\lambda^2 K\alpha b}{n\pi t\beta_n^2}(-1)^n \left(1 - \frac{\cos(\beta_n y)}{\cos(\beta_n l/2)}\right) \tag{3.43}$$

Eğilme zorlaması altındaki elastomer esaslı deprem izolatöründe kauçuk üzerinde meydana gelen basınç için tam çözüm denklemi bir sonraki eşitlikte verilmiştir (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

$$p(x,y) = \frac{2\lambda^2 K\alpha b}{t}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n\pi\beta_n^2}\left[1 - \frac{\cos(\beta_n y)}{\cos(\beta_n l/2)}\right]\sin\left(\frac{n\pi x}{b}\right) \tag{3.44}$$

Ve daha sonra şu eşitlikler yazılır.

$$(EI)_{eff} = \frac{M}{\alpha/t} = -\frac{1}{\alpha/t}\int_{-l/2}^{l/2}\int_{-b}^{b} p(x,y)x\,dx\,dy$$

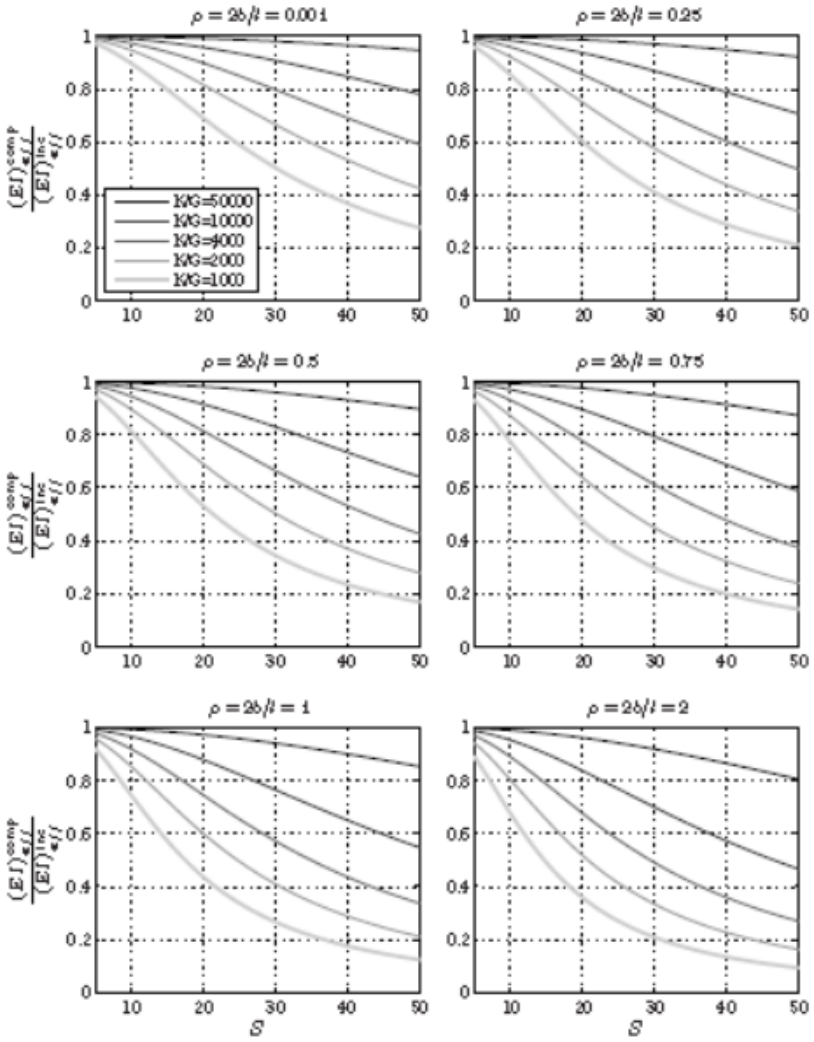
$$= \frac{4\lambda^2 Klb^3}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2\beta_n^2}\left(1 - \frac{2}{\beta nl}\tan\left(\frac{\beta_n l}{2}\right)\right)$$

$$= \frac{48GS^2 lb}{\pi^2}\left(1 + \frac{2b}{l}\right)^2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2\beta_n^2}\left(1 - \frac{2}{\beta_n l}\tan\left(\frac{\beta_n l}{2}\right)\right) \tag{3.45}$$

Eğilme rijitliği üzerinde sıkıştırılabilirliğin etkilerini kontrol etmek için (3.24)'de verilen denklem sıkıştırılamaz malzemeler için etkili *EI* 'ne oranlayarak (3.45)'deki eşitlikten yola çıkarak bir sonraki denklem elde edilir ve aşağıdaki oransal denklemde p = *2b/l* dir. Şekil 3.6 *p* ve farklı *K/G* değerleri için şekil faktörü *S*

değerlerine karşılık gelen $(EI)_{eff}^{sıkştrlblir}$ / $(EI)_{eff}^{skstrılmaz}$ grafiklerini göstermektedir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{(EI)_{eff}^{skstrblir}}{(EI)_{eff}^{skstrlmaz}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4\left(1+\frac{12GS^2}{n^2\pi^2K}(1+p)^2\right)} \left[1-\frac{p}{n\pi}\frac{\tan\left(\frac{n\pi}{p}\sqrt{1+\frac{12GS^2}{n^2\pi^2K}(1+p)^2}\right)}{\sqrt{1+\frac{12GS^2}{n^2\pi^2K}(1+p)^2}}\right]}{\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^4}\left(1-\frac{p}{n\pi}\tan\left(\frac{n\pi}{p}\right)\right)} \quad (3.46)$$



Şekil 3.6 Elastomer esaslı ve dikdörtgen kesitli bir deprem izolatörü için sıkıştırılabilir kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğinin sıkıştırılamaz kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğine oranını gösteren eğriler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

3.2.3 Sıkıştırılabilir Elastomer Esaslı ve İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörünün Eğilme Rijitliği

İçi delikli dairesel kesitli deprem izolatörünün iç çapı *a* ve dış çapı *b* olsun ve burada $a \leq r \leq b$, (3.31)'de verilen denklemde yerlerine yazılarak aşağıdaki (3.47)'deki eşitlik elde edilir, K(elly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} - \lambda^2 p = \lambda^2 \frac{K\alpha}{t} r\cos\theta \tag{3.47}$$

$p(a, \theta) = p(b, \theta) = 0$ sınır şartlarından hareketle,

$$p(r,\theta) = f(r)\cos\theta \tag{3.48}$$

Böyle bir çözüm şekli kabulü ve (3.47)'de verilen denklemde yerleştirilerek klasik bir diferansiyel denklem olan (3.49)'da ki eşitlik bulunur.

$$r^2\frac{d^2f}{dr^2} + r\frac{df}{dr} - \left(1+\lambda^2r^2\right)f = \frac{\lambda^2K\alpha}{t}r^3 \tag{3.49}$$

Yukarıdaki denklemin çözüm şekli aşağıdaki gibidir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$f(r) = \frac{K\alpha}{t}\left(B_1I_1(\lambda r) + B_2K_1(\lambda r) - r\right) \tag{3.50}$$

Burada K_1, 1'in ikinci dereceden modifiye Bessel fonksiyonu dizilişidir. Sınır şartları $f(a) = f(b) = 0$ kullanılarak B_1 ve B_2 sabitleri elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$B_1 = \frac{-bK_1(\lambda a) + aK_1(\lambda b)}{I_1(\lambda a)K_1(\lambda b) - I_1(\lambda b)K_1(\lambda a)}$$

$$B_2 = \frac{bI_1(\lambda a) - aI_1(\lambda b)}{I_1(\lambda a)K_1(\lambda b) - I_1(\lambda b)K_1(\lambda a)} \tag{3.51}$$

O halde,

$$p(r,\theta) = \frac{K\alpha}{t}\left(B_1I_1(\lambda r) + B_2K_1(\lambda r) - r\right)\cos\theta \tag{3.52}$$

ve

$$M = -\int_0^{2\pi}\int_a^b p(r,\theta)r^2\cos\theta dr d\theta$$

$$= -\pi\frac{K\alpha}{t}\left[B_1\frac{r^2}{\lambda}I_2(\lambda r) - B_2\frac{r^2}{\lambda}K_2(\lambda r) - \frac{r^4}{4}\right]_a^b$$

$$= -\pi\frac{K\alpha}{t}\left[\frac{B_1}{\lambda}\left(b^2I_2(\lambda b) - a^2I_2(\lambda a\right) - \frac{B_2}{\lambda}\left(b^2K_2(\lambda b) - a^2K_2(\lambda a)\right) - \frac{b^4-a^4}{4}\right. \tag{3.53}$$

Burada I_2 ve K_2, sırasıyla, 1'in modifiye Bessel fonksiyonun birinci dereceden dizilişi ve ikinci dereceden dizilişidir. Kauçuk tabakanın eğilme rijitliği aşağıda

(3.54)'de verilen denklemle formüle edilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$(EI)_{eff} = -\pi K\left(\frac{B_1}{\lambda}\left(b^2 I_2(\lambda b)\right) - a^2 I_2(\lambda a) - \frac{B_2}{\lambda}\left[b^2 K_2(\lambda b) - a^2 K_2(\lambda a)) - \frac{b^4 - a^4}{4}\right]\right.$$

(3.54)

Şekil faktörü $S = (b - a)/(2t)$, $\eta = a / b$ (yani iç çap dışçap oranı) ve $I = \pi(b^4 - a^4)/4$ kullanılarak eğilme rijitliği EI aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$(EI)_{eff} = KI[1 - B_1'(I_2(v)) - \eta^2 I_2(\eta v) + B_2'\left[K_2(v) - \eta^2 K_2(nv))\right] \quad (3.55)$$

Burada υ,

$$v = \sqrt{\frac{48G}{K}}\,\frac{S}{1-\eta} \quad (3.56)$$

$$B_1' = \frac{4}{v\left(1-\eta^4\right)}\,\frac{-K_1(\eta v) + \eta K_1(v)}{I_1(\eta v)K_1(v) - I_1(v)K_1(\eta v)}$$

$$B_2' = \frac{4}{v\left(1-\eta^4\right)}\,\frac{I_1(nv) - \eta I_1(v)}{I_1(\eta v)K_1(v) - I_1(v)K_1(\eta v)} \quad (3.57)$$

(3.55)'de verilen denklemden elde edilen sonuç, (3.29)'de ki eşitlikte verilmiş olan sıkıştırılamaz kauçuktaki eğilme rijitliğinin, sıkıştırılamaz kauçuktaki eğilme rijitliğine oranını kullanmak çok uygun bir yaklaşımdır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{(EI)_{eff}^{skstrblir}}{(EI)_{eff}^{scstrlmaz}} = \frac{K}{2GS^2}\,\frac{1+\eta^2}{(1+\eta)^2}\left[1 - B_1'(I_2(v) - \eta^2 I_2(\eta v) + B_2'\left(K_2(v) - \eta^2 K_2(nv)\right)\right]$$

(3.58)

Bu bölümde yapılmış olan analizler, elastomer esaslı deprem izolatörlerine ait ve çok geniş bir aralığa sahip şekil faktörleri S için eğilme rijitliği üzerine odaklanmıştır. Elastomer esaslı deprem izolatörlerinin eğilme rijitliği, izolatörün

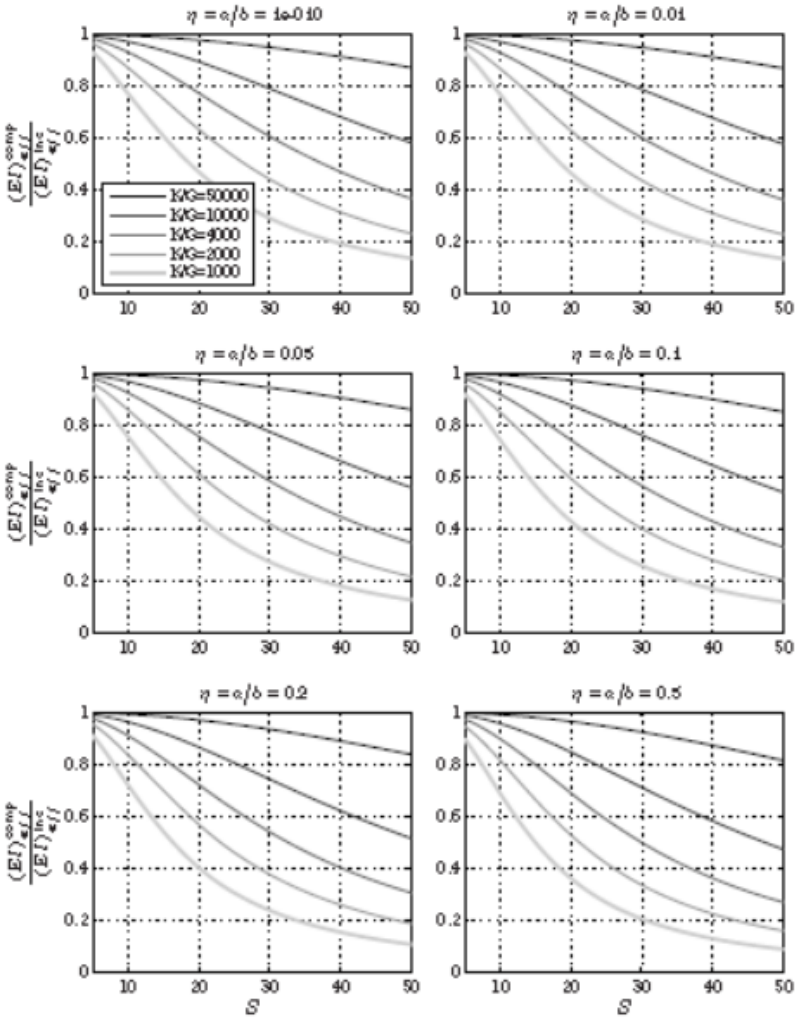
deprem sırasında burkulma davranışını tahmin etmede kullanılabilir önemli bir izolatör özelliğidir.

Deprem yalıtım tasarsım mühendisleri, bu izolatöre dışarıdan bir eğilme momenti uygulanması durumunda basınç yükü altındaki bir izolatörün tepkisini saptamak için ve bir deprem izolatörünün yatay rijitliği üzerinde düşey yükün etkisini tahmin etmek için ihtiyaç duyarlar. Buna ek olarak, bir deprem izolatörü kesme deformasyonuna maruz kaldığı zaman izolatörün üstünde ve altında dengelenmemiş kesme kuvvetleri tarafından bir eğilme momenti üretilir.

Bu söz konusu eğilme momentleri, izolatör tasarımın da önemli olan kauçuk kütledeki kesme gerilmelerine burkulmayla neden olur. Aynı zamanda bu momentler, burkulma ile sonuçlanabilen ince çelik plakalardaki basınç gerilmelerine de sebep olurlar.

Birçok izolatör tiplerinin eğilme rijitliği analizleri bu bölümde yapılmıştır ve burada analizlere hacimsel sıkıştırılabilirlik etkileri konusunun dahil edilmesi tamamen yeni bir konudur ve de bugünün izolatör tiplerinin tasarım uygulamalarında kullanılan tam bir analiz için bu işin ana prensibidir. Bu günün deprem izolatörü imalatçıları tarafından çok büyük şekil faktörlü kauçuk tabakalı izolatörler tercih edilmektedir.

Şekil 3.7, çeşitli şekil faktörü S değerlerine karşılık gelen farklı K / G ve η değerleri için $(EI)_{eff}^{sıkştrlblir} / (EI)_{eff}^{skstrılmaz}$ oranlarının eğrisel grafiklerini göstermektedir.



Şekil 3.7 Elastomer esaslı ve içi delikli dairesel kesitli bir deprem izolatörü için sıkıştırılabilir kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğinin sıkıştırılamaz kauçuk tabakadaki etkili eğilme rijitliğine oranını gösteren eğriler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

BÖLÜM DÖRT
BASINÇ VE EĞİLME ZORLAMASI ALTINDAKİ ÇOK TABAKALI DEPREM İZOLATÖRLERİNDEKİ ÇELİK PLAKALARIN İNCELENMESİ

Elastomer esslı deprem izolatörlerinin ana karakteristiği düşey rijitliklerinin yatay rijitliklerine oranınınçok büyük olmasısıdır, yani, düşey rijitliklerinin yatay rijitliklerine kıyasla çok büyük olmasıdır. Deprem izolatörlerinin düşey yöndeki rijitliklerinin yüksek olmasının nedeni ise izolatör kauçuk tabakaları arasına yerleştirilen ince çelik güçlendirme plakalarıdır. Bu çelik plakalar kauçuk tabakalarının yanal yönde şişmesini engeller, fakat kauçuğu kesme kuvveti yönünde yatay olarak hareketine engellemeksizin izin veririr. Deprem izolatörlerinin düşey rijitliği yatay rijitliklerinin birkaç yüz katıdır. Çelik plakalarla izolatörün düşey yönde güçlendirmesi, izolatör kauçuk tabakalarında meydana gelen kesme gerilmesi üretim etkisine sahiptir ve bu gerilmeler çelik plakalarda çekme gerilmelerine sebep olacak şekilde et ederler. Eğer bu çekme gerilmeleri yeterince büyük olursa, bu çelik plakalar akmaya başlar veya akma sonucunda kalıcı deformasyona geçirerek koparlar.

Deprem izolatörüne dışarıdan gelebilecek muhtemel bir harici basınç önemli bir tasarım paremetresidir. Bu yüzden, izolatöre dışarıdan uygulanan harici yük altında olduğu zaman, bu çekme gerilmelerini tahmin edebilmek için gereklidir. Bu bölümde, yapılacak olan mühendislik çözümleri, elastomer esaslı deprem izolatörlerin güçlendirilmesinde kullanılan ince çelik plakalarda meydana gelen çekme gerilmeleri için geliştirilecektir. Bu çözüm metotları, çelik plakalarda oluşan düzlemsel gerilmelerin genel kullanımını olanaklı hale getirir ve bir gerilim fonksiyonu yaklaşımı kullanırlar, bir ince çelik plakanın alt ve üst yüzeylerinde yüzey gerilmeleri tarafından üretilen gövde kuvvetleri vardır.

Bu da bize, kauçuk tabakadaki basıncın bu gövde kuvvetleri için potansiyel etkileme kapasitesi olduğunu göstermektedir. Mühendislik çözümleri, düşük ve orta büyüklüklerdeki şekil faktörüne sahip deprem izolatörlerini dikkate alınarak, burada kauçuk malzemenin sıkıştırılamaz olduğu varsayımına dayanarak ve aynı zamanda

günüz izolatör uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılan kauçuğun sıkıştırılamaz olduğu kabulüne dayalı büyük şekil faktörlü olduğu ve de kauçuk malzemenin hacimsel modülünün etkileri de işin içine dahil edilerek yapılmalıdır. Söz konusu çelik güçlendirme plakalarındaki gerilme ler, izolatörün sadece basınç altında ve sadece eğilme zorlaması altında olduğu kabul edilerek hesaplanmalıdır. Günümüz uygulamalarında bunlar ayrı ayrı ve kombine edilerek iki şekilde yapılır. Dairesel kesitli bir deprem izolatöründeki çelik plakalardaki gerilme durumları için kauçuk malzemenin sıkıştırılamazlık kabulü ve sadece basınç altın olduğu faraziyesi, gerilme analojisi kullanılarak değerlendirmeye tabi tutulur. Gerilme fonksiyonu metodu kullanımı oldukça yenidir ve dairesel şekilli izolatörlerden başka tip şekilli olan izolatörler için genişletilmiş çözümler için bir metot önermektedirler (Kelly ve Konstantinidis, 2009).

Bu bölümde, elastomer esaslı deprem izolatörlerinin güçlendirilmesinde kauçuk tabakalar arasında kullanılan çelik plakalarda meydana gelen akma incelenecektir. Sıkıştırılamaz olduğu varsayılan kauçuk tabakalar arasındaki ince çelik plakalarda meydana gelen ve akmaya neden olan basıncın sonuçları görülecektir. Burada, kauçuğun sıkıştırılamazlık durumunun yanında kauçuğun sıkıştırılabilirliğinin hesaplamalara dahil edilmesi konusu, daha büyük şekil faktörlü izolatörlerdeki çelik plakalarda akmanın meydana gelmesi konusunda tutucu bir basınç tahmini yapılması varsayımını öngörmektedir.

4.1 Elastomer Esaslı Bir Deprem İzolatöründe Basınç ve Eğilme Konusunun Gözden Geçirilmesi

Bölüm 2 ve 3'te izolatörlerin tek bir kauçuk tabakasının sadece basınç zorlaması ve eğilme zorlaması altındaki davranışı incelendi ve bu bölümde ise, elde edilmiş olan önemli sonuçlar tekrar kısaca özetlenecektir. Dairesel kesitli, yarıçapı R olan ve düşük ve orta büyüklükte şekil faktörlü sıkıştırılamaz bir deprem izolatörü için basınç çözümü bir sonraki denklem ile verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(r) = \frac{3G\varepsilon_c}{t^2}\left(R^2 - r^2\right) \tag{4.1}$$

O halde basınç yükü, (4.2)'da verilen eşitlikteki gibi ifade edilir.

$$P = 2\pi \int_0^R p(r) r dr = \frac{3G\varepsilon_c \pi R^4}{2t^2} \tag{4.2}$$

ve, $S = R / 2t$ ve de $A = \pi R^2$, basınç modülü $E_c = P / A\varepsilon_c$ den hareketle aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$E_c = 6GS^2 \tag{4.3}$$

Sıkıştırılamaz kauçuk esaslı ve dairesel kesitli bir deprem izolatörü için sadece eğilme zorlaması altındaki basınç çözümü aşağıdaki denklem ile formüle edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(r) = \frac{3G}{2t^2}\frac{\alpha}{t}\left(r^2 - R^2\right) r\cos\theta \tag{4.4}$$

Eğilme zorlamasını ε_b'yi tanımlamak için, basınç zorlaması ε_c ile analoji kurmak faydalı olacaktır.

$$\varepsilon_b = \frac{\alpha}{t} R \tag{4.5}$$

Buradan basınç çözüm denklemi şöyle yazılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(r) = \frac{3G\varepsilon_b}{2Rt^2}\left(r^2 - R^2\right) r\cos\theta = 6GS^2\varepsilon_b\left(\frac{r^2}{R^2} - 1\right)\frac{r}{R}\cos\theta \tag{4.6}$$

Sadece basınç altındaki daha büyük şekil faktörlü ve sıkıştırılabilir kauçuk esaslı, dairesel kesitli bir izolatör olması durumunda ise, basınç çözüm denklemi (4.7)'de verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p(r) = K\varepsilon_c\left(1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0(\lambda R)}\right) \tag{4.7}$$

Burada I_0, birinci türden sıfır dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur. Kauçuk izolatörün alanı üzerinde *p* entegrali alınarak *P* ile ilgili aşağıdaki denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P = K\varepsilon_c R^2 \left[1 - \frac{2I_1(\lambda R)}{(\lambda R I_0(\lambda R))}\right] \tag{4.8}$$

Bu eşitlikte $\boldsymbol{I_1}$, 1'in birinci dereceden modifiye edilmiş Bessel fonksiyonudur. Böylece basınç modülü nihai olarak aşağıda verilen eşitlikleki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$E_c = K\left(1 - \frac{2}{\lambda R}\frac{I_1(\lambda R)}{I_0(\lambda R)}\right) \tag{4.9}$$

Burada λR,

$$\lambda R = \sqrt{\frac{12GR^2}{Kt^2}} = \sqrt{\frac{48G}{K}}S$$

Sonuç olarak, sadece eğilme altındaki dairesel kesitli sıkıştırılabilir kauçuk malzeme esaslı bir izolatör için basınç dağılımı, bir önceki bölüm 3'te verilen denklemden hareketle aşağıdaki (4.10) eşitliğindeki gibi olacaktır.

$$p(r) = \frac{K\alpha}{t}\left(R_1\frac{I_1(\lambda r)}{I_1(\lambda R)} - r\right)\cos\theta = K\varepsilon_b\left(\frac{I_1(\lambda r)}{I_1(\lambda R)} - \frac{r}{R}\right)\cos\theta \tag{4.10}$$

4.2 Sıkıştırılamaz Kauçuk Esaslı Dairesel Kesitli Bir Deprem İzolatörü Çelik Plakalarında Meydana Gelen Gerilmeler

Basınç zorlaması veya eğilme zorlaması veya her ikisi birlikte olan zorlama altındaki elastomer esaslı çok tabakalı bir deprem izolatöründe, kauçuk tabakadaki gerilme durumu, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, ince çelik plakalara hem alttan ve hem de üstten yapıştırılarak sınırlandırılmış olan kauçuk tabakasındaki yanal şişkinliklerin de dahil olduğu bir basınç dağılımının var olduğu kabul edilir. Söz konusu çelik

levhalar tarafından sınırlandırılan kauçuk tabakanın her iki yüzeyindeki çelik levhalarda çekme ve basma gerilimleri olarak etki eden gerilmeler, kauçuk tabakada kesme gerilmelerine neden olurlar. Bu tür düzlemsel gerilmeleri çözmek için, yüzeysel gerilmelerin ve yüzeysel kesme gerilmelerinin, düzlemsel gövde kuvvetlerine eşdeğer olduklarını varsayarak, iki boyutlu elastisite teorisi kullanılır. Gelişi güzel şekilli olarak seçilmiş levha veya plaka için düzlemsel gerilme problemini formüle etmek mümkündür, bu çalışma sadece dairesel kesitli deprem izolatörü üzerine yapılmıştır. Bu incelemede Timoshenko ve Goodier (1970) gerilme fonksiyonu kullanılmıştır, (Timoshenko ve Goodier, 1970).

Kauçuk tabakadaki gerilmeler için polar koordinat sistemi (r, θ), denge eşitlikleri kullanılmıştır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{r-}\sigma_\theta}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \qquad (4.11)$$

$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = -p$ olduğu kabul edilir ve z bağımsızdır ve aynı zamanda düzlemdeki kesme kuvveti yani kayma gerilmesi $\tau_{r\theta}$ ihmal edilir. Buradan birinci ve ikinci denge denklemi yazılır.

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial r} \qquad 4.12)$$

$$\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta} \qquad (4.13)$$

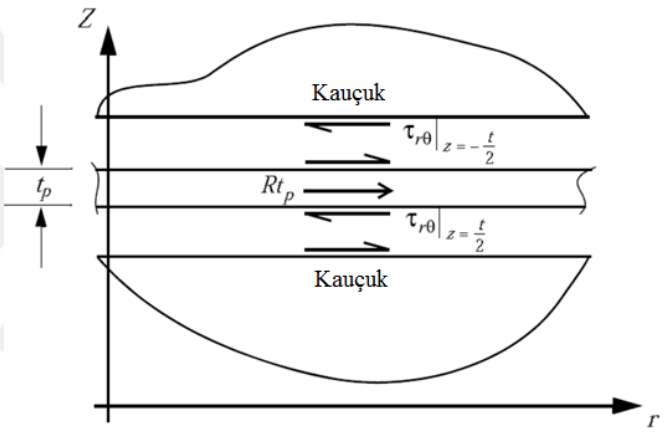
Bu yukarıdaki eşitlikler üçüncü bir denklem olan (4.11)'da ki eşitlikte yerlerine yerleştirilerek z'e göre türev alınarak ve diferansiyel sırasını değiştirerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \qquad (4.14)$$

Bu denklem bize ya (4.12'de ya da (4.13)'deki eşitliklerde yerlerine yerleştirilmesine izin verir, eğer gerekirse, kauçuk tabakasının kalınlığı boyunca σ_z dağılımını saplamamıza müsaade eder. Bu da, yukarıdaki stres varsayımları içinde kalarak, biz p = p(r , θ) yazabiliriz anlamına gelir.

$$\tau_{rz} = \frac{\partial p}{\partial r} z$$

$$\tau_{\theta z} = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} z \qquad (4.15)$$



Şekil 4.1 Kesme gerilmelerinin (kayma gerilmeleri) çelik plakada eşdeğer gövde kuvvetleri üretimi grafiği, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Şekil 4.1' de gösterildiği gibi elastomer esaslı deprem izolatörüne ait çelik plakalar arasındaki kauçuk tabakanın altında meydana gelen kesme gerilmeleri çelik paklanın üst yüzeyinde aşağıdaki kesme gerilmelerini üretirler,

$$\tau_{rz}|_{z=-t/2}$$

$$\tau_{\theta z}|_{z=-t/2}$$

ve kauçuk tabakanın üstünde meydana gelen kayma gerilmeleri ise çelik plakanın alt yüzeyinde kesme gerilmeleri üretirler (Kelly J. M., Tension Buckling in Multilayer Elastomeric Bearings, 2003).

$$\tau_{rz}\big|_{z=-t/2}$$

$$\tau_{\theta z}\big|_{z=-t/2}$$

İnce çelik plakalardaki iç gerilmeler denge denklemine karşılık gelirler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta}+\frac{\sigma_{r-}\sigma_\theta}{r}+R=0$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial r_\theta}{\partial \theta}+\frac{2\tau_{r\theta}}{r}+S=0 \tag{4.16}$$

Bu denklemlerde *R* ve *S*, birim hacim başına yüzeydeki kesme gerilmeleri tarafından üretilen eşdeğer gövde kuvvetleridir ve denklem (4.17)'te verilen eşitliklerdir.

$$t_p R=\tau_{rz}\big|_{z=-t/2}\ -\tau_{rz}\big|_{z=t/2}$$

$$t_p S=\tau_{\theta z}\big|_{z=-t/2}-\tau_{\theta z}\big|_{z=t/2} \tag{4.17}$$

Bu eşitliklerde, t_p, ince çelik plakaların kalınlığıdır.

$$R=-\frac{t}{t_p}\frac{\partial p}{\partial r}$$

$$S=-\frac{t}{t_p}\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta} \tag{4.18}$$

Burada basıncın gövde kuvvetleri için bir potansiyel *V* rolü oynadığı aşağıdaki denklemden açıkça görülmektedir.

$$V(r,\theta)=\frac{t}{t_p}\,p(r,\theta) \tag{4.19}$$

$$R = -\frac{\partial V}{\partial r}$$

$$S = -\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta} \tag{4.20}$$

ve daha sonra, çelik plaka için denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial(\sigma_r - V)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{(\sigma_r - V) - (\sigma_\theta - V)}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial(\sigma_\theta - V)}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \tag{4.21}$$

Bu denklemler söz konusu bu gerilmeler için $\Phi(r, \theta)$ bir gerilme fonksiyonu ile aşağıdaki gibi ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_r - V = \frac{1}{r}\frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}$$

$$\sigma_\theta - V = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \Phi}{\partial \theta}\right) \tag{4.22}$$

Plakadaki gerilme kabulleri altında Φ için eşitlik (4.23) denklemi ile elde edilir.

$$\nabla^2\nabla^2\Phi + (1+\upsilon)\nabla^2 V = 0 \tag{4.23}$$

Burada υ, çeliğin Poizon oranıdır, sadece basınç altında eşitlik aşağıdaki gibi olur,

$$\nabla^2 \rho = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \tag{4.24}$$

ve sadece eğilme için ise aşağıdaki denklem yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2 p = \frac{12GE_b}{t^2}\frac{r}{R}\cos\theta \tag{4.25}$$

4.2.1 Deprem İzolatörü Çelik Plakalarında Sadece Basınç Zorlaması Altında Meydana Gelen Gerilim Fonksiyonu Çözümü

Deprem izolatörü çelik plakalarında sadece basınç zorlaması altında meydana gelen gerilim fonksiyonu (Φ) aşağıda (4.26)'de verilen çözüm denklemi ile verilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2\nabla^2\Phi + \overline{C} = 0 \tag{4.26}$$

Burada verilen $\overline{C}$ sabit bir değere sahiptir.

$$\overline{C} = -(1-v)\frac{12G\varepsilon_c}{t_p t} \tag{4.27}$$

Bu durumda, gerilim fonksiyonu sadece ***r***'ye bağlıdır ve çözümün sonucu için Timoshenko ve Goodier'in geliştirmiş olduğu çözüm fonksiyonuna bakılmalıdır, (Timoshenko & Goodier, 1970).

$$\Phi = A\ln r + Br^2\ln r + Cr^2 + D - \frac{\overline{C}r^4}{64} \tag{4.28}$$

Elde edilen gerilimle r, (4.29)'da verilen eşitlik ile ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_r - \frac{t}{t_p}p(r) = \frac{A}{r^2} + B(1+2\ln r) + 2C - \frac{1}{16}\overline{C}r^2$$

$$\sigma_\theta - \frac{t}{t_p}p(r) = -\frac{A}{r^2} + B(3+2\ln r) + 2C - \frac{3}{16}\overline{C}r^2 \tag{4.29}$$

Dairesel şekilli bir çelik plaka için hem A ve hem de B'nin sıfır olduğu açıktır ve $\sigma(R) = 0$ ve de $r = R$'de basıncın sıfır olduğu bir gerçektir.

$$2C = \frac{\overline{C} R^2}{16} \tag{4.30}$$

Denklem (4.1)'de verilen eşitlikten kullanılarak $\overline{C}$ ve denklem (4.27)'den hareketle çekme gerilmeleri σ_r ve σ_θ için çözüm denklemi (4.31)'deki gibidir.

$$\sigma_r = \frac{3G\varepsilon_c}{tt_p}\frac{3+v}{4}\left(R^2 - r\right) = 3GS^2\varepsilon_c \frac{t}{t_p}(3+v)\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

$$\sigma_\theta = \frac{3}{4}\frac{G\varepsilon}{tt_p}\left[(3+v)R^2 - (1+3v)r^2\right] = 3GS^2\varepsilon_c \frac{t}{t_p}\left(3 + v - (1+3v)\frac{r^2}{R^2}\right) \tag{4.31}$$

Sadece basınç altında ve $\boldsymbol{v = 0}$ olduğu durumda çelik plakadaki gerilim dağılımı Şekil 4.2'de gösterildiği gibidir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$S_r = \frac{\sigma_r}{3GS^2\varepsilon_c(t/t_p)}, S_\theta = \frac{\sigma_\theta}{3GS^2\varepsilon_c(t/t_p)} \tag{4.32}$$

Ve çelik plakanın merkezinde gerilmeler şöyle ifade edilir,

$$\sigma_{\max} = \sigma_r = \sigma_\theta = 3GS^2\varepsilon_c \frac{t}{t_p}(3+v) \tag{4.33}$$

Çelik plaka üzerindeki ortalama basınca bağlı olarak maksimum gerilmeleri ifade etmek için P_{ort} aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_{ort} = E_c\varepsilon_c = 6GS^2\varepsilon_c \tag{4.34}$$

ve buradan şu eşitlik elde edilir,

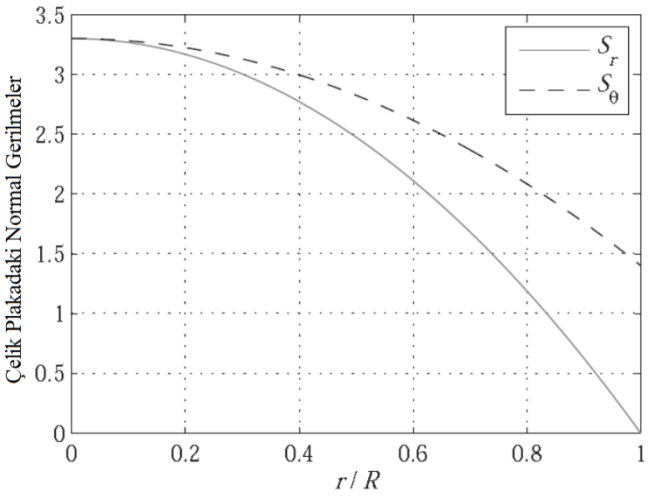
$$\frac{\sigma_{\max}}{P_{ort}} = \frac{3+v}{2}\frac{t}{t_p} \tag{4.35}$$

Çelik plaka merkezinde akmaya neden olan maksimum basıncı belirlemek için yukarıda verilen (4.35)denklemi kullanılabilir. Normal koşullar altında, çelik plakalardaki gerilmelerin basın yüzünden meydana gelmesi bir önem arz etmez. Örneğin, 3mm kalınlıkta çelik plakalar ve 15mm kalınlıkta kauçuk tabakalar üzerinde inceleme yapılıyorsa, çelik plakada standart 7,0 MPa'lık bir basınca neden

olan gerilmeler çelik plakanın akma seviyesi 58 MPa'lın iyice altında bir değerde gerçekleşirler.

Eğer plakanın merkezindeki çekme gerilmesi, çelik malzemenin akma gerilmesi ile ilgili bir gerçeklikse, o halde daha sonra çeliğin akmaya başlamayabilmesi için ortalama basınç P_{ort} (4.36)'da verilmiştir. Bu sadece akmanın başlamasıdır, fakat çelik plaka üzerindeki basınç artıkça ayrıca daha fazla akmaya çalışacaktır.

$$P_{ort} = \frac{2}{3+v}\frac{t_p}{t}\sigma_0 \tag{4.36}$$



Şekil 4.2 Sıkıştırılamaz kabulü ile basınç altında çelik plakadaki gerilmeler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Çelik plakadaki akma bölgesi, çelik plaka tamamen akıncaya kadar basıncın artışına bağlı olarak plakanın merkezinden dış yarıçapa doğru dağılım gösterecektir, yani, akmanın meydana geldiği bölge tam plastik bölgeye ulaşıncaya kadar $0 \leq r \leq R$ bu devam eder. Tıpkı ince çelik bir diskte merkez kaç kuvvetine neden olan gerilmeler olduğu gibi bu durumda da problemin aynı olduğuna dikkat etmek gerekir. Baştan sona tamamen farklı bir deplasman yaklaşımına dayanan Timoshenkon ve Goodier denklemlerinde verilen çözüm kullanılarak ve sabitler hariç tutulmak koşulu ile tamamıyla aynıdırlar. Timoshenkon ve Goodier'in geliştirdikleri denklemler, merkezindeki delik yarıçapı α olan ve çelik plaka yarıçapı

r olan dairesel şekilli bir çelik plaka için ve $\alpha \leq r \leq b$ için akma gerilmeleri (4.37)'deki gibi olacaktır, (Timoshenko & Goodier, 1970).

$$\sigma_r = \frac{3}{4}\frac{G\varepsilon_c}{tt_p}(3+v)\left(b^2+a^2-\frac{a^2b^2}{r^2}-r^2\right)$$

$$\sigma_\theta = \frac{3}{4}\frac{G\varepsilon_c}{tt_p}(3+v)\left(b^2+a^2+\frac{a^2b^2}{r^2}-\frac{1+3v}{3+v}r^2\right) \tag{4.37}$$

Maksimum çapsal gerilim ise,

$$r = \sqrt{ab}$$

yukarıda verilen *r* için aşağıdaki gibidir, ve buradan maksimum radyal gerilim ve maksimum teğetsel gerilim sınır şartları içinde aşağıda (4.38) ve (4.39)'da verilen eşitlikte olduğu gibi olacaktır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_r = \frac{3}{4}\frac{G\varepsilon_c}{tt_p}(3+v)(b-a)^2 \tag{4.38}$$

$$\sigma_\theta = \frac{3}{4}\frac{G\varepsilon_c}{tt_p}(3+v)\left(b^2+\frac{1-v}{3+v}a^2\right) \tag{4.39}$$

Burada, maksimum teğetsel gerilmeler, maksimum çapsal gerilmelerden daima daha büyüktürler. Dairesel şekilli çelik diskin merkezinde bulunan α yarıçaplı delik çok çok küçük hale geldiği zaman maksimum teğetsel gerilmeler dairesel çelik plakanın tamamını kaplayacak şekilde neredeyse iki katı bir değere yaklaşacaktır. Bu küçük bir delikteki gerilme yoğunluna diğer bir örnektir.

4.2.2 Deprem İzolatörü Çelik Plakalarında, Sadece Eğilme Zorlaması Altında Meydana Gelen Gerilim Fonksiyonu Çözümü

Sadece eğilme zorlaması altındaki deprem izolatörü için gerilim fonksiyonu eşitliği aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2\nabla^2\Phi + \overline{C}r\cos\theta = 0 \tag{4.40}$$

ve

$$\overline{C} = (1 - v)\,\frac{12G\varepsilon_b}{Rtt_p} \tag{4.41}$$

Buradan hareketle bir çözüm denklemi yazalım,

$$\Phi(r,\theta) = f(r)\cos\theta \tag{4.42}$$

Timoshenkon ve Goodier denklemlerinden hareket ederek f i çin sıradan bir diferansiyel denklem yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{d^4 f}{dr^4} + \frac{2}{r}\frac{d^3 f}{dr^3} - \frac{3}{r^2}\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{3}{r^3}\frac{df}{dr} - \frac{3}{r^4} f + \overline{C}_r = 0 \tag{4.43}$$

Ve çözüm denklemi (4.44)'de verilen eşitlikle ifade edilir.

$$f(r) = Ar^3 + \frac{B}{r} + Cr + Dr\ln r - \frac{\overline{C} r^5}{192} \tag{4.44}$$

Sonuç olarak, elde edilen gerilmeler şöyle yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\begin{aligned}
\sigma_r - \frac{t}{t_p} p &= \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r}\right)\cos\theta + \overline{R} \\
\sigma_\theta - \frac{t}{t_p} p &= \left(6Ar + \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r}\right)\cos\theta + \overline{S} \\
\tau_{r\theta} &= \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r}\right)\sin\theta + \overline{T}
\end{aligned} \tag{4.45}$$

ve bu eşitliklerden aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\overline{R} = \left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}\right)\left(-\frac{\overline{C} r^5}{192}\cos\theta\right) = -\frac{\overline{C} r^3}{48}\cos\theta$$

$$\overline{S} = \frac{\partial^2}{\partial r^2}\left(-\frac{\overline{C} r^5}{192}\cos\theta\right) = -\frac{5\overline{C} r^3}{48}\cos\theta$$

$$\overline{T} = -\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(-\frac{\overline{C}r^5}{192}\cos\theta\right)\right] = -\frac{\overline{C}r^3}{48}\sin\theta \tag{4.46}$$

Çelik plakanın tamamı için $0 \leq r \leq R$, B ve D sıfır olmalıdır,

$$\sigma_r = \frac{t}{t_p}p(r,\theta) + 2Ar\cos\theta - \frac{\overline{C}r^3}{48}\cos\theta \tag{4.47}$$

ve p(r, θ) sınırda sıfır olmalıdır, σ_r (R, θ) = 0 gerekliliğinden aşağıdaki nihai eşitlikler yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

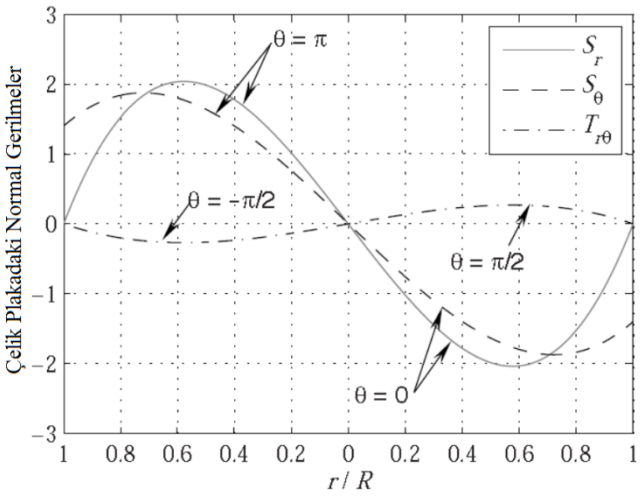
$$2A = \frac{\overline{C}R^2}{48}$$

$$\sigma_r(r,\theta) = -\frac{G\varepsilon_b}{4tt_pR}(5+v)\left(R^2 - r^2\right)r\cos\theta$$

$$\sigma_\theta(r,\theta) = \frac{G\varepsilon_b}{4tt_pR}\left[(1+5v)r^2 - 3(1+v)R^2\right]r\cos\theta$$

$$\tau_{r\theta}(r,\theta) = -\frac{G\varepsilon_b}{4tt_pR}(1-v)\left(R^2 - r^2\right)r\sin\theta \tag{4.48}$$

Bu elde edilen sonuçlar, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi boyutsuz gerilmeler olarak gösterilirler.



Şekil 4.3 Sıkıştırılamaz durum için eğilme momenti altındaki çelik plakada meydana gelen gerilmeler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Buradan aşağıdaki denklemler yazılır, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$S_r = \frac{\sigma_r(r,\theta)}{GS^2\varepsilon_b\dfrac{t}{t_b}} = -(5+v)\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right]\frac{r}{R}\cos\theta$$

$$S_\theta = \frac{\sigma_\theta(r,\theta)}{GS^2\varepsilon_b\dfrac{t}{t_b}} = \left[(1+5v)\left(\frac{r}{R}\right)^2 - 3(1+v)\right]\frac{r}{R}\cos\theta$$

$$T_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}(r,\theta)}{GS^2\varepsilon_b\dfrac{t}{t_b}} = (1-v)\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right]\frac{r}{R}\sin\theta \qquad (4.49)$$

4.3 Sıkıştırılabilir Kauçuk Esaslı Dairesel Kesitli Bir Deprem İzolatöründe Güçlendirme İçin Kullanılan İnce Çelik Plakalardaki Gerilmeler

4.3.1 Sadece Basınç Zorlaması Altındaki Çelik Plakalarda Gerilme Fonksiyonu Çözümü

İzolatör çelik plakalarında meydana gelen çekme gerilmesi, gerilme fonksiyon metodu kullanılarak hesaplanabilir. Gerilme fonksiyonu için denklem aynı kalır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2\nabla^2\Phi + (1-v)\nabla^2 V = 0$$

ve potansiyel $V\ (r,\ \theta)$ tanımı aynıdır, $V = (t/t_p)\ p(r,\ \theta)$, fakat basınç şimdi burada aşağıdaki denklemi vermektedir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla_P^2 - \frac{12G}{Kt^2}\,p = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \tag{4.50}$$

Şimdi böylece gerilme fonksiyonu aşağıdaki (4.51)'deki denklemi verir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2\nabla^2\Phi + (1-v)\,\frac{t}{t_p}\,\frac{12G}{t^2}\left(\frac{p}{K} - \varepsilon_c\right) = 0 \tag{4.51}$$

(4.7)'de daha önce verilmiş olan denklemde p yerine yazılarak bir sonraki eşitlik elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2\nabla^2\Phi - (1-v)\,\frac{t}{t_p}\,\frac{12G}{t^2}\,\frac{I_0(\lambda r)}{I_0(\lambda R)}\,\varepsilon_c = 0 \tag{4.52}$$

Sadece basınç için çözüm rotasyonel simetriktir ve çözümün tamamlayıcı kısmı aynı kalır, ancak $I_0\ (\lambda r)$ terimine karşılık gelen özel integrali tanımlamak gerekir. Bunu yapabilmek için radyal simetri tekrar hatırlamalıdır.

$$\nabla^2\nabla^2(f) = \frac{1}{r}\,\frac{d}{dr}\left(r\,\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r}\,\frac{d}{dr}\left(r\,\frac{df}{dr}\right)\right)\right) \tag{4.53}$$

$f = I_0(\lambda r)$ alarak, $x = \lambda r$ değişkenini değiştirerek ve x'in boyutsuzluğunu hatırlatarak ve de ters yönde bir uzunluktur.

$$\nabla^2\nabla^2\Phi|_r = \left(\frac{1}{\lambda^4}\right)\nabla^2\nabla^2\Phi|_x$$

Böylece, başarılı bir şekilde aşağıdaki eşitlikler yazılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{1}{x}\frac{d}{dx}\left(x\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\frac{d}{dx}\left(x\frac{df}{dx}\right)\right)\right) = I_0(x)$$

$$x\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\frac{d}{dx}\left(x\frac{df}{dx}\right)\right) = \int xI_0(x)dx = xI_1(x)$$

$$\frac{1}{x}\frac{d}{dx}\left(x\frac{df}{dx}\right) = \int I_1(x)dx = I_0(x)$$

$$x\frac{df}{dx} = \int xI_0(x)dx = xI_1(x)$$

$$f = I_0(x) \tag{4.54}$$

Gerilme fonksiyonu Φ için sonuç denklemi şöyle yazılır,

$$\Phi = A\ln r + Br^2\ln r + Cr^2 + D + \frac{1}{\lambda^4}\overline{C}I_0(\lambda r) \tag{4.55}$$

ve burada $\overline{C}$ sabiti şöyle formüle edilir,

$$\overline{C} = (1-v)\frac{t}{t_p}\frac{12G\varepsilon_c}{t^2}\frac{1}{I_0(\lambda R)} \tag{4.56}$$

ve gerilme denklemleri de aşağıdaki gibi olacaktır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_r - \frac{t}{t_p}p(r) = \frac{A}{r^2} + B(1+2\ln r) + 2C + \frac{\overline{C}}{\lambda^2}\frac{I_1(\lambda r)}{\lambda r}$$

$$\sigma_\theta - \frac{t}{t_p}p(r) = -\frac{A}{r^2} + B(3 + 2\ln r) + 2C + \frac{\overline{C}}{\lambda^2}\left(I_0(\lambda r) - \frac{I_1(\lambda r)}{\lambda r}\right) \tag{4.57}$$

Çelik plakanın tamamında *A* ve *B* sıfır olmak koşulu ile ve dış yarıçapta basıncın sıfır olduğu durumda $\sigma_r(R) = 0$ şartlarında $\overline{C}$ sabiti şöyle ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$C = -\frac{\overline{C}}{2\lambda^2}\frac{I_1(\lambda R)}{\lambda R} \tag{4.58}$$

(4.7)'de verilen *p(r)* denklemi ile aşağıdaki eşitlik yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_r = \frac{t}{t_p}K\varepsilon_c\left[1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0(\lambda R)} - \frac{1-v}{I_0(\lambda R)}\left(\frac{I_1(\lambda R)}{\lambda R} - \frac{I_1(\lambda r)}{\lambda r}\right)\right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{t}{t_p}K\varepsilon_c\left[1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0(\lambda R)} - \frac{1-v}{I_0(\lambda R)}\left(\frac{I_1(\lambda R)}{\lambda R} + \frac{I_1(\lambda r)}{\lambda r} - I_0(\lambda r)\right)\right] \tag{4.59}$$

Çelik plakanın merkezindeki gerilmeler ise (4.60)'de verilen formülle ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{t}{t_p}K\varepsilon_c\left[1 - \frac{1}{I_0(\lambda R)} - \frac{1-v}{I_0(\lambda R)}\left(\frac{I_1(\lambda R)}{\lambda R} - \frac{1}{2}\right)\right] \tag{4.60}$$

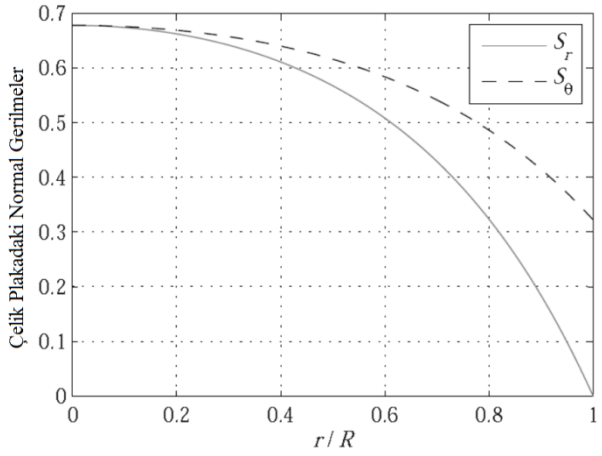
Şimdi, Şekil faktörünün $S = 30$, kauçuğun kayma modülünün $G = 0{,}42$ MPa ve hacimsel modülünün $E_c = 2000$ MPa, $\lambda R = 3$ olması durumunda bu sonuçları açıklığa kavuşturalım. Çelik plakadaki normal gerilmeler aşağıdaki gibi gösterilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$S_r = \frac{\sigma_r}{K\varepsilon_c\left(\frac{t}{t_p}\right)}, S_\theta = \frac{\sigma_\theta}{K\varepsilon_c\left(\frac{t}{t_p}\right)} \tag{4.61}$$

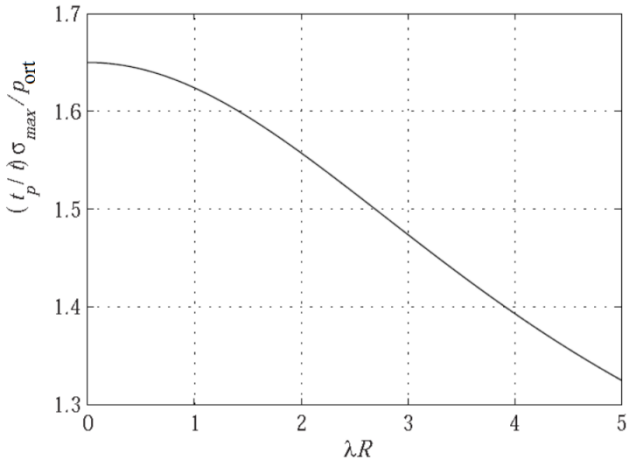
Şekil 4.4' te *r / R*'nin bir fonksiyonu gösterilmiştir.

Eğer, sıkıştırılamaz durum için aynı sonuçları veren çözümü bulunan bu çelik plakaların merkezinde maksimum gerilme değerleri karşılaştırılırsa, ortalama basıncı saptamak için (4.8)'de verilen denklemden hareket ederek (4.60)'ki eşitlikten şu aşağıda verilen denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\sigma_{\max}}{P_{ort}} = \frac{t}{t_p} \frac{I_0(\lambda R) - 1 - (1-v)\left(\frac{I_1(\lambda R)}{\lambda R} - \frac{1}{2}\right)}{I_0(\lambda R) - \frac{2}{\lambda R} I_1(\lambda R)} \tag{4.62}$$



Şekil 4.4 Büyük şekil faktörleri için basınç altında çelik plakadaki gerilmeler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).



Şekil 4.5 Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz durumlarda çelik plakalardaki maksimum gerilme oranları, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Şekil 4.5, sıkıştırılamaz durum için sıfırdan λR değerine kadar denklem (4.62)'nin bir grafik gösterimidir. Bu şekil, sıkıştırılabilirlik artıkça ε_c değeri ve t / t_p için daha küçük pik gerilmeler olacağını göstermektedir. Sıkıştırılamaz durumda hesaplamalar için izolatör büyük şekil faktörüne sahipse tutucu bir gerilim tahmininde bulunulur, ancak maksimum çekme gerilmelerinin değerlerinin öngörülmesinde çoğunlukla basit bir tahmin metodu kullanılır.

4.3.2 Sadece Eğilme Zorlaması İçin Çelik Plakadaki Gerilme Fonksiyonu Çözümü

Deprem izolatörüne ait bir kauçuk tabakayı alttan ve üstten yapıştırılmış olan iki adet ince çelik plaka arasındaki α dönme açısı ile sadece eğilme zorlaması altındaki elastomer esaslı bir deprem izolatörü için gerilme fonksiyonu çözüm denklemleri (4.10) ve (4.23)' de verilmiştir ve Şekil 3.1' de gösterilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2\nabla^2\Phi + (1-v)\,\frac{t}{t_p}\,\frac{12G\varepsilon_b}{t^2}\,\frac{I_1(\lambda r)}{I_1(\lambda R)} \tag{4.63}$$

Bu denklemlerde hareketle bir çözüme ulaşalım.

$$\Phi(r,\theta) = f(r)\cos\theta \tag{4.64}$$

f için klasik diferansiyel denklemde (4.63)'de verilen eşitlikte sonuçlar yerlerine yazılarak aşağıdaki denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{d^2 f}{dr^4} + \frac{2}{r}\frac{d^3 f}{dr^3} - \frac{3}{r^2}\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{3}{r^3}\frac{df}{dr} - \frac{3}{r^4} f + \overline{C} I_1(\lambda r) = 0 \tag{4.65}$$

$$\overline{C} = (1-v)\,\frac{t}{t_p}\,\frac{12G\varepsilon_b}{t^2}\,\frac{1}{I_1(\lambda R)} \tag{4.66}$$

Çözüm denkleminin bir parçası olan eşitlik aşağıda verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$f(r) = Ar^3 + \frac{B}{r} + Cr + Dr\ln r \tag{4.67}$$

Ve özel integral şöyle yazılabilir,

$$-\left(\frac{\overline{C}}{\lambda^4}\right) I_1(\lambda r)$$

Buradan çelik plakadaki gerilmeler aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\begin{aligned}
\sigma_r - \frac{t}{t_p}p &= \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r}\right)\cos\theta + \overline{R} \\
\sigma_\theta = \frac{t}{t_b}p &= \left(6Ar + \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r}\right)\cos\theta + \overline{S} \\
\tau_{r\theta} &= \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r}\right)\sin\theta + \overline{T}
\end{aligned} \tag{4.68}$$

$$\begin{aligned}
\overline{R} &= \left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}\right)\left(-\frac{\left(\overline{C}I_1(\lambda r)\cos\theta\right)}{\lambda^4}\right) = \frac{2I_1(\lambda r) - I_0(\lambda r)\lambda r}{\lambda^2 r^2}\frac{\overline{C}}{\lambda^2}\cos\theta \\
\overline{S} &= \frac{\partial^2}{\partial r^2}\left(-\frac{(\overline{C}I_1(\lambda r)\cos\theta}{\lambda^4}\right) = \frac{I_0(\lambda r)\lambda r - I_1(\lambda r)\left(2+\lambda^2 r^2\right)}{\lambda^2 r^2}\frac{\overline{C}}{\lambda^2}\cos\theta \\
\overline{T} &= -\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(-\frac{\left(\overline{C}I_1(\lambda r)\cos\theta\right)}{\lambda^4}\right)\right) = \frac{2I_1(\lambda r) - I_0(\lambda r)\lambda r}{\lambda^2 r^2}\frac{\overline{C}}{\lambda^2}\sin\theta
\end{aligned} \tag{4.69}$$

plakanın tamamı için $0 \leq r \leq R$ ve hem B ve hem de D'yi sıfır yazarak (4.70)'de verilen denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$A = \frac{1}{2R}\frac{I_0(\lambda R)\lambda R - 2I_1(\lambda R)}{\lambda^2 R^2}\frac{\overline{C}}{\lambda^2} \tag{4.70}$$

(4.10)'da ve (4.66)'de verilen eşiliklerde $p(r, \theta)$ için değerler yerlerine yerleştirilerek

$$\lambda^2 = \frac{12G}{Kt^2}$$

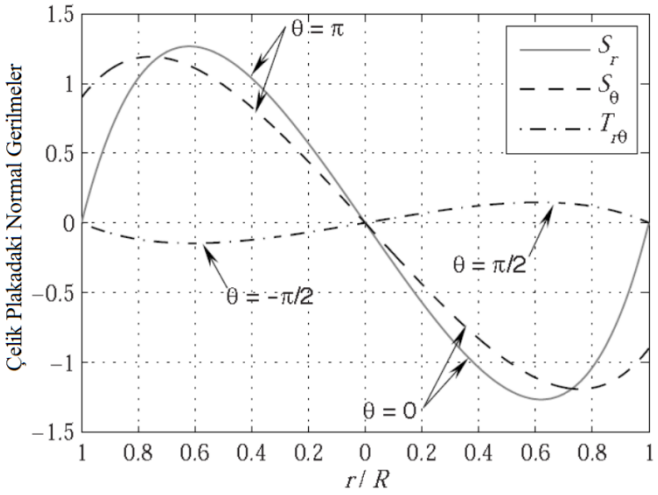
kullanılarak aşağıda verilen denklemler yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\sigma_r = K\varepsilon_b \frac{t}{t_p}\left[\frac{\mathrm{I}_1(\lambda r)}{\mathrm{I}_1(\lambda R)} - \frac{r}{R} + \frac{1-\nu}{\mathrm{I}_1(\lambda R)}\left(\frac{\mathrm{I}_0(\lambda R)\lambda R - 2\mathrm{I}_1(\lambda R)}{\lambda^2 R^2}\frac{r}{R} - \frac{\mathrm{I}_0(\lambda r)\lambda r - 2\mathrm{I}_1(\lambda r)}{\lambda^2 r^2}\right)\right]\cos\theta$$

$$\sigma_\theta = K\varepsilon_b \frac{t}{t_p}\left[\frac{\mathrm{I}_1(\lambda r)}{\mathrm{I}_1(\lambda R)} - \frac{r}{R} + \frac{1-\nu}{\mathrm{I}_1(\lambda R)}\left(3\frac{\mathrm{I}_0(\lambda R)\lambda R - 2\mathrm{I}_1(\lambda R)}{\lambda^2 R^2}\frac{r}{R} + \frac{\mathrm{I}_0(\lambda r)\lambda r - \mathrm{I}_1(\lambda r)\left(\lambda^2 r^2 + 2\right)}{\lambda^2 r^2}\right)\right]\cos\theta$$

$$\tau_{r\theta} = K\varepsilon_b \frac{t}{t_p}\frac{1-\nu}{\mathrm{I}_1(\lambda R)}\left(\frac{\mathrm{I}_0(\lambda R)\lambda R - 2\mathrm{I}_1(\lambda R)}{\lambda^2 R^2}\frac{r}{R} - \frac{\mathrm{I}_0(\lambda r)\lambda r - 2\mathrm{I}_1(\lambda r)}{\lambda^2 r^2}\right)\sin\theta \quad (4.71)$$

Bu sonuç çözüm denklemleri $\lambda R = 3$ olduğu zamanki durum için Şekil 4.6da eğrisel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Büyük şekil faktörlerinde eğilme zorlaması altındaki çelik plakada gerilmeler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

4.4 Basınç Zorlaması Altında İnce Çelik Plakaların Akması

Bu bölümde yapacağımız analizlerde, sıkıştırılamaz durum için ince çelik plakaların tamamında akmaya neden olan basınç zorlamaları incelenecektir. Büyük şekil faktörlü deprem izolatöründeki çelik plakaların tamamen akması ile sonuçlanan tutucu bir basınç tahmini yaklaşımında kauçuğu sıkıştırılabilir olduğu işin içine dahil edilmelidir.

4.4.1 Sıkıştırılamaz Kauçuk İçin Deprem İzolatörü İnce Çelik Plakalarının Akması

Daha önce yapılmış olan analizlerde, tamamen elastik olduğu farz edilen ince çelik plakalardaki çekme gerilmeleri üzerine yoğunluk verilmişti, bu ise, sadece basınç zorlamasının olması altında ince çelik plakalarda tam olarak akmaya neden olacak olan basıncın tahmin edilmesi ile mümkündür. Bu da, Şekil 4.7'de gösterilen Tresca akma şartı kullanılarak, tam bir akmaya sebep olması için gerekli olan basıncı ön görebilecek özel basit bir çözüme izin verir, (Prager & Hodge, 1951).

Burada, çeliğin akma gerilmesinin ki burada N_0, ve $N_0 = \sigma_0 t_p$, σ_0 tarafından çelik plakadaki akma kuvvetine işaret ettiği göz önünde tutulmalıdır. Burada, hem çap doğrultusundaki kuvvet N_r yönünde ve hem de teğetsel yöndeki kuvvet N_θ

doğrultusunda çekme olduğu ve $N_\theta = N_0$ ve de $0 \leq N_r \leq N_0$ olduğu kabul ederek çelik plaka için denge denklemi aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\mathrm{d}N_r}{\mathrm{d}r} + \frac{N_r - N_\theta}{r} + \tau_{rz}\big|_{z=-t/2} - \tau_{rz}\big|_{z=t/2} = 0 \tag{4.72}$$

veya 4.1)'de verilen denklemden p ve (4.15)'de verilen denklemden kesme gerilmelerinden hareketle aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{\mathrm{d}N_r}{\mathrm{d}r} + \frac{N_r - N_\theta}{r} = -\frac{6G\varepsilon_c}{t}r \tag{4.73}$$

Eğer çelik plakanın rijit olduğu farzedilirse, denge denklemi için tek çözüm yoktur. Ancak eğer çelik plakanın deforme olabileceği kabul edilirse, hatta deformasyon bile ihmal edilebilirse, tek bir çözüm elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\mathrm{d}\,(r\,N_r)}{\mathrm{d}r} = N_o - \frac{6\,G\varepsilon_c}{t}r^2 \tag{4.74}$$

Bu denkleminin, $r = 0$'da, $N_r = N_\theta = N_0$ sınır şartı çerçevesinde integral alınarak aşağıdaki eşitlik elde edilir,

$$N_r\,(r) = N_o - \frac{2\,G\varepsilon_c}{t}r^2 \tag{4.75}$$

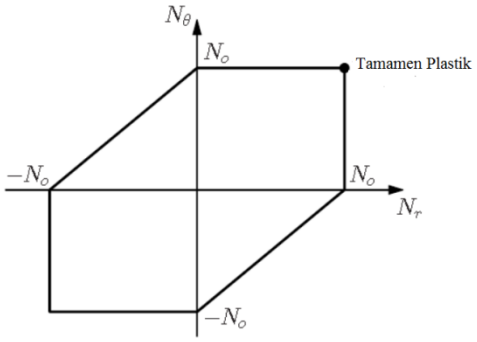
ve diğer bir sınır şartı $r = R$ de $N_r = 0$, maksimum ε_c değerini verir. Sırasıyla

$P_{ort} = E_c\,\varepsilon_c = 6\,GS^2\,\varepsilon_c$ aşağıdaki P_{ort} ortalama denklemini verir.

$$p_{ort} = \frac{3}{4}\frac{t_p}{t}\sigma_0 \tag{4.76}$$

Çelik plakanın tamamen akmasına neden olacak ortalama bir basınca gereksinim vardır. Böylece, akmanın başladığı zamandaki tam akma durumundaki basınç oranı 1,23 civarındadır. Kauçuğun sıkıştırılamaz olduğu kabulüne dayanan bu hesaplama

metodu burada vurgulanmalıdır ve çoğu uygulamada, bu kabullerin yapılabilmesi için daha fazla büyük şekil faktörlerinin kullanıldığı deprem izolatörleri öne çıkmaktadır. Sırayla, kauçuğun sıkıştırılabilir olduğunu hesaba katan durumlarda hesaplamayı genişletmek gerektiği unutulmamalıdır.



Şekil 4.7 Tresca akma koşulu, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

4.4.2 Kauçuğun Sıkıştırılabilir Olması Durumunda Çelik Plakalarda Meydana Gelen Akma

Önceki bölümde verilen elastomer esaslı bir deprem izolatörü basınç teorisi iki kabule dayanmaktadır: bunlardan birincisi, deplasman eşitliği (2.7)'de verilen denklemdir, ikincisi, normal gerilim bileşenlerinin malzeme içinde *p* basınç tarafından bütün üç yönde de yaklaşık olarak kabul edilmesidir. Hacım modülünün etkisi işin içine dahil etmek için sadece sıkıştırılamazlık kısıtlaması denklemi ile yer değiştirmeye gereksinim vardır.

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = -\frac{p}{K} \tag{4.77}$$

Burada *K* hacim modülüdür. Kalınlık tamamında *p(x, y)* formu için integral alınırsa (4.78)'de verilen denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\nabla^2 p - \frac{12G}{Kt^2} p = -\frac{12G\varepsilon_c}{t^2} \tag{4.78}$$

Çelik plakanın kenarlarında $p = 0$ alınarak daha önceki gibi çözüm yapılır. Bölüm (2.4.1)'de açıklanan basınç dağılımı aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$p(r) = K\varepsilon_c\left(1 - \frac{I_0(\lambda r)}{I_0(\lambda R)}\right) \tag{4.79}$$

Deprem izolatörlerindeki güçlendirme çelik plakalarındaki çekme gerilmeleri (4.79)'da ki denklem de verilen basınç dağılımı kullanılarak daha yapıldığı gibi aynı metotla hesaplanabilir. Burada, akmanın çelik plakanın dış kenarına ulaştığı zaman, çelik plakanın tamamen plastik olduğu kabulü ile hesaplama yapılır. Böylece kauçuk tabakadaki denge denklemi aşağıdaki gibi olur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial r} = -\lambda K\varepsilon_c \frac{I_1(\lambda r)}{I_0(\lambda R)} \tag{4.80}$$

ve çelik plaka için ise, denge denklemi şöyle yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{dN_r}{dr} + \frac{N_r - N_\theta}{r} = -\lambda K\varepsilon_c t \frac{I_1(\lambda r)}{I_0(\lambda R)} \tag{4.81}$$

Daha önce de kullanıldığı gibi, Tresca akma şartı kullanılarak ve $N_\theta = N_0$ ve de $0 \leq N_r \leq N_0$ kabul ederek (4.82)'de verilen eşitlik yazılır.

$$\frac{d(rN_r)}{dr} = N_0 - K\varepsilon_c t \frac{\lambda r(\lambda r)}{I_0(\lambda R)} \tag{4.82}$$

Buradan da integral alarak ve $r = 0$, $N_r = N_\theta$ sınır şartı kullanarak şu sonuca ulaşılır.

$$rN_r(r) = N_0 r - K\varepsilon_c t \int_0^t \frac{\lambda r I_1(\lambda r)}{I_0(\lambda R)} \tag{4.83}$$

Sırasıyla aşağıdaki denklemler yazılır.

$$N_r(r) = N_0 - \frac{K\varepsilon_c t}{\lambda r I_0(\lambda R)} L(\lambda r) \tag{4.84}$$

Burada $L(\lambda r)$ yazılacak olursa,

$$L(\lambda r) = \int_0^{\lambda r} xI_1(x)dx \tag{4.85}$$

Buradan, $r = R$'de $N_r = 0$ sınır şartı, bize maksimum ε_c değerini verir.

$$\frac{K\varepsilon_c t}{\lambda R I_0(\lambda R)} L(\lambda R) = N_0 \tag{4.86}$$

ve sırasıyla, $P_{ort} = E_c\, \varepsilon_c$ kullanılarak, (4.9)'daki denklem tarafından verilen basınç modülü, çelik plakanın tamamen akması için gerekli olan ortalama basıncı verir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A.,2010).

$$\frac{tp_{ort}}{\lambda R I_0(\lambda R) - 2I_1(\lambda R)} L(\lambda R) = N_0 \tag{4.87}$$

(λR) için integral alınırsa, Bessel Fonksiyonları ve Struve Fonksiyonları aşağıdaki gibi eşitlik yazılabilir, (McLachlan, 1955).

$$\int xI_1(x)dx = \frac{1}{2}\pi x(I_1(x)H_0(x) - I_0(x)H_1(x)) \tag{4.88}$$

Burada, H_0, H_1 Struve fonksiyonlarını gösteririr. Aşağıda integral formunda dört fonksiyon x serisi olarak yazılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A, 2010).

$$I_1(x) = \frac{x}{2}\left(1 + \frac{x^2}{8} + \frac{x^4}{192} + O\left(x^6\right)\right)$$

$$I_0(x) = \left(1 + \frac{x^2}{4} + \frac{x^4}{64} + O\left(x^6\right)\right)$$

$$H_1(x) = \frac{2}{3\pi}\left(x^2 - \frac{x^4}{15} + \frac{x^6}{525} + O\left(x^8\right)\right)$$

$$H_0(x) = \frac{2}{\pi}\left(x - \frac{x^3}{8} + \frac{x^5}{525} + O\left(x^7\right)\right) \tag{4.89}$$

Bütün bunların hepsi (4.87)'de verilen eşitlikte yerlerine yerleştirilerek (λR)'nin küçük değerleri için birinci yaklaşım olarak verir.

$$p_{ort} = \frac{3}{4}\sigma_0 \frac{t_p}{t}\left(1 + \frac{(\lambda R)^2}{120} + O(\lambda R)^4\right) \tag{4.90}$$

İlk eşitlik sıkıştırılamaz çözüme karşılık gelen denklemdir ve $(\lambda R)^2 = 48\ G / (KS)^2$, işin gerçeği ise, dört fonksiyon için asimptotik ifadeler kullanarak şekil faktörü artıkça artan çarpanı göstermektedir. Bu da bize, asimptotik birim değere karşılık çarpanın kademeli olarak yavaş yavaş arttığını gösterir. Sonuç olarak varılan nokta, ortalama basıncı tahmin etmektir, bununun için, çelik plakanın tamamen akması için ihtiyaç duyulan sıkıştırılamaz kauçuk durumundaki özellikler tarafından çelik plaka alt yüzünden yapıştırılmalıdır. Böylece, tasarım amaçlarına ulaşacak şekilde maksimum basıncı göz önünde bulundurmak gerçek bir gerekliliktir.

$$p_{ort} = \frac{3t_p}{4t}\sigma_0 \tag{4.91}$$

Sıkıştırılamazlık kabulü içinde akmayı başlatacak basınç için çözüm eskiden beri çok iyi bilinmektedir, fakat tamamen plastik durum için ise konu oldukça yenidir, (Kelly ve Konstantinidis, 2009).

Büyük şekil faktörlü deprem izolatörleri için tutucu kabul edilen sonuçların son zamanlara kadar endişe verici konu olmasıydı, analizler sıkıştırılabilirliği hesaplara dahil etmeyi gerektirirler. Bununla beraber, bu bölümde yapılan analizler, sıkıştırılamaz durum için çözümün, çoğu büyük şekil faktörlü deprem izolatörlerinde tutucu bir sınırlı basınç tahmini kullanılabileceğini göstermektedir.

BÖLÜM BEŞ
ÇOK TABAKALI ELASTOMER ESASLI DEPREM İZOLATÖRLERİNİN BURKULMA DAVRANIŞI

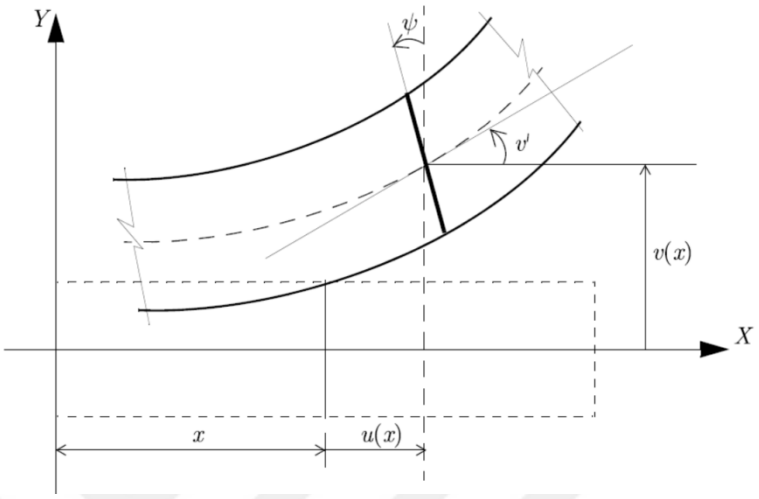
5.1 Deprem İzolatörlerinin Denge Dayanıklılık Analizleri

Çok tabakalı elastomer esaslı bir deprem izolatörü klasik bir kolona benzer şekilde bir çeşit burkulma dengesizliği konusunda hassas olabilir, ancak düşük kesme rijitliğine sahip deprem izolatörlerinde burkulma hassasiyeti daha baskındır. Bu çalışmada daha önceki bölümlerde, tek bir izolatör tabakasının tamamen baştan aşağıya deformasyonu üzerine yapılmış olan analizler, devamlı bir kompozit sistem gibi davranan izolatörün burkulma analizlerinde kullanılabilirler. Bu analizlerde deprem izolatörünün bir kiriş olduğu farz edilir ve deformasyonun kesit düzlemlerinde oduğu, deforme olmamış merkezi eksenin diger arta kalan kısmında ise dik olduğu kabul edilir, fakat deformasyona uğramış eksene dik olması gerekli değildir.

Deprem yalıtım izolatörlerinin burkulma teorisi fikrini, Haringsx tarafından 1947 yılında, helisel çelik yaylar ve kauçuk titreşim takozlarının mekanik özellikleri üzerine yapmış oldukları çalışmalarda geliştirmişlerdir. Bu çalışma, sert kauçuk takozların stabilitesi başlığı altında, 1949 yılında, Haringx tarafından rapor olarak da yayınlanmıştır. Haringx teorisi daha sonra, 1964 yılında Gent tarafından uygulama kullanılmıştır (Haringx, 1949). Daha açık ifade edilecek olursa, Gent sıkıştırılabilir kauçuk esaslı çok tabakalı takozların stabilite problemlerinin çözüm üygulamalarında bu teoriyi kullandı ve burada bizim üzerinde duracağımız analizlerde bu teorinin bu konudaki uygulamaları esas alındı, (Gent, Elastic Stability of Rubber Compression Springs, 1964).

Şekil 5.1’ de gösterildiği gibi deformasyon şekli, izolatörün orta ara yüzeyinin deplasmanı $\upsilon(x)$ ve deforme olmamış eksene dik yüzeyin rotasyonunu $\psi(x)$ gibi iki sayısal büyüklük tarafından tanımlanır. İzolatördeki kayma (kesme) deformasyonunun tamamı $\boldsymbol{\gamma}$, yatay eksendeki rotasyonun $\upsilon'(x)$ ve dik yüzeyin

rotasyonun ψ, yani $\gamma = v' - \psi$ arasındaki farktır. Şekil 5.2 deforme olmuş bir deprem izolatöründe iç ve dış kuvvetleri göstermektedir.



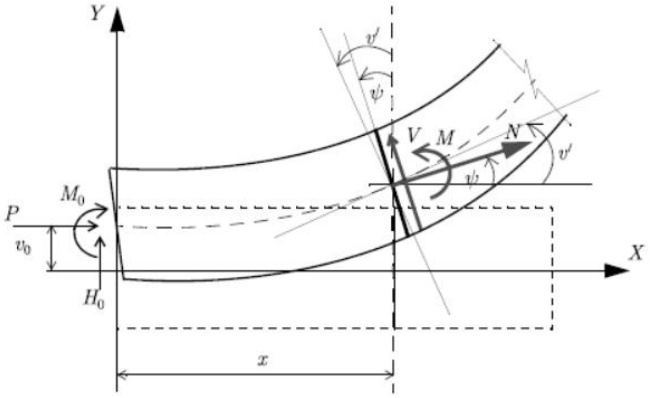
Şekil 5.1 Elastomer esaslı bir deprem izolatörü için deformasyon şekli (deformasyondan sonra ve deformasyondan önce kesit planı görünümü, fakat deformasyon eksenine dik yönde gerekli değildir), (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Sırasıyla, kesme kuvveti V döndürülmüş yüzeye paraleldir ve eksenel kuvvet N ise dik yöndedir. Eksenel yük P dahil nihai yükler, bir yanal tepki H_0, ve problemin ne olduğuna bağlı olarak özellik arz eden veya bilinmeyen bir eğilme momenti M_0, tarafından tanımlanırlar.

İç kesme kuvveti V, aşağıda formülü verilen kesme deformasyonu ile ilişkilidir,

$$V = GA_s(v' - \psi)$$

burada A_S, tam olarak toplam kesit alanı A değildir, fakat $A(h / t_r)$, burada h çelik plakalar ve kauçuk tabakalar dahil izolatörün toplam yüksekliğidir ve t_r ise, kauçuk tabakaların toplam yüksekliğidir. A alanındaki artış, çelik ve kauçuk plakaların birbirine yapıştırılmasıyla meydana gelmiş olan kompozit sistemde çelik plakaların deforme olmadığı gerçeğini hesaplamak için gereklidir.



Şekil 5.2 Deformasyona uğramış bir deprem izolatörü üzerindeki iç kuvvetler ve dış yükler (Deformasyon kesitine kesme kuvveti V pareleldir ve eksenel kuvvet N ise kesite diktir), (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Burada tek bir izolatör tabaksı için eğrilik α / t, Ψ' olur; tek bir izolatör plakası için eğrilik ve eğilme momenti M arasındaki ilişki $EI = E_c I / 3$ denklemindeki gibiydi, çelik plakanda kesme rijitliğini hesaplamak için daha önce yapıldığı gibi aynı yolla bu denklem modifiye edilmelidir. Kompozit yapıdaki deprem izolatöründe kesme ve eğilme rijitliğinin varlığı aşağıdaki denklemlerde GA_S olarak yukarıda tanımlandığı gibi verilmiştir ve kesme kuvveti V ve eğilme momenti M, aşağıdaki denklem (5.1) ve (5.2)'de verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$EI_s = \frac{1}{3}(E_c I)\frac{h}{t_r}$$

$$V = GA_s(v' - \psi) \tag{5.1}$$

$$M = EI_s\psi' \tag{5.2}$$

Şekil 5.2'de gösterildiği gibi deformasyona uğramış deprem izolatöründe eğilme momenti ve kesme kuvveti için denge denklemi (5.2)ve (5.3)'deki gibi olur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$M + P(v - v_0) - M_0 - H_0 x = 0 \tag{5.3}$$

$$V + H_0 - P\psi = 0 \tag{5.4}$$

Buradan hareketle asıl denklem aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$EI_s\psi' + Pv = Pv_0 + M_0 + H_0 x \tag{5.5}$$

$$GA_s(v' - \psi) - P\psi = -H_0 \tag{5.6}$$

(5.6) denklemi aşağıdaki eşitliği verir.

$$\psi = \frac{GA_s v' + H_0}{GA_s + P} \tag{5.7}$$

ve

$$\psi' = \frac{GA_S}{GA_S + P} v'' \tag{5.8}$$

Eğer ψ' denklem (5.3)'de yerine konulursa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$EI_s \frac{GA_s}{GA_s + P} v'' + Pv = Pv_0 + M_0 + H_0 x \tag{5.9}$$

Ve aynı zamanda, (5.3)'deki denklemden de (5.7)'de verilen eşitlik yazılır.

$$v' = \frac{GA_s + P}{GA_s}\psi - \frac{H_0}{GA_s} \tag{5.10}$$

(5.3) denkleminin türevi alınmış halde formül içine v' yerleştirilirse, (5.11)'de verilen eşitlik elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$EI_s\psi'' + \frac{P(GA_s + P)}{GAs}\psi = H_0 + \frac{P}{GA_s}H_0 \tag{5.11}$$

ve

$$EI_s \frac{GA_s}{GA_s + P}\psi'' + P\psi = H_0 \tag{5.12}$$

Böylece, bu iki denklem υ ve ψ kinematik değişkenlere göre aşağıdaki eşitlikte olduğu gibi çözülür.

$$EI_s \frac{GA_s}{GA_s + P} v'' + Pv = Pv_0 + M_0 + H_0 x \tag{5.13}$$

$$EI_s \frac{GA_s}{GA_s + P} \psi'' + P\psi = H_0 \tag{5.14}$$

Şu iki parametre olan α ve β'yı tanımlamak faydalıdır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\alpha^2 = \frac{P(GA_s + P)}{EI_s GA_s}, \beta = \frac{GA_s}{GA_s + P} \tag{5.15}$$

Ve (5.12) ve (5.13) denklemlerinde iki diferansiyel denklem çözüm için aşağıdaki eşitlikleri buluruz, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$v = A\cos(\alpha x) + B\sin(\alpha x) + v_0 + \frac{M_0}{P} + \frac{H_0}{P} x$$

$$\psi = C\cos(\alpha x) + D\sin(\alpha x) + \frac{H_0}{P} \tag{5.16}$$

Yukarıdaki denklemlerde verilen *A, B, C* ve *D* sabitleri bağımsızdırlar.

$$v' = \frac{1}{\beta}\psi - \frac{H_0}{GA_s} \tag{5.17}$$

Denklem (5.16)'de yerleştirilerek,

$$-\alpha A\sin(\alpha x) + \alpha B\cos(\alpha x) + \frac{H_0}{P} = \frac{1}{\beta} C\sin(\alpha x) + \frac{1}{\beta} D\sin(\alpha x) + \frac{1}{\beta}\frac{H_0}{P} - \frac{H_0}{GA_s} \tag{5.18}$$

Bu sabitler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılır.

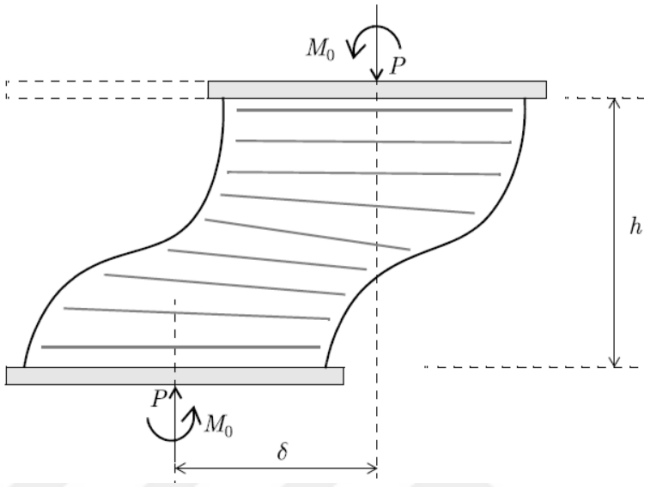
$$C = \alpha\beta B, D = -\alpha\beta A \tag{5.19}$$

Çoğu zaman (5.16) ve (5.17)'de verilen denklemlerin çözüm şekli aşağıdaki gibidir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$v = A\cos(\alpha x) + B\sin(\alpha x) + v_0 + \frac{M_0}{P} + \frac{H_0}{P} x \tag{5.20}$$

$$\psi = \alpha\beta B\cos(\alpha x) - \alpha\beta A\sin(\alpha x) + \frac{H_0}{P} \tag{5.21}$$

Şimdi dikkatimizi deprem yalıtım sisteminde kullanılan bir deprem izolatörü üzerine yoğunlaştıralım. Şekil 5.3' de gösterildiği gibi, alt kısmından deplasmana karşı ve hem alttan hem de üstten rotasyona karşı sınırlandırılan bir deprem izolatörü göz önüne alalım ve bu izolatörün üst kısmı yatay yönde serbestçe hareket etsin.



Şekil 5.3 Düşey bir P yükü altındaki bir deprem izolatörü için sınır şartları, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

İzolatörün alt kısmında $x = 0$ ve üst kısmında ise, $x = h$ olsun. Buradan aşağıdaki eşitlikler yazılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$v(0) = 0, \psi(0) = 0, \psi(h) = 0, H_0 = 0 \tag{5.22}$$

ve böylece (5.20)'da verilen eşitlik aşağıdaki denklemi verir.

$$A + \frac{M_0}{P} = 0 \tag{5.23}$$

ve denklem (5.21)'den (5.24)'de verilen eşitlikler elde edilir.

$$\psi(0) = \alpha\beta B = 0$$

$$\psi(h) = -\alpha\beta A \sin(\alpha h) = 0 \tag{5.24}$$

Böylece, $\alpha h = \pi$ ve genel çözüm denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$v(x) = \frac{1}{2}\delta\left(1 - \cos\left(\frac{\pi x}{h}\right)\right)$$

$$\psi(x) = \frac{1}{2}\alpha\beta\delta \sin\left(\frac{\pi x}{h}\right) \tag{5.25}$$

ve $M_0 = P\delta/2$, burada $\delta = \upsilon(h)$'dir. Sonuç, $\alpha h = \pi$ demektir.

$$\alpha^2 = \frac{\pi^2}{h^2} \tag{5.26}$$

Eğer, (5.15)'de verilen denklemde α^2 yazılırsa (5.22)'deki eşitliği elde ederiz.

$$\frac{P(GA_s + P)}{GA_s} = \frac{\pi^2 EI_s}{h^2} = P_E \tag{5.27}$$

Burada P_E, standart bir kolon için Euler yüküdür. Eğer $GA_S = P_S$ olarak yerine yazılırsa, yukarıdaki kritik yük P denklemi aşağıdaki şekle dönüşür, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P^2 + P_s P - P_s P_E = 0 \tag{5.28}$$

ve böylece buradan kritik yük, *Pkritik* aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_{kritik} = \frac{-P_s \pm \sqrt{P_s^2 + 4P_s P_E}}{2} \tag{5.29}$$

Eğer $P_S \approx GA$ kabul edilirse,

$$P_E \simeq \frac{\pi^2}{h^2}\frac{1}{3}6GS^2 I \simeq GA\left(\frac{2\pi^2 S^2 I}{Ah^2}\right) \tag{5.30}$$

ve daha sonra da, çoğu elastomer esaslı deprem izolatörü tipinde şekil faktörü S 5'den büyük olduğu için veya $P_E >> P_S$ olduğu için kritik izolatör yükü yaklaşım yapılarak aşağıdaki gib yazılabilir.

$$P_{kritik} = \sqrt{P_s P_E} \tag{5.31}$$

P_E ve P_S eşitlikleri yerlerine yerleştirilerek nihai olarak *Pkritik* aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_s = GA\frac{h}{t_r}$$

$$P_E = \frac{\pi^2}{h^2}\frac{1}{3}E_c I\frac{h}{t_r}$$

$$P_{kritik} = \sqrt{\left(GA\frac{h}{t_r}\right)\left(\frac{\pi^2}{h^2}\frac{1}{3}GS^2Ar^2\frac{h}{t_r}\right)} = \frac{\sqrt{2}\pi GASr}{t_r} \quad (5.32)$$

Yukarıdaki denklemde r dönme (rotasyon) yarıçapıdır, α kenar ölçülerindeki bir kare kesitli deprem izolatörü için r,

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{\alpha}{2\sqrt{3}} \quad (5.33)$$

ve çapı Φ olan bir dairesel kesitli bir deprem izolatörü için ise, $\Phi / 4$ olacaktır. Kritik basınç $p_{kritik} = P_{kritik} / A$, şekil faktörü S ve ikinci şekil faktörü $\boldsymbol{S_2}$ hem dairesel kesitli izolatör için ve hem de kare kesitli izolatör için p_{kritik} denklemi tekrar düzenlenir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$p_{kritik} = \frac{P_{kritik}}{A}$$

Dairesel kesitli izolatör için,

$$S_2 = \frac{\Phi}{t_r} \quad (5.34)$$

Kare kesitli izolatör için,

$$S_2 = \frac{a}{t_r} \quad (5.35)$$

$$\frac{p_{kritik}}{G} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}SS_2 \quad (5.36)$$

$$\frac{p_{kritik}}{G} = \frac{\pi}{\sqrt{6}}SS_2 \quad (5.37)$$

Deprem izolatörlerinin uygulama tasarımlarında, deprem izolatörü tarafından taşınan yük, (genellikle W olarak ifade edilir) kritik yükten daha az olur ve izolatör yatay rijitliği K_H üzerinde, düşey yükün etkisi ihmal edilir.

Bu $K_H = GA / t_r$ tarafından verilir ve sırasıyla bu yatay frekansla ω_H ilgilidir.

$$\omega_H^2 = \frac{K_H}{W} g \tag{5.38}$$

Böylece eğilmeye karşı emniyet faktörü *S. F.* tarafından aşağıdaki gibi ifade edilebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A, 2010).

$$S.F. = \frac{\sqrt{2}\pi S \omega_H^2 r}{g} \tag{5.39}$$

Emniyet faktörü, şekil faktörü ile frekansı artırır ve izolatör ölçülerini artırır. Şüphesiz, izolatör ölçüsü gerçekleşen kritik yüke bağlıdır. Eğer basınç $p = W / A$ olarak tanımlanıyorsa, o zaman, dairesel kesitli bir izolatör için,

$$r = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{W}{p} \right)^{1/2} \tag{5.40}$$

kare kesitli bir izolatör için,

$$r = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{W}{p} \right)^{1/2} \tag{5.41}$$

Şayet basınç, emniyet faktörünü *S. F.*, $W^{1/2}$ olarak azaltacak şekilde sabitlenirse, çok hafif yüklerde bile probleme neden olabilen beklenmedik bir durum olan burkulmaya kadar işi götürebilir. Bu nedenle emniyet faktörü *S. F* en az 3 olmalı, şekil faktörü ise 10'dur ve frekans π rad/s (periyot 2 s)' dir. Bu durumda *r* aşağıdaki gibi değerde olur.

$$r = \frac{3,9810}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 10.\pi^2}} - = 67,01mm$$

Eğer deprem izolatörü dairesel şekilli ise, o zaman çap Φ = 268 mm. olur. Bu minimum ölçü taşınan yükten veya basınçtan bağımsızdır, fakat, eğer basıncın belirlendiği söyleniyorsa, örneğin, 6,90 MPa ise, 39.000 kg (39 ton) minimum bir yük transfer eder. Çoğu bina için, deprem izolatörleri bu minimum ölçüden çok daha

büyük olacaktır ve yüzlerce tonluk yükleri taşıyacaktır. Böylece, büyük bir ihtimalle burkulma, deprem izolatörü tasarımı için problem olmayacaktır. Bununla birlikte hafif yükler için deprem izolatörü tasarlamak gerektiği zaman bazı vakıalar olmuştur, örneğin; elektrik güç üretim santrali devre kesicilerinde olduğu gibi. Bu tür parçaların ağırlığı birkaç tonu geçmez ve izolatör tasarımı 1 ton ile 5 ton aralığında dengeli ve istikrarlı olmalıdır. Bu tür uygulamalar için geliştirilen bu izolatörlere stabilitesi artırılmış izolatörler denilmektedir. Bu tip izolatörlerde eğilme rijitliği, küçük izolatörlerin montajını çelik plakalar ile yaparak artılır (Kircher ve arkadaşları, 1979). Veya tek tek kauçuk tabakalar çelik plakalar ile bağlanarak monte edilirler (Tyler, 1991). Bu tür ilk izolatör uygulaması, Kircher ve arkadaşları tarafından yapıldı. Burada bu stabilitesi artırılmış izolatörler için de tek bir izolatör için verilen bu stabilite analizleri uygulanabilir.

5.2 İçi Delikli Dairesel Kesitli Deprem İzolatörü Stabilite Analizi

Hafif yükü destekleyen bir izolatörün stabilitesini artırıp geliştirmenin diğer bir yolu da içi delikli dairesel şekilli bir izolatör kullanmaktır. İzolatörün düşey eksende merkezinde büyük bir deliğin varlığı izolatörün yatay rijitliğini azaltır, fakat eğilme rijitliği üzerinde çok az bir etki eder. Daha önceki bölümlerde geliştirilen analizleri kullanarak tek bir içi delikli dairesel kesitli izolatör için aşağıdaki denklem düzenlenebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$(EI)_{eff} = \frac{\pi G}{8t^2}\left(b^2 - a^2\right)^3 \tag{5.42}$$

Burada α ve b iç ve dış yarıçaptır ve t ise izolatör kalınlığıdır. Bunu burkulma yükü için yazılmış olan eşitlikte yerine yerleştirilirse P_{kritik} denklemi aşağıdaki gibi yazılır (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_{\text{kritik}} = \sqrt{P_S P_E}$$

$$P_s = GA\frac{h}{t_r} = G\pi\left(b^2 - a^2\right)\frac{h}{t_r} \tag{5.43}$$

$$P_E = \pi^2 (EI)_{eff} \frac{h}{t_r} \frac{1}{h^2} = \frac{\pi^2 \pi G}{h t_r 8 t^2} \left(b^2 - a^2\right)^3 \tag{5.44}$$

Buradan hareketle P_{kritik} denklemini yazabiliriz.

$$P_{kritik}^2 = G\pi\left(b^2 - a^2\right) \frac{h}{t_r} \frac{\pi^2}{h t_r} \frac{\pi G}{8t^2} \left(b^2 - a^2\right)^3 = \frac{G^2 \pi^4 \left(b^2 - a^2\right)^4}{8 t_r^2 t^2}$$

$$P_{kritik} = \frac{\pi^2 G \left(b^2 - a^2\right)^2}{2\sqrt{2} t_r t} \tag{5.45}$$

Tanımlanan yatay frekans izolatör başına uygulanan yük W ile ilişkilidir.

$$\omega_H^2 = \frac{K_H}{W} g = \frac{G\pi g\left(b^2 - a^2\right)}{W t_r} \tag{5.46}$$

Böylece, burkulmaya karşı emniyet faktörü *S. F.* (5.39)' verilen denklemle ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$S.F. = \frac{P_{kritik}}{W} = \frac{\pi^2 G \left(b^2 - a^2\right)^2}{2\sqrt{2} t_r t} \quad \frac{\omega_H^2 t_r}{G\pi\left(b^2 - a^2\right) g} = \frac{\pi\left(b^2 - a^2\right)\omega_H^2}{2\sqrt{2} t g} \tag{3.47}$$

Eğer frekans ω_H ve izolatör kalınlığı t ise, bu takdirde emniyet faktörü $S\,F.$ delik ölçüsünün atışına paralel olarak azalır. Bu açıkça görülen zıt sonuç, *b ve α* firekans değişim aralığında basıncın sabit tutulması nedeniyle oluşur. Eğer basınç sabitse, bu durumda $(\alpha^2 - b^2)$ de sabit olur, böylece emniyet faktörü *S.F.* sabit kalır. Eğer basınç sabit tutulursa, o zaman emniyet faktörünü artırmanın tek yolu tek tek her bir tabaka kalınlığını *t* azaltmak gereklidir. Bunu dairesel kesitli izolatör yerine stabilite artışına katkısı olmayan içi delikli dairesel şekilli izolatör kullanma işlemi takip eder. Bu ise, basıncı ve tabaka kalınlığını azaltmak için gereklidir. Bunula beraber, içi delikli dairesel kesitli deprem izolatörü belili durumlar için üstünlüğe sahiptir. Toplam kauçuk tabakaları kalınlığının t_r, emniyet faktörü üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur, daha büyük t_r değeri kullanılabilir. Böylece, pik kesme gerilmesini azalması ve burkulmaya karşı emniyet faktöründe *S.F.* hiçbir azalma olmaksızın deplasmanın izolatör çapına oranında azalma söz konusudur. Sonuç olarak bu da,

izolatör başın a gelen yük hafif ise, izolatörlerin deprem yalıtımında daha iyi performans, yani daha iyi dayanım göstereceğini kesin bir şekilde göstermektedir.

5.3 Deprem İzolatörlerinde Düşey Yükün Yatay Rijitlik Üzerindeki Etkisi

Şayet bir izolatör üzerindeki yük burkulma yükü ile kıyaslanabilirse, o zaman yatay rijitlik ile ilgili basit bir formül olan $K_H = GA / t_r$ eşitliğinde aşağıdaki gibi değişiklik yapılabilir. Burkulma yükünü hesaplamada kullanılan mühendislik analizleri, eksenel yükün varlığı durumunda etkili yatay rijitliğin belirlenmesinde kullanılabilirler (Koh & Kelly, 1987). Deprem izolatörünün en üstündeki çelik plakada bir yatay kuvvet F_H düşünelim, bu durumda, bu üst plakadaki deplasman $v(h)$ hesaplanır, buradan hareketle K_H hesaplanılır.

$$K_H = \frac{F_H}{v(h)} \tag{5.48}$$

Ve temel denklemler, sınır şartları kullanılarak (5.20) ve (5.21) eşitliklerinden aşağıda verilen denklemler elde edilir.

$$v(0) = 0, \psi(0) = 0, \psi(h) = 0, H_0 = -F_H \tag{5.49}$$

Böylece,

$$v(x) = A\cos(\alpha x) + B\sin(\alpha x) + \frac{M_0}{P} - \frac{F_H}{P}x \tag{5.50}$$

ve

$$\psi(x) = \alpha\beta B\cos(\alpha x) - \alpha\beta A\sin(\alpha x) - \frac{F_H}{P} \tag{5.51}$$

Ve sınır şartlarını kullanırsak,

$$A = \frac{F_H}{P}\frac{\cos(\alpha h) - 1}{\alpha\beta\sin(\alpha h)} \tag{5.52}$$

ve de,

$$B = \frac{F_H}{\alpha\beta P} \tag{5.53}$$

Bunları (5.50)'daki denklemde yerlerine yerleştirirsek aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$v(h) = \frac{F_H}{\alpha\beta P}\left(2\tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) - \alpha\beta h\right) \tag{5.54}$$

ve $x = h$ için deplasman değerlendirmesi yapılırsa, böylece buradan da yatay rijitlik aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_H = \frac{F_H}{v(h)} = \frac{\alpha\beta P}{2\tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) - \alpha\beta h} \tag{5.55}$$

$\alpha h \to \pi$, $\tan(\alpha h / 2) \to \infty$ ve $K_H \to 0$. Küçük P değerleri için,

$$\alpha^2 \to \frac{P}{EIs}, \beta \to 1 - \frac{P}{GAs} \tag{5.56}$$

Taylor Serisinde $2\tan(\alpha h / 2)$ açılımı aşağıdaki eşitiği verir.

$$2\tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) = \alpha h + \frac{1}{12}(\alpha h)^3 + \ldots$$

Böylece K_H ,

$$K_H = \frac{\propto [1 - P/(GA_s)]P}{\frac{1}{12}\alpha^3 h^3 + \alpha h \frac{P}{GAs}} \simeq \frac{P}{\frac{1}{12}\frac{P}{EI_s}h^3 + \frac{Ph}{GAs}}$$

$$= \frac{1}{h^3/(12EI_s) + h/(GAs)} \simeq \frac{GAs}{h}\left(1 - \frac{GA_s h^2}{12EI_s}\right) \tag{5.57}$$

Yukarıdaki denklemde parentez içinde verilen terim, eğilme esnekliğinin rijitliğe olan etkisini gösterir. Dairesel şekilli deprem izolatörleri için bu aşağıdaki gibi formülleştirilir ve genellikle formülün birinci kısmıyla kıyaslandığında ihmal edilebilir.

$$\frac{h^2}{6S^2R^2}$$

P_S ve P_E arasındaki P değerler için (5.28)'da verilen denkleme götüren yaklaşımlar sonucunda aşağıdaki eşitlikler yazılır.

$$\alpha^2 = \frac{P}{EI_sGA_s} \tag{5.58}$$

ve

$$\alpha h = \pi\left(\frac{P}{P_{kritik}}\right)$$

$$\beta = \frac{GAs}{P} = \frac{P_s}{P} \tag{5.59}$$

Buradan hareketle yatay rijitlik denklemi aşağıdaki gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_H = \frac{GA_s}{h}\frac{\frac{\pi}{2}\frac{P}{P_{kritik}}}{\tan\left(\frac{\pi}{2}\frac{P}{P_{kritik}}\right) - \frac{\pi}{2}\frac{P}{P_{kritik}}\frac{GAs}{P}} \tag{5.60}$$

P değeri P_{kritik} değerine yakın olduğunda tangent terimi baskın olur ve buradan şu aşağıda verilen yaklaşım yapılabilir.

$$K_H = \frac{GA_s}{h}\frac{\frac{\pi}{2}\frac{P}{P_{kritik}}}{\tan(\frac{\pi}{2}\frac{P}{P_{kritik}}} \tag{5.61}$$

Kesin tam denklem olarak (5.60)'da verilen eşitliktir ve kesik çizgili eğri ise, (5.61)'de verilen denklemin yaklaşımıdır. Noktalı ve kesik çizgili eğri (5.62)'de verilen denklemin yaklaşımıdır. Şekil 5.4'de gösterildiği gibi yatay rijitlikle ilgili gerçek sonuç (5.60)'de verilen denklem ile ifade edilmiştir.

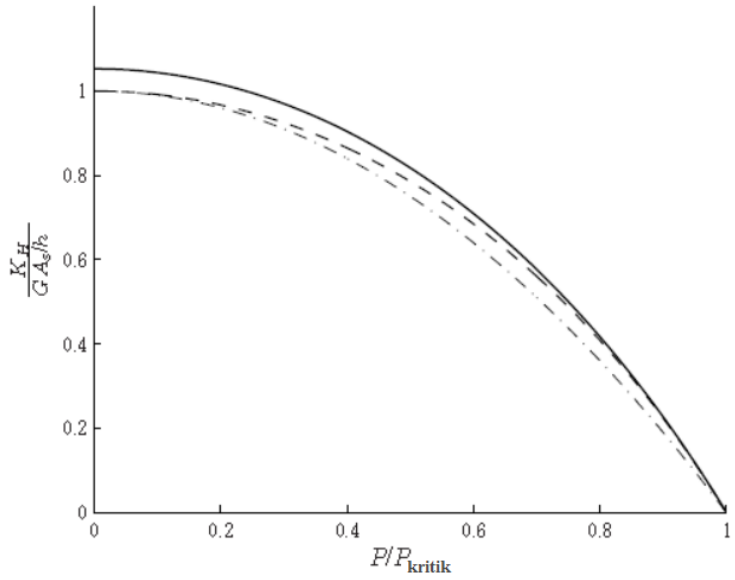
$$K_H = \frac{GAs}{h}\left[1 - \left(\frac{P}{P_{kritik}}\right)^2\right] \tag{5.62}$$

Bu durum aynı zamanda Şekil 5.4 de gösterilmiştir.

Gerçek ve tam K_H değeri, eğer yük P_A olarak alınırsa, boyutsuz p ve λ cinsinden kolayca aşağıdaki gibi ifade edilebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_A^2 = \frac{\pi^2 EI_s GA_s}{h^2} \tag{5.63}$$

P_A değeri $P_S << P_{crit} << P_E$ ve $p = P/P_A$, $\lambda = GA_s / P_A$ olduğu zaman P_{kritik} demektir.



Şekil 5.4 Yatay rijitlik üzerine eksenel yükün etkisi, düz çizgili eğri: GAS / P = 0, 05, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_H = \frac{GA_s}{h} \frac{\frac{\pi}{2} p^2/3(p+\lambda)^{-1/2}}{\tan\left[\frac{\pi}{2} p^{1/2}(p+\lambda)^{-1/2}\right] - \frac{\pi}{2} p^{1/2}(p+\lambda)^{-1/2}} \tag{5.64}$$

Burada λ'nın değeri,

$$\lambda = \sqrt{2}h/(\pi SR) \tag{5.65}$$

ve genellikle 1 ile mukayese edildiğinde daha küçük bir değerdedir.

5.4 Elastomer Esaslı Bir Deprem İzolatörünün Üstteki Çelik Yükleme lakasının Düşey Yönde Yukarıdan Aşağıya Doğru Deplasmanı

Elastomer esaslı bir deprem izolatörünün yatay bir deplasman nedeniyle düşey yönde yukarıdan aşağıya doğru deplasmanı, sıklıkla izolatör tasarım sürecinde ihtiyaç duyulan bir konudur ve bu düşey yöndeki deplasman aynı zamanda burkulma analizi kullanılarak da yapılabilir. Deprem izolatörünün tam bir kritik P yükü altında olduğu farz edilsin, fakat izolatör burkulmaya doğru hareket ettikçe amacından ve doğrultusundan sapmamış istenen iş izolatörün içinde ve dışında gerçekleşir. Dışarıdaki iş $P\delta$ ile ve burada δ düşey yöndeki aşağı doğru deplasmanı gösterir, ancak bu işlem sırasında yükün değişmeden sabit kaldığı kabul edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$W_D = \frac{1}{2}\int_0^h \left[V(v' - \psi) + M\psi'\right] dx \tag{5.66}$$

Ve fakat (5.2) ve (5.23)'de verilen eğilme momenti ve kesme kuvveti ile ilgili denge denklemleri yukarıdaki denklemde yerlerine yerleştirilerek (5.68)'deki eşitlik yazılır.

$$V = -H_0 + P\psi$$

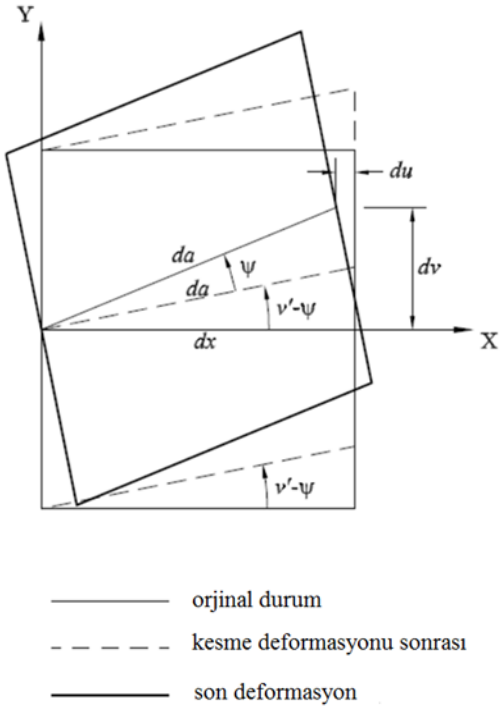
$$M = M_0 + H_0 x - Pv + Pv_0 \tag{5.67}$$

Ve böylece,

$$W = \frac{1}{2}\int_0^h \left[(-H_0 + P\psi)(v' - \psi) + (M_0 + H_0 x - Pv + Pv_0)\psi'\right] dx$$

$$= \frac{1}{2} P \int_0^h \left(\psi v' - \psi^2 - v\psi'\right) dx$$

$$= -\frac{1}{2} H_0 \int_0^h \left[(v' - \psi) - x\psi'\right] dx + (M_0 + Pv_0)\left[\psi(h) - \psi(0)\right] \tag{5.68}$$



Şekil 5.5 Yatay deformasyona uğramış elastomer esaslı bir deprem izolatörünün eksenel deplasman geometrisi (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

Burkulmadaki problem,

$$v(0) = 0, \psi(0) = 0, \psi(h) = 0, H_0 = 0$$

olduğuna benzer şekilde iş eşitlik denklemi aşağıdaki hale gelir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P\delta_v = \frac{P}{2}\int_0^h \left(2\psi v' - \psi^2\right)dx \tag{5.69}$$

Kısmen sezgisel bir yaklaşım olmasına rağmen bu sonuç, Şekil 5.5'de gösterildiği gibi geometrik olarak da elde edilebilir. Burada düşey yöndeki deplasman, *x*-ekseninde *u* ile veya eksen, veya doğrultuyu ifade eder.

Bu sonuçdan elde edilen çıkarım olan izolatörün düşey yöndeki deplasmanı (5.70)'da verilen eşitlik formülleştirmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_\nu = \frac{1}{2}\int_0^h \left(2\psi v' - \psi^2\right)dx \tag{5.70}$$

$$du = da(\cos\left(v' - \psi\right) - \cos v' \tag{5.71}$$

Burada da aşağıdaki gibi formüle edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$da = \frac{dx}{\cos(v' - \psi)} \tag{5.72}$$

$$\cos\left(v' - \psi\right) - \cos v' = -2\sin\left[\frac{1}{2}\left(v' - \psi + v'\right)\right]\sin\left[\frac{1}{2}\left(v' - \psi - v\right)'\right]$$

Burada sinüs ve cosünüs için küçük açı yaklaşımları kullanıldığı zaman aşağıdaki denklem yazılabilir, (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

$$du = dx\left(1 + \frac{1}{2}\left(v' - \psi\right)^2\right)\left(\frac{1}{2}\left(2v' - \psi\right)\psi\right) \tag{5.73}$$

Buradan (5.64)'deki eşitliğe ulaşılır.

$$\delta_v = \frac{1}{2}\int_0^h \left(2v' - \psi\right)\psi dx \tag{5.74}$$

Deprem izolatörü burkulduğu zaman düşey yöndeki moment ile yatay yöndeki deplasman arasındaki ilişki (5.74)'de verilen denklem içinde bunlar yerlerine

yerleştirilerek aşağıdaki eşitlikler yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$v(x) = \frac{\delta}{2}\left(1 - \cos\frac{\pi x}{h}\right)$$

$$\psi(x) = \frac{\alpha\beta\delta}{2}\sin\frac{\pi x}{h} \tag{5.75}$$

$$\delta_\nu = \frac{1}{2}\int_0^h \left(2\,\frac{\alpha\beta\delta}{2}\,\frac{\pi}{h}\,\frac{\delta}{2} - \frac{\alpha^2\beta^2\delta^2}{4}\right)\sin^2\frac{\pi x}{h}\,dx = \frac{\alpha\beta\pi}{8}\left(1 - \frac{\alpha\beta h}{2\pi}\right)\delta^2 \tag{5.76}$$

$\alpha h = \pi$ olduğundaki burkulmada, böylece düşey yöndeki deplasman δ_v, aşağıdaki formülle verilmiştir.

$$\delta_v = \frac{\pi^2}{8h}\,\beta\left(1 - \frac{\beta}{2}\right)\delta^2 \tag{5.77}$$

ve

$$\beta = \frac{GAs}{GA_s + P_{kritik}} \simeq \frac{GAs}{P_{kritik}} \ll 1 \tag{5.78}$$

ve de

$$\delta_v = \frac{\pi^2 GA_s}{8hP_{kritik}}\,\delta^2 \tag{5.79}$$

Yarıçapı R olan dairesel bir deprem izolatörü için denklem (5.29)'da P_{kritik} için yaklaşım kullanılarak (5.80)'deki denklem yazılabilir.

$$\delta_v = \frac{\sqrt{2}\pi}{8SR}\,\delta^2 \tag{5.80}$$

Bu eşitlikte düşey yöndeki rijitliğin sürpriz bir şekilde izolatör yüksekliğine bağlı olmadığı anlaşılmaktadır. Örneğin, R = h, δ = h, S = 10 olduğunu kabul edilsin, bu durumda düşey yöndeki deplasman δ_v aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$\delta_v = \frac{\sqrt{2}\pi}{80} h = 0{,}055h$$

Aynı prosedür $P < P_{\text{kritik}}$ olduğu zaman düşey rijitliği δ_v tahmin etmek için kullanılabilir ve deprem izolatörü yatay bir şekilde yerleştirilir, cebirsel karmaşıklık azalan geri dönüş noktasına ulaşmıştır. Bu konuda daha basit bir model bir sonraki bölüm de geliştirilip verilecektir.

Önceki bölümde verilen (5.70) eşitlik, bir izolatörün yatay bir yük F_H tarafından yatay yönde ve düşey bir yük P tarafından da aşağıya doğru yüklendiği zaman, deprem izolatörünün üst yükleme plakasının deplasmanının hesaplanmasında kullanılabilir. Hesaplama için başlangıç noktası, $v(x)$ ve $\psi(x)$ için çözüm yapmaktır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Şöyle ki;

$$v(x) = \frac{F_H}{\alpha\beta P}\left[\sin(\alpha x) - \alpha\beta x + \frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)}\left(1-\cos(\alpha x)\right)\right] \tag{5.81}$$

ve

$$\psi(x) = \frac{F_H}{P}\left[\frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)}\sin(\alpha x) - \left(1-\cos(\alpha x)\right)\right] \tag{5.82}$$

ve buradan da aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$v(h) = \delta_h = \frac{F_H}{\alpha\beta P}\left(2\,\frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)} - \alpha\beta h\right) \tag{5.83}$$

$$v'(x) = \frac{F_H}{\beta P}\left(\cos(\alpha x) + \frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)}\sin(\alpha x) - \beta\right) \tag{5.84}$$

Yukarıda verilen (5.82) ve (5.84) denklemleri kullanılarak bir sonraki eşitlik yazılır.

$$2\psi v' - \psi^2 = \frac{F_H^2}{\beta P^2}\{-2(\beta\cos\alpha h\cos^2\alpha x - \beta\cos\alpha h + \cos\alpha h - 2\cos\alpha h\cos^2\alpha x$$

$$+\cos\alpha h\cos\alpha x - 1 + \sin\alpha h\sin\alpha x\ -2\sin\alpha h\cos\alpha x\sin\alpha x$$

$$+\beta\cos\alpha x\sin\alpha x\sin\alpha h\ +\cos\alpha x)/(\cos\alpha h+1)\} \tag{5.85}$$

$x = 0$ dan $x = h$'ye kadar integral alarak ve (5.74)'de verilen denklemde yerine yerleştirilerek aşağıdaki denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_\nu = \frac{1}{2}\frac{F_H^2}{\beta P^2}\frac{\alpha h\beta\cos\alpha h - 2\sin\alpha h + 2\alpha h - \beta\sin\propto h}{\alpha(\cos\alpha h+1)} \tag{5.86}$$

F_H ve P, δ'nin karesiyle bölünerek denklem (5.83)'ten (5.87)'de verilen denklem yazılır.

$$\delta_v = [\frac{\alpha h\beta}{2}\ \frac{\alpha h\beta\cos(\alpha h) - 2\sin(\alpha h) + 2\alpha h - \beta\sin(\alpha h)}{-4\cos(\alpha h) + \beta^2\alpha^2h^2\cos(\alpha h) + 4 + \beta^2\alpha^2h^2 - 4\beta\alpha h\sin(\alpha h)}\ ]\ \frac{\delta_h^2}{h} \tag{5.87}$$

Denklem (5.87)'de parantezler içinde verilen her ikisi de düşey yüke P bağlı olan ve iki boyutsuz αh ve β sembolün bir fonksiyonudur. Bu sonuç, izolatör paremetrelerinin P_S ve P_E, yatay deplasmanın karesi δ_h ile doğru orantılı olan düşey deplasmanı δ_v tanımlar ve kolaylıkla eksenel yükün herhangi bir değeri için bu deplasman hesaplanabilir. Eğer daha önceki bölümde yapılan GA_S ihmal yaklaşımları P ile karşılaştırılarak kullanılırsa, $\alpha h = \pi p$ ve $\beta = 0$ verilerek yukarıda verilen eşitlik (5.78)'deki denkleme dönüşür, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_v = \frac{\pi GA_s}{4P_{kritik}}\left(\frac{\pi p - \sin(\pi p)}{1-\cos(\pi p)}\right)\frac{\delta_h^2}{h} = \frac{\pi GA_s}{4P_{kritik}}f(\pi p)\frac{\delta_h^2}{h} \tag{5.88}$$

$f(x)$ fonksiyonu $x = \pi$ olduğu zaman $x = 0$ dan $\pi/2$'ye kadar ve x, $-x$ ile yer değiştirdiği zaman $0 \le x \le \pi$ aralığında monoton olarak artar, yani, $f(x)$ fonksiyonu, $-f(x)$ anti simetriktir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$f(x) = \frac{x - \sin x}{1 - \cos x}$$

$$f'(x) = \frac{(1 - \cos x) - x \sin x}{(1 - \cos x)^2} \tag{5.89}$$

Deformasyona uğramamış durumdaki deprem izolatörünün düşey rijitliği (5.90)'de verilen ile ifade edilir.

$$K_v^0 = \frac{E_c A_s}{h} \tag{5.90}$$

Bu denklemde verilen E_c sıkıştırma modülüdür.

$$E_c = 6GS^2 \tag{5.91}$$

Bir yatay deplasman δ_h yanında, düşey bir deplasman δ_v aşağıdaki gibi formülleştirilir.

$$K_v = \left(\frac{d\delta_v^t}{dP} \right)^{-1} \tag{5.92}$$

ve

$$\delta_v^t = \frac{Ph}{E_c As} + \delta_v \tag{5.93}$$

Şimdi de şu aşağıda verilen denklemi yazalım, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{d\delta_n}{dP} = \frac{d\delta_\nu}{dx} \frac{dx}{dP} = \frac{\pi^2 G A_s}{4P_{kritik}^2} f'(\pi p) \frac{\delta_h^2}{h} \tag{5.94}$$

ve nihayet,

$$K_v = K_v^0 \frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4} \frac{G A_s E_c A_s}{P_{kritik}^2} f'(\pi p) \frac{\delta_2^2}{h}} \tag{5.95}$$

ve

$$P_{kritik}^{2} = GA_s EI_s \left(\frac{\pi^2}{h^2} \right)$$

formülde yerine yazılırsa (5.96)'da verilen eşitliğe dönüşmüş olur.

$$K_v = K_v^0 \frac{1}{1 + \frac{3}{4} f'(\pi P) \frac{\delta_h^2}{r^2}} \tag{5.96}$$

Burada $r^2 = \boldsymbol{I / A}$ dır. Φ çaplı dairesel bir deprem izolatörü için $r^2 = \Phi^2 / 16$ yazılarak aşağıdaki denklem elde edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_v = K_v^0 \frac{1}{1 + 12 f'(\pi p) \frac{\delta_h^2}{\Phi^2}} \tag{5.97}$$

Bir çok durumda deplasman, izolatör çapına önemli derecede bağlıdır, böylece düşey yöndeki izolatör rijitliği yatay deplasman tarafından ciddi anlamda önemli bir derece azaltılabilir. Bu sonuç, deprem izolatörlerinin bilgisayar modellemeleri için öneriler sunmaktadır. Çoğu yapı ile ilgili yapısal analiz programlarında deprem izolatörleri modelleri, izolatörün yatay rijitliği ve düşey rijitliklerini temsilen bağımsız iki yay setine sahip olarak tasarlanırlar. Bu sonuç, eğer uygun ve doğru bir izolatör modeli tasarlamak istenilirse, bu izolatör modelinin düşey rijitlik ve yatay deplasman arasında bir etkileşime sahip olması göz önünde tutulmalıdır.

Prensip olarak izolatör analizleri sonlu elemanlar metodu FEM ile yapılır, fakat bunu yapısal bir analiz programı içine dahil ederek yapmak aşırı derecede karmaştır. Bununla birlikte gelecek bölüm 5.5' de, iki yayla temsil edilen bu iki büyüklük arasında etkileşimin dahil edildiği bir deprem izolatörünün davranışını hassa bir şekilde temsil edecek olan mekanik bir model tasarlanıp gösterilecektir ve bu kolayca yapısal analiz programı içine konulabilir.

5.5 Elastomer Esaslı Deprem İzolatörü İçin Basit Bir Burkulma-Mekanik Modeli

Zayıf kolon-Kesme teorisi kullanılarak elastomer esaslı eprem izolatörlerinin bazı diğer farklı yönleri vardır, ancak cebirsel karmaşıklık, tasarımlarda faydalı olan bir olayın anlamının doğrudan fiziksel bir kayba uğramasının ne kadar önemli olduğunu gösterir. Deprem izolatörü ile ilgili kapsayıcı diğer bir yararlı konu ise, izolatörün yatay yöndeki deplasmanı tarafından üretilen izolatörün burkulma ötesi davranışı ve izolatör sönümü üzerine eksenel yükün etkisi sonucu bir deprem izolatörünün üst yükleme plakasının düşey yönde aşağı doğru hareketidir. Bu faktörlerin fiziksel basit bir yorumunu yapabilmek için basit iki deformasyon mekanizmalı bir mekanik izolatör modeli geliştirilmiştir, bu basitleştirilmiş modelde izolatör davranışının bu söz konusu yönleri temsil edilerek gösterilsin ve teoriye tam bir yaklaşım uyumu gösterebilsin. Şekil 5.6'da gösterilmiş olan basitleştirilmiş izolatör modelinde, iki adet rijit profil şekilli eleman alttan ve üstten mafsallı moment yayları ile bağlanmıştır ve bu iki eleman yüksekliklerinin tam ortasından da sürtünmesiz silindirik yataklar ile ve esnek kayma yayları ile birbirine tutturulmuştur. Burada gösterilen iki deformasyon değişkenleri kayam (kesme) deplasmanı s ve rölatif dönme θ'dır ; iki moment yayı rijitliği $K_1 / 2$ her biri (radyan) olarak, kayma yayı rijitliği K_2 (kesme kuvveti / deplasman) olarak, düşey yük P olarak ve kolon üstündeki yatay yük F_H olarak gösterilmiştir. Yatay yönde kolon tepesinde meydana gelen yatay deplasman V ise, s ve θ cinsinden aşağıdaki gibi formüle edilir, (Kelly, 2003).

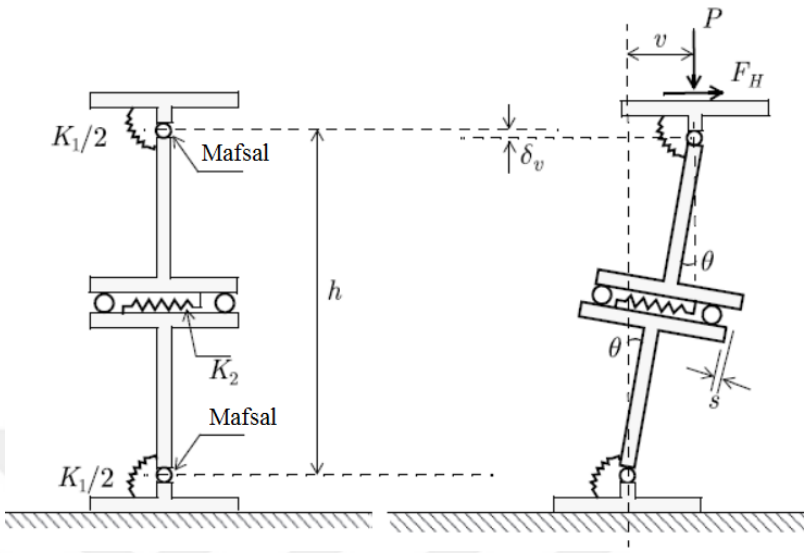
$$v = h\sin\theta + s\cos\theta \tag{5.98}$$

Veya eğer deplasmanların ve rotasyonların küçük olduğu kabul edilirse,

$$v = h\theta + s \tag{5.99}$$

Kesin olarak tam teoriye uygun olarak bu sistemi ilişkilendirmek için, düşey yöndeki deplasman δ_v izin verilir, yatay rijitlik ise $K_2\ h$ olur. Burada K_1, $P_E\ h$'ye ve $K_2 = GA_S$ olur ve burada P_E ise aşağıdaki gibi bir eşitlik kayma deformasyonu ihmal edilen kolonun Euler burkulma yükü aşağıdaki gibi formüle edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_E = \frac{\pi^2 EI_s}{h^2}$$



Şekil 5.6 Elastomer esaslı bir deprem izolatörünün basit ikili yay modeli, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

ve GA_S ve EI_S izolatörün etkili kesmesi ve eğilme rijitliğidir. Daha önce ifade edildiği gibi, GA_S' yi P_S olarak yazmak uygun olacaktır. Şayet deplasmanların küçük oldukları kabul edilirse, (5.89)'da verilen denklem aşağıdaki eşitlikte olduğu gibi yazılır.

$$(P_E - P)\theta - P\frac{s}{h} = F_H \tag{5.100}$$

ve

$$-P\theta + P_s\frac{s}{h} = F_H \tag{5.101}$$

Eğer F_H = 0, sıfırdan büyük veya küçük θ değerlerinin varlığı ve *s/h* bizi belirleyici bir denkleme ulaştırır.

$$(P_E - P)P_s = P^2 = 0 \tag{5.102}$$

Bu da (5.23)'de verilen denklemdeki kesin teori için geliştirilen burkulma yükü denklemi ile aynıdır.

Yatay kesme kuvveti F_H gösterir θ ve s için çözümler şöyledir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\theta = F_H \frac{P_s + P}{P_s P_E - P P_s - P^2}$$

$$\frac{s}{h} = F_H \frac{P_E}{P_s P_E - P P_s - P^2} \tag{5.103}$$

ve böylece, oluşturulan modelin yatay rijitliği aşağıda verilen denklemle ifade edilir.

$$K_H = \frac{F_H}{v} \tag{5.104}$$

$$v = h\theta + s = \frac{h F_H (P_s + P + P_E)}{P_s P_E - P P_s - P^2} \tag{5.105}$$

ve böylece yatay rijitlik aşağıdaki gibi formülleştirilir.

$$K_H = \frac{1}{h} \frac{P_s P_E - P P_s - P^2}{P_E + P + P_s} \tag{5.106}$$

$(P_E P_S)^{1/2}$ olarak verilen burkulma yükü aynı yaklaşım sırasıyla bu sonuç azalır.

$$K_H = \frac{GAs}{h} \left(1 - \frac{P^2}{P_s P_E}\right) \tag{5.107}$$

Bu sonuç (5.53)'de verilen denklemdeki yaklaşıma benzerdir ve GA_S / P = 0,05 için denkelm (5.51)'de ki tam formülle karşılaştırma Şekil5.4'deki eğrilerle gösterilmiştir. Deprem izolatörü üst yükleme plakasının aşağıya doğru hareketine neden olan yatay deplasman denklemi bu modelden elde edilebilir. Deprem izolatörü yüksekliğindeki azalma, bitişik komşu temel elemanlarını detaylandırmak için genellikle yaralıdır. Eğer izolatörün üst yükleme plakasının aşağıya doğru bir hareketinde küçük bir rotasyon olduğu farz edilirse, δ_v düşey deplasman denklemi aşağıda (5.98)'de verildiği gibi yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_v = s\theta + h\theta^2/2 \tag{5.98}$$

Şayet θ *ve s/h* için (5.93)'de verilen eşitlik kullanılırsa ve (5.95)'deki denklemi V'nin F_H'yi elimine edip yerleştirmekle aşağıdaki formüle ulaşılır.

$$\delta_v = \frac{v^2}{2h} \frac{(GA_s + P)(GA_s + P + 2P_E)}{\left(GA_s + P + P_E\right)^2} \tag{5.99}$$

P_E, P ve P_S'den çok daha büyüktür veya aşağıda verilen eşitlik ile bu ifadeden bir yaklaşım denklemine ulaşılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_v = \frac{v^2}{h} \frac{GA_s + P}{P_E} \tag{5.100}$$

Koh ve Kelly 1987 yılında bu sonucun tam ve kesin bir denklemini sundular (Koh & Kelly, 1987). Bununla birlikte yukarıdaki sonuç, dikkate değer şekilde daha basittir ve bu aynı yayın çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışma ile bu husus doğrulanmıştır. Bu basitleştirilmiş sonuç, uygulamada çok kullanışlıdır ve deforme olmuş bir pozisyondaki bir izolatörün dikey sertliğini hesaplamak için kullanılabilir. Bu parametre, bazı uygulamalar için gereklidir ve standart öneri, izolatör yatay olarak yerleştirildiğinde, izolatör üst yükleme plakası ile alt yükleme plakası arasındaki örtüşme alanı, yani; bu iki çelik plakanın birbiri üzerine iz düşüm alanı *A* ile değiştirilerek $K_V = E_C / A_r$ formülü kullanmak olarak özetlenebilir. Bu çok basitleştirilmiş analiz yaklaşımı rasyonel analizlere dayanarak yapılmıştır; Bu husus, deprem izolatörünün üst yükleme plakasının aşağıya doğru hareketi (yatay deplasman esnasında alt yükleme plakasına göre) gerçeğini ihmal edip yok sayar ve bu hareket, kenarları sınırlandırılmış olan izolatörün orta kısmında bulunan ince çelik plakalarının devrilip yana doğru yatmasına neden olur. Bu yana yatma olayı, bazı izolatör tabakalarının izolatörün ekseni etrafında dönen çelik plakalarda düşey yük bileşeni tarafından üretilen kesme gerilmesi nedeniyledir. Böylece, eğer biz yatay deplasmanı *V*, sabit ve yükü *P* değişken alırsak, , denklem (5.100)'de verilen eşitlikte izolatörün kolon hareketine sebeb olan ilave deplasman δ dahil toplam düşey deplasman δ_v ve kauçuğun sıkıştırma deplasmanı δ_v^t aşağıda verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_v^t = \frac{Ph}{E_c A_s} + \frac{GA_s + P}{P_E} \frac{v^2}{h} \tag{5.101}$$

Anlık düşey rijitlik denklemi aşağıda (5.102)'de verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_v = \frac{dP}{d\delta_v^t} = \frac{1}{h/(E_c A_s) + v^2/(P_E h)} \tag{5.102}$$

P_E yerine aşağıdaki eşitlik yazılarak bir sonra verilen denklem yazılır.

$$P_E = \frac{\pi^2 E I_s}{3h^2}$$

$$K_v = \frac{E_c A_s}{h} \frac{1}{1 + (3v^2)/(\pi^2 r^2)} \tag{5.103}$$

Dairesel kesitli bir izolatör için $r = \Phi / 4$ yazılırsa, böylece aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\frac{3v^2}{\pi r^2} = 1 \tag{5.104}$$

ve

$$v^2 = \frac{\pi^2}{3} \frac{\Phi^2}{16} \tag{5.105}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\pi}{4} \Phi = 0,45\Phi \tag{5.106}$$

Yatay deplasmanın zolatör düşey rijitliği üzerindeki etkisi, izolatörün çapına kıyaslandığında deplasmalar üzerinde belirgin ve önemli bir rol oynayabilir.

5.5.1 İzolatörün Burkulma Sonrası Davranışı

Büyük deplasmanlar altındaki bir deprem izolatörünün davranışı, eğer denge denklemi doğrusal değilse, basit ikili yay modeli ile tanımlanabilir, fakat deneyim tam olarak trigonometriyi gerekli görür. Buradaki denge denklemleri aşağıda verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_v + hF_H \cos\theta = P_E h\theta$$

$$P\sin\theta + F_H \cos\theta = P_s \frac{s}{h} \tag{5.107}$$

Denklem (5.88)'de verilen eşitlik, deplasman v ile θ ve h ilişkilendirilirse, burada küçük, F_H s sin θ ihmal edilerek düzenlenebilir. Denge denklemlerinin ikincisi ise, birinci denklemde s/h için θ yerleştirildiği zaman çözüme izin vermektedir.

$$P\sin\theta + \frac{P(F_H\cos\theta + P\sin\theta)}{P_s}\cos\theta + F_H\cos\theta = P_E\theta \tag{5.108}$$

Denklemler (5.88) ve (5.108) iki şekilde kullanılabilir. Burada biz bir F_H bulabiliriz ve θ cinsinden P için ikinci dereceden bir denklem çözümü bulabiliriz ve birinci denklemden bu P değerine karşılık gelen v değerini saptayıp bulabiliriz, böylece yatay deplasman ın v bir fonksiyonu olarak P için bir bağıntı elde edilir. Örneğin, İzolatörün burkulma sonrasında stabil olup olmadığını tespit etmek için F_H, $F_H = 0$ yazılır ve için aşağıdaki denklem yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P = \frac{P_s}{2\cos\theta}\left[\left(1 + 4\frac{P_E}{P_s}\frac{\theta}{\tan\theta}\right) - 1\right] \tag{5.109}$$

$$\frac{v}{h} = \frac{\sin\theta}{2}\left[1 + \left(1 + 4\frac{P_E}{P_s}\frac{\theta}{\tan\theta}\right)^{1/2}\right] \tag{5.110}$$

Yukarıdaki her iki denklemde baskın terim P_E / P_S dir ve $(P_S / P_E)^{1/2}$ olarak krıtik yük veren aynı seviyeli yaklaşımdır, yukarıda verilen bu iki denklem aşağıdaki gibi yaklaşımla yazılabilir.

$$P = \frac{(P_s P_E)^{1/2}}{\cos\theta}\left(\frac{\theta}{\tan\theta}\right)^{1/2} \tag{5.111}$$

ve

$$\frac{v}{h} = \sin\theta\left(\frac{P_E}{P_s}\right)^{1/2}\left(\frac{\theta}{\tan\theta}\right)^{1/2} \tag{5.12}$$

Burada deprem izolatörünün burkulma sonrasında stabil olup olamadığını belirmek için sadece *dP/dv* ifadesini tespit etmek gerekir.

Şimdi bunu yazalım,

$$\frac{dP}{dv} = \frac{dP}{d\theta}\frac{d\theta}{dv} \tag{5.113}$$

ve

$$\frac{dP}{d\theta} = (P_E P_s)^{1/2}\left(\frac{\sin(2\theta)}{2\theta}\right)^{1/2}\frac{\sin(2\theta) - 2\theta\cos(2\theta)}{(\sin(2\theta))^2}$$

$$\frac{dv}{d\theta} = h(P_E P_s)^{1/2}\left(\frac{2}{\theta\sin(2\theta)}\right)^{1/2}\frac{\sin(2\theta) - 2\theta\cos(2\theta)}{4} \tag{5.114}$$

böylece,

$$\frac{dP}{dv} = \frac{P_s}{h}\frac{\sin(2\theta) - 2\theta\cos(2\theta)}{\sin(2\theta)(\sin(2\theta) + 2\theta\cos(2\theta))} \tag{5.115}$$

Bu yukarıda verilen denklemlerden hareketle şu eşitlikler yazılabilir.

$$\frac{dP}{dv} = \frac{P_s}{h}\frac{\tan(2\theta) - 2\theta}{\sin(2\theta)(\tan(2\theta) + 2\theta)} \tag{5.116}$$

Şimdi, $0 < \theta < \pi/2$ için $dP/dv > 0$ aralığında $\tan(2\theta) > 2\theta$ böylece, izolatörün stabil durumunu gösterir (yani; *P* denge yükü *v* arttıkça artar).

Bu denklemleri yorumlamanın diğer bir yolu, θ'nın bir fonksiyonu olarak F_H için birinci denklemin sabit çözümünü P olarak kabul etmektir ve daha sonra, sabit bir P için v'nin bir fonksiyonu olarak F_H için bir bağıntı tanımlamaktır. İlk olarak F_H ile ilgili şu eşitliği yazabiliriz, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$F_H = \frac{P_s P_E \theta - P P_s \sin\theta - P^2 \sin\theta\cos\theta}{\cos\theta(P_s + P\cos\theta)} \tag{5.117}$$

ve ikinci denklem olarak da şu yazılabilir,

$$\frac{v}{h} = \sin\theta\left(\frac{P}{P_s}\cos\theta + 1\right) + \frac{F_H \cos^2\theta}{P_s} \tag{5.118}$$

ve şu şekilde de yazılabilir,

$$\frac{v}{h} = \frac{P_E\theta\cos\theta + P\cos\theta\sin\theta + P_s\sin\theta}{P_s + P\cos\theta} \tag{5.119}$$

Daha yapıldığı bazı yaklaşımlar yaparak F_H, (5.120)'de verilen eşitlikteki gibi yazılır.

$$F_H = \frac{P_E P_s \theta - P^2 \sin\theta\cos\theta}{P\cos^2\theta} \tag{5.120}$$

$$\frac{v}{h} = \frac{P_E\theta + P\sin\theta}{P} \tag{5.121}$$

Tekrar biz eğer eksi işaretli olması için türev işareti dF_H / dv ile ilgilenirsek,bu da $(P_S\ P_E)^{1/2}$ değerini aşmayan düşey bir yük için yatay bir kesme kuvveti F_H altında izolatörün dengesiz olacağına işaret eder. Daha önce olduğu gibi aynı şekilde ilerleyerek aşağıda verilen denklemi yazarız, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\mathrm{d}F_H}{\mathrm{d}\theta} = \frac{P_s\ P_E(\cos\theta + 2\,\theta\sin\theta) - P^2(\cos\theta\cos(2\theta) + \sin\theta\sin(2\theta))}{P\cos^3\theta} \tag{5.122}$$

$$\frac{dv}{d\theta} = h\,\frac{P_E + P\cos\theta}{P} \tag{5.123}$$

böylece,

$$\frac{dF_H}{dv} = \frac{P}{h}\frac{P_s P_E(\cos\theta + 2\theta\sin\theta) - P^2\cos\theta}{(P_E + P\cos\theta)\cos^3\theta} \tag{5.124}$$

Bu eşitliğin böleni yani paydası daima artı değerdedir ve eğer kesirli paydalar artı değerde ise aşağıdaki eşitlik yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{P_s P_E}{P^2} > \frac{\cos\theta}{\cos\theta + 2\theta\sin\theta} = \frac{1}{1 + 2\theta\tan\theta} \tag{5.125}$$

Şimdi burada, $P_S\, P_E\, /\, P^2$ daima 1'den büyük olacaktır ve çünkü, $0 < \theta < \pi/2$ için $\tan\theta > 0$ eşitliğin sağ tarafı daima bu aralıkta birden biraz daha küçük olacaktır, bu yüzden deprem izolatörü daima dengeli ve stabil olacaktır.

5.5.2 Basınç Yükünün Deprem İzolatörü Sönümleme Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Basit iki yay modeli, aynı zamanda bir deprem izolatöründe düşey yükün sönümleme özellikleri üzerindeki etkisini tahmin etmek için de kullanılabilir. Bu durumda, E ve G ile $E^* = E\,(1+i\tan\delta)$ ve G ve $G^* = (1+ i\tan\delta)$ yer değiştirir, burada δ, malzemenin kayıp açısı olarak ve tan δ, kauçuğun kayıp faktörü olarak tanımlanır. Bu konuya karşılık gelen büyüklükler; P_E^* , P_S^* aşağıdaki gibi formüle edilirler, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_E^* = P_E(1 + i\tan\delta)$$

$$P_s^* = P_s(1 + i\tan\delta) \tag{5.126}$$

ve yatay rijitlik (5.127)'de verilen denklemle ifade edilir.

$$K_H^* = \frac{P_s^*}{h}\frac{P_s^* P_E^* - P P_s^* - P^2}{P_s^* P_E^* + P P_s^* + P s^{*2}} \tag{5.127}$$

Karmaşık rotasyonlara θ^* ve kayma deformasyonuna s^* karşılık gelen eşitlikler aşağıda verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\theta^* = F_H \frac{P_s^* + P}{P_s^* P_E^* - P P_s^* - P^2}$$

$$\frac{s^*}{h} = F_H \frac{P_E^*}{P_s^* P_E^* - P P_s^* - P^2} \tag{5.128}$$

Eğer $\delta \neq 0$ ise, θ^* ve s^* için faz açısını tespit edebiliriz. Burada, izolatörün dinamik kayma rijitliği K_D'yi hesaplayabiliriz,

$$K_D = |K_H^*| \tag{5.129}$$

ve izolatör için kayıp faktörü tan η, tan δ ile tanımlanan malzeme için kayıp faktörüne zıt olarak (5.130)'da verilen denklemle tanımlanır.

$$\tan\eta = \frac{Im(K_H^*)}{Re(K_H^*)} \tag{5.130}$$

Pek çok durum için sonuçlar kolaylıkla değerlendirilebilir. Örneğin, şayet tüm deformasyon kayma (kesme) deformasyonu olduğu durumdaki gibi tanımlanıyorsa $P_E >> GA_S > P$, deprem izolatörü için kayıp faktörü (5.131)'de verilen eşitlikteki gibi yazılır.

$$\tan\eta = \tan\delta \tag{5.131}$$

Bu nedenle kayıp faktörü basınç yükü tarafından etkilenmez ve sönümü büyütme etkisi olamaz. Diğer taraftan, eğer $P_S = GA_S >> P_E$ sadece kopma deformasyonuna götüren bir durum ise, deprem izolatörü kayıp faktörü aşağıdaki gibi bir eşitlik ile ifade edilir.

$$\tan\eta = \frac{\tan\delta}{1 - P/P_E} \tag{5.132}$$

Bu durumda burkulma yükü, P_E ile ifade edilir; bu nedenle sönümlemede bir artış olmasına rağmen oluşur, eksenel yükün bir sonucu olarak sadece izolatör rijitliğinde bir azalma nedeniyledir, yani $R_E(K_H^*)$. Tüm bir tam çevrim boyunca yutulan enerji mıktarında bir artış yoktur.

$P_E >> GA_S$ olan bir izolatör için, fakat $P > GA_S$, olduğu zaman kayıp faktörü için sonuç şöyle yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\tan \eta = \tan \delta \frac{1 + \tan^2 \delta + P^2/P_{kritik}^2}{1 + \tan^2 \delta - P^2/P_{kritik}^2} \tag{5.133}$$

Burada,

$$P_{kritik} = \sqrt{P_E P_s}$$

Yukarıdaki denklemde paydadaki terim, rijitlikteki azalmadan kaynaklı yazılmıştır, fakat bu paydadaki terim, bir çevrimde yani bir döngüde yutulan toplam enerjiyi göstermektedir. Bir çevrimde yutulan bu enerjideki artış, kesme kuvveti F_H ve deplasman υ arasındaki faz farkı artışı basınç yükü sebebiyledir, bu da θ ve s üzerindeki etkisi vasıtasıyla olur. Burada, aynı zamanda, statik burkulma yükünde P_{kritik}, dinamik rijitliğin yok sayılamayacağı önemli konudur. Ancak,

$$P_{kritik}\left(1 + \tan^2 \delta\right)^{1/2}$$

Bununla beraber, genellikle, tan δ ortalama 0,20 ─ 0,30'dan daha büyük olamaz; pratikte bu artış ihmal edilip yok sayılabilir.

İzolatör sönülmesindeki bu atışla ilgili tahmin öngörülerindeki hassasiyet, California üniversitesi, Berkeley Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezinde (EERC) yapılan tabii kauçuk esaslı izolatörler üzerinde yapılan test programları ile duğrulanmıştır. Koh ve Kelly tarafından verilen sonuçlar, yatay deplasman sonucunda izolatörün aşağı doğru hareketi ve sönümleme ve düşey eksenel yük tarafından etkilenen dinamik rijitliği hassas olarak tahmin etmek için geliştirilip kullanılan basit iki yaylı modelini doğrulamıştır.

5.6 Stabilite Lansmanı

Eğer, bir deprem izoltörü tasarım yükü altında doğal olarak stabil ise, şayet çekme yüklerine dayanamayan izolatör üst yükleme plakasından üst yapıya ve alt yükleme plakası ile yapının temeline bağlanarak monte ediliyorsa bile diğer bir istikrarsızlık, yani stabil olmama durumu yaşanabilir. Başlangıçta izolatör tasarımcıları kauçuğun gerilmeye maruz kalmayacağını düşündüler, bu nedenle ilk kauçuk esaslı izolatör tasarımlarında montajda kesme bağlantıları için cıvata yerine dübel kullandılar. Bununla beraber, dübelli izolatörler, yatay deplasman ile ilişkili olduğu düşünülen stabil olmayan yerinden kopma davranış modu denenebilir ve böyle bir durumda izolatörün maksimum deplasmanına bir limit onulabilir. İzolatör bu tür bir deplasmanın ötesindeki bir yerdeğiştirmede istirarsız olacaktır, ve kuvvet-deplasman eğrisi azalan bir eğime sahip olacaktır. Çünkü, Şekil 5.7(a)'da gösterildiği gibi, düşey yük sonucunda bir doğru hattı üzerindeki değişim nedeniyle izolatörün alt ve üst yükleme plakalarındaki meydana gelen harekette izolatör gerilmelere dayanmaz

Bu hareketin sınırına yatay hareket izolatörün kenarında son bulduğu zaman ulaşılmış olur ve burada, düşey yük P tarafından üretilen yatay kuvvetin F_H meydana getirdiği moment eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$P(b - \delta_{\max}) = hF_H \tag{5.134}$$

Burada verilen b genişliktir, eğer kare kesitli bir izolatörde bu α karenin genişliğidir, eğer dairesel kesitli bir izolatör olursa bunun yerine Φ yarıçap olarak alınır. Yatay kuvvet F_H ve yatay deplasman δ arasındaki ilişki Şekil 5.7(b)'de gösterilmiştir.

Eğer, $F_H = K_H \delta$ alınırsa aşağıda (5.135)'de verilen denklem yazılabilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\frac{\delta_{\max}}{b} = \frac{P}{P + K_H h} \tag{5.135}$$

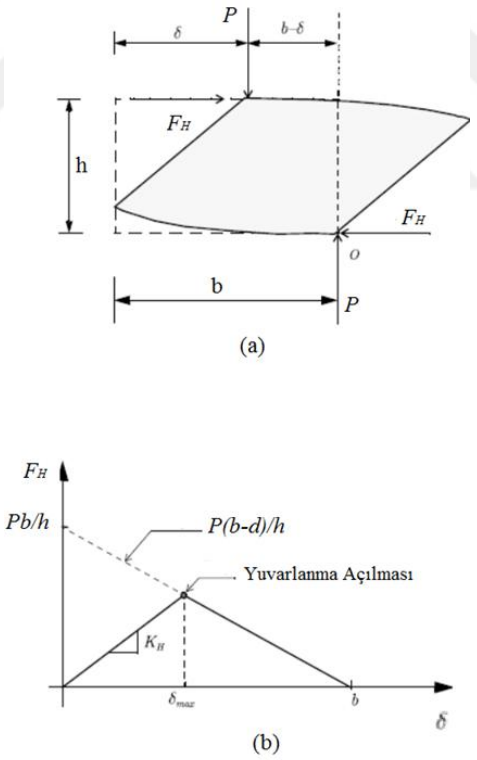
Şayet, F_H, GA/t_r ve basınç $p = P/A$ yazılırsa, yukarıdaki eşitlik aşağıda verilen denkleme dönüşür.

$$\frac{\delta_{\max}}{b} = \frac{1}{1 + \frac{G}{p}\frac{h}{t_r}} \tag{5.136}$$

Tipik olarak izolatörlerde $G \approx 0{,}828$ MPa, $p \approx 6{,}90$ MPa alınırsa örnek olarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{\delta_{\max}}{b} = 0,88$$

Böylece, dübelli bir izolatörün yatay deplasmanı, izolatör kesit ölçüsünün en az ortalama olarak %88'inden daha az ise, izolatörün yana doğru yuvarlanarak açılmasına karşı stabil olması beklenebilir. Aksine, eğer bir deprem izolatörü kullanılacağı yere cıvata ile monte edilmişse, deplasmanın İzolatör kesit ölçüsünün %88'lük değerini geçinceye kadar izolatörde önemli bir gerilme olmaz.



Şekil 5.7 Dübelli deprem izolatörleri için mekanik yuvarlanma açılması, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

EERC de ve Japonya'da yapılan izolatör testleri kauçuk izolatörlerin çekme gerilmelerine karşı oldukça yüksek bir dayanıma sahip olduklarını göstermiştir ve şimdi deprem izolatörü bağlantılarında dübel yerine cıvata kullanımı daha yaygındır. Bununla beraber ilave araştırmalar, henüz tam anlamıyla iyice anlaşılamayan gerilme sürecinde meydana gelen kopmalar gibi konularda çalışmaya gereksinim olduğunu göstermiştir. Bu kapsamda Gent ve Lindley 1959 yılında, izolatörler üzernde kauçuk malzemede meydana gelen kavitasyon veya yapışma ayrılmasını ve kauçuğu çelik plakalardan kopmasını kapsayan bir dizi çalışma yapmışlardır. Bazı testlerle Kelly tarafından 1991 yılında, izolatör çapını aşan deplasmanlar göstermiş olmalarına rağmen, bu durum civatalı bağlantılar kullanılsa bile deplasman limitlerine izolatör tasarımlarında dikkat etmek kesinlikle çok önemlidir, (Kelly, 1991).

5.7 Deprem İzolatörü Burkulmasında Kauçuğun Sıkıştırılabilirliğinin Etkisi

Önceki bölümde kauçuğun hacimsel sıkıştırılabilirliği ile ilgili bilgi verilmişti, ve kauçuğun sıkıştırılabilme özelliğinin, deprem izolatörünün hem sıkıştırma rijitliği ve hem de şekil faktörünün, S, 10 gibi düşük değerleri için bile eğilme rijitliği üzerinde şaşırtıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştü. Denklem (5.32)'de verilen izlenim yani, tabaka sayısını artırarak ve kauçuk kalınlığını azaltarak elde edilen şekil faktörünün artışı gibi basit bir işlem ile ve belirli bir izolatör çapı için deprem izolatörünün stabilitesini geliştirip artırmak mümkündür. Ancak, kauçuk malzemesinin hacimsel sıkıştırılabilirliğinin etkisi nedeniyle bu gelişme sınırlıdır. Denklem (5.26)'da verilen eşitliğin çözümü ile burkulma yükünün olduğu farz edilmektedir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_s = GA_r \frac{h}{r}$$

$$P_E = \frac{\pi^2}{h^2} (EI)_{eff} \frac{h}{r} \tag{5.137}$$

ve $(EI)_{eff}$ ifadesi için yerine yerleştirilirse,

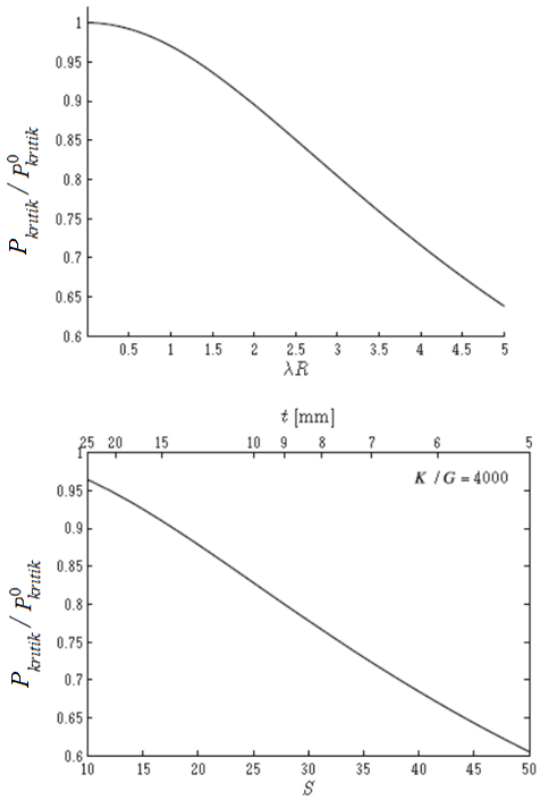
$$(EI)_{eff} = \frac{K\pi R^4}{4} \left(1 - \frac{4I_2(\lambda R)}{\lambda R I_1(\lambda R)}\right) \tag{5.138}$$

ve burada λR için aşağıdaki eşitlik yazılabilir,

$$\lambda R = \sqrt{\frac{48GS^2}{K}}$$

Kritik yükün sonuç değeri P_{kritik}, kauçuk malzemenin sıkıştırılabilir olarak alındığı durumlarda, kritik yük için elde edilen sonuca bölünerek sadece λR miktarına bağlı bir ifadeye indirgenebilir, buradan P_{kritik} aşağıdaki gibi formüle edilebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\left(\frac{P_{kritik}}{P^0_{kritik}}\right)^2 = \frac{24}{\lambda^2 R^2}\left(1 - \frac{4I_2(\lambda R)}{\lambda R I_1(\lambda R)}\right) \tag{5.139}$$



Şekil 5.8 Burkulma yükü üzerinde kauçuğun sıkıştırılabilirliğinin etkisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

veya şekil faktörü, kayama modülü ve hacimsel modül cinsinden yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\left(\frac{P_{kritik}}{P^{0}_{kritik}}\right)^{2} = \frac{1}{\frac{2GS^{2}}{K}}\left(1 - \frac{4\,\mathrm{I}_2\left(\sqrt{\frac{48\,G}{K}}S\right)}{\sqrt{\frac{48\,G}{K}}S\mathrm{I}_1\left(\sqrt{\frac{48\,G}{K}}S\right)}\right) \tag{5.140}$$

Şekil 5.8' deki grafikler, sıkıştırmanın hesaba katıldığı zaman burkulma yükünde önemli bir azalma olduğunu gösterir. Bunlar aynı zamanda, şekil faktörünü artırarak daha yüksek bir burkulma yükü elde etme gayretinin kendine kendini geçersiz hale getirdiğini gösterir. Sıkıştırılamaz durumda iken yapılan analizler, artan şekil faktörü ile burkulma yükünün doğrusal olarak artırılmasını önerir. Günümüzde yapılan çoğu deprem izolatörü tasarımında çok büyük şekil faktörleri, (S = 30-40 aralığında) kullanılmaktadır.

BÖLÜM ALTI
GERİLİM ALTINDAKİ ÇOK TABAKALI KAUÇUK ESASLI DEPREM İZOLATÖRLERİNİN BURKULMA DAVRANIŞI

6.1 Giriş

Bu bölümde, bir önceki bölümde ele almış olduğumuz sıkıştırma altındaki izolatörün burkulmasıyla ilgili denklemleri aşağıda tekrar ele alıp kullanacağız.

$$P^2 + P_s P - P_s P_E = 0 \tag{6.1}$$

Burada $P_S = GA_S$ ve $P_E = \pi^2 E_S I / h^2$ 0lur. Bu denklem biri pozitif ve diğeri negatif olmak üzere iki çözüme sahiptir. Bu çözüm şekilleri aşağıda verilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_{kritik} = \frac{-P_s \pm \sqrt{P_s^2 + 4P_s P_E}}{2}$$

Basınç altında çözüm geçen bölümde detaylı bir şekilde ele alınıp incelenmiştir aşağıda verilmiştir.

$$P_{kritik} = \frac{-P_s - \sqrt{P_s^2 + 4P_s P_E}}{2} \tag{6.2}$$

Negatif çözüm, bir çekme burkulma yükünün varlığına işaret eder ve şimdi soru çözümün önemli olduğudur. Bir önceki bölümde, 5.26) numaralı denklemde gösterildiği gibi, eğer izolatör 5'ten daha büyük şekil faktörüne sahipse sıkıştırma kritik yükü negatiftir. O halde buradan biz aşağıdaki gibi bir kritik gerilme yükü tanımlayabiliriz.

$$T_{kritik} = \sqrt{P_s P_E} \tag{6.3}$$

Bu sonuçtan elde edilen beklenmedik bir çıkarım ise, sıkıştırma burkulma yükünde olduğu gibi aynı değere sahip olan bu tip bir kauçuk bileşen için çekme burkulma yükünün varlığıdır. Ek olarak, T yerine P yazıldığı zaman α ve β büyüklükleri cinsinden aşağıda verilen eşitlikler yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\alpha^2 = \frac{T(T - GA_s)}{EI_s GAs} \tag{6.4}$$

$$\beta = -\frac{GA_s}{T - GAs} \tag{6.5}$$

Böylece, eğer $T > GA_S$, gerilim altında izolatör burkulmuş şekilde ise, sıkıştırılabilir durumda olduğu gibi çözüm aynıdır. Şimdi, β değeri negatif olunca denklem (5.20)'de rotasyon $\psi(x)$ tersinedir ve izolatör merkezinde bulunan tabakalar, kesme deformasyonu ile izolatör üst kısmının yukarı doğru hareketini kolaylaştırma yönünde döndürülürler. Şüphesiz, bu burkulma yükü, kauçuk esaslı izolatör burkulmalarından önce pratikte böyle davranmaz, ancak çekme gerilmesi sonucu meydana gelen burkulma yükü ve burkulma şekli tamamen kesme deformasyonu nedeniyle olan sıkıştırma durumuna zıttır ve kesme tam simetriktir.

Gerilim altındaki burkulma sistemlerine ait birçok örnek vardır, fakat bunlar istikrarsızlık meydana getiren sıkıştırma elemanlarına daima transfer edilen gerilme kuvvetlerinde tamamen sıkıntılı problemlere neden olurlar, izolatörlerin burkulması gerçekten çekme gerilmesi nedeniyledir. Hem sıkıştırma burkulması ve hem de gerilme burkulmasına götüren lineer elastik model aşırı derece basittir ve çekme gerilmesi sonucu meydana gelen burkulma yapay bir model olabileceği ve izolatör modeli olmayabileceği tartışılabilir (Kelly ve Konstantinidis, 2010). Bu nedenle, çok tabakalı bir deprem izolatörü ile ilgili sonlu elemanlar metodu (FEM) modeli kullanarak yapılan sayısal simulasyon ile basit bir modelden elde edilen sonuçların doğrulanması önemlidir. Ayrıca basit lineer elastik teori ile çekme burkulması tahmini gerçekte çok hassas bir iştir ve aslında bu tür bir izolatör modelinin yapay olarak yapılması zordur. Böyle sayısal deney, uzun bir şerit şeklindeki izolatörün davranışlarının benzerini yaparak göstermek için hesaplama boyutunu küçültmek için iki ölçüde yapılır ve bu çekme burkulması gerçek bir olasılık olduğunu gösterir ve bu yapay bir model değildir. Burada temel husus gerilim altındaki izolatör mekaniğinin sıkıştırma altındaki izolatörünkinin aynadaki görüntüsü gibi olduğudur. Özellikle burkulma yükü altındaki izolatör sıkıştırılır, ancak kesme deformasyonun neden olduğu ve bir izolatör tabakası üzerine gelen düşey yük altında izolatör merkezindeki tabakaların dönmesi test edilir. Bu ters yöndeki dönüşler, yatay

olmayan bir hayli büyük deplasmanlar ile izolatör üst kısmının yukarı doğru hareketine izin vere çekme kuvvetinin nedeniyle oluşan bir kesme deformasyonu sonucunda, merkezde bulunan izolatör tabakaları, ters yönde döndürülerek test edilir ve izolatör deplasmanın olmadığı tam gerilme altında dayanımlı olmalıdır.

6.2 Elastomer Esaslı Bir Deprem İzolatöründe Çekme Gerilmesi Altında Düşey Yükün İzolatör Yatay Rijitliği Üzerindeki Etkisi

Eğer bir izolatör tarafından taşınan yük burkulma yükü ile kıyaslanırsa, o zaman yatay rijitlik için basit bir formülle aşağıdaki gibi değiştirilebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_H = \frac{GA}{t_r} = \frac{GA_s}{h} \tag{6.6a}$$

Burkulma yükü hesabında kullanılan analizler, eksenel yükün varlığı durumunda etkili yatay rijitliği tespit etmek için kullanılabilir. Örneğin izolatörün üst kısmında bir yatay kuvvet F_H düşünelim ve izolatör tepesindeki deplasman $v(h) = \delta_h$ olarak hesaplanır ve daha sonra K_H için aşağıdaki gibi bir denklem yazılır, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_H = \frac{F_H}{v(h)} = \frac{F_H}{\delta_h} \tag{6.6b}$$

Temel denklemler (5.42a) ve (5.42b)sınır şartları yazılarak çözülür, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$v(0) = 0, \psi(0) = 0, \psi(h) = 0, H_0 = -F_H \tag{6.7}$$

Böylece,

$$v(x) = A\cos(\alpha x) + B\sin(\alpha x) + \frac{M_0}{P} - \frac{F_H}{P}x \tag{6.8a}$$

$$\psi(x) = \alpha\beta B\cos(\alpha x) - \alpha\beta A\sin(\alpha x) - \frac{F_H}{P} \tag{6.8b}$$

Burada sınır şartlarını kullanarak şu eşitlikleri yazabiliriz, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$A = \frac{F_H}{P}\left(\cos(\alpha h) - 1\right)\frac{1}{\alpha\beta\sin(\alpha h)} = -\frac{M_0}{P} \tag{6.9}$$

$$B = \frac{F_H}{\alpha\beta P} \tag{6.10}$$

denklem (6.8a)'da bu verilen eşitlikler yerlerine yazılarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$v(x) = \frac{F_H}{\alpha\beta P}\left[\frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)}\left(\cos c\alpha x\right) + \sin(\alpha x) - \alpha\beta x\right] \tag{6.11a}$$

$$\psi(x) = \frac{F_H}{P}\left[\frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)}\sin(\alpha x) - (1-\cos(\alpha x))\right] \tag{6.11b}$$

$x = h$ için deplasman (6.12)'deki gibidir.

$$\delta_h = v(h) = \frac{F_H}{\alpha\beta P}\left(2\tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) - \beta\alpha h\right) \tag{6.12}$$

ve *x = h/2 için rotasyon şöyle yazılır,*

$$\psi\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{F_H}{P}\left(\frac{1-\cos\left(\frac{\alpha h}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha h}{2}\right)}\right) \tag{6.13}$$

Sonuç olarak, yatay rijitlik denklemi (6.6)'da verilen eşitlikten hareketle aşağıdaki gibi olur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_H = \frac{F_H}{\delta} = \frac{\alpha\beta P}{2\tan\left(\frac{\alpha h}{2}\right) - \beta\alpha h} \tag{6.14}$$

P, *T* ile yer değiştirildiği zaman, $T > GA_S$, hem β ve *P (6.14)*'de verilen denklemin açılımını değiştirir ve rijitlik hala pozitifdir, ancak izolatör üst kısmını yukarıya doğru hareketini kolaylaştırarak izolatör merkezindeki rotasyon işaretini (dönüş yönünü)değiştirir.

$T < GA_S$, bu durumda çözüm için trigonometrik fonksiyonlar yerine hiperbolik olacaktır.

$T = GA_S$ olduğu zaman ilk terimler, (5.10a) ve (5.10b)'de verilen temel denklemler belirsizdirler. Bu durumda *v (x)* ve *ψ (x)* için çözümler aşağıda verilmiştir.

$$v(x) = \frac{F_H}{GAs} x \tag{6.15a}$$

$$\psi(x) = 0 \tag{6.15b}$$

Böylece deformasyon tam bir kesme gerilmesinin sonucudur ve bunun böyle olduğunu (5.60)'da verilen denklemde göstermek kolaydır , (Kelly, 2003).

Deprem izolatörünün yatay rijitliği üzerinde düşey rijitliğin etkisinin sonucu bu etkiyi fiziksel olarak kavramayı sağlamaz, ancak GA_S değerini tekrar hatırlarsak, P_E ve *P* karşılaştırıldığında çok küçük değerdir. Biz αh ve β, burada $p = P/P_{kritik}$ dir ve 1'den çok küçük olan $\beta \approx GA_S$, olup yatay rijitlik aşağıdaki bir denklemle ifade edilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_H = \frac{GAs}{h} \frac{\pi p}{2\tan(\pi p)} \tag{6.16}$$

$$K_H = \frac{GAs}{h} = \frac{GA}{t_r}$$

Buradan,

$$K_H = \frac{GAs}{h} \frac{\pi p}{2\tan(\pi p)}$$

$p \rightarrow 0$ ve $K_H \rightarrow 0$, $p \rightarrow 1$ olursa yukarıda verilen formül elde edilir. P, T ile ve p ise $-t$ ile değiştirildiği zaman, burada t aşağıdaki denklemde verildiği gibi olup aynı sonucu elde ederiz, hem P ve T hem simetrik bir şekilde rijitliği etkiler.

$$t = \frac{T}{\sqrt{P_E P_s}}$$

6.3 Yatay Yük Altında Deprem İzolatöründe Meydana Gelen Düşey Deplasman

Denklem (5.60)'da verilmiş olan eşitlik, yatay yük F_H ve $T > GA_S$ bir gerilme yükü ile zorlanmış olan bir deprem izolatörünün üst kısmının deplasmanını hesaplamak için kullanılabilir. Hesaplama için başlangıç noktası (6.11a) ve (6.11b)'de verilen denklemlerinde $\upsilon(x)$ ve $\psi(x)$ için çözüm bulmaktır. $x = h$ için denklem (6.11a)'nın değerlendirilmesinden yatay deplasman aşağıda verilen eşitlikteki gibi bulunur, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_h = v(h) = \frac{F_H}{\alpha\beta P}\left(2\frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)} - \beta\alpha h\right) \tag{6.17}$$

(6.11a)'nın diferansiyelinden aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$v'(x) = \frac{F_H}{\beta P}\left(\cos(\alpha x) + \frac{1-\cos(\alpha h)}{\sin(\alpha h)}\sin(\alpha x) - \beta\right) \tag{6.18a}$$

Ve nihayet (6.11b)'den hareketle aşağıda verilen uzun bir denklem yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\begin{aligned} 2\psi\psi' - \psi^2 = \frac{F_H}{\beta P^2}\{-2[&\beta\cos\alpha h - \beta\cos\alpha h + \cos\alpha h \\ &-2\cos\alpha h\cos^2\alpha x + \cos\alpha h\cos\alpha x - 1 \\ &+\sin\alpha h\sin\alpha x - 2\sin\alpha h\cos\alpha x\sin\alpha x \\ &+\beta\cos\alpha x\sin\alpha x\sin\alpha h + \cos\alpha x]/[\cos\propto h + 1]\} \end{aligned} \tag{6.18b}$$

x = 0 dan x = h'ye kadar bu yukarıda verilen eşitliğin integrali alınarak (6.19)'da verilen denklem yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_v = \frac{1}{2}\int_0^h \left(2\psi v' - \psi^2\right) dx$$

$$= \frac{1}{2}\frac{F_H^2}{\beta P^2}\left(\frac{\propto h\beta\cos(\alpha h) - 2\sin(\alpha h) + 2\alpha h - \beta\sin(\alpha h)}{\alpha(\cos(\alpha h)+1)}\right) \qquad (6.19)$$

F_H ve P terimleri, denklem (6.17)'den δ_h'nin karesine bölünerek elimine edilirler ve aşağıdaki şu denkleme ulaşılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_v = \frac{\beta\alpha h}{2}\left(\frac{\beta\alpha h\cos(\alpha h) - 2\sin(\alpha h) + 2\alpha h - \beta\sin(\alpha h)}{-4\cos(\alpha h) + \beta^2\alpha^2 h^2\cos(\alpha h) + 4 + \beta^2\alpha^2 h^2 - 4\beta\alpha h\sin(\alpha h)}\right)\frac{\delta_h^2}{h} \qquad (6.20)$$

Yukarıda verilen denklem (6.20) de parentez içindeki ifade, hem düşey yüke hem P veya *T'ye bağlı olan* iki boyutsuz büyüklük αh *ve* β'nın bir fonksiyonudur. Bu sonuç, izolatör paremetreleri P_S ve P_E'nin düşey deplasman ile tanımlandığı zaman yatay deplasmanın δ_h ikinci derecesi olduğudur ve eksenel yük, basınç veya çekme gerilmesi değerlerinden herhangi biri için kolaylıkla hesaplanabilir.

Eğer biz önceki bölümde yapılmış olan yaklaşımları kullanırsak, verilen $\alpha h = \pi p$ *ve* $\beta \approx 0$ için P'ye kıyaslanan GA_S'nin ihmal edilmesiyle aşağıdaki denklem indirgenir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$\delta_v = \frac{\pi G A_s}{4P_{kritik}}\left(\frac{\pi p - \sin(\pi p)}{1-\cos(xp)}\right)\frac{\delta_h^2}{h} = \frac{\pi GAs}{4P_{kritik}} f(\pi p)\frac{\delta_h^2}{h} \qquad (6.21)$$

$$f(x) = \frac{x - \sin x}{1 - \cos x}$$

fonksiyonu, x = 0 ile $\pi/2$ olduğunda, $x = \pi$ olduğu zaman ve $0 \le x \le \pi$ aralığı dışında monoton bir şekilde artar. Ve x, $-x$ ile yer değiştirdiğinde, antisimetriktir,

yani *f(-x)= -f(x)* dir. Türev alarak (6.22)'de verilen simetrik denkleme ulaşılır ve *x,* 0'dan $x = \pi$'ye kadar değiştiği gibi 1/3' den 1'e kadar değişkenlik gösterir. Böylece, bu aralığın üzerinde monoton bir şekilde artar ve p=1/2'ye karşılık gelen $x = \pi/2$ için değeri 0,429 olur.

$$f'(x) = \frac{2(1-\cos x) - x\sin x}{(1-\cos x)^2} \tag{6.22}$$

Deforme olmamaış bir deprem izolatörünün düşey rijitliği bir sonraki denklemle ifade edilir.

$$K_v^0 = \frac{E_c A_s}{h} \tag{6.23}$$

Burada, E_c sıkıştırma modulüdür ve dairesel kesitli bir deprem izolatörü için

$E_c = 6GS^2$ dir.

Aşağıda verilen denklemlerdeki gibi yatay bir deplasman δ_h ile düşey rijitliğin ilişkisi gösterilmiştir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_v = \left(\frac{d\delta_v^t}{dP}\right)^{-1} \tag{6.24}$$

$$\delta_v^t = \frac{P}{K_v^0} + \delta_v = \frac{h}{E_c A_s} P + \delta_v \tag{6.25}$$

Şimdi,

$$\frac{d\delta_v}{dP} = \frac{d\delta_v}{dx}\frac{dx}{dP} = \frac{\pi^2}{4}\frac{GAs}{P_{kritik}^2} f'(\pi p)\frac{\delta^2}{h} \tag{6.26}$$

Ve düşey rijitlik denklemi şöyle yazılır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$K_v = K_v^0 \frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4}\frac{GA_s E_c As}{P_{kritik}^2} f'(\pi p)\frac{\delta_h^2}{h^2}} \tag{6.27}$$

$$P_{kritik}^2 = GA_s EI_s \left(\frac{\pi^2}{h^2} \right)$$

yazılarak *Kv*, (6.28)'de verilen eşitlik olarak yazılır.

$$K_v = K_v^0 \frac{1}{1 + \frac{3}{4} f'(\pi p) \frac{\delta^2}{r^2}} \tag{6.28}$$

Burada $r^2 = I/A$ dır ve çapı Φ olan dairesel kesitli bir deprem izolatörü için ise,

$r^2 = \Phi^2/16$ olur, ve böylece dairesel kesitli bir izolatör için düşey rijitlik (6.29) ile verilen denklemde yazıldığı gibidir.

$$K_v = K_v^0 \frac{1}{1 + 12 f'(\pi p) \frac{\delta^2}{\Phi^2}} \tag{6.29}$$

Bir çok durumda, aşırı deprem yükleri altında, standart kodların teknik şartnamelerinden hesaplanan düşey yöndeki deplasman, düşey rijitliğin, hem basınç sıkıştırması altında ve hem de gerilme zorlamaları altında iken yatay deplasman ile önemli derecede azaldığını ve izolatör çapına yakından bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Örneğin, eğer $\delta_h = 0{,}5$ ve $p = P/P_{kritik} = 0{,}5$ ise, bu durumda denklem (6.29) bize düşey rijitlik olarak $K_V = 0{,}437\ K_V^0$ değerini verir.

Deprem izolatörleri normal olarak basınç zorlamsı altındadır, ancak yakın fay hattı bölgelerinde yapılan yüksek binaların deprem yalıtımı için standart kodların teknik şartnameleri, izolasyon sisteminin çevresinde bulunan ve gerilmeleri bir miktar azaltması için yerleştirilmiş olan deprem izolatörlerindeki gibi bir duruma yönlendirmektedir. Bu gerilme, deprem yalıtımı yapılan binanın kütle merkezinde oluşan yatay atalet kuvveti tarafından üretilir ve bu gerilim binanın devrilmesine neden olur. İlk bakışta kritik bir durum gibi görünen binanın devrilmesi olayı, maksimum atalet kuvveti ve bunun sonucunda maksimum devrilme momenti oluşumu aynen maksimum yatay deplasmanda olduğu gibi olur.

Doğal kauçuk (polyisoprene) veya sentetik kauçuk neopren (polycloroprene) gibi iyi bilnen elastomerlerde 3G civarındaki negatif bir basınçta kavitasyon meydana gelir, (Gent, 1990). G değeri 0,5 ile 1,0 MPa olunduğunda ve çok tabakalı bir izolatörün ince tabakasında meydana gelen iç gerilme hali tamamen hidrostatiktir ve bu iç gerilmelerin kavitasyon üretme ihtimali oldukça düşüktür. İzolatördeki çekme gerilmesi de son derece küçüktür, kavitasyon oluşmadan önce gerilme altındaki bir izolatörün rijitliği aynı basınç zorlaması altındaki izolatörde olduğu gibidir. Dairesel bir izolatörün etkili basınç modülü E_c=6 GS^2 dir, burada S izolatöre ait tek tek her bir elastomer tabakası için 10 ile 20 arasında değerlikli şekil faktörüdür, böylece, çekme gerilmesi ε_t, kavitasyonun başlangıcında $\varepsilon_{t\,=\,1/2S^2}$ olacaktır ve yukarı doğru meydana gelen deplasman bunun birkaç milimetre veya daha az olacaktır. Böylece, bununla ilgili olanlar izolatör tasarım mühendisleridir, tasarım mühendisleri gevşek cıvata yaklaşımı gibi birçok konu üzerinde çalıştılar. Bu kesinlikle gerilme problemini çözer, fakat eğer yukarı doğru yükselme olursa, civataların güvenirliği gibi diğer sorunlar ortaya çıkar, civatalarda konsol gibi hareket eden deprem izolatörüne transfer edilen kesme yüküne sahip olacaklardır. Diğer stratejiler denendi, ancak gerilimi ortadan kaldıran her bir yaklaşım başkaca dezavantajlara sahiptir.

Günümüzde izolatör prototip testlerini gerekli gören tüm deprem yalıtım standart kodları alttan yukarı doğru yükselmeyi kapsayan bir yaklaşıma sahiptirler. İki farklı deprem yalıtım projesinde izolatörler büyük yatay deplasman yapacak şekilde bina tabanına terleştirildiler ve daha sonra izolatörün üst kısmı yukarı doğru yükseltilmiş, yani 12,5 mm yükseltilmiş bir izolatör durumu ve bir diğeri ise, 19 mm olarak yükseltilmiştir. Bu iki durumda da izolatörler test edildi, fakat şurası gerçek ki çekme gerilmesi, büyük oranda kavitasyon gerilmesini aştı. Burkulma teorisi değeri, deprem izolatörlerinin bu çekme yüklerini dayanmaya devamını nasıl sağlayacağıdır. Gerilme altındaki deprem izolatörlerinin mekaniğindeki temel prensip, basınç sıkıştırması altındaki izolatör için bunların ayna görüntüsü gibi olmasıdır. Özellikle izolatör, burkulma yükünün biraz altında basınç zorlamasına maruzdur, fakat yatay olarak yerleştirilirler, izolatör merkezindeki tabakalar boyunca düşey yükün neden olduğu dönme ve bir kesme deformasyonu üretir.

Gerilme altında, izolatör merkezindeki tabakaların ters yönde bir dönmesi denenir, bu tecrübe, çekme kuvvetinin neden olduğu bir kayma deformasyonuna izin verir ve sadece gerilmeye dayanabilen bir izolatörde, çok daha büyük bir deplasman tarafından izolatör üst kısmının yukarı doğru hareketine yatay deplasman olmaksızın izin verilir. Böylece, gerilmenin eş zamanlı oluşumu ve kesme deprem izolatörünün kavitasyondan zarar görmesini engeller.

Kauçuk üç eksenli durumda, büyük bir şekil faktörüne sahip olan çok tabakalı bir izolatörde yalnız gerilme altındayken sadece küçük gerilmelere dayanımını sürdürebilir, ancak %500 ile %600 arasındaki kesme gerilmelerine karşı dayanıklıdır. Böylece, eş zamanlı gerilme ve kesmenin eş zamanlı meydana gelmesi, izolatörün kavitasyon etkilerinin neden olduğu zararlardan korunmasını sağlar.

6.4 Gerilme Altındaki Deprem İzolatörünün Sayısal Burkulma Modeli

6.4.1 İzolatör Modellemenin Detayları

Basit bir analitik teori ile gerilmeler sonucu meydana gelen burkulma öngörüsünü doğrulamak bir realitedir, genel amaçlıbir sonlu elemanlar metodu olan ABAQUS (HKS 2001) ince çelik plakalar ile güçlendirilmiş olan çok tabakalı deprem izolatörlerini modellemek için ve hem gerilme, hem de basınç zorlamaları altındaki deprem izolatörünün burkulma davranışını incelemek için kullanılmaktadır. Bu analiz prosedürünün ayrıntıları, Kelly ve Takhirov tarafından 2004 yılında yapılmış olan bir çalışmada verilmiştir, (Kelly & Takhirov, 2004).

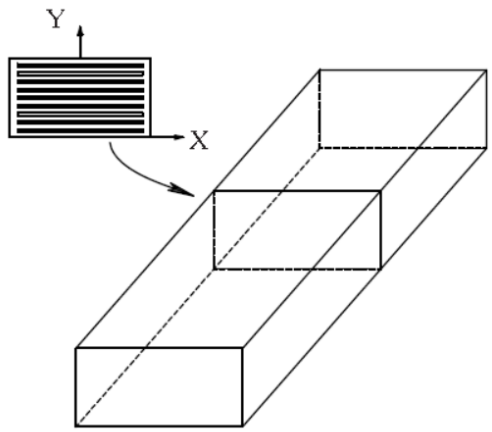
Bir deprem izolatörünün beş sonlu elemanlı modeli oluşturuldu. Bu sayısal modeller aynı genişliğe, aynı toplam kauçuk kalınlığına ve bütün çelik plakaları aynı kalınlığa sahiptir. Sadece modeller arasındaki fark, kauçuk tabakalarına ait şekil faktörleridir. Toplam kauçuk kalınlığı her bir modelde aynıdır, fakat modelden modele kauçuk tabakaların kalınlıkları değişmektedir.

Tablo 6.1 Deprem İzolatörlerin Çeşitli Şekil Faktörüne Göre Sonlu Eleman (FEM) Modelleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Model Adı	İnce Çelik Plaka Kalınlığı [mm]	Toplam Kauçuk Kalınlığı [mm]	İzolatör Genişliği [mm]	Kauçuk Tabakası Kalınlığı [mm]	Şekil Faktörü
Model 1	2.60	80.01	160.02	5.72	14
Model 2	2.60	80.01	160.02	8.00	10
Model 3	2.60	80.01	160.02	11.43	7
Model 4	2.60	80.01	160.02	16.00	5
Model 5	2.60	80.01	160.02	26.67	3

İzolatörin model numaralarına göre izolatör özellikleri ve kauçuk tabakası kalınlıkları Tablo 6.1' de verilmiştir.

Deprem izolatörleri Şekil 6.1' de gösterildiği gibi uzun şerit şeklinde temsil edildi ve FEM analizi düzlem gerilmesi ile sınırlandırılmıştır. Böylece, tanımlanmış olan sayısal çözümler sonsuz uzunluktaki bir izolatörün iki boyutlu analizine dayandırılmıştır.



Şekil 6.1 Sonlu Elemanlar Simülasyonu Kordinat Eksenleri ve Geometrisi, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Şekil 6.1' de gösterildiği gibi, koordinat sisteminin y-ekseni çelik plakalara ve kauçuk tabakaları boydan boya uzanan düşey bir eksendir ve yatay eksen-x ise, izolatörün yatay doğrultusuna karşılık gelir. Genel olarak ince çelik plakalar ile güçlendirilmiş olan kauçuk esaslı deprem izolatörleri çelik plakaların ortasında yani

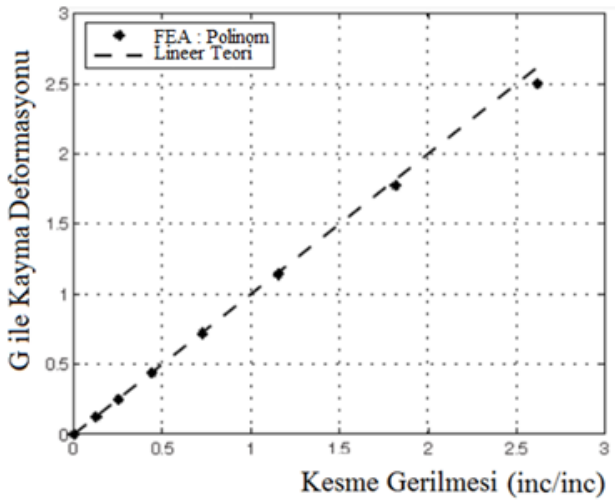
düşey eksende merkezinde bir deliğe sahiptirler ve izolatörün yük taşımayan bölgesinin etrafını saran bir kauçuk örtü vardır. Bir izolatör modeli oluşturmak daha verilmiş olan teorik bir modele benzerdir, izolatör ortasındaki delik ve izolatörün etrafını saran kauçuk örtü bu düşünceye dahil değildir. Deprem izolatörü alt ve üst kısmında bulunan yükleme plakalarının deformasyona uğramadığı kabul edilir; böylece, sonlu elemanlar modelinde izolatör üst kauçuk tabakası, orta referans noktasında rijit bir yüzeyle bağlıdır, düşey yük bu referans noktasına uygulanır. İzolatörün alt yüzü deprem izolatörü modelinin düşey yöndeki iki yüzeyde sabitlenmiştir. İzolatör üst yüzeyi z-ekseni (düzlem dışı) etrafında meydana gelebilecek dönmelere (rotasyonlara) karşı sınırlandırılmıştır, ancak yatay yöndeki hareketi serbesttir.

Lineer elastik malzeme özellikleri çelik plakalar için Young modülü ve Poison oranı sırasıyla 200 GPa ve 0,30 değerlerine eşit olduğu kabul edilir. Kauçuk malzemeler esnekliklerine kıyasla çok az miktarda sıkıştırılabilirliğe sahiptirler ve bu malzemeler genellikle hiper elastik malzeme modeli ile modellenirler. ABAQUS (HKS 2001) kauçuk bir malzemede görülen tamamen sıkıştırılamaz davranışı modellemek için özel bir hibrid elemanlar ailesine sahiptir. Takibeden kabuller kauçuk malzemesinin modellemsei için yapılmıştır: (1) malzeme elastiktir, (2) malzeme izotropiktir, (3) malzeme sıkıştırılamazdır veya hemen hemen sıkıştırılamazdır, (4) simulasyon lineer olmayan geometrik etkileri kapsar.

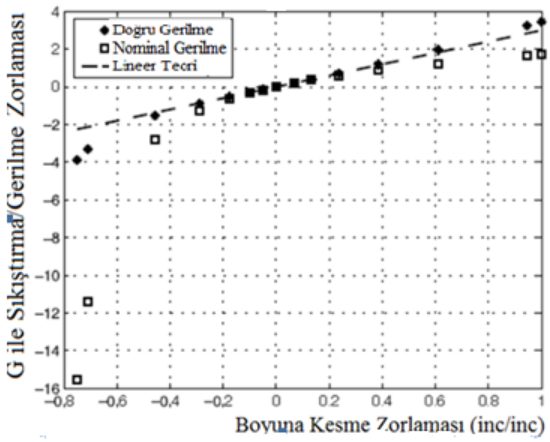
Hiper elastik malzemeler, belirli bir referans hacmin birimi başına malzeme içinde depolanan gerilme enerjisi potansiyeli U ifadesinde tanımlandığı gibidir. Kauçuk malzeme ikinci dereceden polinom şeklinde hiper elastik malzeme olarak modellenir. Bu durumda, gerilme enerjisi potansiyeli aşağıdaki gibi Kelly ve Kostantinidis tarafından 2010 yılında verilmiştir, (Kelly ve Konstantinidis, 2010).

$$\mathbf{U} = \frac{1}{D_1}\left(J^{el} - 1\right)^2 \sum_{i+j=1}^{2} C_{ij}(I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^i \tag{6.30}$$

Burada C_{ij} ve D_1 malzeme paremetreleridir, I_1 ve I_2 sırasıyla birinci ve ikinci deviatorik gerilme değişmez sabit değerlerdir ve J^{el} ise, elastik hacim oranıdır.



(a)



(b)

Şekil 6.2 Polinominal davranışlı kauçuk malzeme modelinin (a)Kesme Gerilmesi altında, (b)Sıkıştırma / Gerilme zorlaması altında, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

Bu iki kauçuk modeli, tamamen sıkıştırılamaz bir model olan ve Polinominal modeli anılan bir modeli ve hemen hemen hiç sıkıştırılamaz bir model olan ve Neo-Hookean (Gent 2001) modeli kapsamaktadır. Kauçuğun malzeme paremetreleri aşağıdaki şekilde, başlangıç kesme modülü ve başlangıç hacim modülleri terimleri ile ifade edilebilir, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$G = 2(C_{10} + C_{10})$$

$$K = \frac{2}{D_1} \qquad (6.31$$

Tablo 6.2 İki tip kauçuk modeli için malzeme parametreleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Kauçuk Model Adı	C_{10} kPa	C_{01} kPa	C_{20} kPa	C_{11} kPa	C_{02} kPa	D_1 kPa
Polinominal	193,4	-0,1	-0,8	0,2	0	0
Neo-Hookean	345,0	0	0	0	0	$9,7 \times 10^{-7}$

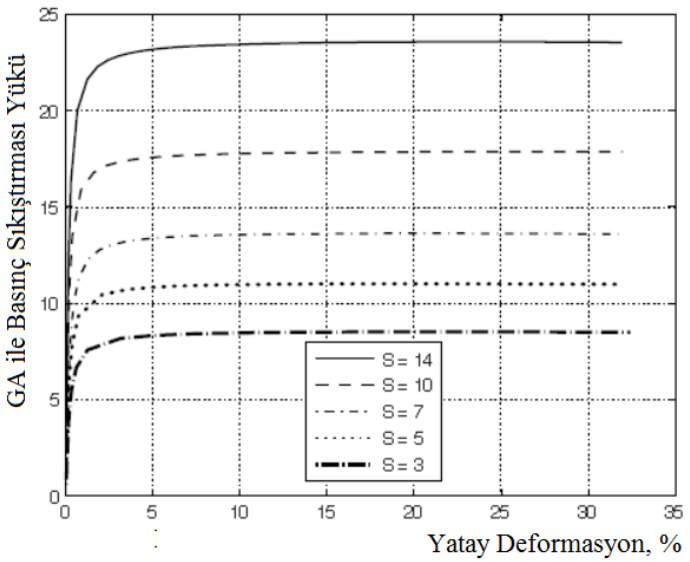
Her iki kauçuk modeli için malzeme parametrelerinin değeri Tablo 6.2'de verilmiştir. D_1, Neo-Hookean modeli için sıfıra eşit değildir, bu model kauçuk malzemede bir miktar sıkıştırılabilmeyi izin verir. İki rijit yatay yüzey ile temsil edilen tek tabakalı kauçuk malzeme modeli düşey yükün olmadığı kesme gerilmeleri için kullanılırken, silindirik kauçuk modeli ise, basınç ve gerilme zorlaması altındaki malzeme modelini incelemek için kullanıldı. Şekil (6.2a) ve (6.2b)'de görüldüğü gibi, her iki malzeme kesme gerilmesi altında yaklaşık %250 zorlanması sırasında lineer elastik iken, düşük zorlama altında gerilme ve basınç altında ise, lineer olmayan bir davranış göstermişlerdir.

6.4.2 Basınç ve Gerilme Altında Kritik Burkulma Yüklemesi

ABAQUS (HKS 2001) ile mevcut bir klasik burkulma analizi yapılmıştır ve bu yaklaşımda, her bir izolatör modelinin burkulma modu belirlenmiş ve de modelde çok küçük kusur ve hatalar (çelik plaka kalınlıklarında yaklaşık %1) tanıtıldı ve burkulma modu analizinden elde edilen burkulma moduna dayandırılmıştır. Burkulma sonrası davranış, yaklaşık olarak kesme deformasyonun %30'unda gelişip ortaya çıktığı gözlenmiştir. Sayısal izolatör modellerinin burkulma analizleri aşağıda verilen sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bütün modeller büyük bir düşey yükün neden olduğu önemli bir yatay sürüklenmeye sahiptirler. Bütün sayısal modeller için yatay sürüklenmeye karşılık gelen düşey yük basınç eğrileri Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Kritik burkulma yükü, şekil faktöründeki artışa bağlı olarak artmıştır. Bütün eğriler,

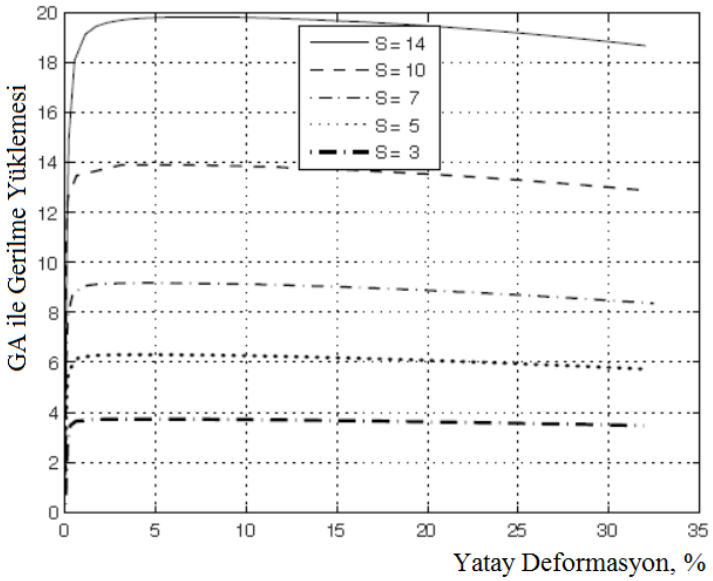
%3 deformasyondan önce önemli bir değişiklik göstererek benzer davranış göstermişlerdir.

Gerilme altındaki burkulma çok daha aniden meydana gelir, böylece burkulmanın başladığı noktada düşey eksene çok yakın olarak hareket eder ve gerilme altında burkulma başladığı zaman, en küçük şekil faktörlü Model-5 için gözlendiği gibi kesme %0,2 kadar düşük olabilir. Şekil faktöründeki artış, basınç zorlaması altındaki burkulma için elde edilen %3'lük kritik gerilmeye daha yakın bir noktaya doğru hareket eder. Şekil 6.5 ve 6.8 arasındaki resimler, basınç altında ve gerilme altında deforme olmuş şekildeki iki sayısal modeli göstermektedirler, (Kelly & Takhirov, 2004).

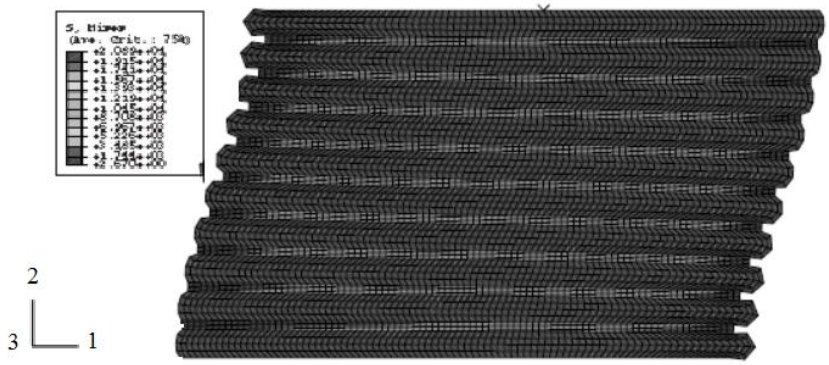


Şekil 6.3 Basınç sıkıştırması altında burkulma davranışı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A.,2010).

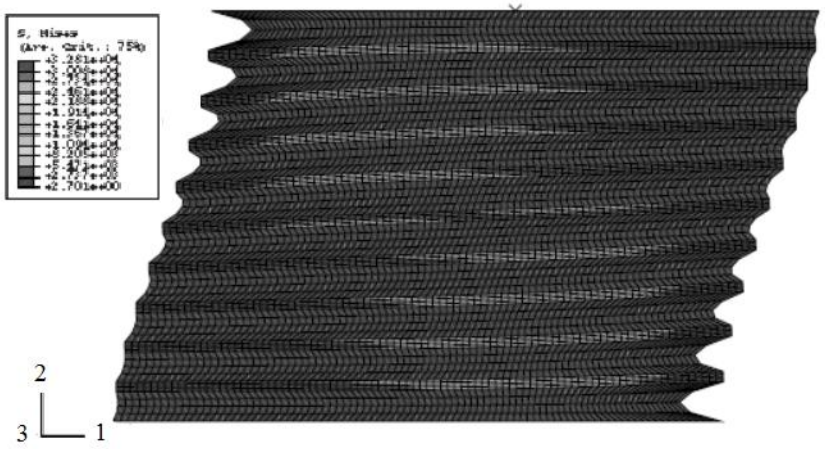
Şekil 6.4 ise, gerilme altındaki burkulmaya karşılık gelen eğrileri temsil ederler. Kritik yükleme, şekil faktörüne ve şekil faktörünün artmasına bağlıdır.



Şekil 6.4 Gerilme zorlaması altında burkulma davranışı, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

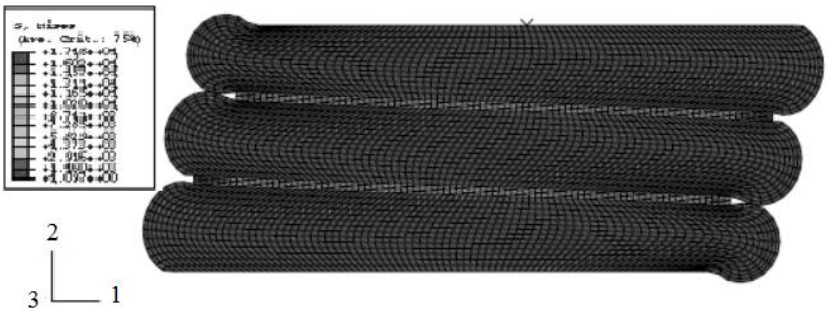


Şekil 6.5 Deprem izolatörünün burkulmuş şekli ve model-2 (basınç sıkıştırması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

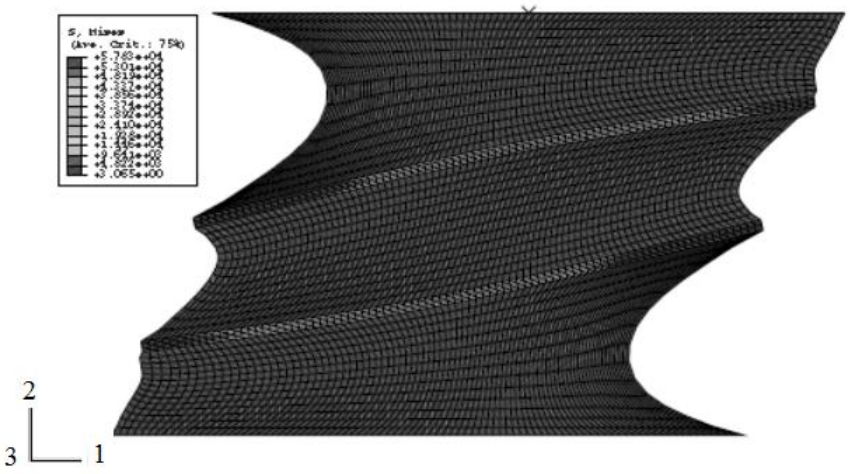


Şekil 6.6 Deprem izolatörünün burkulmuş şekli ve Model-2 (gerilme zorlaması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Deprem izolatörlerinin burkulma davranışından elde edilen sayısal sonuçlar, teorik çözümlerle ilgili tatminkâr ilişkilere sahiptir. Teorik çalışma ve sonlu elemanlar analizleri aşağıda verilen sonuçlara götürür. Kritik burkulma yükü şekil faktörünün artışıyla artar ve teoride öngörüldüğü gibi, bu durum, hemen hemen şekil faktörüne göreceli olarak bağlı olan lineer davranışa sahiptir. Basınç altında meydana gelen sayısal basınç burkulma yükü hemen hemen ve daima bütün izolatörler için teorik olarak tahmin edilen değerden daha büyüktür. Sayısal modeller basınç ve gerilme zorlaması altında farklı burkulma sonrası davranışlara sahiptirler.

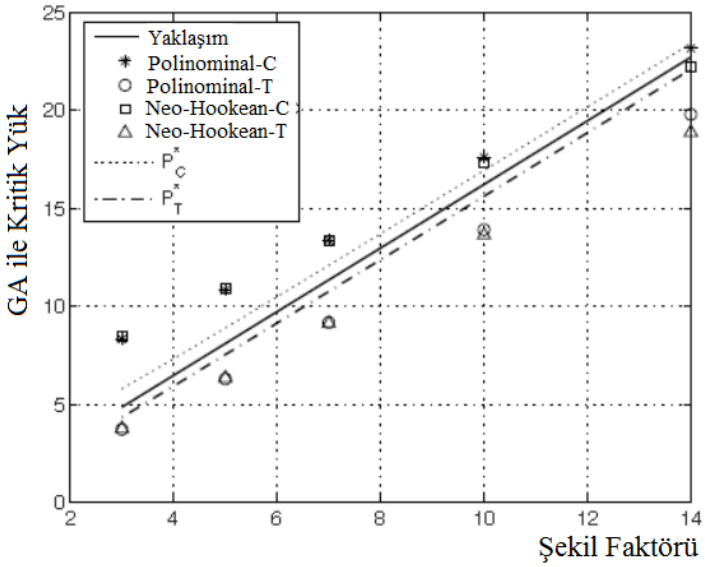


Şekil 6.7 Deprem izolatörünün burkulmuş Şekli ve Model-5 (basınç sıkıştırması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).



Şekil 6.8 Deprem izolatörünün burkulmuş şekli ve Model-5 (gerilme zorlaması) için Von Mises gerilmeleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Basınç sıkıştırmasında, düşey yük burkulma oluşumundan sonra hemen hemen aynı kalır ve izolatör yatay olarak yön değiştirir. Aksine olarak, gerilmede düşey yük, yatay yön değiştirme ile yavaş yavaş azalır. Kritik yükü şekil faktörünün bir fonksiyonu olarak veren Şekil 6.9 ise, sıkıştırılamaz kauçuk malzemelerin(Polinomial) durumu için ve sıkıştırılabilir kauçuk malzemelerin (Neo-Hookean) durumu için gerekli olan kritik burkulma yükleri arasında önemli bir farkın olmadığını göstermektedir. Teorik burkulma basınç yükünün, basit teorik çözümünü denklem (6.2) ile gösteren ve Şekil 6.9 da gösterilen sayısal analiz sonuçları ile tutarlı olmayan gerilme yükünün mutlak değerinden daima daha az olduğudur. Basınç altında burkulma yükünü gösteren şekilde, aynı şekil faktörü için burkulma yükü, gerilim altındaki burkulma yükünün mutlak değerinden daima daha büyüktür ve Şekil 6.9'de sırasıyla düz doğru çizgi, kesik çizgi ve noktalı çizgi ile gösterilmiştir. Bu teorik bir işareti gösteriyor olabilir, fakat gerçekte bu elementer kolon burkulma teorisinde kullanılan uzunluktan ortaya çıkan bir durumdur. Bu kolon teorisi eksenel yük nedeniyle uzunluktaki bu değişimi ihmal edebilir, hâlbuki sonlu eleman analizinde boyu uzatma ve boyu kısaltma olayı burkulmanın başladığı zaman meydana gelir. Daha küçük şekil faktörü değerleri için boydaki değişmeler önemli olabilir.



Şekil 6.9 Şekil faktörüne S karşılık GA ile normalize edilmiş kritik burkulma yükü, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

GA_S << P için GA_S ve EI_S yaklaşık kabuller kullanarak ve kritik basınç yükleri P_{kritik} aşağıda verilen eşitlikte olduğu gibi uzun şerit izolatör için teorik analiz Kelly ve Takhirov (2007) tarafından yapılmıştır, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$P_{kritik} = \frac{P_{kritik}}{A} = \frac{\sqrt{P_s P_E}}{A}$$

$$\frac{\rho_{kritik}}{G} = \pm \frac{2\pi bS}{\sqrt{15}tr} \tag{6.32}$$

Burada, t_r izolatör kauçuğunun toplam kalınlığıdır. Bu teoriyi sonlu elemanlar simulasyonu ile uyumlu hale getirmek için deforme olmamış izolatör konfigürosyonundaki kauçuğunun toplam kalınlığı t_r^0 ile t_r yer değiştirilir. Basınç için işaret (-) dir ve gerilme için işaret (+) işaretidir. Burkulma yükleri daha sonra Kelly ve Takhirov 2007, tarafından verilmiştir,(Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

$$t_r = t_r^0 \left(1 \pm \frac{p_{kritik}}{4GS^2}\right) \tag{6.33}$$

$$\frac{\rho_{kritik}}{G} = \pm \frac{2\pi bS}{\sqrt{15}t_r^0(1 \pm \frac{p_{kritik}}{4GS^2}} \tag{6.34}$$

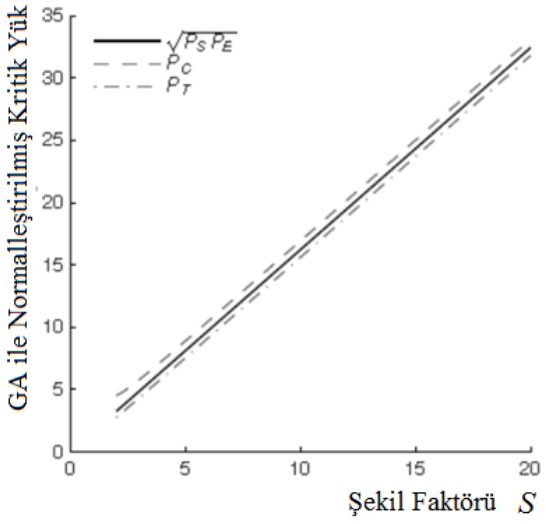
$$\frac{p_{kritik}}{G} = 2S^2 \left[1 - \left(1 - \frac{2\pi b}{\sqrt{15}t_r^0} \frac{1}{S} \right)^{1/2} \right] \tag{6.35a}$$

$$\frac{p_{kritik}}{G} = 2S^2 \left[\left(1 + \frac{2\pi b}{\sqrt{15}t_r^0} \frac{1}{S} \right)^{1/2} - 1 \right] \tag{6.35b}$$

Denlemler (6.35a), (6.35b) vasıtasıyla hesaplanan basınç ve gerilmedeki kritik yük Şekil 6.10'da gösterilmiştir.

$$\frac{P_{kritik}}{GA} = \frac{p_{kritik}}{G} \quad , \qquad 2\left(\pi b / \left(\sqrt{15}t_r^0\right)\right)^2$$

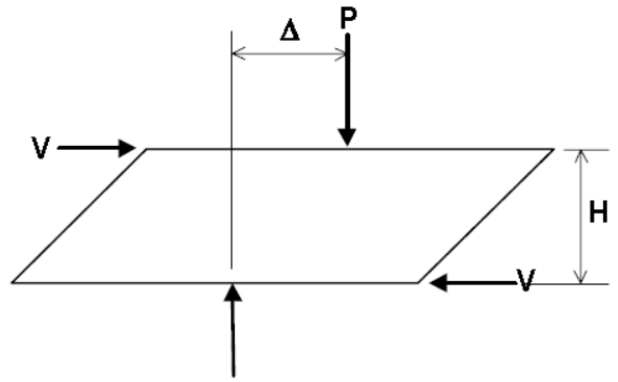
Basınç altındaki değerin gerilim altındaki değerden daima daha büyük olduğunu anlamak kolaydır. Basınçt altındaki durum ile gerilme altındaki değerler arasındaki fark, $|p_{kritik}/G|$, yaklaşık olarak aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir, Burada $b = t_r^0$ için fark 4/3'tür ve böylece, şekil faktörünün S artışı ile daha az onemli hale gelir.



Şekil 6.10 Denklemler (6.32), (6.35a), ve (6.35b) ile verilen şerit izolatör için şekil faktörlerine karşılık gelen GA ile normalleştirilmiş kritik yük, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

6.5. Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti Etkisi Altındaki Elastomer Esaslı Deprem İzolatörü Montajı

Elastomer esalı bir deprem izolatörü, taban yalıtımı yapımı düşünülen bir yapıya monte edilip yerleştirildiği zaman, söz konusu bu izolatör kesme kuvvetlerini V, düşey yükleri P ve eğilme momentlerini M, transfer etmelidir. Eğilme momentleri M, birinci derecede (VH) ve ikinci derecede ise (PΔ) etkileri nedeniyledir. Kesme kuvvetine göre izolatör tarsımı bu kuvvetlerle göreceli olarak doğrudan ilişkilidir. Eğilme momentlerine göre izolatör tasarımı, özellikle aşırı deplasmanlar altındaki izolatör sıkıştırma bloğunun bilinemeyen şekli nedeniyle oldukça karmaşıktır.

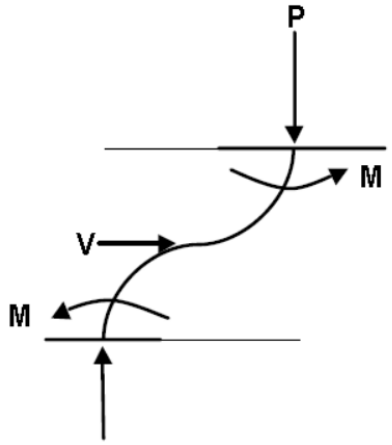


Şekil 6.11 Deformasyona uğramış elastomer esaslı bir deprem izolatöründe kesme kuvvet ve eğilme momenti, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

İzolatör tasarımı montaj plakası ve montaj bağlantı civatalarını da içermelidir. Öncelikle, izolatör tasarımı, taban yalıtım projesi şartnamesine bağlı olarak yapılmalıdır. Fakat tasarımlar genellikle, ya sismik yükler için 4/3'lük artış faktörüne izin verilen AASHTO gerilme değerlerine, ya da AISC şartnamesi gerekliliklerine bağlı olarak yapılırlar.

İzolatör montaj bağlantı tasarımları, eş zamanlı meydana gelen maksimum deprem deplasmanı ve maksimum deprem kesme kuvvetinin her birinde (1) maksimum düşey yük ve (2) minimum düşey yük için iki koşul da yapılmalıdır. İzolatörün alt ve üst yükleme plakasından montaj plakaları vasıtasıyla yapının

kolonuna bağlantısı yapılır ve böylece, tasarım momentlerini elde etmek için kolon ucuna veya kolon ortasına izolatör monte edilmiş olur.



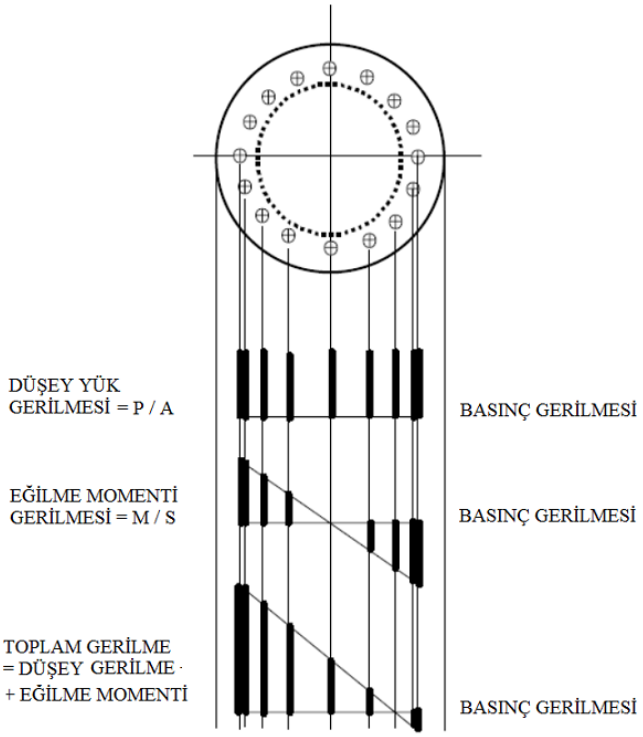
Şekil 6.12 Eşdeğer kolon yükleri, (Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A., 2010).

Şekil 6.11 izolatör üzerinde meydana gelen kuvvetleri göstermektedir ve Şekil 6.12 ise, İzolatör merkez ekseninden geçen eşdeğer bir kolonda olduğu gibi izolatör hareketlerinin nasıl hesaplanabileceğini göstermektedir. Uygulanan kesme kuvvetleri (VH), ilave olarak (P)'nin eksantrikliği, izolatörün altındaki ve üstündeki eşit momentler tarafından dengelenerek mukavemet edilir. Bu söz konusu tasarım momentleri aşağıdaki eşitlikte olduğu gibi ifade edilir, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

$$M = \frac{1}{2}(VH + P\Delta) \tag{6.36}$$

6.5.1 İzolatör Montaj Bağlantı Civatası Tasarımı

Standart tasarım prosedürleri, izolatör montaj plakası bağlantısını Şekil 6.13'te gösterilen basitleştirilmiş mühendislik yaklaşımna dayanarak vermektedir.



Şekil 6.13 İzolatör montaj civatası kuvvet dağılımı, Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010).

Şekil 6.13'te görüldüğü gibi dairesel kesitli bir yükleme plakasındaki toplam eksenel yük ve toplam moment izolatör montaj civataları tarafından karşılanır. İzolatör civatası tasarım prosedüründe aşağıda verilen yol takip edilir;

1- V / n olarak her bir cıvata başına düşen kesme kuvvetini hesapla, burada, n toplam cıvata sayısıdır.

2- P / A olarak her bir cıvata başına düşen eksenel yükü hesapla.

3- M / S olarak her bir cıvata başına düşen momentin neden olduğu her bir civataya gelen gerilmeyi hesapla, burada S cıvata grubunun kesit modüludür.

4- P / A – M / S olarak her bir civataya gelen net gerilmeyi hesapla.

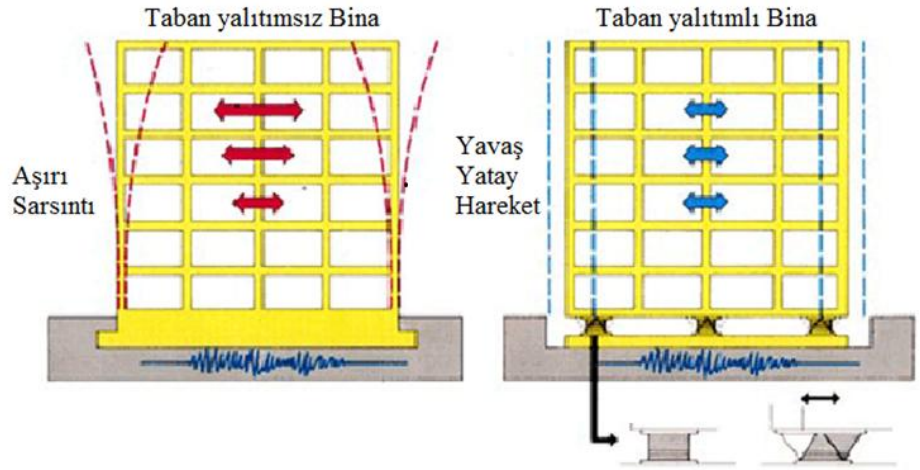
5- En son olarak kesme + gerilme toplamı için cıvata kontrolü yap.

Yukarıdaki süreç maksimum ve minimum düşey yükler için yapılmalıdır.

BÖLÜM YEDİ
KURŞUN ÇEKİRDEKLİ (LRB) TİPİ İZOLATÖRLERE ALTERNATİF OLARAK GELİŞTİRİLEN ELASTOMER ÇEKİRDEKLİ DEPREM İZOLATÖRLERİ (ELRB)

7.1 Giriş

Yapıların planındaki asimetriklik ve yapıdaki düzgün olmayan kütle dağılımı, deprem hareketi sırasında yapıda burulma momentlerine neden olur. Yapıda deprem nedeniyle meydana gelen bu burulma, momentleri yapının düşey taşıyıcı elemanlarında ilave kesme kuvvetleri oluşmasına ve yapıda ciddi hasarlara sebep olur. Aşağıda verilen Şekil ‘ de gibi deprem hareketinin ankastre tabanlı yapı üzerindeki hasar verici etkisi ve deprem yalıtımı yapılmış binada depremin hasar verici ve yıkıcı etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 7.1 Deprem yalıtımı yapılmış olan ve deprem yalıtımı yapılmamış ankastre tabanlı bir binanın deprem sırasındaki davranışı

Bu doktora çalışması kapsamında yapıların taban yalıtımı yapılmasında kullanılan elastomer esaslı çok tabakalı deprem izolatörleri üzerinde deprem nedeniyle oluşan kuvvetlerin analizleri yapılıp incelenmiş ve sonunda Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlere alternatif bir izolatör olan Elastomer Çekirdekli Kauçuk İzolatörler ELRB keşfedilip geliştirilmiştir.

Bu bölümde ELRB tipi izolatörler ile LRB ve HDRB tipi yüksek sönümleme kabiliyetli izolatörler karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

7.2 Binalarda Uygulanacak Deprem Yalıtım Sisteminin Ana Amacı

Binalarda uygulanacak deprem yalıtım sisteminin ana amacı, yapının yatay yük taşıyıcı sistemine gelmesi muhtemel deprem kuvvetlerinin ve ivmelerin azaltılmasıdır. Bunun için; deprem yalıtımı yapılmış yapının temel titreşim periyodunun T yükseltilmesi ve/veya yapının taban yalıtımı sayesinde etkin sönüm oranının arttırılması gereklidir. İşte bu nedenle yapılarda taban yalımı yapılmaktadır ve depremin can ve mal kaybına sebep olan zarar verici etkilerinden korunma amaçlanmaktadır.

7.3 Taban Yalıtımında Kullanılan Bir İzolatörden Beklentiler

Yapılarda kullanılan elastomer esaslı deprem izolatörleri şu özelliklere sahip olamlıdır;

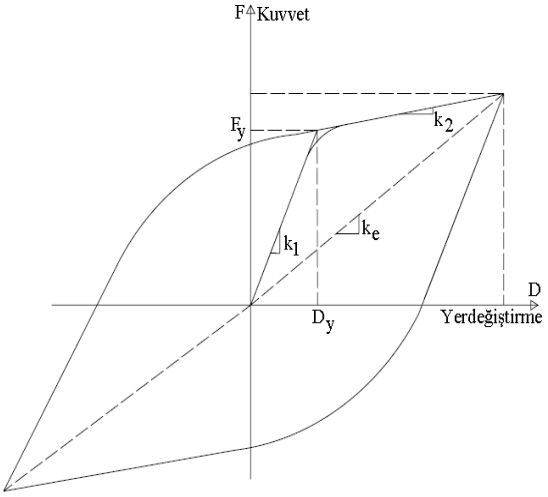
- Yüksek düşey rijitlik, Düşük yatay rijitlik,
- Yüksek düşey yük taşıyabilme performansı,
- Enerji yutumu,
- Deprem sonrası çabuk yeniden geri gelme ve ani olarak merkezlenme,
- Deprem harici yatay yükler (Rüzgar ve trafik yükleri) karşısında istenilen kadar yatay rijitlik.

7.4 Elastomerik İzolatörler için Kuvvet-Deplasman (histeresiz) Eğrisi İlişkisi

Elastomer esaslı izolatörler, kendilerine özgü yatay kuvvet-deplasman (histerisiz) eğrileri, etkin rijitlikleri ve etkin viskoz sönüm oranları ile tanımlanırlar.

Verilen bir yükleme döngüsündeki (histerisiz eğrisi) etkin rijitlik (ke), o döngüde uygulanan kuvvetin (F) ulaşılan maksimum deplasmana (D) bölünmesi ile elde edilir

$$ke = F/D$$



Şekil 7.2 Elastomer esaslı izolatörlerin kuvvet-deplasman (Histerisiz) eğrisi

Burada kullanılan semboller;

- **Q** = Karakteristik Dayanım
- **k1** = Birinci (Elastik) Rijitlik
- **k2** = İkinci (Elastik Ötesi) Rijitlik
- **ke** = D deplasmanındaki Etkin Rijitlik = F / D
- **F** = D deplasmanına tekabül eden Kuvvet
- **Fy** = İtibari Akma Kuvveti
- **Dy**= İtibari Akma Deplasmanı

göstermektedir.

Etkin viskoz sönüm oranı (βe), bir deplasmanda yutulan enerjinin (histeresiz alanı =*Wd*'nin), $2\pi FD$ değerine bölünmesi ile elde edilir.

$$\beta_e = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{W_d}{FD}\right]$$

Kurşun çekirdekli elastomer izolatörlerde ise Q,

$$Q = F_y = A_p\ \tau_{yp}$$

Burada Ap kurşun çekirdeğin çapını, τ_{yp} ise kurşun malzemenin akma kayma gerilmesini göstermektedir. Kurşun çekirdekli elastomer esaslı izolatörlerde birinci (elastik) rijitlik k_1, kurşun çekirdeğin elastik rijitliği tarafından belirlenir.

Tüm elastomer izolatörlerde ikinci (elastik ötesi) rijitlik k_2 elstomer malzemenin kayma modülü (G) ile elastomer katmanının yüzey alanının (A) çarpımının toplam elastomer kalınlığına (t_e) bölünmesi ile bulunur.

$$k_2 = G\,(A / t_e)$$

7.5 Kolon Altıdaki Deprem İzolatöründe Oluşan Kuvvetlerin Analizi

Yapılarda deprem nedeniyle oluşan kuvvetlerin şiddeti;

1-Yapının kütlesine,

2-Yapının periyoduna,

3-Depremin yer kabuğunda ürettiği ivmeye,

4-Yapının kurulu olduğu zemin-yapı etkileşimine

bağlıdır.

Deprem etkisi altında bulunan yapılar kendilerine özgü periyotlar üreterek depreme karşı dinamik tepki gösterirler. Bu nedenle, taban yalıtımının ana prensibi, üst yapıyı zemininden ayır ve böylece depremin vereceği can ve mal kaybına neden olan yapı hasarlarından kurtul ilkesidir.

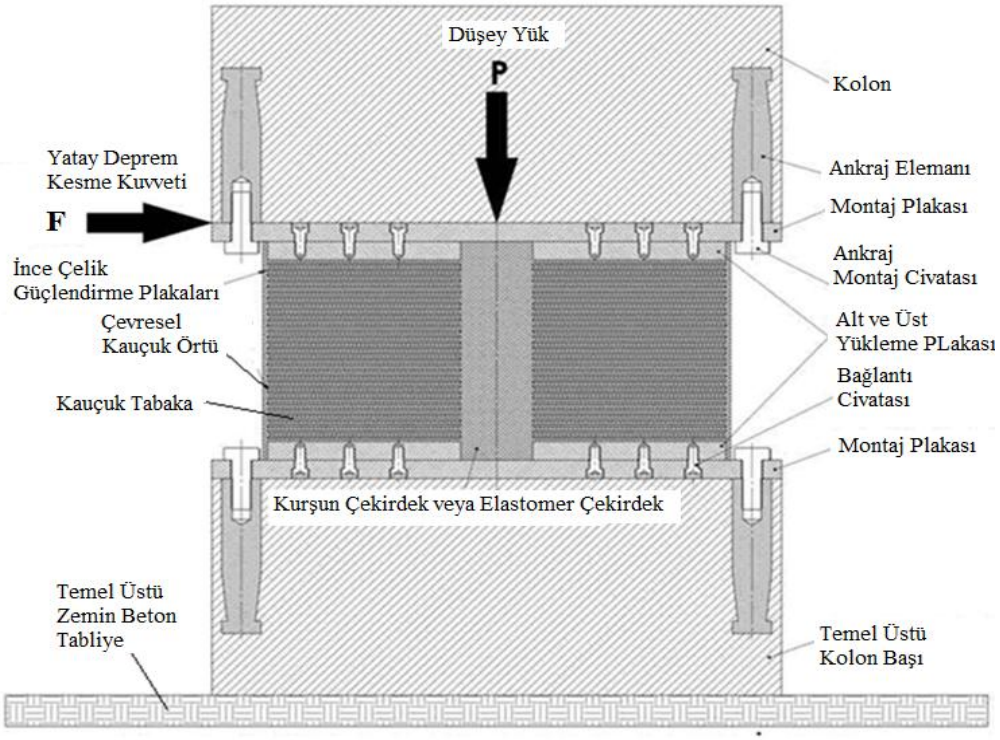
Elastomer esaslı izolatörler, otomobillerdeki süspansiyon sistemine benzer., araç tekerleklerinin yoldan kaynaklanan titreşimleri araç içindeki yolculara filitre ederek iletmesi gibidirler.

Elastomer esaslı deprem izolatörlerinin günümüzde düşük sönümlü RB, yüksek sönümlü HDRB ve LRB olmak üzere iki farklı tipi kullanılmaktadır (Naeim ve

Kelly, 1999). Ancak bu çalışma kapsamında yeni nesil elastomer çekirdekli izolatör ELRB tipi geliştirlmiştir.

7.6 Elastomer Çekirdekli Deprem İzolatörü ELRB

Elastomer çekirdekli ve kauçuk esaslı deprem izolatörü ELRB, tıpkı kurşun çekirdekli deprem izolatörüne LRB benzer, ancak izolatör içine eksenel olarak yerleştirilmiş olan kurşun çekirdek yerine aynı ölçülerde özel bir elastomer çekirdek yerleştirilmiştir. ELRB tipi izolatörlerin içindeki bu elastomer çekirdek sayesinde LRB tipi izolatörlere kıyasla izolatöre ani merkezleme yeteneği ve performans artışı ve de uzun ömür kazandırılmıştır.



Şekil 7.3 Elastomer çekirdekli ELRB ve kurşun çekirdekli LRB deprem izolatörü kesit resmi

Bu çalışmada R=700mm yarıçaplı dairesel kesitli ve elastomer esaslı deprem izolatörüne ait bir kauçuk tabakanın P yükü altındaki davranışı hem ELRB, hem de LRB ve HDRB tipi izolatörler için incelenmiştir ve birbirleriyle mukayese edilmiştir. Bu çalışmada, ELRB, LRB ve HDRB tipi izolatörlerin mekanik davranışları FEM

analiz metodu kullanılarak incelenmiştir. Özellikle, ELRB tipi elastomer çekirdekli deprem izolatörü LRB ve HDRB tipi izolatörlere göre daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir. Böylece, bu analiz çalışmaları, ELRB tipi deprem izolatörlerinin bu kullanımda olan LRB ve HDRB tipi izolatörlere göre taban yalıtımında kullanımının daha avantajlı olduğunu göstermiştir.

7.7 ELRB, LRB ve HDRB Tipi İzolatörlerin FEM Analizleri

Burada FEM analizlerinde kullanılan ELRB, LBR ve HDRB tipi elastomer esaslı deprem izolatörlerinin ölçüleri aynı olup analiz için kullanılan sınır şartları Tablo 7.1' de verilmiştir.

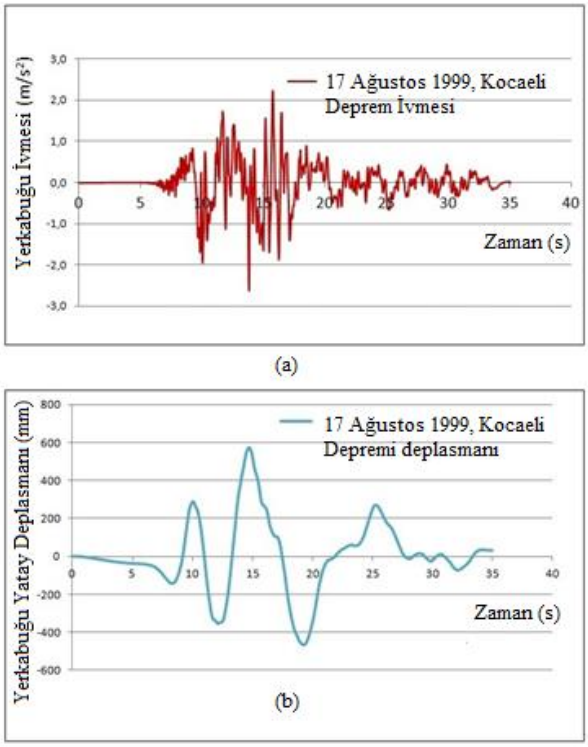
Her üç tip izolatör dairesel kesitli olup dış çapları 700mm, ELRB için elestomer çekirdek çapı ve LRB için kurşun çekirdek çapı 140mm' dir. Analizde kullanılan bütün izolatörler 43 adet 4.7mm kalınlıkta kauçuk tabakadan ve 42 adet 3.1mm kalınlıkta ince çelik plakadan üretilmişlerdir.

Tablo 7.1 Sınır şartları, izolatör yapımında kullanıla malzemelerin özellikleri ve izolatörlerin tasarım paremetreleri

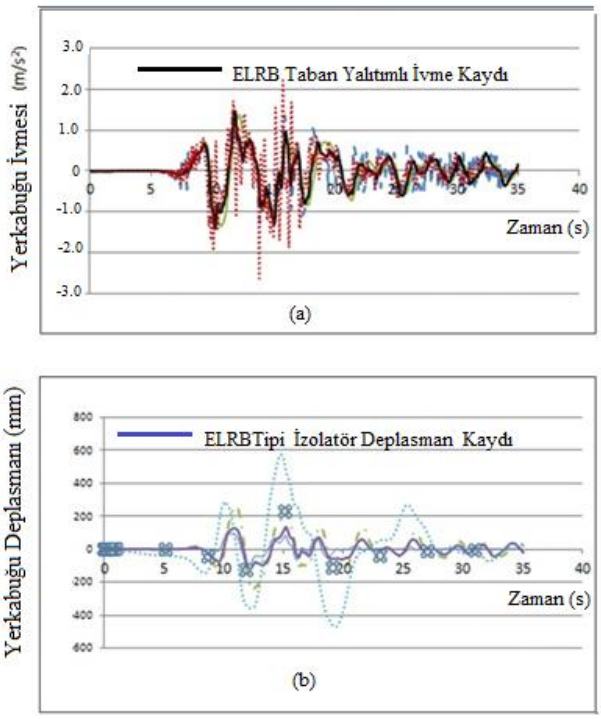
Tanım	Parametre adı	HDRBr (Çekirdeksiz izolatör)	LRBr (Kurşun Çekirdekli izolatör)	ELRBr (Elastomer çekirdekli izolatör)	Birim
Sınır Şartları	Herbir izolatör için bina yükü	250,000	250,000	250,000	kg
	Deplasman (Yatay yönde her bir elastomer tabakası için)	8	8	8	mm
	Deplasman (Düşey yönde her bir elastomer tabakası için)	-0,1	-0,1	-0,1	mm
Malzeme Özellikleri	Yoğunluk	960	10220	1260	kg m^-3
	Young's Modülü	1,87	16000	85	MPa
	Poisson's Oranı	0,4999	0,44	0,496	N/A
	Bulk Modülü (Hacım modülü)	3118	44444	3540	MPa
	Kesme (Kayma) Modülü	0,623	5555	28,4	MPa
	Akma Mukavemeti	Lineer	12	5,9	MPa
Geometri Tasarım Parametre-leri	t_e (Elastomer dış sargı kalınlığı)	5	5	5	mm
	t_s (İnce çelik plaka kalınlığı)	3,1	3,1	3,1	mm
	t_r(Herbir kauçuk tabaka kalınlığı)	4,7	4,7	4,7	mm
	D_c (Çekirdek Çapı)	N/A	140	140	mm
	D (İzolatör dış çapı)	700	700	700	mm
	n (Kauçuk tabaka sayısı)	43	43	43	pcs
	H (Toplam kauçuk kalınlığı)	202,1	202,1	202,1	mm

İzolatörlerin alt ve üst çelik yükleme plakalarının kalınlığı 25mm' dir. ELRB, LRB ve HDRB için FEM analizlerinde kullanılan sınır şartları Tablo 7.1' de verilmiştir. İzolatörlerin her birine gelen düşey kolon yükü 250.000kg' dır.

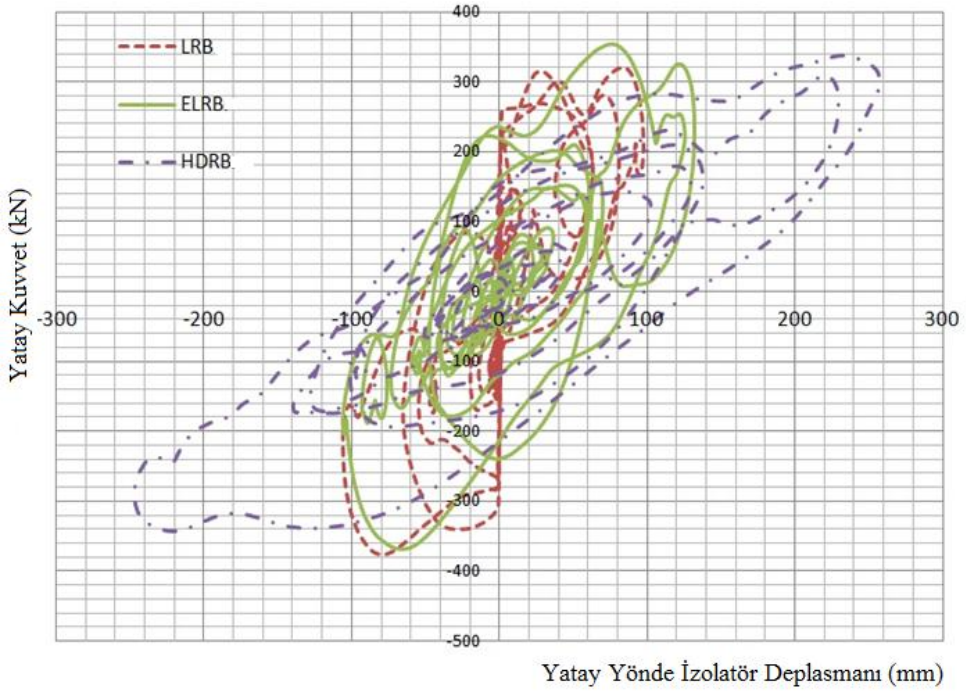
ELRB, LRB ve HDRB tipi izolatörlerin FEM analizlerinde , Şekil 7.4 (a) ve (b)' de verilen17 Ağustos 1999 tarihli Kocaeli deprem verileri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonunda elde edilen taban yalıtımlı yapının ivme ve deplasman kaydı Şekil 7.5' de gösterilmiştir.



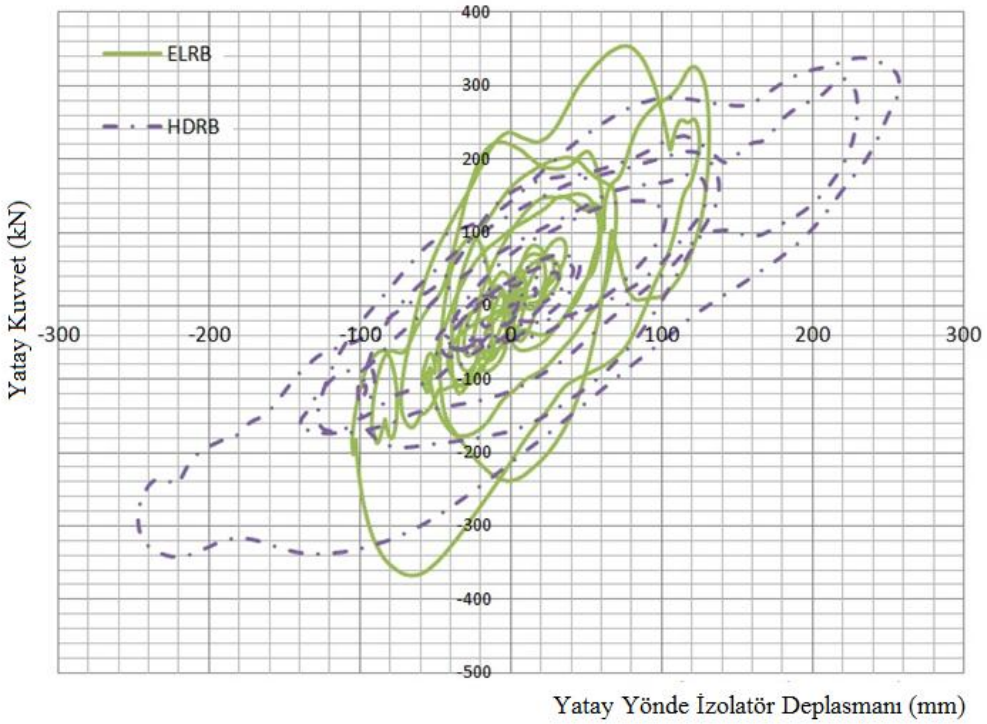
Şekil 7.4 (a) 17 Ağustos 1999, Kocaeli depremi ivme kaydı, (b) 17 Ağustos 1999, Kocaeli depremi yer kabuğu yatay deplasman kaydı



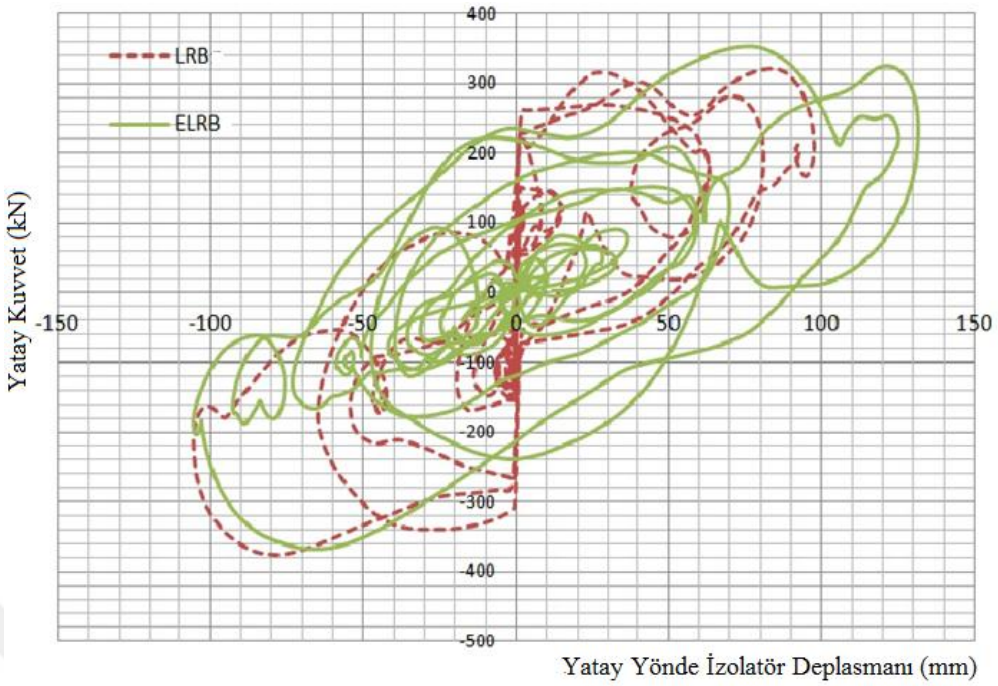
Şekil 7.5 17 Ağustos 1999, Kocaeli deprem verilerine göre (a) Taban yalıtımı ELRB tipi deprem izolatörü ile yapılmış bir yapının ivme kaydı, (b) Taban yalıtımı ELRB tipi deprem izolatörü ile yapılmış bir yapının deplasmanı



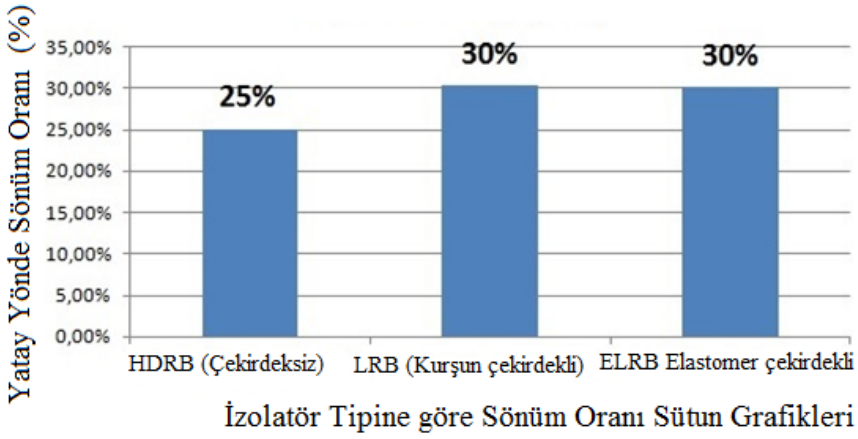
Şekil 7.6 Karşılaştırmalı olarak ELRB, LRB ve HDRB tipi izolatörlerde Kuvvet-Deplasman ilişkisini gösteren histerisiz eğrileri



Şekil 7.7 ELRB ve HDRB tipi izolatörlerin Kuvvet-Deplasman karşılaştırması



Şekil 7.8 ELRB ve LRB tipi izolatörlerin Kuvvet-Deplasman karşılaştırması



Şekil 7.9 ELRB, LRB ve HDRB tipi izolatörlerin Sönüm Oranları

7.8 ELRB, LRB ve HDRB Tipi İzolatörlere Ait FEM Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi

Şekil 7.6, 7.7 ve 7.8' de verilen histerisiz eğrilerinden görüldüğü gibi ELRB tipi elastomer çekirdekli deprem izolatör, hem LRB tipi kurşun çekirdekli izolatör ve hem de HDRB tipi yüksek sönümlü izolatör enerji sönümlemeleri karşılaştırmalı bir

şekilde verilmiştir. Her üç şekilde de ELRB tipi izolatörün performans kapasitesi açıkça görülmektedir. Ayrıca, Şekil 7.9' da ELRb tipi elastomer çekirdekli kauçuk izolatörün sönüm oranın HDRB tipi izolatörleri sahip olduğu değerden büyük ve LRB tipi izolatör sönüm oranı ile aynı düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Ancak, ELRB tipi izolatörlerin bu yüksek sönüm oranları yanında bu tür izolatörlerin lineer elastik bir sönümleme davranışı gösterdikleri ve deprem sırasında hız bir merkezleme yetenekleri olduğu akılda tutulmalıdır. Oysa LRB tipi kurşun çekirdekli deprem izolatörlerinde böyle bir davranış yeteneği yoktur, deprem sırasında akmaya uğramış LRB tipi izolatörlerin sökülüp yeniden yapılması gereklidir.

Bu yeni keşif ELRB tipi elastomer çekirdekli kauçuk esaslı deprem izolatörü, yüksek performans özelliklerinin yanında oldukça yüksek bir servis ömrüne sahiptir.

FEM analiz çalışmaları ile elastomer çekirdekli kauçuk deprem izolatörlerinin ELRB, LRB ve HDRB tipi kauçuk esaslı izolatörler ile mukayese edildiğinde daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları anlaşılmıştır.

BÖLÜM SEKİZ
SONUÇLAR

Bu çalışmada, binaların kolonları altına yerleştirilmiş olan elastomer esaslı deprem izolatörleri kullanılarak yapılmış olan taban yalıtımı hakkında ayrıntılı bilgiler verildi ve bu tip izolatörler üzerinde deprem nedeniyle meydana gelen kuvvetler analiz edilip incelendi.

Öncelikle bu çalışmanın birinci bölüm başlığı altında, taban yalıtım sistemi, amacının ne olduğu, ne işe yaradığı, deprem yalıtımının kısa bir geçmişi, taban yalımının yararları ve deprem yalıtımının güvenirliği hakkında bilgi verilerek çalışmaya başlanılmıştır. Özellikle, taban yalıtımı konusunda tasarımdan uygulamaya kadar faydalı ve kullanışlı birçok konu, bu çalışmanın başında öncelikle ele alınıp incelenmiştir.

İkinci bölümünde, basınç yükü altında, kolon altındaki elastomer esaslı deprem izolatörüne gelen kuvvetler, hem sıkıştırılabilir doğal kauçuk açısından ve hem de sıkıştırılamaz doğal kauçuk açısından analiz edilmiş olup farklı geometrideki izolatörler için değerlendirme yapılmıştır. Burada verilen analizler, elastomer malzemnin hacimsel modulünü belirmenin mümkün olduğunu göstermektedir, bu değeri tahmin etmek için deprem izolatörünün ölçülen düşey rijitliği kullanılır. Deprem izolatörleri genellikle, doğrusal olmayan ve yüksek histerisiz özelliklerine sahip yüksek sönümlü kauçuk malzemelerden üretilirler. Bu histerisiz kapasitelerinin zor olan ölçümü de ancak yorumlanarak yapılabilir, fakat bazı deprem yalıtım projelerinde histerisiz özelliği olmayan ve çok büyük kesme zorlamalarına kadar kesmede tamamen doğrusal davranan (LNR) tipi düşük sertlik özelliklerine sahip olan kauçuk malzemeler kullanılır. Bunun için kauçuk esaslı deprem izolatörlerine uygulanan yatay kesme testlerinin sonuçları, kesme modulü elde etmek için kullanılabilir ve ayrıca, düşey rijitlikle ilgili test sonuçları, hacimsel modülünün tahmini bir değerini elde etmek için kullanılır.

Üçüncü bölümde, kolon altına yerleştirilen izolatörün eğilme zorlaması altındaki davranışları analiz edilip değerlendirilmiştir. Deprem izolatörlerinin deprem yükü altında analiz edilmesinde zorunlu olan önemli bir izolatör özelliği de deprem izolatörlerinin burkulma, yani eğilme momenti etkisi altındaki davranışlarıdırıdır. Bu tür analizler için basınç altında sıkıştırılmış bir izolatörün eğilme momenti tepkisinin incelenmesi gereklidir. Buna elastomer esaslı izolatörün eğilme rijitliği olarak isimlendirilmektedir. Eğilme rijitliği, bir deprem izolatöründe meydana gelen eğilme yüklerinin tahmin edilmesinde önemli bir role sahiptir. Aynı zamanda, izolatörün yatay yöndeki kesme rijitliği üzerinde düşey yükün etkisinin belirlemek için de eğilme rijitliğine ihtiyaç vardır. Bunlara ilaveten, elastomer esaslı bir izolatör, kesme deformasyonunu maruz kaldığı zaman, deprem izolatörünün alt ve üst yükleme plakalarında dengelenmemiş kesme kuvvetleri tarafından bir eğilme momenti üretilir. Söz konusu bu eğilme momentleri izolatör tasarımında çok önemli bir bileşen olan kauçuk malzemede, kesme gerilmelerine neden olurlar ve aynı zamanda izolatör içindeki ince çelik plakalarda üzerinde de bu gerilmeler etkilidir.

Bu bölümde yapılmış olan analizler, elastomer esaslı deprem izolatörlerine ait ve çok geniş bir aralığa sahip şekil faktörünün *S* eğilme rijitliği üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Elastomer esaslı deprem izolatörlerinin eğilme rijitliği, izolatörün deprem sırasında burkulma davranışını tahmin etmede kullanılabilir önemli bir özelliktir. deprem yalıtım tasarsım mühendisleri, bu izolatöre dışarıdan bir eğilme momenti uygulanması durumunda, basınç yükü altındaki bir izolatörün tepkisini saptamak için ve bir deprem izolatörünün yatay rijitliği üzerinde düşey yükün etkisini tahmin etmeye ihtiyaç duyarlar. Buna ek olarak, bir deprem izolatörü kesme deformasyonuna maruz kaldığı zaman izolatörün üstünde ve altında dengelenmemiş kesme kuvvetleri tarafından bir eğilme momenti üretilir. Bu söz konusu eğilme momentleri, izolatör tasarımın da önemli olan kauçuk kütledeki kesme gerilmelerine burkulmayla neden olur. Aynı zamanda bu momentler, burkulma ile sonuçlanabilen ince çelik plakalardaki basınç gerilmelerine de sebep olurlar. Birçok izolatör tipinin eğilme rijitliği analizleri bu bölümde yapılmıştır ve burada, analizlere hacimsel sıkıştırılabilirlik etkileri konusunun dahil edilmesi ise, tamamen yeni bir konudur ve

günümüzde izolatör tiplerinin tasarım uygulamalarında kullanılan kusursuz bir analizin ana prensibidir.

Dördüncü bölümünde, basınç ve eğilme zorlaması altında bulunan kolon altındaki çok tabakalı deprem izolatörü içindeki ince çelik plakalarda meydana gelen gerilmelerin incelenmesi yapılmıştır. Beşinci bölümde, çok tabakalı izolatörlerin burkulma davranışları çeşitli yönleriyle incelenip analiz edilmiştir. Son olarak altıncı bölümde, çok tabakalı elastomer esaslı deprem izolatörlerinin gerilme zorlaması altındaki burkulma davranışı incelenmiş ve analiz edilmiştir.

Elastomer esaslı deprem izolatörlerinin ana karakteristiği, düşey rijitliklerinin yatay rijitliklerine oranının çok büyük olmasıdır. Yani, düşey rijitliklerinin yatay rijitliklerine kıyaslabir kaç yüz kat büyük olmasıdır. Deprem izolatörlerinin düşey yöndeki rijitliklerinin yüksek olmasının nedeni ise izolatör kauçuk tabakaları arasına yerleştirilen ince çelik güçlendirme plakalarıdır. Bu çelik plakalar kauçuk tabakalarının yanal yönde şişmesini engeller, fakat kauçuğu kesme kuvveti yönünde yatay olarak hareketine engellemeksizin izin veririr. Deprem izolatörlerinin düşey rijitliği yatay rijitliklerinin birkaç yüz katıdır. Çelik plakalarla izolatörün düşey yönde güçlendirmesi, izolatör kauçuk tabakalarında meydana gelen kesme gerilmesi üretim etkisine sahiptir ve bu gerilmeler çelik plakalarda çekme gerilmelerine sebep olacak şekilde et ederler. Eğer bu çekme gerilmeleri yeterince büyük olursa, bu çelik plakalar akmaya başlar veya akma sonucunda kalıcı deformasyona geçirerek koparlar. Bu bölümde, yapılmış olan mühendislik çözümleri, elastomer esaslı deprem izolatörlerin güçlendirilmesinde kullanılan ince çelik plakalarda meydana gelen çekme gerilmeleri üzerne yoğunlaşmıştır. Burada kullanılan çözüm metotları, çelik plakalarda oluşan düzlemsel gerilmelerin genel kullanımını olanaklı hale getirir ve bir gerilim fonksiyonu yaklaşımı kullanırlar, bir ince çelik plakanın alt ve üst yüzeylerindeki yüzey gerilmeleri tarafından üretilen gövde kuvvetlerini dikkate alan bir yaklaşım ile bu analizler yapılmıştır. Bu da bize, kauçuk tabakadaki basıncın bu gövde kuvvetleri için potansiyel etkileme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Mühendislik çözümleri, düşük ve orta büyüklüklerdeki şekil faktörüne sahip deprem izolatörlerini dikkate alınarak, burada kauçuk malzemenin

sıkıştırılamaz olduğu varsayımına dayanarak ve aynı zamanda izolatör uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılan kauçuğun sıkıştırılamaz olduğu kabulüne dayalı büyük şekil faktörlü bir izolatör olduğu ve de kauçuk malzemenin hacimsel modülünün etkileri işin içine dahil edilerek yapılmıştır. Söz konusu çelik güçlendirme plakalarındaki gerilmeler, izolatörün sadece basınç altında ve sadece eğilme zorlaması altında olduğu kabul edilerek hesaplanmıştır. Bu bölümde, elastomer esaslı deprem izolatörlerinin güçlendirilmesinde kauçuk tabakalar arasında kullanılan çelik plakalarda meydana gelen akma incelenmiştir. Sıkıştırılamaz durumda olduğu varsayıla kauçuk tabakalar arasındaki ince çelik plakaların her tarafında meydana gelen akmalara neden olan basıncın sonucu görülecektir. Burada sıkıştırılamazlık durumu, kauçuğun sıkıştırılabilirliğinin hesaplamalara dahil edilmesi açısından daha büyük şekil faktörlü izolatör söz konusu olması durumunda, tam olarak çelikte akmanın meydana gelmesi için tutucu bir basınç tahmini yapılması varsayımıdır.

Bölüm beşte, çok tabakalı elastomer esaslı bir deprem izolatörü klasik bir kolona benzer şekilde bir çeşit burkulma dengesizliği konusunda hassas olabilir, ancak düşük kesme rijitliğine sahip deprem izolatörlerinde burkulma hassasiyeti daha baskın bir davranıştır. Bu çalışmada, tek bir izolatör tabakasının tamamen baştan aşağıya deformasyonu üzerine yapılmış olan analizler, devamlı bir kompozit sistem gibi davranan izolatörün burkulma analizlerinde kullanılabilirler. Bu analizlerde deprem izolatörünün bir kiriş olduğu farz edilir ve deformasyonun kesit düzlemlerinde olduğu, deforme olmamış merkezi eksenin diğer kalan kısmına ise dik olduğu kabul edilir, fakat deformasyona uğramış eksene dik olması gerekli değildir.

Bölüm altıda, gerilim altındaki burkulma sistemlerine ait birçok örnek vardır, fakat bunlar istikrarsızlık meydana getiren sıkıştırma elemanlarına transfer edilen gerilme kuvvetlerinde tamamen ciddi problemlere neden olduğu bu analiz çalışmalarında görülmüştür. En önemli problemlerden biri hiç şüphesiz ki, izolatörlerin burkulmasıdır ve bu da, gerçekten çekme gerilmesi nedeniyledir. Hem sıkıştırma burkulması ve hem de gerilme burkulmasına götüren lineer elastik model aşırı derece basittir ve çekme gerilmesi sonucu meydana gelen burkulma yapay bir

model olabileceği ve izolatör modeli olmayabileceği tartışılabilir. Bu nedenle, çok tabakalı bir deprem izolatörü ile ilgili sonlu elemanlar metodu (FEM) modeli kullanarak yapılan sayısal simulasyon ile basit bir modelden elde edilen sonuçların doğrulanması gereklidir ve önemlidir. Ayrıca basit lineer elastik teori ile çekme burkulması tahmini gerçekte çok hassas bir iştir ve aslında bu tür bir izolatör modelinin yapay olarak yapılması zor olduğu görülmüştür. Böyle sayısal deney, uzun bir şerit şeklindeki izolatörün davranışlarının benzerini yaparak göstermek için hesaplama boyutunu küçültmek için iki ölçüde yapılır ve bu çekme burkulması gerçek bir olasılık olduğunu gösterir ve bu yapay bir model değildir. Buradaki temel konu, gerilim altındaki izolatör mekaniğinin sıkıştırma altındaki izolatörünkinin aynadaki görüntüsü olduğu anlaşılmıştır.

Deprem izolatörlerinin burkulma davranışından elde edilen sayısal sonuçlar, teorik çözümlerle ilgili tatminkar ilişkilere sahip olduğu anlaşılmıştır. Teorik çalışmalar ve sonlu elemanlar metodları ile yapılan analizler bizi aşağıda verilen sonuçlara götürür. Kritik burkulma yükü şekil faktörünün artışıyla artar ve teoride öngörüldüğü gibi, bu durum, hemen hemen şekil faktörüne göreceli olarak bağlı olan bir lineer davranışa sahiptir. Basınç altında meydana gelen sayısal basınç burkulma yükü hemen hemen ve daima bütün izolatörler için teorik olarak tahmin edilen değerden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Sayısal modeller, basınç ve gerilme zorlaması altında farklı burkulma sonrası davranışlar ortaya koymuşlardır. Basınç sıkıştırmasında, düşey yük burkulma oluşumundan sonra hemen hemen aynı kalmış ve izolatör yatay olarak yön değiştirmiştir.

Bu çalışma kapsamındaki analitik analizler ile elastomer esaslı, diğer bir ifade ile bina kolonu altına yerleştirilmiş olan kauçuk esaslı deprem izolatörleri üzerinde, deprem kuvvetleri nedeniyle meydana gelen muhtemel bütün gerilmelerin ve kuvvetlerin ayrıntılı bir incelemesi yapılmıştır. Yapılan analizlerde model olarak seçilen izolatörlerin tek bir kolon altına monte edilmiş olduğu kabul edilmiştir. Ancak, bu çalışmadan hareketle bir binanın deprem yalıtım sistemi tasarlanabilir ve bu analiz çalışmaları kullanılarak yeni deprem izolatörleri geliştirilebilir.

Bu çalışma kapsamında Bölüm Yedi' de yeni geliştirmiş olduğumuz keşif ELRB tipi elastomer çekirdekli kauçuk esaslı deprem izolatörleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu yeni tür izolatörlerin yüksek performans özelliklerinin yanında oldukça yüksek bir servis ömrüne sahip oldukları gözlenmiştir.

FEM analiz çalışmaları sonucunda elastomer çekirdekli kauçuk deprem izolatörlerinin ELRB, LRB ve HDRB tipi kauçuk esaslı izolatörler ile mukayese edildiğinde daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları anlaşılmıştır. Elasromer çekirdekli yeni buluş ELRB tipi izolatörler önümüzdeki süreçte LRB tipi kurşun çekirdeli kauçuk izolatörlere iyi bir alternatif olacaktır. Bu konu ile ilgili olarak, önümüzdeki süreçte ELRB tipi izolatörler üzerindeki çalışmalarımız devam edecektir.

KAYNAKLAR

American Association of State Highway Transportation Officials [AASHTO]. (1991). *Guide specifications for seismic isolatation design*. Washington D.C., Amerika Birleşik Devletleri.

American Association of State Highway Transportation Officials [AASHTO]. (1999). *Guide specifications for seismic isolatation design.* Washington D.C., Amerika Birleşik Devletleri.

Atımay, E. (2000). *Betonarme sistemlerin tasarımı I-II*. Ankara: ÖDTÜ Yayını.

Buckle, I., & Mayes, R. (1990). *Seismic isolation: history, application and performance - a world view*. *Vol 6, No. 2*. Earthquake Spectra.

Celep, Z.,v e Kumbasar, N. (2000). *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı.* İstanbul, Türkiye: Beta Dağıtım.

Chalhoub, M. S., ve Kelly, J. M. (1987). *Reduction of the Stiffness of rubber bearings due to compressibility. Report No.UCB/SEMM-86/06,* . Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California.

Costantinou, M. C., Kartoum, A., ve Kelly, J. M. (1992). Analysis of compression of hollow circular elastomeric bearings. *Engineering Structures, 14(2),103-111* .
Derham, C. J.,ve Walker, R. A. (1975). *Luxury without Rumble*.

Fuller, K. N., Gregory, M. J., ve Harris, J. A. (1988). *Engineering use of natural rubber*. New York : Oxford University Press.

Gent, A. N. (1990). *Cavitation in rubber: a cautionary tale. Rubber Chemistry and Technology*, 63, G49–G53.

Gent, A. N. (1964). Elastic stability of rubber compression springs. *Journal of Mechanical Engineering Science* , 6(4), 318–326.

Haringx, J. A. (1949). *On highly compressible helical springs and rubber rods, and their application for vibration free mountings, III.* Philips Research Reports.

Holmes Consulting Group Ltd. (2010). *Base isolation*. Welington, 11 Aurora Terrace, New Zealand: Holmes Consulting Group Ltd.

Kelly, J. M. (1991). *Dynamic and failure characteristics of bridgestone ısolation bearings. Report No. UCB/EERC-1991/04* . Berkeley, Amerika Birleşik Devletleri: Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Kelly, J. M. (2003). *Tension buckling in multilayer elastomeric bearings. Journal of Engineering Mechanics (ASCE)* , 129(12), 1363–1368.

Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2010). *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration ısolation.* Wiley, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.

Kelly, J. M., ve Konstantinidis, D. A. (2009). *Steel shim stresses in multilayer bearingsunder compression and bending. Journal of Mechanics of Materials and Structures* , 4(6), 1109–1125.

Kelly, J. M., ve Takhirov, S. M. (2001). *Analytical and experimental study of fiber-reinforced elastomeric ısolators.,* Report No. PEER-2001/11. Berkeley, University of California, Amerika Birleşik Devletleri: Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Kelly, J., ve Takhirov, S. M. (2004). *Analytical and numerical study on buckling of elastomeric bearings with various shape factors.* Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Kircher, C. A., Delfosse, G. C.,ve Schoof, C. C. (1979). *Performance of a 230 KV ATB 7 power circuit breaker mounted on gapec seismic ısolators. California:* The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.

Koh, C. G.,ve Kelly, J. M. (1987). *Effects of axial load on elastomeric ısolation bearings.* Berkeley, Amerika Birleşik Devletleri: Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Lindley, P. B. (1978). Engineering design with natural rubber. *NR Technical Bulletin , 4th end* . Hertford, Brickendonbury, England: The Malaysian Rubber Producer Research Association.

McLachlan, N. W. (1955). *Bessel functions for engineers.* Oxford, England: Clarendon Press.

Naeim, F., ve Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures*: From theory to practice. New York, Amerika Birleşik Devletleri: Jhon Wiley ve Sons Inc.

Prager, W., ve Hodge, P. G. (1951). *Theory of perfectly plastic solids.* New York: John Wiley ve Sons.

Ristic, D. (1993). *Control of structural behaviour –Part 2: passive structural control*. Skopje: Lectures for International Post Graduate Studies.

Robinson, W. H. (2000). Seismic isolated of civil buildings in New Zealand. New Zealand: Program Sructure Engering. Mater.

Skellerup Industries (1992). Skellerup industries lead rubber isolation bearings : experimental properties. *Holmes Consulting Group Report No. 3373-01* . Holmes Consulting Group.

Tarics, A. G., Way, D., ve Kelly, J. M. (1984). *The implementation of base isolation*. The Foothill Communities Law and Justice Center. California, San Francisco, Amerika Birleşik Devletleri: National Science Foundation and the County of San Bernardino Base Isolation Consultants Inc.

Timoshenko, S. P., ve Goodier, J. N. (1970). *Theory of elasticity*. New york: McGraw-Hill.

Tyler, R. G. (1991). *Rubber bearings in base isolated structures: a summary paper*. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering.

Uniform Building Code (1999). *Uniform building code appendix division III earthquake regulations for seismic isolated structures [UBC]*. Whittier, Canada: American Association of Building Officials.

EKLER

Ek 1. Semboller

A_b	=	Kauçuğun yapışma alanı
A_g	=	İzolatör kaplama kılıfı dahil brüt kesit alanı
A_h	=	Histerisiz eğri alanı
		(EDC-Tekrar başına sönümlenen enerji, olarak da adlandırılır)
A_{pl}	=	Kurşun çekirdeğin kesit alanı
A_r	=	Azaltılmış kauçuk kesit alanı
B	=	Sönüm faktörü
B_b	=	İzolatör çelik levhalara yapışık kesit alanı
E	=	Kauçuğun elastisite modülü
	=	Sertliğe bağlı olarak 3.3G ile 4.0G arasında değişir
E_b	=	Burkulma modülü
E_c	=	Etkin sıkıştırma modülü
E_∞	=	Bulk (hacim) modülü
EI	=	Eğilme rijitliği
f	=	Yük kapasitesi için uzanıma uygulanan faktör
		1 / (Emniyet faktörü)
F_H	=	İzolatöre gelen yatay kuvvet
F_m	=	Belirli bir deplasman için izolatör üzerindeki kuvvet
g	=	Yerçekimi ivmesi
G	=	Kauçuk kesme (kayma) gerilmesi
G_γ	=	γ kesme gerilmesindeki kauçuk kesme modülü
H_0, H_1	=	Struve fonksiyonları
H_r	=	Serbest burkulma yüksekliği
I	=	İzolatör atalet momenti
I_0	=	İkinci dereceden modifiye edilmiş Bessel fonksiyonun dizilişi
I_1	=	Modifiye edilmiş Bessel fonksiyanunun birinci derece dizilişi
k	=	Kauçuk Sertliğine bağlı malzeme sabiti (0.65 ile 0.85 arası bir değer)
K	=	Hacim modulüdür
K_d	=	Elastiklik ötesi rijitlik

K_{eff} = Etkin rijitlik

K_H = İzolatör yatay rijitliği

K_r = Akma sonrası yanal rijitlik

K_u = Elastik yanal rijitlik

K_v = İzolatörün düşey rijitliği

K_{vi} = i tabakasının düşey rijitliği

M = Eğilme momentini

M_I = Atalet Momenti

N = Eksenel kuvvet

n = Kauçuk tabaka sayısı

p = Kauçuk tabaka üzerindeki normal basınç

P_{ort} = Ortalama basınç, ortalama basınca bağlı maksimum gerilmeleri ifade eder

P = Eksenel düşey yük (İzolatöre uygulanan düşey kolon yükü)

p_{kritik} = Kritik basınç

P_{kritik} = Kritik Burkulma yükü

P_γ = Nominal maksimum düşey yük

$P_m(y)$ = Fourier serisi katsayısı

Q_d = Karakteristik dayanım (Sıfır deplasmanda engelieyici olan kuvvet)

r = Dönme (rotasyon) yarıçapıdır

S_a = Etkin periyotdaki $T_{e,}$ spektral ivme

S = Şekil faktörü

S.F. = Emniyet faktörü

S_i = (i) tabakası için şekil faktörü

t = izolatör kalınlığı

t_i = Kauçuk tabaka kalınlığı

t_r = Kauçuk tabakaların toplam yüksekliği

t_{sc} = İzolatör koruyucu kauçuk tabakanın kalınlığı

t_{sh} = Ara çelik levhaların kalınlığı

T_{pl} = İzolatör alt ve üst montaj tabakası kalınlığı

T_r = Toplam kauçuk tabaka kalınlığı

W = Sismik ağırlık

Δ = Uygulanan yatay deplasman

Δ_m = Uygulanan maksimum deplasman

Δ_γ = Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün akma deplasmanı

β = Eşdeğer viskoz sönümleme

ε_u = Kauçuk kopmasında minimum uzanım

ε_c = Sıkıştırma gerilmesi

ε_{sc} = Uygulanan düşey yüklerden gelen kesme gerilmesi

ε_{sh} = Uygulanan yanal deplasmanlardan gelen kesme gerilmesi

ε_{sr} = Uygulanan rotasyondan gelen kesme gerilmesi

Θ = Uygulanan rotasyon

σ_y = Kurşun akma gerilmesi

δ_v = Düşey yönde izolatör deplasmanı

γ = Kesme gerilmesi

γ_c = Kesme zorlaması

γ_{ort} = Ortalama kesme zorlaması

$\tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{r\theta}$ = Kesme gerilmeleri yani kayma gerilmeleri

$|\tau_{rz}|_{z=-t/2}|$ = Çelik paklanın üst yüzeyindeki kesme gerilmeleri

$|\tau_{\theta z}|_{z=-t/2}|$ = Çelik paklanın üst yüzeyindeki kesme gerilmeleri

U = Kauçuk tabakalar üzerinde depolanan toplam elastik enerji

V = İzolatörde iç kesme kuvvet

(r, θ) = Kauçuk tabakadaki gerilmeler σ_r, σ_θ, σ_z için polar koordinat sistemi

υ = Çeliğin poizon oranıdır

$\upsilon(x)$ = İzolatörün orta ara yüzeyi deplasmanı

$\upsilon'(x)$ = İzolatörün yatay eksendeki rotasyonu

(Φ) = Gerilim fonksiyonu

ψ = İzolatöre dik yüzeyin rotasyonun

$\psi(x)$ = İzolatörün deforme olmamış eksenine dik yüzeyin rotasyonu

Ψ' = Tek bir izolatör tabaksı için eğrilik

δ_v = İzolatörün düşey yöndeki deplasmanı

ω_H = Frekans