

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HASTANE BİNASININ SİSMİK İZOLATÖRLERLE DEPREME DAYANIKLI
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali DOĞRU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HASTANE BİNASININ SİSMİK İZOLATÖRLERLE DEPREME DAYANIKLI
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali DOĞRU
(501091214)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ertaç M. ERGÜVEN

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501091214 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ali DOĞRU** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**HASTANE BİNASININ SİSMİK İZOLATÖRLERLE DEPREME DAYANIKLI TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ertaç M. ERGÜVEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Barış Erkuş**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk Alhan
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2014**

Tüm dünyada depreme verilen değerli canların anısına ve sevdiklerime...,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bana bilgi, tecrübe ve yardımlarını sunan saygıdeğer değerli hocam Prof. Dr. Ertuç Ergüven'e, bana her zaman inanan, umut ve ışık veren, yardımlarını hiç esirgemeyen sevgili arkadaşım Yüksek Mühendis Ceren Şahin'e, kardeşim, dostum, yoldaşım, Yüksek Mühendis Kerem Karakuş'a ve bana yol gösteren saygıdeğer büyüklerim, annem ve babama sonsuz minnet içerisinde teşekkürlerimi sunuyorum.

Mayıs 2014

Ali DOĞRU
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. SİSMİK İZOLASYON TEORİSİ.....	10
2.1 Doğrusal Kuram	10
2.2 Kuramın Binalar İçin Genişletilmesi.....	17
2.2.1 M-Serbestlik Dereceli Sistemlerin Hareket Denklemi.....	17
2.2.2 M- Serbestlik dereceli sistemin modal analizi	18
3. SİSMİK İZOLATÖRLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	22
3.1 Kauçuk Esaslı Sistemler	22
3.1.1 Düşük sönümlü kauçuk izolatörler	22
3.1.2 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler	23
3.1.3 Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler.....	24
3.2 Kayma Esaslı Sistemler.....	24
3.2.1 Sürtünmeli sarkaç sistemler	25
3.2.2 Çapraz raylı mesnetler	26
3.2.3 Esnek-sürtünmeli izolatörler	27
3.2.4 Elektrik-Fransız sistemi	28
3.2.5 Deprem araştırma merkezi birleşik sistemler.....	29
3.2.6 TASS sistemi.....	29
3.3 Yay Tipi Sistemler	29
3.4 Son Gelişmeler İle Diğer Sistemler.....	29
4. SİSMİK İZOLATÖRLERİN MEKANİK KARAKTERİSTİKLERİ	32
4.1 Giriş	32
4.2 Sismik İzolatörlerin Bilineer Modelleme ile Tasarımı.....	32
4.3 Kauçuk Esaslı İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri.....	34
4.4 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri.....	38
4.5 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerinin Mekanik Karakteristikleri.....	39
5. SİSMİK İZOLASYONLU YAPI TASARIMINDA YÖNETMELİK	
ŞARTLARI	41
5.1 Tasarım Metodu	42
5.1.1 Statik analiz.....	43
5.1.2 Dinamik analiz	46
5.2 UBC 97 Yönetmeliği İle Tasarım Kriterleri	48
5.2.1 Deprem bölge katsayısı	48

5.2.2 Zemin profil cinsi	48
5.2.3 Sismik kaynak tipleri.....	49
5.2.4 Kaynağa yakınlık katsayısı.....	49
5.2.5 Sismik katsayılar	50
5.2.6 Olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı.....	51
5.2.7 Olabilecek maksimum depreme göre sismik katsayılar	51
5.2.8 Sönüm katsayıları	52
5.2.9 Taşıyıcı sistem davranış katsayısı	53
5.2.10 Yapı önem katsayısı	54
5.3 Diğer Yönetmelikler İle Tasarım Kriterleri.....	55
5.3.1 Göçmeye karşı dayanım koşulu	55
5.3.2 Hasarın sınıflandırılması koşulu.....	55
5.3.3 Taban yalıtımının temel prensipleri	56
5.3.3.1 Taban izolasyonunun amaçları.....	56
5.3.3.2 İzolasyon malzemeleri ve tasarımları.....	56
5.3.4 Güvenilirlik	57
5.3.5 Tasarım kriterleri ve genel düzen.....	57
5.3.6 Analiz yöntemleri ve modelleme	58
5.3.6.1 Sismik hareket	58
5.3.6.2 Eşdeğer lineer analiz	59
6. SİSMİK İZOLATÖRLÜ YAPI TASARIMI	63
6.1 TDY 2007'ye Göre Tasarım	63
6.1.1 Eşdeğer deprem yükü hesabı.....	66
6.1.2 Yapıdaki düzensizliklerin tahkiki.....	68
6.1.2.1 A1 burulma düzensizliklerin tahkiki	68
6.1.2.2 A2 döşeme süreksizliklerin tahkiki	70
6.1.2.3 A3 planda çıkıntılar bulunmaması tahkiki	70
6.1.2.4 B1 komşu katlar arasında dayanım düzensizliği (zayıf kat) tahkiki ..	70
6.1.2.5 B2 komşu katlar arasında rijitlik düzensizliği (yumuşak kat) tahkiki	70
6.1.2.6 B3 taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği tahkiki	72
6.1.3 Görelî yer değiştirme tahkiki.....	72
6.1.4 İkinci mertebe etkileri tahkiki	74
6.2 Sismik İzolatör Tasarımı	75
6.2.1 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin tasarımı	75
6.2.2 Tepki spektrum analizi ile tasarım	84
6.2.3 Zaman tanım alanı analizi ile tasarım	85
6.3 Analiz Sonuçları Ve Bulgular	87
6.3.1 Giriş.....	87
6.3.2 Analizin irdelenmesi	89
6.3.2.1 Ankastre mesnetli yapı analizi	89
6.3.2.2 Sismik izolasyonlu yapı analizi.....	91
6.3.2.3 Sismik izolasyonlu ve ankastre mesnetli yapı karşılaştırması	93
7. SONUÇ.....	102
KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	107

KISALTMALAR

ALSC	: Almost Lifted Structure Concept
DBE	: Design Basis Earthquake
EC	: Eurocode
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
IBC	: International Building Code
IC	: International Code
LRB	: Federal Emergency Management Agency
MCE	: Maximum Capable Earthquake
SEAOC	: Structural Engineers Association of California
SRSS	: Square Root of the Sum of the Squares
TASS	: Taisei Shake Suspension System
TDY	: Türk Deprem Yönetmeliği
TSA	: Tepki Spektrumu Analizi
UBC	: Uniform Building Code
ZTA	: Zaman Tanım Alanı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Farklı kesitlerdeki izolatörlerin şekil ve basınç modülleri	35
Çizelge 5.1: Statik ve dinamik analizlerin azaltma katsayıları	47
Çizelge 5.2: Deprem bölge katsayıları	48
Çizelge 5.3: Zemin profil cinsi	49
Çizelge 5.4: Sismik kaynak tipleri	49
Çizelge 5.5: UBC 97 yönetmeliğine kaynağa yakınlık katsayısı N_A değerleri	50
Çizelge 5.6: UBC 97 yönetmeliğine kaynağa yakınlık katsayısı N_V değerleri	50
Çizelge 5.7: Sismik katsayılar- C_A	50
Çizelge 5.8: Sismik katsayılar- C_V	50
Çizelge 5.9: Olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı- M_M	51
Çizelge 5.10: Sismik katsayılar- C_{AM}	51
Çizelge 5.11: Sismik katsayılar- C_{VM}	52
Çizelge 5.12: Sönüm katsayıları	52
Çizelge 5.13: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı R_I	53
Çizelge 5.14: IC 2003, EC 8, IBC 2000 Statik analiz kriterleri	62
Çizelge 6.1: Yapı bilgileri	64
Çizelge 6.2: Yapı kolon yerleşim bilgileri	64
Çizelge 6.3: Yapı giriş bilgileri	64
Çizelge 6.4: Eşdeğer deprem yüküne göre kat kesme kuvvetleri	68
Çizelge 6.5: Yapıya gelen %5 dış merkezli yükleme kombinasyonları	68
Çizelge 6.6: EXP yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları	69
Çizelge 6.7: EXN yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları	69
Çizelge 6.8: EYP yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları	69
Çizelge 6.9: EYN yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları	70
Çizelge 6.10: EXP yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği	71
Çizelge 6.11: EXN yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği	71
Çizelge 6.12: EYP yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği	72
Çizelge 6.13: EYN yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği	72
Çizelge 6.14: X ve Y doğrultusundaki 26 nolu noktanın göreceli ötelemeleri	73
Çizelge 6.15: EXP yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri	74
Çizelge 6.16: EXN yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri	74
Çizelge 6.17: EYP yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri	74
Çizelge 6.18: EYN yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri	74
Çizelge 6.19: Zaman tanım alanı analizinde kullanılacak deprem kayıtları	86
Çizelge 6.20: A tipi izolatör modelleme mekanik karakteristikler	88
Çizelge 6.21: B tipi izolatör modelleme mekanik karakteristikler	88
Çizelge 6.22: ZTA analizinde maksimum x ve y taban kesme kuvvetleri	90
Çizelge 6.23: Deprem kayıtlarına ilişkin maksimum kat yer değiştirmeleri	90
Çizelge 6.24: Ankastre mesnetli yapının 1. ve 5. kattaki ivme değerleri	90
Çizelge 6.25: Deprem kayıtlarına ilişkin maksimum göreceli kat ötelemeleri	91
Çizelge 6.26: Ankastre mesnetli yapının ZTA ve TSA karşılaştırılması	91

Çizelge 6.27: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların periyotları.	92
Çizelge 6.28: İzolasyonlu yapı dinamik analizleri maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.	92
Çizelge 6.29: İzolasyonlu yapının dinamik analizlerinin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.	93
Çizelge 6.30: İzolasyonlu yapının 1. ve 5. kattaki ivmeler.....	93
Çizelge 6.31: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapının katlara etkiyen maksimum ivmeleri.	94
Çizelge 6.32: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların dinamik analizlerine ait kat yer değiştirmeleri.	95
Çizelge 6.33: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların dinamik analizlerine ait kat kesme kuvvetleri.	98
Çizelge 6.34: Her iki yapının dinamik analizine ait max görelî kat ötelemeleri.	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: İvme-Periyot Grafiği.	4
Şekil 1.2: Tipik ivme-periyot grafiği ve tipik deplasman-periyot grafiği.....	4
Şekil 1.3: İzolatörlerin temeldeki konumlandırılması.	5
Şekil 1.4: İlkel sismik izolatörler.	6
Şekil 1.5: Büyük ölçekli izolatör sistemi örneği.....	6
Şekil 1.6: Sabiha Gökçen Havalimanı izolatör örneği.....	7
Şekil 1.7: İzolatör testi.....	7
Şekil 1.8: Bolu Viyadüğü izolatör sistemi.	7
Şekil 2.1: İki serbestlik dereceli yalıtılmış sistemin parametreleri.....	11
Şekil 3.1: Düşük sönümlü kauçuk izolatör.	23
Şekil 3.2: Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet örneği.	24
Şekil 3.3: Sürtünmeli sarkaç mesnet.....	26
Şekil 3.4: Çapraz raylı mesnet örneği	27
Şekil 3.5: Çapraz raylı mesnet örnekleri.....	27
Şekil 3.6: Elastik sürtünmeli taban izolatör sistemi	28
Şekil 3.7: Elektrik Fransız izolatör sistemi	28
Şekil 3.8: Yaylı izolatör	29
Şekil 3.9: Sabit çekirdekli izolasyon.	30
Şekil 3.10: Almost lifted structure concept (ALSC).	31
Şekil 4.1: İzolatör Bilineer Modeli	33
Şekil 4.2: Gerilme-Şekil değiştirme grafiği	35
Şekil 4.3: Düşey rijitlik-yatay deformasyon eğrisi	37
Şekil 4.4: Kayma modülü-Sıcaklık eğrisi	38
Şekil 4.5: Sürtünmeli sarkaç sistem modeli.....	39
Şekil 4.6: Kayma hızına ve basınca bağlı sürtünme katsayılarının değişimi.	40
Şekil 5.1: Kütle merkezi-Rijitlik merkezi.....	45
Şekil 5.2: İvme spektrumu.	48
Şekil 6.1: Çerçeve sistemin kalıp planı ve kirişler.	65
Şekil 6.2: Üç boyutlu betonarme hastane binası.....	66
Şekil 6.3: İzolatörlere gelen en büyük düşey yükler.....	76
Şekil 6.4: İzolatör yerleşimi.....	77
Şekil 6.5: A tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün kuvvet-deplasman grafiği.	84
Şekil 6.6: B tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün kuvvet-deplasman grafiği.	84
Şekil 6.7: Kompozit tasarım tepki spektrumu	85
Şekil 6.8: Ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları.....	87
Şekil 6.9: 3 boyutlu izolatörlü model.	89
Şekil 6.10: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların ivme karşılaştırması	94
Şekil 6.11: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların toplam max yer değiştirmesi-x... 95	
Şekil 6.12: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların toplam max yer değiştirmesi-y... 96	
Şekil 6.13: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların kat kesme kuvvetleri-x.....	96

Şekil 6.14: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların kat kesme kuvvetleri-y	97
Şekil 6.15: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların kat max görelî yer değıştirmesi. .	99
Şekil 6.16: A tipi köşe izolatörün Düzce-x yönünde kuvvet-yer değıştirmesi.	100
Şekil 6.17: A tipi köşe izolatörün Düzce-y yönündeki kuvvet-yer değıştirmesi	100
Şekil 6.18: B tipi orta izolatörün Düzce-x yönündeki kuvvet-yer değıştirmesi	101
Şekil 6.19: B tipi orta izolatörün Düzce-y yönündeki kuvvet-yer değıştirmesi	101

SEMBOL LİSTESİ

A	: İzolatör kesitinin alanı
A_I	: Kurşun çekirdek kesit alanı
B_D	: Tasarım esaslı deprem düzeyindeki sönümleme katsayısı
B_M	: Olabilecek maksimum düzeyindeki sönümleme katsayısı
b	: Deprem yönündeki boyutun uzunluğu
C_A	: Spektral ivme
C_{AM}	: Spektral ivme
C_V	: Spektral ivme
C_{VM}	: Spektral ivme
C_{VD}	: Tasarım esaslı deprem düzeyindeki sismik katsayı
C_{VM}	: Olabilecek maksimum düzeyindeki sismik katsayısı
$[C]$	: Sönüm matrisi
C_s	: Taban kesme kuvveti katsayısı
c_b	: Yalıtımın sönümü
c_s	: Yapının sönümü
D	: Yer değiştirme
D_y	: Akma yer değiştirmesi
D_D	: Tasarım deplasmanı
D_M	: Maksimum deplasman
D_{TD}	: Tasarım esaslı deprem düzeyindeki toplam deplasman
D_{TM}	: Olabilecek maksimum deprem düzeyindeki toplam deplasman
d	: Deprem yönüne dik olan boyutun uzunluğu
E_c	: Basınç modülü
e	: Dış merkezlik
F_s	: Sürtünme kuvveti
F_y	: Akma kuvveti
F_x	: X seviyesindeki yanal kuvvet
f_{yl}	: Kurşun çekirdeğin akma dayanımı
f_{max}	: Yüksek hızlardaki sürtünme katsayısı
f_{min}	: Düşük hızlardaki sürtünme katsayısı
G	: Kayma modülü
g	: Yerçekimi ivmesi
h_x	: X. katın yerden yüksekliği
$[K]$	: Rijitlik matrisi
K_{eff}	: Efektif rijitlik
K_e	: Elastik rijitlik
K_H	: Yatay rijitlik
K_p	: Akma sonrası rijitlik
K_v	: Düşey rijitlik
k_b	: Yalıtımın rijitliği
k_s	: Yapının rijitliği

L_i	: Yapının i derecesindeki modal katılım oranı
M	: Yapı ve yalıtımın ağırlığı
M_M	: Olabilecek maksimum deprem düzeyindeki sismik katsayı
$[M]$	: Kütle matrisi
M_i	: Yapının i derecesindeki modal kütlesi
m	: Üst yapı ağırlığı
m_b	: Yalıtım aletlerinin ağırlığı
N_A	: Kaynağa yakınlık katsayısı
N_V	: Kaynağa yakınlık katsayısı
P_{cr}	: Burkulma kritik dayanımı
R_I	: Davranış katsayısı
R_L^A	: A tipi kurşun çekirdeğin yarıçapı
R_L^B	: B tipi kurşun çekirdeğin yarıçapı
S	: Şekil faktörü
S_D	: Spektral deplasman
S_V	: Spektral hız
S_A	: Spektral ivme
T_b	: Yapının burulma periyodu
T_D	: Tasarım esaslı deprem düzeyindeki titreşim periyodu
T_M	: Olabilecek maksimum deprem düzeyindeki titreşim periyodu
T_v	: Düşey yöndeki titreşim periyodu
T_x	: Yapının X yönündeki titreşim periyodu
T_y	: Yapının Y yönündeki titreşim periyodu
t	: İzolatör tabakasının kalınlığı
t_r	: İzolatör tabakalarının toplam yüksekliği
Q	: Karakteristik dayanım
q_1	: Yapının gerçek yer değiştirmesi
q_2	: Yalıtımın gerçek yer değiştirmesi
V_b	: İzolasyon düzeyindeki taban kesme kuvveti
V_s	: Üst yapıya gelen tasarım kuvveti
V_{tx}	: Ankastre mesnetli yapının X yönündeki taban kesme kuvveti
V_{ty}	: Ankastre mesnetli yapının Y yönündeki taban kesme kuvveti
v_b	: Yalıtımın görelî yer değiştirmesi
v_s	: Yapının görelî yer değiştirmesi
$\dot{v}_b$	: Yalıtımın görelî hızı
$\dot{v}_s$	: Yapının görelî hızı
$\ddot{v}_b$	: Yalıtımın ivmesi
$\ddot{v}_s$	: Yapının ivmesi
W	: Yapının kütlesi
W^A	: A tipi izolatör eksenel yükü
W^B	: B tipi izolatör eksenel yükü
W_D	: Histerik eğri alanı
w_x	: X. katın ağırlığı
u	: Yer değiştirme
u_b	: Yalıtımın yer değiştirmesi
u_g	: Yer in yer değiştirmesi
u_s	: Yapının yer değiştirmesi
$\ddot{u}_g$	: Yer in ivmesi
Z	: Sismik bölge faktörü

β	: Sönüm çarpanı
β_D	: Tasarım esaslı deprem düzeyindeki sönüm çarpanı
β_M	: Olabilecek maksimum deprem düzeyindeki sönüm çarpanı
β_{eff}	: Efektif sönüm çarpanı
β_b	: Yalıtımın sönüm çarpanı
β_s	: Yapının sönüm çarpanı
ε_b	: Kopma uzaması
ε_c	: Düşey şekil değiştirme
Δ	: Düşey yer değiştirme
Δ_i	: Göreli yer değiştirme
δ_i	: Etkin göreli kat ötelemesi
γ	: Kayma şekil yer değiştirme oranı
ω	: Açısal frekans
ω_b	: Yalıtımın açısal frekansı
ω_s	: Yapının açısal frekansı
μ	: Sürtünme katsayısı
θ_i	: İkinci mertebe katsayısı
$[\Phi]^i$	: Ankastre yapının i derecesindeki doğal modları
Φ_b^i	: Yalıtımın i derecesindeki modu
Φ_s^i	: Yapının i derecesindeki modu
η_{bi}	: Yapının burulma düzensizliği katsayısı
η_{ci}	: Yapının dayanım düzensizliği katsayısı
η_{ki}	: Yapının komşu katlar arası rijitlik düzensizliği

HASTANE BİNASININ SİSMİK İZOLATÖRLERLE DEPREME DAYANIKLI TASARIMI

ÖZET

Yerkürenin varoluşundan bu yana devam eden yer hareketleri ve depremler, öncelikle yapının temelinden başlayarak büyük şekil değiştirme enerjileri oluştururlar. Yapı mühendislerinin amacı bu büyük enerjiler etkisi altında kalan binanın depreme dayanıklılığını artırmak üzere tasarımlar yapmaktır. Son yıllarda yapılan çalışmalar sismik izolatör sistemlerinin kullanımının yapıların depreme dayanıklılığını artırdığı ve büyük şekil değiştirme enerjileri altında dayanım sağladığını ortaya koymuştur.

Bu amaç dâhilinde, bu tez çalışmasında hastane binasının sismik izolatörler kullanılarak tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Çalışma kapsamında hastane binasının seçilmesinin nedeni, kullanım amaçları, aynı anda pek çok kullanıcıyı barındırması ve ileri teknoloji gerektirmesi gibi özellikleri incelendiğinde hastane binasının tasarımı yüksek performans gerektirmektedir. Bu doğrultuda, deprem etkisi altındaki hastanelerin yapı elemanlarının deformasyona uğramadan, içindeki malzeme ve donanımların yüksek ivmeler altında etkilenmeden ve yapı konforunu kaybettirmeden, deprem sonrasında hemen kullanıma alınması sağlanmalıdır. Sağlık Bakanlığı 2013 yılında yayınlamış olduğu bir genelge ile “Birinci ve İkinci Derece Deprem Bölgelerinde 100 yatak ve üzeri hastanelerin taşıyıcı sistemlerinin sismik izolatörlü olarak projelendirilmesi” kararını yürürlüğe koymuştur. Genelgenin zorunlu kılınmasıyla beraber sismik izolatörlü hastane binalarının tasarıma esas alınması hız kazanmıştır ve gelecekte de bu tasarımların artması beklenmektedir.

Uniform Building Code (1997) ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) standartları Türkiye’de bu tasarımların yapılmasında kullanılan en yaygın yöntem ve yönetmelikler olup bu tez çalışmasında da esas alınmış ve ETABS programıyla analiz yapılmıştır.

Bu kapsamla, bu tez çalışmasının birinci kısmında sismik izolasyon sistemleri hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Sismik izolatörlerin lineer teori ile tasarımı ve bu teorinin bina üzerindeki uygulaması açıklanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında sismik izolatörlerin sınıflandırılması için yapılan yaklaşımlar incelenmiştir. Sınıflandırmaya dâhil olan, kauçuk esaslı, kayma esaslı ve yay tipi sistemler açıklanmış ve bunların yanı sıra bu alandaki son gelişmeler ve diğer sınıflandırma sistemleri tanımlanmıştır.

Çalışmanın üçüncü kısmında sismik izolatörlerin özellikleri açıklanmış ve tasarım esaslarına giriş yapılmıştır. Sismik izolatörlerin bilineer modellemesi, kauçuk esaslı izolatörlerin mekanik özellikleri, kurşun çekirdekli izolatörlerin mekanik özellikleri, sürtünmeli sarkaç sistemin mekanik özellikleri bu başlık altında incelenmiştir.

Çalışmanın bu tanımlama basamaklarının tamamlanmasının ardından, modelleme ve tasarım kısmına geçilmiş ve çalışmanın dördüncü kısmında, tez kapsamında ele alınan yönetmeliğin şartları değerlendirilmiş ve kullanılan dizayn metodu statik ve

dinamik analizler yönünden açıklanmıştır. Yönetmeliğe esas olan parametrelerin tanımlanması ve deprem karakteristiklerinin belirlenmesi bu kısımda yapılmıştır.

Deprem karakteristiklerinin belirlenmesinin ardından modellemeye geçilmiş ve tasarım metodundan bahsedilmiştir. Çalışma kapsamında Türk Deprem Yönetmeliğine göre yapılan ön tasarımdan sonra oluşturulan kesitler ve UBC 97'ye dayanarak kurşun çekirdekli sismik izolatörlerin tasarımı yapılmış bu sistemin dinamik ve statik analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tasarım basamakları irdelenecek ve modellenen hastane binasının baz alınan deprem etkileri altındaki dinamik davranışları karşılaştırılmıştır. Modellemede uygulanan tepki spektrumu ve zaman tanım alanı çözüm metotları karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır. Bu aşamada zaman tanım alanı metodu uygulanırken bölgeye uygun olarak ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarından yararlanılmıştır.

Modellemenin tamamlanmasıyla elde edilen sonuçlar analiz edilerek ankastreli ve sismik izolatörlü yapı arasında karşılaştırmalı sonuçlar değerlendirilmiştir. İzolasyonlu bir yapının davranışı değerlendirilerek bu yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarının, izolasyonsuz bir yapının davranışına göre üstünlükleri açıklanmıştır.

EARTHQUAKE RESISTANCE DESIGN OF HOSPITAL BUILDING WITH SEISMIC ISOLATORS

SUMMARY

Since the earth have been existed, ground motions and earthquakes proceed so far. Those constitute high amount of deformation energies starting from the base and foundation of the structures. The purpose of structural engineers is to design of structures for resisting earthquakes and improve earthquake resistance under the influence of this great energy effects. In recent years, studies for the use of seismic isolation systems shows that the seismic isolation systems increase the earthquake resistance of the structures and provide strength under great strain revealed that energy.

Within this scope, the goal of this study is to find solution on using seismic isolators in the design of hospital building. The reason for selecting the hospital structures intended with this thesis is that type of structures require many high-tech features for being used by many users at exactly the same time, using principles and so on. For this aim, the structural components of the hospitals under the effect of earthquake forces is expected to not to be deformed, not to be effected of the material and structural elements intended under the great accelerations, not to be lose the structural comfort and to be commissioned again right after the earthquake. Ministry of Health issued a circular, was published in 2013 with the content of “The designation of the hospitals having over 100 beds at the first and second earthquake zones which are obliged to design with the seismic isolators ” was enacted. With this mandatory, the designs of the hospitals with the seismic isolators have gained momentum and are expected of these designs to increase in the future.

Uniform Building Code (1997) and “The Specification for the structures to be built in the earthquake zones in Turkey” (2007) are the most common methods and regulations for design in Turkey and also this thesis study. Regarding to this specifications with using of ETABS, a hospital buildinga design solution have been developed in this study.

At the first part of the study, the general idea, definitions and concept of seismic isolation systems were explained. The design of seismic isolators with linear theory and the applications of this theory on the structures were discussed.

At the second part of the study, classification approaches of seismic isolation systems were explained. Classified ones which are elastomer based, shearing based and arc-type systems, and adding to them other classification approaches and the recent developments in this area were described.

At the third part of the study, the characteristics of seismic isolators and design principles were introduced. Bilinear modelling of the seismic isolators, elastomer based isolator’s mechanical properties, lead core isolator’s mechanical properties and the mechanical properties of friction pendulum system were discussed under this heading.

After completion of the description steps of the study, the modelling and the design phase were actualized. At the fourth part of the study, the requirements of the dealt specification used in the thesis is going to be assessed and the design methods in terms of the static and dynamic analysis were explained. Determination and identification of the parameters based on the specifications and the characteristics of the earthquake were taken place in this section.

After determining the earthquake characteristics, the modelling and the design methods were assessed. In the study, preliminary design and based on this pre-design generated sections which are conducted by the Turkish Earthquake Code and based on the UBC 97 codes, lead rubber bearing seismic isolator design had been constituted. After this design, the static and dynamic analysis of the comprised system had been practiced.

After the completion of the modelling, the steps of the design is going to be examined and the modelled hospital structure's dynamic behavior under the effects of base earthquakes were compared. The applied response spectrum and time-history analysis solution methods in the modelling were applied comparatively. At this stage, when the application of the time-history analysis has been generated, the structure has been scaled being regard to the locational characteristics. Within the accordance of these characteristics of the structure, the scaled acceleration records have been used.

After the results obtained by the modelling have been analyzed, the comparison between cantilever structure and seismic isolator-structure was assessed. The behavior of an isolated structure under the earthquake forces and non-isolated structure was compared and the advantages and outclasses of isolation systems were evaluated.

Traditionally, the design of seismic isolation systems of structures are based on the increasing the resistance capacity. This can be made by usage of shear walls, braced frames or moment-resistant frames. Nevertheless these conventional methods typically end within high floor accelerations or large inter story collapses for the structure. Under the influences of this effects, non-structural components and structural components may suffer from this damages during a typical earthquake or even a ground motion. This harmful situation cannot be accepted for the structures just as hospitals, fire and police stations whose importance are higher than normal buildings.

In order to restrain the structure from stipulated effects, new approaches and technologies must be developed to minimize the harmful effects of great accelerations. The base isolation technique is increasingly unique method to use and being adopted. There are many different methods and techniques to isolate the structure from the ground motions and earthquakes. Seismic isolation is one of the most popular and strange approach of this techniques. The main idea of isolation is to restrain the superstructure of the building coming from the base of it resulted in great earthquake energy. Hence, the superstructure must be supported strongly in order to prevent the effects come from the ground.

The basic aims of the seismic isolation is to carry the effects flexible parallel to the ground and non-shaking orthogonal to the ground. The natural periods must be extended of cantilevered building. Increasing that value reduces the spectral acceleration for a typical ground effect. In that situation, displacements are often greater and energy dissipation or damping creates them.

As mentioned above, a typical seismic isolation system has to meet the sufficient horizontal flexibility and vertical shaking effects in order to extend the period and spectral needs. A typical system must be required all of the soil characteristics, energy dissipation capacities under the limits of displacements, adequate rigidity and all the requirements.

Within the development of seismic isolation systems, a lot of types and techniques have also been developed under the head of base isolation with seismic methods. The most commonly used ones are elastomeric bearings with lead core rubber, natural rubber or neoprene and sliding bearings with the sliding surface. The intended types of systems that are used and implemented are elastomeric bearings and sliding bearings in recent. The types of elastomeric systems are low damping natural rubber bearings, high damping rubber bearings (HDRB) and also synthetic rubber bearings and lead core bearings.

To be compared to these main 2 types of seismic isolation systems (rubber bearings and lead core bearings), friction systems have some advantages not being affected by natural frequencies. Friction coefficient determines if a sliding can be occur in the system or not.

Lead core laminated bearings are combination of the layers of rubbers which requires the system flexibility and load carrying capacities. This is provided by the laminated steel plates which are at the top and bottom of the layers.

Being consider all of the explained characteristics of seismic isolation systems and the facts of their characteristics, it shall be expressed that the seismic isolation systems prevents the structural damage by a huge amount of majority. Additionally, the limitation of the maximum lateral deformations and accelerations with and within the stories of the structures are prevented from the harm of the earthquake effects and ground motions. The seismic isolation system confidently guarantees that the protection of non-structural components of a building can be prevented from the great forces and accelerations.

On economic dimension of application of a seismic isolation system to a structure starting with the very early phases of the design, actually in the pre design phase is gaining benefits. On that vision, the studies have been shown that aftermath calculations of major earthquakes without designation of base isolation has lots of economic loses starting with the architectural and structural components.

Taking consider the advantages of designing the structures with the base isolation technology, under the limitation of damage level of the superstructure is decreased to the minimum. This makes the structure can be used immediately after an earthquake effects just as hospitals. Replacing the fixed-based and cantilevered systems, the seismic isolation systems of base makes the usage of the structure more flexible and economic features.

1. GİRİŞ

Yapı mühendisleri, bina, köprü ve diğer mühendislik yapılarını yaşam döngüsü boyunca güvenilir, ekonomik ve konforlu olarak depreme karşı dayanıklı olarak yapmayı hedeflemektedirler. Ancak 17 Ağustos 1999 Marmara ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinde olduğu gibi kötü tasarlanmış yapıların birçoğu yıkılmış, iyi tasarlanan yapılarda ise yapısal hasarlardan kullanılamaz hale gelmiş ve yapı içindeki ekipmanların hasarına neden olmuştur. Can güvenliğinin yanı sıra, özellikle hastane, telekomünikasyon servisleri, yüksek hassasiyetli alet içeren depremden sonra hemen kullanıma elverişli olması gereken önemli binalarda bu gibi depremlerde tamamen çalışmaz duruma gelmiş ekonomik zarar oluşturmuştur. Bu gibi zararların önüne geçmek adına, yapıda sismik izolasyon aletler kullanılarak depremin yer hareketinden üst yapıya gelen sismik kuvvetleri önemli ölçüde sönümlediği kanıtlanmıştır [1].

Sismik izolasyon, basitçe depremin oluşturduğu dinamik etkileri azaltmaya yönelik tasarım şeklidir. Daha genel anlamıyla taban izolasyonu yapının tabanına düşeyde rijit fakat yatayda esnek, belirli ölçülerde deplasmanlar yapabilen donanımlar yerleştirmek suretiyle üst yapıyı deprem hareketinin yüksek frekanslı etkisinden ayırma işlemidir [2]. Klasik tasarım olan ankastre mesnetli yapı tasarımına nazaran sismik izolasyonlu sistemlerde rijitlik artırımı yerine yapının doğal periyodunu artırarak yapının depreme karşı güvenliğini artırmaktadır. Ankastre mesnetli yapıda rijitlik artışıyla, kat öteleme ve deplasmanlar azalır ve depreme karşı güvenlik sağlanırken diğer taraftan yapının maliyeti ve kat ivmeleri önemli derecede artmaktadır. Artan kat ivmeleri yapıda bulunan yüksek hassasiyetli malzemelerin hasarına neden olmaktadır. Diğer taraftan ankastre mesnetli yapı daha az rijit yani sünekliği artırılırsa, kat ivmeleri azalırken, diğer yandan kat deplasmanları artar ve yapısal elemanların hasarına yol açar. Bu ikilemde yapı mühendisinin optimum tasarım yapmak istemesi durumunda hem kat ivmelerinin azaltılması, hem de göreceli kat yer değiştirmelerin azaltılmasını sağlayan sismik izolasyon aletlerini kullanmak durumundadır.

Günümüz teknolojisinde depreme dayanıklı yapı tasarımı yapıyı rijit hale getirip yapıyı güçlendirmek yerine, depremin dinamik etkilerini azaltmada kullanılan birçok değişik yöntemler bulunmaktadır. Bunlar aktif kontrol sistemleri, pasif kontrol, yarı aktif kontrol ve karma sistemler olarak dört ana gruba ayrılmaktadır [3]. Aktif kontrol sistemlerinde, zemine ve yapının çeşitli yerlerine yerleştirilen sensörler yardımıyla depremin etkilediği kuvvetler kontrol bilgisayarına iletilip daha önce belirlenmiş bir algoritmaya göre hesaplanır ve bu kuvvetler harici bir kuvvet üreten mekanizma ile yapıya zıt yönde kuvvetler uygulanıp depremin dinamik etkileri azaltılmaya çalışılır. Bu sistemlerin çalışması için her zaman çalışan ve harici güç kaynağına ihtiyaç vardır.

Pasif kontrol sistemleri ise aktif kontrol sistemlerinde olduğu gibi harici bir güç kaynakları bulundurmazlar ve sismik enerjiyi kendi içlerinde sönmürler. Aktif kontrol sistemlerine göre ucuz olan bu sistemlerde değişken dinamik yüklemelere karşı ayarlanabilir değiller ve çeşitli malzeme özellikleriyle günümüzde sıkça kullanılmaktadır.

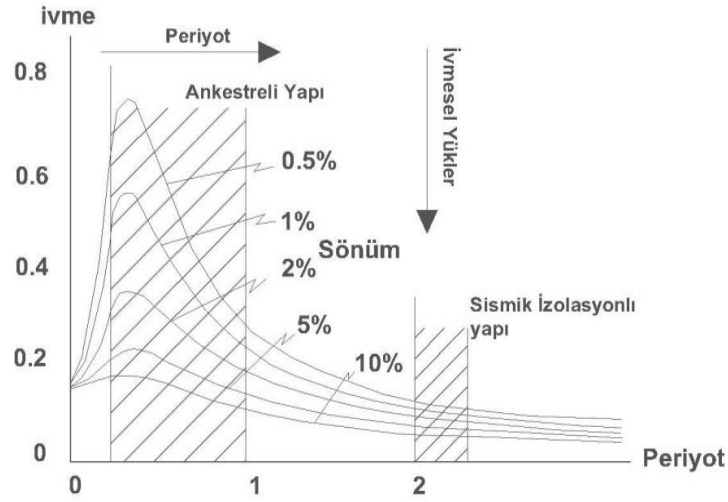
Yarı aktif kontrol sistemleri yine aktif kontrol sistemlerinde olduğu gibi kuvvetleri oluşturmak için yine enerji ihtiyacı olup, bu enerjiler genellikle pil ve bataryalarla sağlanmaktadır. Deprem sırasında oluşan enerji kesintisinin bertaraf edilebildiği bu sistemlerde genelde elektrik ve manyetik alana duyarlı sıvılar içermektedir.

Karma sistemler ise; aktif, yarı aktif ve pasif kontrol sistemlerinin bir arada kullanılmasıyla oluşturulmuş sistemlerdir. Karma sistemler yüksek enerji ihtiyacı olmadan çalışabilmektedir. Bu tez çalışmasında pasif kontrol sistemleri olan sismik izolatör ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

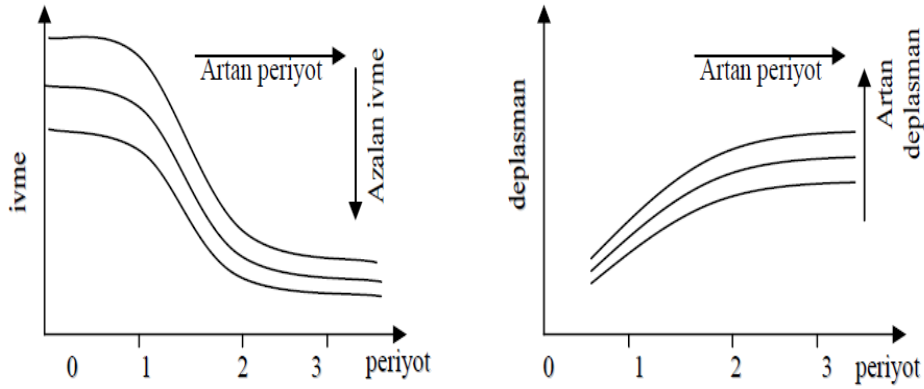
Depreme dayanıklı yapı tasarımında pasif kontrol sistemleri kullanımında temel ilke olarak yapıların yeterli rijitlik, yeterli süneklik ve yeterli dayanımda olmaları gerekmektedir. Depremin etkisi altında yapının davranışı yapının periyodu, zemin yapı etkileşimi, sönmü gibi özelliklere bağlıdır. Bu anlamda bir yapı tasarlanırken, yapının; hafif ve küçük depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanların elastik sınırlar içinde kalarak herhangi bir hasar oluşmaması, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanların elastik sınırlar ötesine geçerek ancak onarılabilecek düzeyde hasarlar oluşabileceği ve büyük şiddetteki depremlerde ise taşıyıcı sistemin kısmen veya tamamı göçmeden ve can kaybı olmadan ayakta

durması gerekmektedir. Bu bağlamda geleneksel yöntemlerle tasarlanan yapıda deprem dayanım kapasitesini artırmak amacıyla taşıyıcı sistemin elemanlarını güçlendirerek daha rijit bir yapı olmasına neden olmakta, dolayısıyla yapı maliyetini, ivme ve kuvvetlerini artırarak yapı içerisindeki ekipmanlara zarar verebilmektedir. Diğer yandan yapının sünekliliği yüksek tutularak kat ivmeleri ve kuvvetleri azaltılabilmekte ancak bu sefer de göreceli kat deplasmanları artarak yapının taşıyıcı elemanları zarar görmektedir. Bu temel soruna pratik çözüm olarak yapıya uygulanan sismik izolasyon yöntemi öne sürülmüştür.

Sismik izolasyon, yapının depreme dayanma kapasitesini arttırmaktan daha ziyade, yapının depreme karşı tepkisini azaltma esasına dayanan bir tür depreme dayanıklı yapı tasarımı yaklaşımıdır. Bu teknolojinin düzgün ve doğru bir şekilde uygulanması, yapıların şiddetli depremler sırasında rijit davranış göstermesine ve zorlanmanın elastik sınırlar içinde kalmasını sağlamaktadır [4]. Bununla birlikte yapıya izolatörler elemanları yerleştirilerek yapının periyodunu artırıp zeminden yapıya aktarılan deprem kuvvetlerinin azaltılması şeklinde de tanımlanabilir. Bu yöntemle yapının doğal periyodu uzatılarak yapıya depremin hakim periyodundan yeterince uzak kalınır ve yapının ani ve aşırı kuvvet alması engellenir. Sismik izolasyon ile deprem hareketinden dolayı yapıya etkiyen ivmeler ve göreceli kat yer değiştirmeler azalır, esneklik artar. Dolayısıyla yapıda kat kuvvetleri ve yer değiştirmeler kontrol altında tutularak, hem yapıda yaşayan insanların yaşam güvenlikleri artırılmış hem de yapının içindeki hassas malzeme, teknolojik araçlar ve makinelerin korunması sağlanır. Şekil 1.1 ve şekil 1.2'de görüldüğü gibi sismik izolasyon ile periyot uzatılarak deprem ivmelerinin yüksek olduğu aralıktan uzaklaşarak daha düşük deprem ivmeleri aralığına kaydırılır. Ayrıca sismik izolasyon elemanlarının sönüm oranının artışı ile yine yapıya etkiyen deprem enerjisi azalır ve böylelikle sismik izolasyon ile taşıyıcı sistemin sismik iç kuvvetleri önemli ölçüde azaltılır.



Şekil 1.1: İvme-periyot grafiği [5].



Şekil 1.2: Tipik ivme-periyot grafiği ve tipik deplasman-periyot grafiği [5].

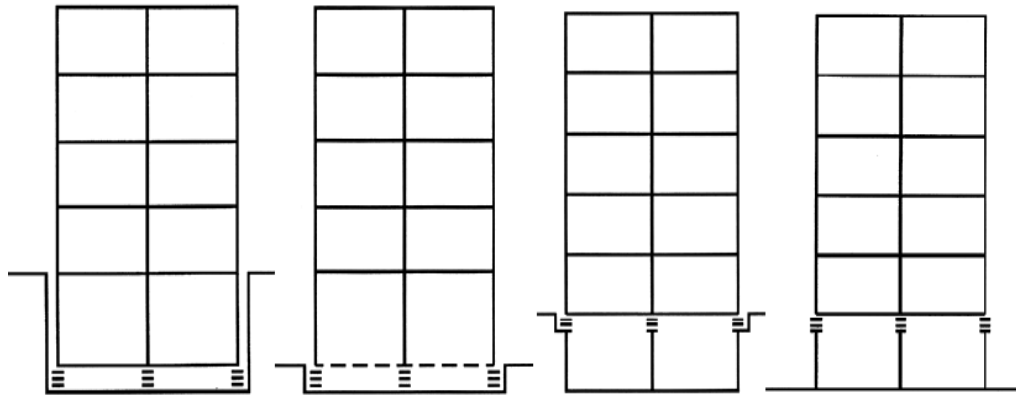
Sismik izolasyon sisteminin depreme karşı dayanıklı bir tasarım olabilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir [6].

- Üst yapıyı güvenli bir şekilde taşıyabilecek yüksek rijitlik
- Ankastre sistemli sistemin ve şiddetli depremin frekansından daha düşük olabilmesi için düşük ve güvenli yatay rijitlik
- Rüzgar ve küçük depremler gibi düşük seviyedeki dinamik yüklemeler altında yapının deplasman yapmasını engelleyecek yeterince yatay rijitlik
- Sistemin güvenli ve kabul edilebilir yer değiştirmesini sağlayabilecek ve olası rezonansı engellemek adına yeterince sönüm
- Sistemi eski haline getirebilecek geri merkezleştirme etkisi

- Beklenmeyen şiddetli bir depremde önce izolatörleri, daha sonra yapının göçmesini engelleyebilecek bir sistem
- Çekme kuvvetlerine karşı önleyici sisteme sahip olması gerekir.

Sismik izolasyon tekniği günümüzde depremlerden sonra hemen kullanım amacı güden ve hayati önem taşıyan yapılarda uygulanmaktadır. Okul, hastane, sağlık ocakları, dispanserler, itfaiye, enerji dağıtım ve haberleşme merkezleri, ulaşım istasyonları, köprü, viyadük, kriz afet merkezleri, içerisinde önemli ve hassas malzemeler içeren yapılar gibi şiddetli depremden sonra mutlaka kalması gereken yapılar ile nükleer santraller gibi tehlike arz eden yapılar ve tarihi binalarda, ve tarihi eserleri bulunduran müze ve bunun gibi yapılarda, mimari detayların değiştirilemediği eski yapıların güçlendirilmesinde sıkça kullanılmaktadır.

Sismik izolasyon aletleri yapıda genelde temel seviyesinde kullanıldığı gibi yapının yüksekliği ve özelliklerine ve diğer özelliklerine bağlı olarak yapının ara katlarında kullanılabilir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi temelin seviyesinin değişik yerlerinde kullanılan izolatörler gösterilmiştir.



Şekil 1Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı..**3:** İzolatörlerin temeldeki konumlandırılması [7].

Temel altında kullanılan sismik izolatörlü sistemlerde yapı yatay yönde belli bir oranda hareket serbestliğine sahip olması gerekmektedir bunun için yapının temeli etrafına perde duvarlar yapılmalıdır.

Sismik izolasyon tekniği depreme karşı güvenli yapı çok eskilere dayanmaktadır. İran'da geleneksel olarak inşa edilmiş bir çok tarihi yapılar incelendiğinde temel ile yapı arasında kaymayı sağlayan çok tabakalı pürüzsüz taş yerleştirilmiş, veya taşıyıcı

duvarlar ile temel arasında kullanılan dairesel ahşap kütüklere veya kumlara rastlanılmıştır [8].



Şekil 1.4: İlkel sismik izolatörler [8].

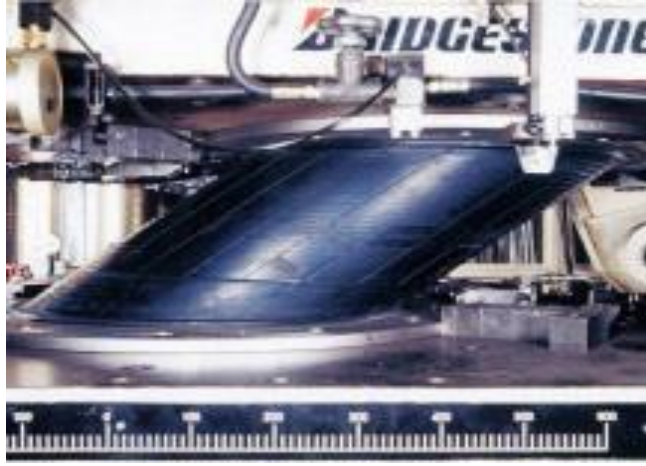
Geleneksel olarak inşa edilen tarihi yapılarda olduğu gibi günümüzde de birçok ülkede sismik izolasyon tekniği başarıyla kullanılmaktadır. Deprem enerjisini sönmülemde kullanılan sismik izolasyonlar ülkemizde ilk olarak Tarsus-Adana-Gaziantep otoyolunda Atatürk Viyadüğü'nde, daha sonra Bolu Viyadüğü'nde ve Aliğa'da sıvı doğal gaz depolarında kullanılmıştır. Son dönemde ise, Kocaeli Üniversite Hastanesi'nde, Tarabya Oteli güçlendirilmesinde ve Ankara Büyükşehir Belediyesi Ego Genel Müdürlüğü, Söğütözü Kongre ve Ticaret Merkezi, Atatürk Havalimanı, Sabiha Gökçen Havalimanı ve Antalya Havalimanı ile Sağlık Bakanlığı 400 yataklı Erzurum Devlet Hastanesi'nde kullanılmıştır [5].



Şekil 1.5: Büyük ölçekli izolatör sistemi örneği [9].



Şekil 1.6: Sabiha Gökçen Havalimanı izolatör örneği [10].



Şekil 1.7: İzolatör testi [11].



Şekil 1.8: Bolu Viyadüğü izolatör sistemi [5].

Sismik izolatörlerle ilgili çalışmalar dünyanın birçok yerinde yapılmaktadır. Özellikle hastane binalarının sismik izolatörlerle tasarımı için yapılan sarsma tablası deneylerinde taban yalıtımının hastane binasının fonksiyonelliğini sağlaması ve koruması açısından oldukça etkili bir performansa sahip olduğunu göstermiştir [12]. Bu deneylerden hem faya yakın hem de uzun dönem yer hareketlerinin taban izolasyonlu sistemlerdeki yapısal performanslarının yeterli düzeyde olduğunu, kat ivmelerinin taban izolasyonu yapılması durumunda etkili biçimde azaldığını, birçok mobilya unsurunun ve hastane aletlerinin taşınabilir olmasının büyük yer değiştirmelere sebep olduğu ve her iki durumdaki yer hareketini etkilediği, mobilyaların ve hastane aletlerinin yer değiştirmesi ve hasar görmesinin deprem etkisi altında ivmelere bağlı olduğunu, deprem kuvveti binaya etki ettiğinde bina içindeki doktor, hemşire, hasta ve tüm insanların bu kuvvetlerden teknik olarak nasıl etkileneceğini değerlendirmiştir. Bu çalışma yapısal tepkilerin deprem etkisi ve hasar altındaki davranışının nasıl olduğunu gözlemlemek, sabitlenmiş tabanlı bir sistemin hasar bilgileri, deprem etkisi altındaki bir hastane binasının, içindeki teknolojik aletlerin, hastaları ve tüm insanları nasıl etkilediğini gözlemlemek, düşey titreşimin taban izolasyon sistemi üzerindeki etkilerini görmek ve çeşitli simülasyonlar ile deneysel davranışı gözlemlemek için yapılmıştır [12].

Bununla birlikte literatürde ve çeşitli mecralarda sismik izolasyon ve sismik enerji sönümleyicileri ile ilgili son teknolojiler hakkında çalışmalar mevcuttur. Sismik izolasyon ve enerji sönümleyici uygulamalarından yola çıkarak sismik izolatörlerin;

- Belirli deprem kuvvetleri altında performanslarını,
- Taban yalıtımının teknik faydaları,
- Performans esaslı tasarım felsefesi,
- İzolatörlerin ilk maliyet bilgileri,
- Eksik yönleri ve maliyet/fayda (değer) bulgularını geniş bir perspektiften bakılarak incelenmiştir.

Sismik izolasyonlu yapıların her ne kadar on yılları aşkın kullanılan bir felsefe olsa da, sismik izolatörlerin geliştirilmesine ve teknolojinin takip edilmesine yeteri kadar önem verilmediğine ve sismik izolatörlü bina sayısının etkin bir artış göstermediğine dikkat çekilmiştir [13].

Türkiyede ve dünyada ses getiren sismik izolasyonlu hastane yapısı olarak Erzurum Medikal Kampüsü bünyesindeki hastane binaları örnek gösterilebilir. Bu yapıların tasarımları sismik yalıtım prensibiyle yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda Erzurum Medikal Kampüsü dünyanın en büyük sismik izolasyonlu hastane binasına kavuşmuştur. Çalışma izolasyonlu yapı tasarımındaki temel gereksinimleri ve izolatörlerin niteliklerini değerlendirmesi bakımından ısı tutan bir çalışmadır. Taban yalıtımı tasarımının yapısal performansı gözle görülür biçimde artırdığı ve bunu yaparken görelî kat ötemeleri ve kat kesme kuvvetlerini düşürdüğünü ispat etmiştir. Bütün bu sonuçlar ışığında hastane binalarının hemen kullanım şartları da göz önünde bulundurularak sismik izolasyonlu yapı tasarımının hastane binaları için en iyi çözümlerden birisi olduğu ispat edilmiştir [14].

2. SİSMİK İZOLASYON TEORİSİ

2.1 Doğrusal Kuram¹

Deprem yalıtımının doğrusal kuramında iki kütleli bir model esas alınarak yapılmıştır. m kütlesi üst yapıyı, m_b kütlesi yalıtımın sisteminin üzerindeki taban katını, k_s ve c_s yapının rijitliğini ve sönümünü, k_b ve c_b yalıtımın rijitliğini ve sönümünü, u_s ve u_b , yapının ve yalıtımın yer değiştirmesini, u_g ise yer hareketini göstermek üzere formüller şu şekilde türetilmiştir:

$$v_b = u_b - u_g \quad (2.1)$$

$$v_s = u_s - u_b \quad (2.2)$$

Analizin yapılmasında görelî yer değiştirmenin kullanımı daha büyük bir kolaylık sağlar. Bunun sebebi yalıtım sisteminin yer değiştirmesi ve görelî kat ötelenmesi üzerinde sonuçların elde edilmesinden dolayıdır. Denklem 2.1 ve denklem 2.2 ile ifade edilen terimler cinsinden iki serbestlik dereceli modelin hareketine bağlı olarak temel denklemler denklem 2.3 ve denklem 2.4 yazılabilir.

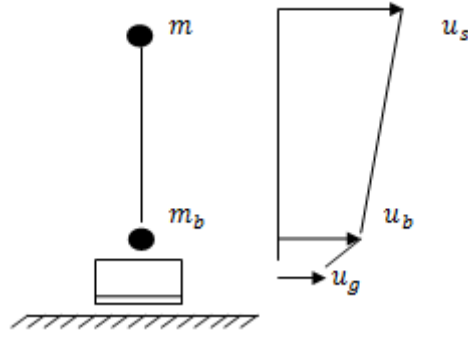
$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (2.3)$$

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (2.4)$$

Bu denklemlerin matris türünde ifadesi denklem 2.5 ile gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.5)$$

¹ Bu bölümdeki tüm denklemler [4]'ten uyarlanarak alıntılanmıştır.



Şekil 2.1: İki serbestlik dereceli yalıtılmış sistemin parametreleri

Denklem 2.5'te toplam kütle $M = m + m_b$ olup bu değer matris notasyonunda denklem 2.6 şekilde yazılır.

$$[M]\{\ddot{v}\} + [c]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} = -[M][r]\ddot{u}_g \quad (2.6)$$

Çözümlerde sıklıkla kullanılacak olan kütlelerin oranı γ tanımı denklem 2.7 ile tanımlanır.

$$\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{M} \quad (2.7)$$

Denklem 2.6 çözümlenirse açısal frekanslar ω_b ve ω_s denklem 2.8 ve denklem 2.9 ile verilir.

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m + m_b} \quad (2.8)$$

$$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m} \quad (2.9)$$

$\frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} = \epsilon$ ve sönüm çarpanları β_b ve β_s olarak alındığında denklem 2.10 ve denklem 2.11 şeklinde yazılır.

$$2\omega_b\beta_b = \frac{c_b}{m + m_b} \quad (2.10)$$

$$2\omega_s\beta_s = \frac{c_s}{m} \quad (2.11)$$

Denklem 2.10 ve denklem 2.11 yukarıda belirtilen denklem 2.3 ve denklem 2.4'de yazılırsa denklem 2.12 ve denklem 2.13 türetilir.

$$\gamma \ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2\omega_b \beta_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (2.12)$$

$$\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2\omega_s \beta_s \dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -\ddot{u}_g \quad (2.13)$$

ω_1 ve ω_2 açısal frekanslar olup tüm sistemin klasik modları ϕ^1 ve ϕ^2 ile gösterilirse

$$\phi^{it} = \phi_b^i, \phi_s^i \quad i=1, 2, \dots \text{ olmak üzere} \quad (2.14)$$

Frekansları belirleyen karakteristik denklem 2.15'teki gibi yazılabilir.

$$(1 - \gamma)\omega^4 - (\omega_s^2 + \omega_b^2)\omega^2 + \omega_b^2\omega_s^2 = 0 \quad (2.15)$$

Denklem 2.15 için çözümü ω_1 ve ω_2 cinsinden yazılırsa

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2(1 - \gamma)} \{ \omega_b^2 + \omega_s^2 - [(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2]^{1/2} \} \quad (2.16)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{2(1 - \gamma)} \{ \omega_b^2 + \omega_s^2 + [(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2]^{1/2} \} \quad (2.17)$$

İki açısal frekansın oranları olarak ϵ hata terimi birinci mertebeden kabul edilirse denklem 2.18 ve denklem 2.19 ϵ cinsinden yazılırsa,

$$\omega_1^2 = \omega_b^2(1 - \gamma\epsilon) \quad (2.18)$$

$$\omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{1 - \gamma}(1 + \gamma\epsilon) \quad (2.19)$$

dolayısıyla, mod şekilleri, $[\Phi]_b^i=1$, $i=1,2$ ile mod şekilleri denklem 2.20 ve denklem 2.21 ile gösterilir.

$$\Phi^{1T} = (1, \epsilon) \quad (2.20)$$

$$\Phi^{2T} = \left\{ 1, -\frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma) \epsilon] \right\} \quad (2.21)$$

Üst yapı ve izolasyonlu yapıların gerçek yer değiştirmeleri, q_1 ve q_2 zamana bağlı modal deplasmanlar olmak üzere modal şekillerle gösterilirse denklem 2.22 ve denklem 2.23 şeklinde olur.

$$v_b = q_1 \Phi_b^1 + q_2 \Phi_b^2 \quad (2.22)$$

$$v_s = q_1 \Phi_s^1 + q_2 \Phi_s^2 \quad (2.23)$$

Modal büyüklükler M_i ve L_i değerleri denklem 2.24 ve denklem 2.25 ile gösterilir ve ϵ hata teriminin çok küçük olması sebebiyle tekrar düzenlenirse denklem 2.26, 2.27, 2.28 ve 2.29 elde edilir.

$$M_i = [\Phi]^i{}^T [M] [\Phi]^i \quad (2.24)$$

$$M_i L_i = [\Phi]^i{}^T [M] [r] \quad (2.25)$$

$$M_1 = M(1 + 2\gamma\epsilon) \quad (2.26)$$

$$M_2 = M \frac{(1 - \gamma)[1 - 2(1 - \gamma)\epsilon]}{\gamma} \quad (2.27)$$

$$L_1 = 1 - \gamma\epsilon \quad (2.28)$$

$$L_2 = \gamma\epsilon \quad (2.29)$$

Denklem (2.3) ve (2.4) deki u_b ve u_s terimleri Φ^1 ve Φ^2 ile ifade edilerek modal katsayılar için aşağıdaki iki denklem 2.30 ve denklem 2.31 elde edilir.

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_1\beta_1\dot{q}_1 + \lambda_1\dot{q}_2 + \omega_1^2 q_1 = -L_1\ddot{u}_g \quad (2.30)$$

$$\ddot{q}_2 + \lambda_2\dot{q}_1 + 2\omega_2\beta_2\dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -L_2\ddot{u}_g \quad (2.31)$$

$2\omega_1\beta_1$ ve $2\omega_2\beta_2$ terimlerinin denklem 2.32 ile türetilir ve bu denklemlerden denklem 2.33 ve 2.34 denklemleri yazılır.

$$[M]_i 2\omega_i [\beta]_i = [\Phi]^i{}^T \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} [\Phi]^i \quad (2.32)$$

$$2\omega_1\beta_1 = 2\omega_b[\beta]_b(1 - 2\gamma\epsilon) \quad (2.33)$$

$$2\omega_2\beta_2 = \frac{1}{(1-\gamma)}(2\omega_s[\beta]_s + 2\gamma\omega_b[\beta]_b) \quad (2.34)$$

Denklem 2.33 ve denklem 2.34 sadeleştirilirse denklem 2.35 ve denklem 2.36 elde edilir.

$$\beta_1 = \beta_b \left(1 - \frac{3}{2}\gamma\epsilon\right) \quad (2.35)$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma\beta_2\epsilon^{\frac{1}{2}}}{(1-\gamma)^{\frac{1}{2}}} \left(1 - \frac{\gamma\epsilon}{2}\right) \quad (2.36)$$

Denklem 2.30 ve 2.31 çözülürse λ_1 ve λ_2 katsayıları denklem 2.37 ve denklem 2.38 olarak bulunur.

$$\lambda_1 M_1 = [\Phi]^{iT} \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} [\Phi]^2 \quad (2.37)$$

$$\lambda_2 M_2 = [\Phi]^{2T} \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} [\Phi]^1 = \lambda_1 M_1 \quad (2.38)$$

Denklem 2.37 ve denklem 2.38 de M_1 ve M_2 yerine yazılırsa denklem 2.39 ve denklem 2.40 elde edilir.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{2\omega_b\beta_b M - \epsilon \left\{ \left(\frac{1}{\gamma}\right) [1 - (1-\gamma)\epsilon] \right\} 2\omega_s\beta_s m}{M(1+2\gamma\epsilon)} \\ &= 2\omega_b\beta_b(1-2\gamma\epsilon) - \epsilon 2\omega_s\beta_s(1-2\gamma\epsilon) \\ &= 2\omega_b[\beta_b(1-2\gamma\epsilon) - \epsilon^{1/2}\beta_s] \frac{\gamma}{1-\gamma} \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \frac{2\omega_b\beta_b M - \epsilon \left\{ \left(\frac{1}{\gamma}\right) [1 - (1-\gamma)\epsilon] \right\} 2\omega_s\beta_s m}{M(1+2\gamma\epsilon)} \\ &= (2\omega_b\beta_b - \epsilon 2\omega_s\beta_s)[1-2\gamma\epsilon] \\ &= 2\omega_b\{\beta_b[1+2(1-\gamma)\epsilon] - \epsilon^{1/2}\beta_s\} \frac{\gamma}{1-\gamma} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Uygulamada λ_1 ve λ_2 çok küçük olduğundan bu değerler ihmal edilebilir. Dolayısıyla genel denklem olan denklem 2.30 ve denklem 2.31 tekrar düzenlenirse denklem 2.41 ve denklem 2.42 elde edilir.

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_1\beta_1\dot{q}_1 + \omega_1^2q_1 = -L_1\ddot{u}_g \quad (2.41)$$

$$\ddot{q}_2 + 2\omega_2\beta_2\dot{q}_2 + \omega_2^2q_2 = -L_2\ddot{u}_g \quad (2.42)$$

Yer hareketinin zamana bağlı geçmişini ifade eden $\ddot{u}_g(t)$ bilindiği takdirde, modal bileşenleri tanımlayan $q_1(t)$ ve $q_2(t)$ duhamel integrali ile hesaplanarak denklem 2.43 ve denklem 2.44 elde edilir.

$$q_1 = \frac{L_1}{\omega_1} \int_0^t \ddot{u}_g(t-\tau) e^{-\omega_1\beta_1\tau} \sin\omega_1\tau \cdot d\tau \quad (2.43)$$

$$q_2 = -\frac{L_2}{\omega_2} \int_0^t \ddot{u}_g(t-\tau) e^{-\omega_2\beta_2\tau} \sin\omega_2\tau \cdot d\tau \quad (2.44)$$

Buna göre q_1 ve q_2 nin maksimum değerleri denklem 2.45 ve denklem 2.46 formülleri ile yazılır.

$$|q_1|_{\max} = L_1 S_D(\omega_1, \beta_1) \quad (2.45)$$

$$|q_2|_{\max} = L_2 S_D(\omega_2, \beta_2) \quad (2.46)$$

Denklem 2.45 ve denklem 2.46'da $S_D(\omega, \beta)$ ifadesinde ω frekansında β sönüm oranına ait, $\ddot{u}_g(t)$ ile ifade edilen yer hareketine tepki yer değiştirme spektrumudur. İzolasyonlu ve üst yapının göreceli yer değiştirmeleri, pik spektral değerlerini kullanarak karelerinin toplamının karekökü (square root of sum of squares- SRSS) yöntemiyle hesaplanır ve denklem 2.47 ve denklem 2.48'deki gibi yazılır.

$$|v_s|_{\max} = [(\Phi_2^1 |q_1|_{\max})^2 + (\Phi_2^2 |q_2|_{\max})^2]^{1/2} \quad (2.47)$$

$$|v_b|_{\max} = [(\Phi_1^1 |q_1|_{\max})^2 + (\Phi_1^2 |q_2|_{\max})^2]^{1/2} \quad (2.48)$$

Bu iki denkleme denklem 2.26, 2.27, 2.28, 2.29 bulunan modal kütleler ve modal katılım oranlarını da yerlerine konur ve denklem 2.45 ve denklem 2.48 kullanılırsa maksimum taban kesme kuvveti ve üst yapıya gelen kuvvetler denklem 2.49 ve denklem 2.50 gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
|v_b|_{\max} &= \{[L_1 S_D(\omega_1, \beta_1)^2 + L_2 S_D(\omega_2, \beta_2)^2]\}^{\frac{1}{2}} \\
&= \{(1 - \gamma\epsilon)^2 [S_D(\omega_1, \beta_1)^2 + \gamma^2 \epsilon^2 [S_D(\omega_2, \beta_2)^2]]\}^{1/2}
\end{aligned} \tag{2.49}$$

$$\begin{aligned}
|v_b|_{\max} &= \{[L_1 S_D(\omega_1, \beta_1)^2 + L_2 S_D(\omega_2, \beta_2)^2]\}^{1/2} \\
&= \{(1 - \gamma\epsilon)^2 [S_D(\omega_1, \beta_1)^2 + \gamma^2 \epsilon^2 [S_D(\omega_2, \beta_2)^2]]\}^{1/2}
\end{aligned} \tag{2.50}$$

Genel olarak, $\epsilon^2 S_D(\omega_1, \beta_1)$ terimi yer değiştirmeler deprem spektrasında yüksek frekanslar (ω_1) düşük frekanslardan (ω_2) daha küçük olduğu durumlarda ihmal edilebilir. Bu durumda yukarıdaki denklemler sadeleştirilmiş olarak denklem 2.51 ve denklem 2.52 şeklinde yazılır.

$$|v_b|_{\max} = (1 - \gamma\epsilon) S_D(\omega_1 \beta_1) \tag{2.51}$$

$$|v_s|_{\max} = \epsilon [S_D(\omega_1 \beta_1)^2 + S_D(\omega_2 \beta_2)^2]^{1/2} \tag{2.52}$$

Bu durumda taban kesme kuvveti, taban kesme kuvveti katsayısı ifadesi C_s ile gösterilirse, denklem 2.53 yazılabilir.

$$C_s = \left| \frac{k_s v_s}{m} \right|_{\max} = \omega_s^2 |v_s|_{\max} \tag{2.53}$$

Denklem 2.53 denklem 2.52 de yerine konur ve sadeleştirme yapılırsa denklem 2.54 haline gelir.

$$\begin{aligned}
C_s &= \omega_s^2 \epsilon [S_D(\omega_1 \beta_1)^2 + S_D(\omega_2, \beta_2)^2]^{1/2} \\
&= [\omega_b^4 S_D(\omega_1 \beta_1)^2 + \epsilon^2 \omega_s^4 S_D(\omega_2, \beta_2)^2]^{1/2} \\
&= [S_A(\omega_1 \beta_1)^2 + \epsilon^2 S_A(\omega_2, \beta_2)^2]^{1/2}
\end{aligned} \tag{2.54}$$

Buna göre denklem 2.54'te eğer sadece ilk terimler gözönüne alınırsa denklem 2.55 ve denklem 2.56 ve denklem 2.57 hali elde edilir.

$$|v_s|_{\max} = \frac{\epsilon S_V}{\omega_b} = \epsilon S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (2.55)$$

$$|v_b|_{\max} = \frac{S_V}{\omega_b} = S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (2.56)$$

$$C_s = \frac{k_s v_s}{m} = \omega_s^2 v_s \quad (2.57)$$

Bu durumda kesme kuvveti katsayısı denklem 2.58 halini alır.

$$C_s = \omega_b S_V \left[1 + \epsilon^2 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \right]^{1/2} = S_A(\omega_b, \beta_b) \left(1 + \frac{\epsilon}{1 - \gamma} \right)^{1/2} \approx S_A(\omega_b, \beta_b) \quad (2.58)$$

Bu formül küçük ϵ ve tipik tasarım spektrumu için en az bir başlangıç durumunun verilmesi durumunda bir görelî taban yer değiştirmesine $[S_D(\omega_b, \beta_b)]$ ve binanın taban kesme katsayısı $S_A(\omega_b, \beta_b)$ kullanılarak izolasyon tasarımının yapılabileceğini göstermektedir.

$C_s = S_A(\omega_b, \beta_b)$ ifadesinin gerçeklendiği sabitleştirilmiş temel yapısı ile karşılaştırıldığında taban kesme kuvvetindeki $S_A(\omega_b, \beta_b)/S_A(\omega_s, \beta_s)$ oranındaki azalmanın sabit hız spektrumu durumunda ω_b/ω_s ye eşit olup yaklaşık olarak $\epsilon^{1/2}$ kadardır. Bu ifade taban kesme kuvvetindeki azalmayı göz ardı eder çünkü β_b genellikle β_s den daha büyüktür [4].

2.2 Kuramın Binalar İçin Genişletilmesi

2.2.1 M-Serbestlik Dereceli Sistemlerin Hareket Denklemi

Basit lineer model için daha önceden geliştirilen iki serbestlik dereceli analiz çok katlı binalar için kullanılabilir. Bu bölümde kütle matrisi $[M]$, sönüm matrisi $[C]$ ve rijitlik matrisi $[K]$ kullanılarak bu binanın yapısal sistemini tanımlanacaktır. Geleneksel temele sahip bir bina için, her bir serbestlik derecesine ait yere göre göreceli yer değiştirme $[u]$ olmak üzere denklem 2.59 yazılır.

$$[M][\ddot{u}] + [C][\dot{u}] + [K][u] = -[M][r]\ddot{u}_g \quad (2.59)$$

Burada $[r]$ yer hareketine göre her bir serbestlik derecesi için eşleştirilen bir vektördür. Bu yapısal model taban yalıtım sistemi üzerinde taban kütlesi m_b , rijitlik k_b ve sönüm c_b ifadeleri kullanılarak türetildiğinde denklem 2.59 denklem 2.60 halini almaktadır.

$$[M][\ddot{v}] + [C][\dot{v}] + [K][v] = -[M][r](\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) \quad (2.60)$$

Denklem 2.60 ifadesinde $[v]$ taban döşemesine göre görelî yer değıştirme ifadesi olup v_b yere göre taban döşemesinin yer değıştirmesini ifade etmektedir. Toplam hareket denklemi bu notasyonlar doğrultusunda denklem 2.61 haline gelmektedir.

$$r^T M (\ddot{v} + r \ddot{v}_b + r \ddot{u}_g) + m_b (\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0 \quad (2.61)$$

Denklem 2.61 sadeleştirilirse ve tekrar düzenlenirse denklem 2.62 halini alır.

$$r^T M \ddot{v} + (m + m_b) \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b) \ddot{u}_g \quad (2.62)$$

Denklem 2.62'de $r^T M r$ ifadesini yapının toplam kütlesi olan m cinsinden tanımlar, bu yüzden $m + m_b$ toplamı, izolasyon sistemi üzerindeki toplam taşınan kütleyi göstermektedir. Bu denklemin matris formu denklem 2.63 gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} m + m_b & r^T M \\ M_r & M \end{bmatrix} [\ddot{v}] + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} [\dot{v}] + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} [v] = - \begin{bmatrix} m + m_b & r^T M \\ M_r & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.63)$$

Denklem 2.63'deki $[v]$ matrisi $v = \begin{bmatrix} v_b \\ v \end{bmatrix}$ şeklinde gösterilir.

2.2.2 M- Serbestlik dereceli sistemin modal analizi

Ankastre mesnetli yapılan doğal modları $[\Phi]^i$ ($i=1,2,\dots,N$) şeklinde yazılmaktadır. Bu mod şekillerinin ifadesi, her bir serbestlik derecesinin yer değıştirmesi olarak denklem 2.64 ile ifade edilir.

$$[v] = \sum_{i=1}^N q_i \Phi^i \quad (2.64)$$

ω_i^2 doğal açısal hızlar denklem 2.65 ile ifade edilir.

$$[M][\Phi]^i \omega_i^2 = [K][\Phi]^i \quad (2.65)$$

Hareketin matris denklemi $N+1$ eşitliklerine indirgenirse denklem 2.66 ve denklem 2.67 yazılır.

$$\sum_{i=1}^N r^T M \Phi^i \ddot{q}_i + (m + m_b) \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b) \ddot{u}_g \quad (2.66)$$

$$\ddot{q}_i + 2\omega_i \beta_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -L_i (\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) \quad (2.67)$$

Denklem 2.67'de ifade edilen L_i nin ankastre mesnetli yapının modlarının katılım oranını göstermekte ve denklem 2.68 ile ve ankastre mesnetli yapının modal kütleleri denklem 2.69 ile ifade edilir.

$$L_i = \frac{\Phi^{iT} M r}{\Phi^{iT} M \Phi^i} \quad (2.68)$$

$$M_i = \Phi^{iT} M \Phi^i \quad (2.69)$$

Denklem 2.68 ve denklem 2.69, denklem 2.66 ve denklem 2.67'de yerlerine yazılır ve sadeleştirme yapılırsa denklem 2.70 ve denklem 2.71 yazılır.

$$\sum_{i=1}^N \frac{L_i M_i}{m + m_b} \ddot{q}_i + \ddot{v}_b + 2\omega_b \beta_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (2.70)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{L_i M_i}{m + m_b} \ddot{q}_i + \ddot{v}_b + 2\omega_b \beta_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (2.70)$$

$$L_i \ddot{v}_b + \ddot{q}_i + 2\omega_i \beta_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -L_i \ddot{u}_g \quad (i=1,2,\dots, N) \quad (2.71)$$

Sismik izolasyonlu yapı ilk moddan daha yüksek olan pek çok mod örneğinde, modlar yapının tasarım aşamasında ya da izolasyonlu sisteminde hiçbir rol oynamamaktadır. Bu sebeple sadece ilk modun dikkate alınması gerekmektedir.

Hareket denklemleri denklem 2.70 ve denklem 2.71'de daha önceden tanımlanan denklem 2.12 ve denklem 2.13'de bir serbestlik dereceli izolasyonlu sistemi yapısıyla karşılaştırmak için, basitleştirilmiş analizdeki v_b ifadesini $L_1 v_b$ ile ve $\ddot{u}_g$ ifadesini $L_i \ddot{u}_g$ ile değiştirir ve yerine koyarsak denklem 2.72 ve denklem 2.73 ile sadeleştirilise denklem 2.74 ve denklem 2.75 genel denklem elde edilir.

$$\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{M} \quad (2.72)$$

$$\gamma_1 = \frac{L_1^2 M_1}{m + m_b} \quad (2.73)$$

Genel denklemler;

$$\frac{L_1^2 M_1}{m + m_b} \ddot{q}_1 + L_1 \ddot{v}_b + 2\omega_b \beta_b L_1 \dot{v}_b + \omega_b^2 L_1 v_b = -L_1 \ddot{u}_g \quad (2.74)$$

$$(L_1 \ddot{v}_b) + \ddot{q}_1 2\omega_1 \beta_1 \ddot{q}_1 = -L_1 \ddot{u}_g \quad (2.75)$$

Denklem 2.75 ve denklem 2.75 çözümünden, basit anlamda bir serbestlik dereceli sistemlerde q_1 takip eden v_s değerlerinin sonuçları bulunmaktadır. Tek serbestlik dereceli sistemler için basit sonuçlar denklem 2.76 ve denklem 2.77 ile yazılır

$$|v_b|_{\max} = \frac{1}{\omega_b^2} S_A(\omega_b, \beta_b) \quad (2.76)$$

$$C_s = [S_A(\omega_b^*, \beta_b^*) + \epsilon^2 (1 - \gamma)^2 S_A^2(\omega_s^*, \beta_s^*)]^{1/2} \quad (2.77)$$

Maksimum görelî taban yer değıştirmesi denklem 2.78 ile ifade edilir.

$$|L_1 v_b|_{\max} = \frac{1}{\omega_b^2} L_1 S_A(\omega_b, \beta_b) \quad (2.78)$$

L_1 her iki tarafta da yok edilirse daha önce elde edilen sonuçlar elde edilmiş olur. Taban kesme kuvvetinin belirlenmesi için denklem 2.79 yazılır.

$$|q_1|_{\max} = \left[\frac{\epsilon^2 L_1^2 S_A^2(\omega_b, \beta_b)}{\omega_b^4} + \frac{\epsilon^2 L_1^2 S_A^2(\omega_s, \beta_s)}{\omega_s^4} \right]^{1/2} \quad (2.79)$$

ϵ yerine de $\epsilon_1 = \frac{\omega_b^2}{\omega_1^2}$ yazılır, sönüm kombinasyonları ihmal edilerek görelî yer değıştirme vektörü $[v]$ denklem gibi ifade edilirse denklem 2.80 yazılır.

$$[v] = q_1 [\Phi]^1 \quad (2.80)$$

Her bir eleman için kuvvetler denklem 2.81 ile yazılır.

$$F = Kv = q_1 K \Phi^1 = q_1 M \Phi^1 \omega_1^2 \quad (2.81)$$

Üst yapıdaki toplam kuvvetler denklem 2.82 ile yazılır ve taban kesme kuvveti denklem 2.83 cinsinden ifade edilirse bu terimler tekrar yazılır ve sadeleştirilirse sonuç olarak taban kesme kuvveti denklem 2.84 ile ifade edilir.

$$r^T F = q_1 \omega_1^2 L_1 M_1 \quad (2.82)$$

$$C_s m = r^T F \quad (2.83)$$

$$\begin{aligned}
C_s &= \frac{L_1 M_1}{m} [L_1^2 S_A^2(\omega_b, \beta_b) + (1 - \gamma_1)^2 \epsilon^2 L_1^2 S_A^2(\omega_s, \beta_s)]^{1/2} \\
&= \frac{L_1^2 M_1}{m} [S_A^2(\omega_b, \beta_b) + (1 - \gamma_1)^2 \epsilon^2 S_A^2(\omega_s, \beta_s)]^{1/2}
\end{aligned} \tag{2.84}$$

Daha önceden belirtildiği gibi burada da $\epsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_1^2}$ ifadesinden faydalanılır.

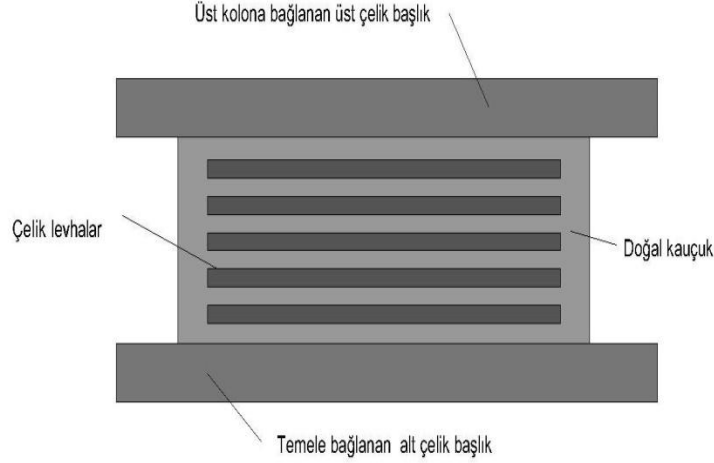
3. SİSMİK İZOLATÖRLERİN SINIFLANDIRILMASI

Pasif kontrol sistemlerinden sismik izolatörler temel olarak kauçuk esaslı, kayma esaslı, yay tipi ve diğer sistemler olmak üzere dört ana başlık altında incelenecektir.

3.1 Kauçuk Esaslı Sistemler

3.1.1 Düşük sönümlü kauçuk izolatörler

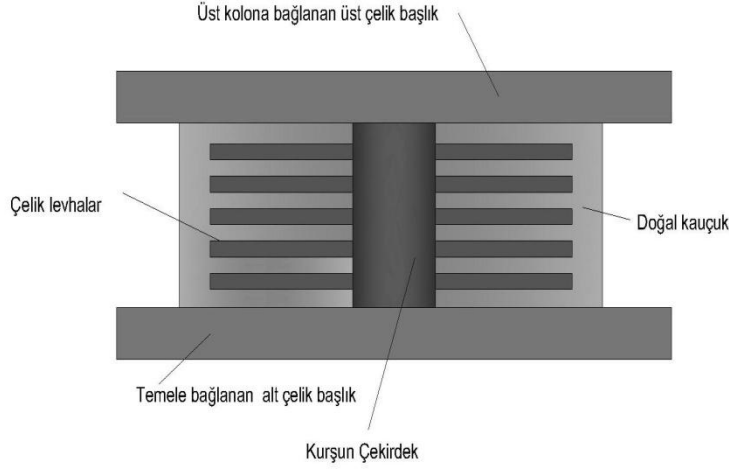
Bu mesnetlerin kalınlığı genelde 8 mm, 20 mm arasında değişen tabakaların üst üste getirilmesi ile oluşmaktadır. Son yıllarda kauçuk tabakaların arasına şekil 3.1'de gösterildiği gibi ince çelik veya sac levhalar konularak ısı ve basınç uygulanmasıyla birbirine yapıştırılır; bu sayede, yatay rijitlikte hemen hemen herhangi bir katkı sağlamayıp ancak mesnedin düşey yük kapasitesini ve rijitliğini artırırken, yatay yönde şişmesini ve yanal deformasyonuna engel olmaktadır. Alt ve üst başlıklarında kalınca çelik levhalar ile tutturulur. Kolay modellenebilir olup, zaman yaşlanması ve sıcaklıktan etkilenmezler. Uzun ömürlü, kolay üretilebilir ve düşük maliyetlidirler. Elastomer mesnetler düşey doğrultuda rijit olup, yatay yönde ise esnektir. Yatay rijitlikleri tabaka kalınlığına ve sayısına bağlıdır. Yatay yöndeki düşük rijitliklerinden dolayı, kayma şekil değiştirmesi %100-250 oranında doğrusal davranış göstermektedir. Yapısal olarak %2 ile %3 arasında değişen düşük viskoz sönüm oranına sahiptir. Elastomerik mesnetlerin düşük kritik sönümlerinden dolayı yatay yüklerde çok fazla yer değiştirmekte olup ilave olarak sönümleyici diğer cihazlarla birlikte kullanılır.



Şekil 3.1: Düşük sönümlü kauçuk izolatör.

3.1.2 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler

Kurşun çekirdekli mesnetler, şekil 3.2'de gösterildiği gibi, düşük sönümlü elastomerik mesnetlere benzemesine karşın, ek olarak bir veya birden fazla kurşun çubukların uygun deliklere yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur [4]. Bu yöntem ilk defa 1975 yılında Yeni Zelanda'da kullanılmıştır. Kurşun çekirdekler yaklaşık olarak 10 MPa civarında gibi düşük gerilmelerde akmaya başlayan, tekrarlı yüklere karşı direnç kabiliyeti gösterebilen elastoplastik bir malzemedir. Düşük yatay yüklerde, kurşun çekirdek yüksek rijitlik ve doğrusal davranış gösterir. Kurşun çekirdeğe etkiyen yatay kuvvetler arttıkça çelik levhaların hareketiyle kurşun çekirdeğin akmasını zorlar ve sistem bilineer davranış gösterir. Kurşun çekirdeğin plastik şekil değiştirme sebebiyle çevrimsel bir davranış gösterir ve sonraki çevrimlerde rijitliği azalır. Sistem, %10 ile %35 arasında değişen yüksek enerji sönümleme oranına sahiptir. Kurşun çekirdekli mesnetlerin sakıncası, yüksek şiddetli depremden sonra kurşun çekirdeğin zarar görüp görmediğinin dışarıdan tespit edilememesidir.



Şekil 3.2: Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet örneği.

3.1.3 Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler

Yüksek sönümlü elastomerik mesnetler, doğal veya sentetik kauçuk malzemesine karbon blokları, özel yağ veya reçine ve diğer katkı maddeleri ilave edilmesiyle oluşturulan sönüm oranı yüksek sismik izolasyon cihazıdır. %100 kayma şekil deformasyonlarında, sönüm %10 ile %20 arasında değişmektedir [4]. Sönüm, karakteristik viskoz veya histerik davranış göstermeyip, bu ikisinin karışımı şeklinde olmaktadır. %20 ile %120 kayma deformasyonlarında kayma modülü sabit ve düşük olmaktadır. Bu nedenle kauçukların arasına çelik levhalar yerleştirilerek burulma serbestliği bir miktar azaltılır. Yine çelik levhalar düşey yük kapasitesini artırır. Yatay rijitlik kauçuk sayısı ve kalınlığına bağlıdır. Tabakaların sayısının artması yatay rijitliği azaltmakta ve burkulma olasılığını artırmaktadır. Bu yüzden yükseklik sınırlı tutulur.

Yüksek sönümlü elastomerik mesnetler düşük kayma şekil değiştirmelerinde lineer olmayan davranış gösterir. Bu yüzden düşük büyüklükteki deprem, rüzgâr, trafik yükleri gibi dinamik yüklerin düşük frekanslı titreşimlerine karşı yüksek rijitlik ve yüksek sönüm davranış gösterir. Mekanik karakteristikleri zaman, sıcaklık ve yüklemeler ile değişir.

3.2 Kayma Esaslı Sistemler

Kayma esaslı sistemler, en basit haliyle deprem enerjisini sürtünme yoluyla sönümleme prensibi ile çalışan sistemlerdir. Bu tip sistemlerde sürtünme yüzeyi

olarak çelik paslanmaz metal, teflon veya sürtünme karakteri gösterebilen diğer malzemeler kullanılarak yapıya etkiyen deprem ivmeleri azaltılmaya çalışılmıştır. Kayma esaslı sistemler, elastik sistemlere nazaran izolasyonlu yapının doğal periyodundan ve deprem hareketinin frekansından etkilenmemesi avantaj sağlamaktadır. Sürtünme katsayısı sistemin kayıp kaymayacağını belirleyen en büyük parametredir. Bu sistemler sıcaklık, ara yüzey hareketinin hızına, aşınma derecesine ve yüzeyin temizliğine bağlıdır [6].

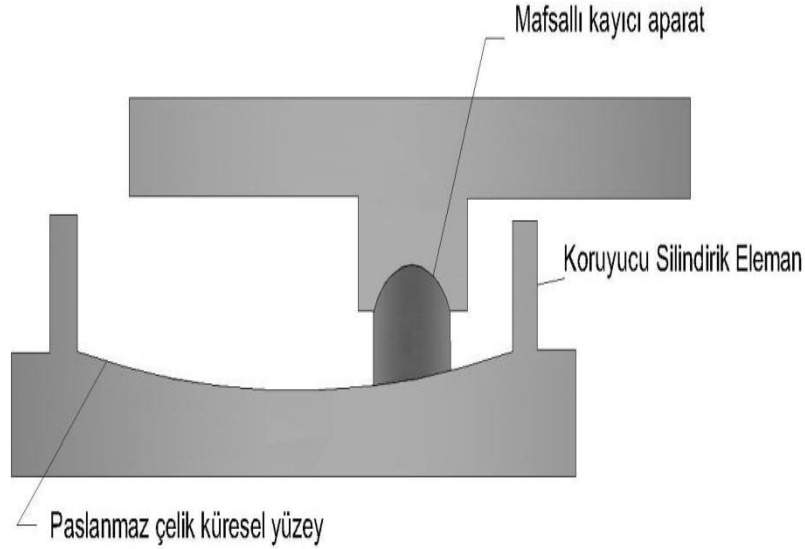
3.2.1 Sürtünmeli sarkaç sistemler

Kayma esaslı sistemlerde yapıya etkiyen deprem kuvvetleri azaltılmasına rağmen, sistemin başlangıç noktasına yani yapının ilk konuma gelememesi en büyük problemdir. Bunun nedeni mesnede etkiyen yatay kuvvetin, sürtünme nedeniyle oluşan kuvvetten küçük olmasıdır. Dolayısıyla, deprem hareketi sırasında mesnedin ilk konumundan daha uzakta kalmasına neden olarak mesnet sınırlarını zorlayarak arızalar oluşabilmektedir. Bu probleme çözüm olarak geliştirilen sürtünmeli sarkaç mesnedi, kayma hareketi ve yapının ilk konuma gelmesini yani geri dönüş kuvvetini sağlayacak geometrik özelliklere sahiptir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi sürtünmeli sarkaç mesnetler paslanmaz çelikten küresel bir yüzey üzerinde hareket eden mafsallı kayıcıya sahiptir. Küresel sürtünmeli yüzey paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Yatay kuvvetler, yapının yukarı yükselmesini ve dolayısı ile yapının kendi ağırlığı mesnet merkezine doğru geri dönüşü sağlamaktadır.

Sürtünmeli sarkaç mesnedin küresel yüzey ile kayıcı mafsallı arasında oluşan sürtünme sönüm etkisi yapmaktadır. Sürtünmeli sarkaç mesnedin efektif rijitliği ve yapının periyodu küresel yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlı olup yapının ağırlığından bağımsızdır.

Sürtünmeli sarkaç mesnedinde, kayıcı mafsalla etkiyen yatay kuvvetler statik sürtünme kuvvetinden ancak büyük olduğunda harekete geçmektedir. Mesnede etkiyen düşey yükler ve kayma hızı mesnedin performansını etkilemektedir. Yüksek düşey yükler sürtünme katsayısını azaltırken, yüksek hızlar sürtünme katsayısını artırmaktadır. Sürtünmeli sarkaç mesnedi, elastomerik mesnetlerde olduğu gibi sıcaklıktan etkilenmektedir. Bunun yanında kayıcı mafsallı yüksek hızlardan dolayı oluşan ısı ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişmektedir. Dolayısı ile kaymaya bağlı olarak oluşan ısının hızlara etkisi ve bu hızların mesnet kapasitesine etkisi tasarım sırasında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Sürtünmeli sarkaç mesnedinin kayıcı mafsalı üst ve alt olmak üzere iki tarafta da koyulabilir. Üst tarafta koyulduğunda mesnette ikincil p-delta momentleri ortaya çıkmaktadır.

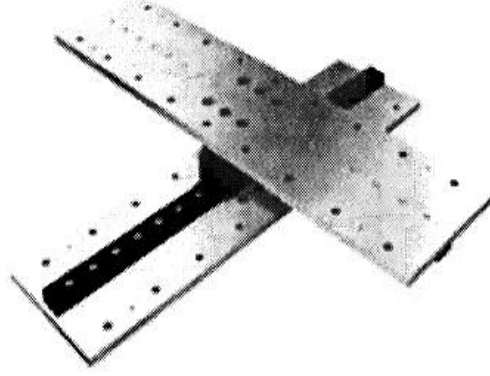


Şekil 3.3: Sürtünmeli sarkaç mesnet.

3.2.2 Çapraz raylı mesnetler

Çapraz raylı mesnetler, şekil 3.4 ve 3.5'te gösterildiği gibi elastomerik mesnetlerdeki çekme kopmaları, burulma ve burkulma sorunlarına çözüm olarak Japonya'da üretilmiştir. Özellikle düşey yükleri karşılaması sebebiyle Japonya'da çokça kullanılmaktadır. Bu mesnetler birbiriyle çapraz iki raylardan ve sürtünme katsayısı düşük ve mukavemetli çelik bilyelerden oluşmuştur. Çapraz raylar iki yönde hareket etmesini sağlamaktadır. Çapraz raylı mesnetlerin çekme dayanımları yüksektir. Yatay rijitliğini belirleyen sürtünme katsayısı özel yerleştirilmiş çelik bilyeler sayesinde çok düşük olmaktadır. Bu mesnetler, hafif yapılarda, yüksek katlı binalarda sismik olaylara bağlı olarak oluşan çekme dayanımlarını ve devrilme momentlerini karşılamasında, taşıma gücü düşük ve periyodu uzun zeminlerde, yüksek periyotlu yapılarda başarı bir şekilde kullanılmıştır. Mesnedin taşıma kapasitesini, bilyelerin sayısı ile sayısı ve ray sayısı belirlemektedir. Japonya menşeli THK firması, %0,5 ile %0,8 arasında değişen düşük sürtünme katsayıları ile basınç

kapasitesi 61190 KN ve çekme kapasitesi 8680 KN olan çapraz raylı mesnetler üreterek başarılı bir şekilde binalara uygulamıştır [15].



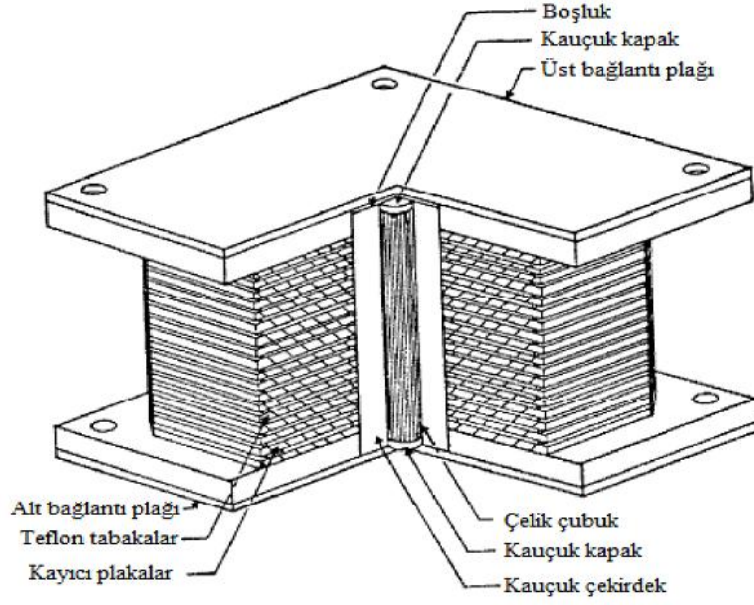
Şekil 3.4: Çapraz raylı mesnet örneği [15]



Şekil 3.5: Çapraz raylı mesnet örnekleri [16].

3.2.3 Esnek-sürtünmeli izolatörler

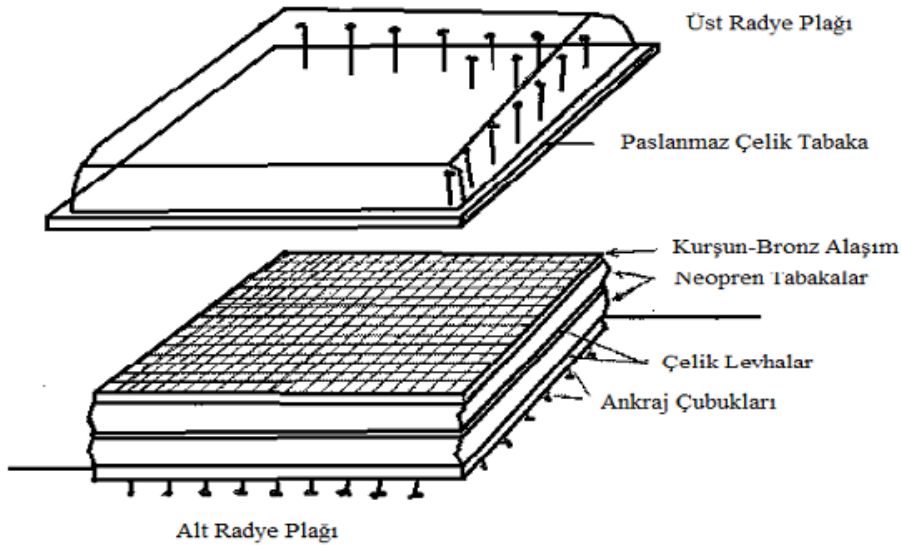
Şekil 3.6'da gösterilmiş olan esnek sürtünmeli izolatörler kayma esaslı sistemlerde temel parametre olan sürtünme katsayısı, hıza ve yüzey alanına bağlıdır. Deprem hareketlerinde mesnetlerde oluşan yüksek hızlar sürtünme katsayısını artırmakta ve yatay rijitliği istenmeyen şekilde artırıp, sistemin çalışmasını engellemektedir. Bu sorunu çözmek adına geliştirilen elastik sürtünmeli taban izolatör sistemi ile birbirinin üzerinde kayan tabakalar daha düşük hızlar elde edilerek dolayısı ile sürtünme katsayısı düşürülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu tabakaların ortasına yerleştirilen ancak herhangi bir düşey yük taşımayan elastomerik ve çelik çekirdek bulunmaktadır. Bu çekirdek, sistemin kayan tabakaları başlangıç konumuna getirir ve sistemin rijit ve homojen çalışmasını sağlar [17].



Şekil 3.6: Elastik sürtünmeli taban izolator sistemi [17].

3.2.4 Elektrik-Fransız sistemi

Elektrik Fransız kurumu tarafından 1970'lerde geliştirilen bu sistem Şekil 3.7'de gösterilen neopren tabakalar ile paslanmaz çelik ile temas halinde olan kurşun-bronz alaşımlı yüzeylerden oluşur. Yapılan çalışmalarda elektrik Fransız sistemi mesnedinin sürtünme katsayısı 0,2 olarak belirlenmiştir. Bu mesnedin dezavantajı olarak başlangıç konumuna geri döndürücü herhangi bir kuvvetin olmayışı, kalıcı yer değiştirmelere neden olmaktadır [4].



Şekil 3.7: Elektrik Fransız izolator sistemi [17].

3.2.5 Deprem araştırma merkezi birleşik sistemler

Bu sistemde elastomerik ve kayma esaslı sistemler birlikte kullanarak yapıya gelen sismik aktiviteyi en aza indirilmeye çalışılmıştır. Yapının dış kolonlarında düşük sönümlü elastomerik mesnetler kullanarak stabiliteyi sağlamak, iç kısımlarda ise kayma esaslı sistemler kullanarak sönümleme yapılması amaçlanmıştır.

3.2.6 TASS sistemi

Japonya'nın Taisei firmasının geliştirdiği bu sistemde temel olgu, tüm düşey yükler yassı teflon-çelik tabakalar tarafından taşınır. Düşey yük almayan ve sadece yatay yük alabilen neopren malzemeler yapının merkezleşmesini sağlar. Bu sistemlerde hızlara bağlı olarak sürtünme katsayısını ayarlayabilmek çok zor olduğu gibi, buna bağlı olarak neopren malzemesinin çekme alması bu mesnedin dezavantajları olarak sıralanabilir.

3.3 Yay Tipi Sistemler

Yatay yükleri karşılamak amacıyla elastomerik ve kayma esaslı sistemler kullanılırken, düşey doğrultudaki deprem etkilerini azaltmak için genellikle yay esaslı sistemler kullanılır. Şekil 3.8'de gösterilen yay tipi sistemlerde helisel yay tek başına veya bunun yanında viskoz sönümleyici sıvılar kullanılır. Tek başlarına etkili değildirler.



Şekil 3.8: Yaylı izolatör [18].

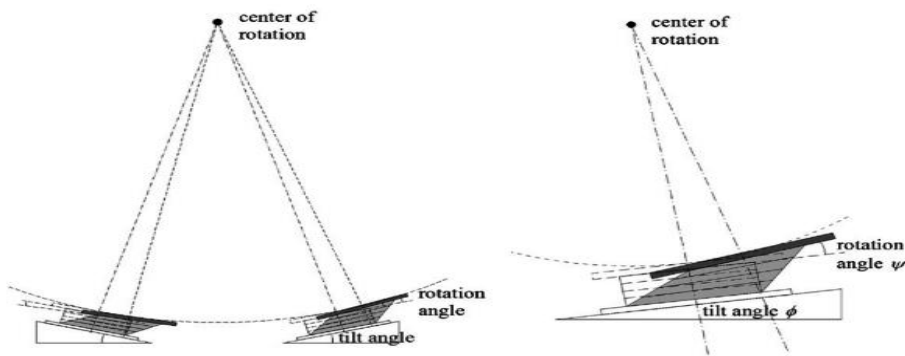
3.4 Son Gelişmeler İle Diğer Sistemler

Son yıllarda yapıya etkiyen deprem enerjisini azaltmak amacıyla bilim adamları yoğun çalışmışlardır. İtalya'nın Napoli kentinde ilk defa uygulanan süspansiyonlu

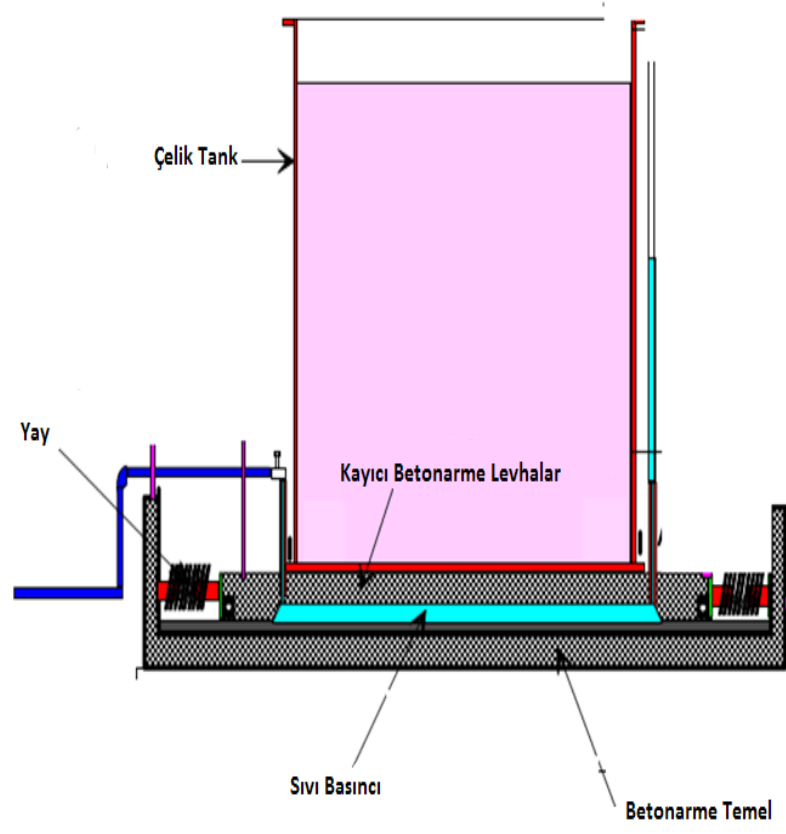
sarkaç izolatörleri (suspended pendulum isolator) geleneksel izolatör tekniklerin dezavantajını kaldırabilmek amacıyla geliştirilmiştir. Süspansiyonlu sistemler, kurşun çekirdekli izolatörlerin kuvvet-şekil değiştirme grafiğine benzer bir davranış gösterirken, temel olarak sürtünmeli sarkaç ve kurşun çekirdekli izolatör felsefesi ile geliştirilmiştir. Bunların dışında asma köprülerin kablolarında enerji sönmüleyici olarak kullanılan süspansiyonlu sistemler son yıllarda kullanılan teknikler arasındadır.

Bunların yanında yuvarlanabilen küre sistemi (Rolling ball isolation system) ve stabil fiber güçlendirilmiş elastomerik sismik izolasyon (stable unbonded fiber reinforced elastomeric seismic isolation) gibi prototipi çok eski zamanlara ait olmasına rağmen bu sistemlerin gelişimi hızla devam etmektedir. Sabit çekirdekli izolasyon sistemi (core suspended isolation), çalışma prensibi şekil 3.9'da gösterildiği gibi, genellikle çok özel yapıların tepelerinde kullanılan iki katmandan oluşan ve sürtünmeli sarkaç sistemi mekanizması ile çalışan elastomerik eğimli izolatörlerdir [19].

Özellikle sanayi ve önemli yapılarda alternatif izolasyon yöntemi olarak kullanılan hemen hemen havada yapı sistemi (almost lifted structure concept) şekil 3.10'da gösterildiği gibi yine yapının belli bir platform üzerinde kayarak deprem etkileri azaltılmaya çalışır. Hemen hemen havada yapı sisteminde; betonarmeden oluşmuş bir tabakadan temel yapılır. Bu temelin üzerine yapıya bağlanmış ve kaymasını sağlayacak ayrı bir tabaka inşa edilir. Tabakalar arasına sönmüleyici olarak sıvı yerleştirilir ve merkezleşmeyi sağlayacak yaylar kullanılır [20].



Şekil 3.9: Sabit çekirdekli izolasyon [19].



Şekil 3.10: Almost lifted structure concept (ALSC) [20].

4. SİSMİK İZOLATÖRLERİN MEKANİK KARAKTERİSTİKLERİ

4.1 Giriş

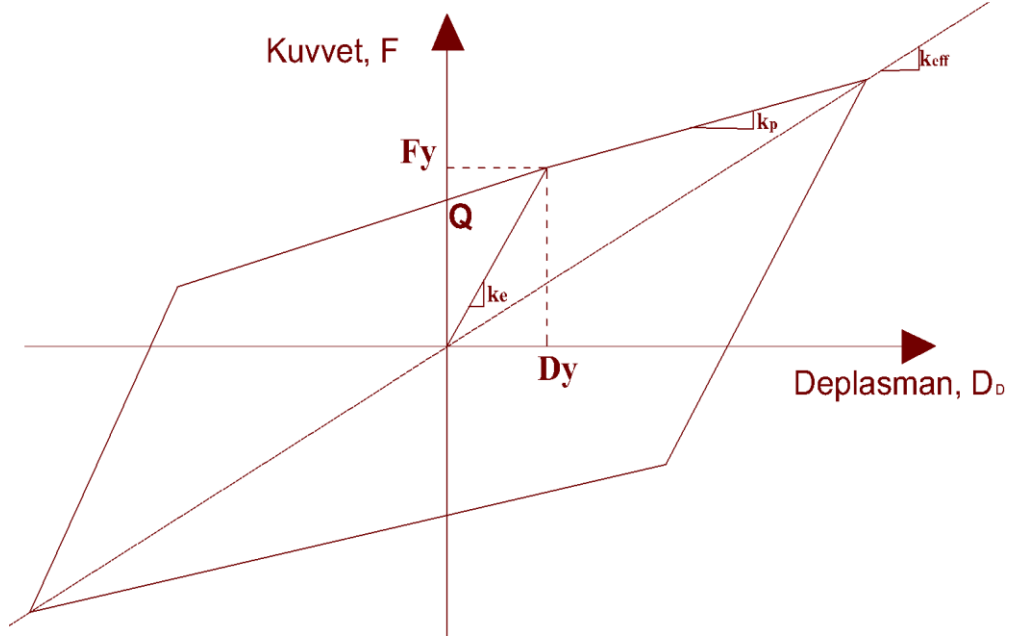
Bir önceki bölümde sismik olarak yalıtılan bir binanın matematiksel modellemesi yapılmıştır. Bu modelde, sismik izolasyonlu yapının yatay ve düşey kuvvetler altında yapının doğrusal davranış şekil gösterdiği varsayılmıştır. Ancak gerçekte hem yapının hem de sismik izolasyon elemanlarının lineer bir davranış göstermemektedir. Bunun temel neden olarak malzemenin yükler altında doğrusal-elastik bir davranış göstermemesi ve dolayısıyla gerilme şekil değiştirme denklemlerinin doğrusal olmamasıdır. Bir diğer neden ise sistemin geometrik değişimlerinin denge denklemlerini ve geometrik sürekliliğini değiştirmesidir. Bunların yanında yakın fay etkisini ve yumuşak zeminin bu modelde doğrusal bir davranış göstermemektedir. Bu sebeplerden dolayı sistemin analitik çözümlemelerde doğrusal modellemenin yetersiz kaldığı ve bu buna çözüm olarak doğrusal olmayan çözümlerin gerekliliği kanıtlanmıştır.

Doğrusal olmayan çözümlemelerin gerekliliğine rağmen yapının rijitliği, izolasyonlu sisteme göre daha rijit kaldığından, çözümü basitleştirmek adına yapı doğrusal elastik analizler ile çözülerek gerçeğe yakın veriler elde edilir. Diğer taraftan depremin maksimum yükleri altında sistemin izolasyonlu kısmında malzeme her zaman doğrusal davranış göstermediğinden her malzemenin karakteristikleri hakkında doğrusal olmayan çözümlemeler yapılarak sistemin performansı hakkındaki analiz tamamlanır.

4.2 Sismik İzolatörlerin Bilineer Modelleme ile Tasarımı

Yapıların sismik izolatör ile tasarımında izolatörlerin deprem sırasında göstereceği davranış yapının güvenilir ve sağlam olması açısından çok önemlidir. Tasarımdan önce ve tasarım sırasında izolatörlerin nasıl bir davranış göstereceğinin bilinmesi tasarımcıya yardımcı olacaktır. Deneysel çalışmalarda elde edilen bilgilerden faydalanılarak izolatörler hem viskoelastik hem de doğrusal olmayan davranış

gösterdiği belirlenmiştir. Uygulamada daha çok doğrusal olmayan izolatörler kullanıldığı için şekil 4.1'de gösterilen bilineer modelleme yapmak gerekmektedir.



Şekil 4.1: İzolatör Bilineer Modeli

Uygulamalarda sismik izolatörler şekil 4.1'de gösterildiği gibi modellenmekte ve bu modelde temel olarak üç parametre esastır. Bu parametreler, K_e , elastik rijitlik; K_p , akma sonrası rijitlik ve Q , karakteristik dayanımdır. Akma sonrası rijitlik, K_p , histerik deneysel çalışmalarla veya belirli katsayılarla çarpılarak elde edilmektedir. Efektif rijitlik, K_{eff} ile tanımlanmakta ve histeri eğiminin en üst noktasıyla en alt noktasını birleştiren doğru parçasının eğimidir.

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D_D} \quad D_y \leq D_D \quad (4.1)$$

Akma deplasmanı, D_y ; ile K_e , K_p arasındaki ilişki 4.2'de verilmiştir. Q arasındaki ilişki denklem 4.2 ve denklem 4.3 ile ifade edilebilir.

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} \quad (4.2)$$

Karakteristik dayanım Q ve çevrim alanı arasındaki ilişki denklem 4.3 ile verilmiştir.

$$Q = \frac{W_D}{4(D_D - D_y)} \quad (4.3)$$

Sistemin efektif sönümü β_{eff} , histerik eğrisinin alanı, W_D , ile ilişkilidir.

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{W_D}{2\pi K_{\text{eff}} D_D^2} \quad (4.4)$$

$$W_D = 4Q(D_D - D_y) \quad (4.5)$$

4.3 Kauçuk Esaslı İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri

Elastomerik izolatörler genellikle kare veya daire şeklinde olup yapının kendi ağırlığını yüksek düşey rijitlikle ve yatay yükleri daha düşük rijitlikle karşılayan mesnetlerdir. İçindeki çelik levhalar, düşey yönde rijitlik ve yatay yöndeki stabilitesini artırıcı özelliği bulunmaktadır. Bir elastomerik izolatörün mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktörler arasında elastomerik tabakanın geometrisi, içerdiği elastomerik tabaka ve çelik plaka adet ve kalınlıkları ile elastomerin yapımında kullanılan malzeme özelliğidir [21]. İzolatörün yüksekliği aynı zamanda yatay yönde deplasmanını sınırlayan ve periyodu etkileyen parametredir. En önemli mekanik özellik olan yatay rijitlik denklem 4.6 ile ifade edilmektedir.

$$K_H = \frac{GA}{t_r} \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'daki ifadede, G kayma modülü, A mesnedin yüzey alanı ve t_r elastomerik tabakanın toplam kalınlığını ifade etmektedir. Mesnedin yatay yükler altındaki deplasman bağıntısı denklem 4.7 ile gösterilir.

$$\gamma = \frac{D_D}{t_r} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7'de D_D , yatay yükler altındaki tasarım deplasmanı ve γ kayma şekil değiştirmesini ifade eder. Yine deprem düşey titreşimleri izolatörlerin düşey rijitliği tarafından karşılanır. Malzeme belli bir limite kadar lineer kabul edilirse elastik ve kiriş teorisine göre düşey rijitlik K_V denklem 4.8 ile ifade edilir.

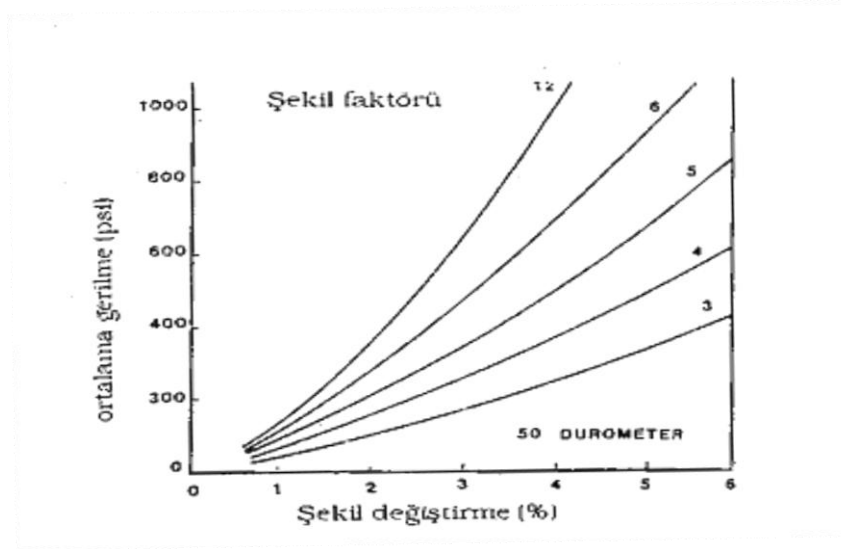
$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \quad (4.8)$$

Denklem 4.8'de E_c düşey yükler altındaki çelik ve elastomerden oluşan kompozit izolatörün anlık basınç modülü, A izolatörün kesit alanı ve t_r izolatör tabakasının toplam kalınlığıdır. K_V bağıntısındaki değişkenlerden basınç modülü E_c şekil izolatörün şekil faktörüne bağlıdır. Şekil faktörü izolatör tabakasının yük alan

alanının yük almayan izolatör kenar alan oranına bağlı olan boyutsuz bir sayıdır. R yarıçaplı ve bir adet t kalınlığındaki dairesel kesitli izolatörler için şekil faktörü denklem 4.9 ile gösterilir.

$$S = \frac{R}{2t} \quad (4.9)$$

Şekil 4.2'de gösterildiği gibi şekil faktörü kayma gerilmesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır [22].



Şekil 4.2: Gerilme-Şekil değiştirme grafiği [22].

Bunun yanında tam dairesel elastomerik izolatörlerin şekil faktörü parametresi ile basınç modülü, E_c , denklem 4.10 ile ifade edilir.

$$E_c = 6GS^2 \quad (4.10)$$

Değişik geometrili sismik izolatörlerin basınç modülü, E_c , ile şekil faktörü, S , arasındaki ilişki çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Farklı kesitlerdeki izolatörlerin şekil ve basınç modülleri

İzolatör Geometrisi	Daire	Boşluklu Daire	Kare	2L genişliğinde şerit
Basınç Modülü (E_c)	$6GS^2$	$6\lambda GS^2$	$6,73GS^2$	$4GS^2$
Şekil Faktörü (S)	$\frac{R}{2t}$	$\frac{y-x}{2t}$	$\frac{a}{4t}$	L/t

Çizelge 4.1'de a, karenin bir kenarını; x, dairesel izolatörün dış yarıçapı; y, dairesel izolatörün iç yarıçapı; olmak üzere λ denklem 4.11 ile hesaplanır.

$$\lambda = \frac{x^2 + y^2 - \left[\frac{(x^2 - y^2)}{\ln\left(\frac{x}{y}\right)} \right]}{(x - y)^2} \quad (4.11)$$

Geleneksel elastomerik izolatörlerin tasarımında şekil faktörü genellikle 15 ile 25 arasında seçilir. Stabilité sorunları azaltmak amacıyla bazen de 30 seçilerek yatay rijitliğin düşey rijitliğe oranı çok yüksek olmaktadır. Dolayısıyla yüksek şekil faktörü çok yüksek düşey rijitliği oluştur. Yüksek düşey rijitlik ile sistemin düşey periyodu 0.03 ile 0.15 saniye arasında oluşur ve izolatörlü sistemde düşey yönde kuvvetlerin elastomerik izolatörlerde çok bir etkisi bulunmayıp, yatay yöndeki kuvvetler tasarımda göz önünde bulundurulmamaktadır. Buna rağmen yapılan çalışmalarda düşey rijitliğin ve şekil faktörünün deprem hareketi sırasında farklı davranışlar gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle eksenel kuvvetler ve yatay kuvvetlerin aynı anda etkimesi durumunda düşey rijitliğin azaldığı yönünde birçok çalışma bulunmaktadır. Keh-Kelly çalışmalarındaki iki yay modeli ile eksenel ve yatay kuvvetlerin aynı anda etkimesinin düşey yöndeki rijitliği hakkında formülasyonlar sunmuştur. Bununla beraber etkin yer hareketi sırasında izolasyonlu sistemlerdeki düşey rijitliğin azalması ve bununla ilgili davranışı belirsiz olup, buna rağmen yapılan birkaç çalışmada düşey rijitliğin azalması izolatörlü yapı sistemlerinin performansında çok önemli etkileri olduğu anlaşılmıştır [23].

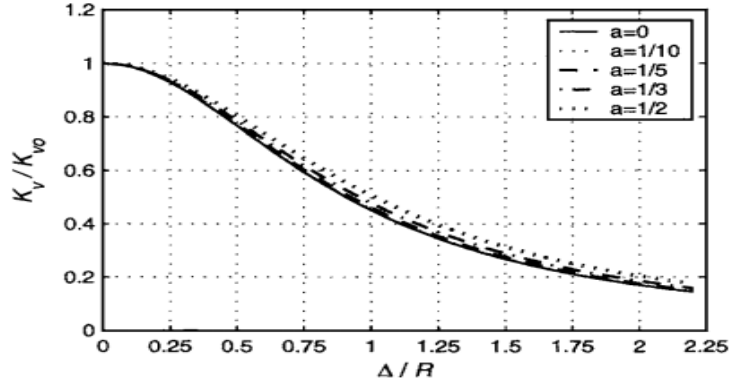
Basınç durumunda sismik izolatörde bulunan çelik levhalar ile sınırlandırılan kayma modülü γ_c ; Δ düşey yerdeğiştirme, ε_c basınç şekil değıştirme olmak üzere denklem 4.12 ile ifade edilebilir.

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta}{t_r} \quad (4.12)$$

Dolayısıyla 4.10 ve denklem 4.12 yerine yerleştirilerek denklem 4.13 elde edilir.

$$\gamma_c = 6S\varepsilon_c \quad (4.13)$$

Elastomerik izolatörlerin düşey rijitlikleri yatay deformasyonlara bağlı olarak azaldığı yönünde ilgili grafik şekil 4.3'te görülmektedir. Görüldüğü gibi dairesel elastomerik izolatörlerde yatay deformasyon sıfır iken düşey rijitlik başlangıç konumunda olmakta ve en yüksek değerdedir. Deformasyonlar arttıkça ilk düşey rijitlik azaltmaktadır [23].

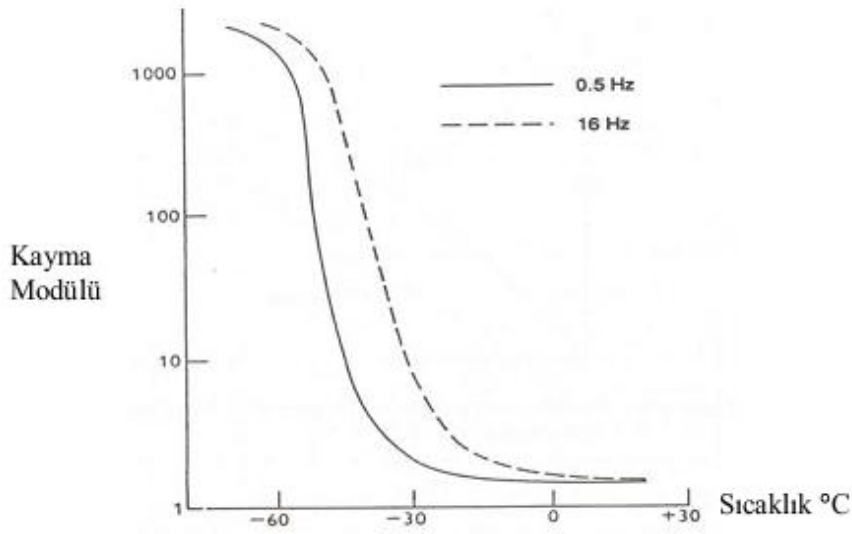


Şekil 4.3: Düşey rijitlik-yatay deformasyon eğrisi [23].

Elastomerik izolatörlerde yatay ve eksenel kuvvet altındaki tam dairesel kesitli izolatörler için burkulmaya yönelik stabilite hesaplarında sıklıkla kullanılan formülasyon denklem 4.14 ile verilmiştir.

$$P_{cr} = \left(\frac{A\pi GSR}{\sqrt{2}t_r} \right) \quad (4.14)$$

Elastomerik izolatörlerin dayanımı zaman ve sıcaklıkla değişmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda elastomerik izolatörlerin şekil 4.4'te görüldüğü gibi düşük sıcaklıkta daha gevrek dolayısıyla daha rijit olduğu ortaya çıkmıştır [24].



Şekil 4.4: Kayma modülü-Sıcaklık eğrisi [24].

4.4 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri

Kurşun çekirdekli izolatörler genellikle düşük sönümlü kauçukların merkezinde kurşun çekirdek bulunup düşük kayma gerilmelerinde kayma olmakta, normal sıcaklıkta 8 MPa ile 10 MPa arasında akmaktadır. Kurşun çekirdekli sistemler birçok yüklemelere rağmen histerik davranışı yeterince stabil olmaktadır. Bilineer olarak modellenmektedir. Karakteristik dayanım Q , kurşun çekirdeğin alanı, A_1 , ve kurşun çekirdeğin akma gerilmesi f_{y1} ile ilişkilendirilip denklem 4.15 ile gösterilir.

$$Q = A_1 f_{y1} \quad (4.15)$$

Akma sonrası rijitlik, K_p denklem 4.16 ile ifade edilir.

$$K_p = \frac{GA}{t_r} \quad (4.16)$$

A , kauçuk malzemenin kesit alanı; t_r , kauçuk malzemenin toplam kalınlığıdır. G , kauçuğun kayma modülüdür. K_e , elastik rijitlik deneysel çalışmalardan elde edilen bir takım katsayılarla çarpılarak bulunmaktadır. Genellikle akma sonrası rijitliğin, K_p , 6.5 ile 10 katı kadar alınır. Akma kuvveti F_y , denklem 4.17 ile ifade edilir.

$$F_y = K_p D_y + Q \quad (4.17)$$

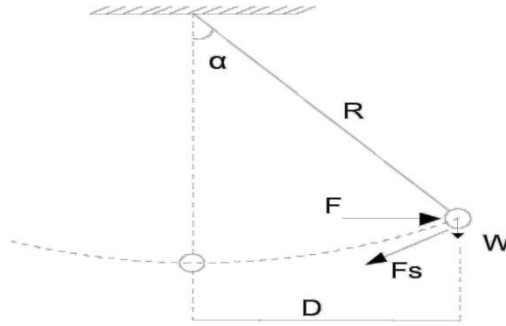
Son olarak efektif rijitlik, K_{eff} , ve efektif sönüm β_{eff} , denklem 4.18 ve denklem 4.19 ile ifade edilebilir.

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D_D} \quad (4.18)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D_D - D_y)}{\pi K_{eff} D_D^2} \quad (4.19)$$

4.5 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerinin Mekanik Karakteristikleri

Sürtünmeli sarkaç sistemlerinde belli bir eğrisel bir yarıçapa sahip özel yüzeylerde deprem hareket enerjisi sürtünme dolayısıyla ısıya dönüşür. Bu tip mesnetler küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı R , kütle W , yer değiştirme D , ve sürtünme kuvveti F_s , sürtünme katsayısı μ parametreleri ile şekil 4.5'de olduğu gibi modellenir.



Şekil 4.5: Sürtünmeli sarkaç sistem modeli.

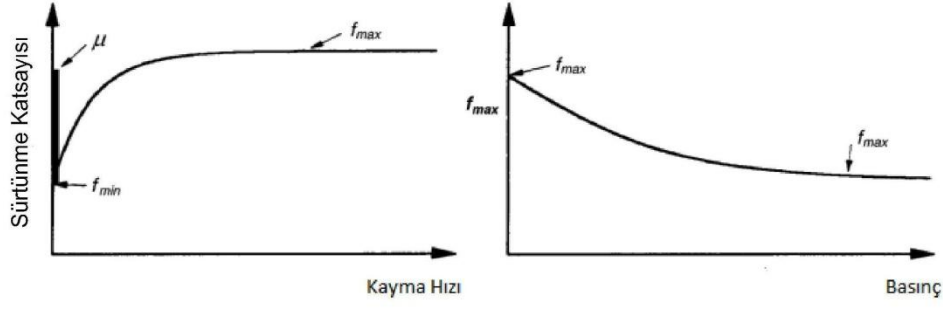
Sisteme gelen tepki kuvveti F , denklem 4.20 ile ifade edilir.

$$F = \frac{W * D}{R} + \mu * W * \text{sign}(\dot{D}) \quad (4.20)$$

$\text{sign}(\dot{D})$, kayma hızına bağlı olarak işaret fonksiyonudur. μ kayma sürtünmesi katsayısıdır ve kayma hızına bağlıdır ve teflon ve kompozit bazlı teflon yüzeylerde yaklaşık olarak denklem 4.21 şeklinde ifade edilir.

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min})e^{-\xi|\dot{D}|} \quad (4.21)$$

Denklem 4.21'de f_{max} , yüksek hızlardaki sürtünme katsayısını, f_{min} ise düşük hızlardaki sürtünme katsayısını, ξ , kayma hızını belirleyen ve deneysel olarak bulunan bir katsayı ve $\dot{D}$ kayma hızını ifade etmektedir. Şekil 4.6'da kayma hızına ve basınca bağlı sürtünme katsayılarının değişimini göstermektedir.



Şekil 4.6: Kayma hızına ve basınca bağlı sürtünme katsayılarının değişimi [25].

Sistemin akma sonrası yatay rijitliği, K_H ;

$$K_H = K_p = \frac{W}{R} \quad (4.22)$$

şeklinde olup sistemin periyodu ise kütleden bağımsız olup denklem 4.23 ile ifade edilebilir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (4.23)$$

Sürtünmeli sarkaç izolatörün efektif rijitliği, K_{eff} ; efektif sönüm β_{eff} ; ve düşey deplasmanı Δ ; denklem 4.24, denklem 4.25 ve denklem 4.26 ile gösterilir.

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D} = \frac{W}{R} + \frac{\mu * W}{D} \quad (4.24)$$

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} D_D^2} = \frac{2\mu}{\pi \left(\frac{D}{R}\right) + \pi\mu} \quad (4.25)$$

$$\Delta = R \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{D}{R} \right) \right] \quad (4.26)$$

5. SİSMİK İZOLASYONLU YAPI TASARIMINDA YÖNETMELİK ŞARTLARI

Yapılarda depreme karşı dayanım kapasitesini artırmaktan çok deprem hasar potansiyelini azaltmak amacıyla kullanılan sismik izolatörler, büyük depremlerde genellikle elastik kalarak iyi performans oluşturmalarını sağlarlar.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından 2007'de yayımlanan "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliği" (TDY 2007) sismik yalıtım ile ilgili olarak bölüm 1.1.6 ve 1.1.7 de şartları şöyledir.

1.1.6 - Bina taşıyıcı sistemini deprem hareketinden yalıtımak amacı ile, bina taşıyıcı sistemi ile temelleri arasında özel sistem ve gereçlerle donatılan veya diğer aktif ve pasif kontrol sistemlerini içeren binalar, bu Yönetmeliğin kapsamı dışındadır.

1.1.7 - Bu Yönetmeliğin kapsamı dışındaki yapılara uygulanacak koşul ve kurallar, kendi özel yönetmelikleri yapılmıyca dek, ilgili Bakanlıklar tarafından çağdaş uluslararası standartlar göz önünde tutularak saptanacak ve projeleri bu esaslara göre düzenlenecektir.

Bu açıklamalara dayanılarak TDY 2007 sismik izolasyon ile ilgili teknik şartları uluslararası geçerliliği olan diğer standartları baz almasını belirtmektedir. Amerika Birleşik Devletleri sismik izolasyonlu yapı tasarımında kullanılan dizayn kriterlerin tarihçesine bakılacak olursa, bununla ilgili şartname ilk olarak olarak 1980 yılların başında Building Safety Board of California tarafından yayımlanmıştır. Daha sonra 1986 yılında Northern Section of the Structural Engineers Association of California (SEAOC) yönetmelik yapmıştır. SEAOC yönetmeliğini 1990 yılında revize ederek tekrar yayımlamıştır. 1991 ve 1994 yıllarında Uniform Building Code adlı yönetmelik yayımlanmıştır. Federal Emergency Management Agency (FEMA) belirli aralıklarla güncellediği yeni binalarda sismik izolasyon tasarımı ve mevcut yapıların sismik izolasyon tasarımı yönetmeliğini geliştirmiştir.

Sismik izolasyon tasarımı ile ilgili yönetmelikler herhangi bir izolasyon sistemini öne çıkarmamakla birlikte, tüm yönetmeliklerin ortak özelliği olarak; sistemin istenilen deplasmanda stabil kalmasını, artan yer değiştirmede sistemin yeterli

dayanım göstermesini ve tekrarlanan yüklerde sistemin özelliğini kaybetmemesi koşulunu belirtmektedir.

Amerika Birleşik Devletlerinde çok fazla kullanılan ve teknik olarak geniş kapsama sahip yönetmeliklerden bir tanesi de 1997 yılında yayımlanan Uniform Building Code (UBC 97) yönetmeliğidir. Bu yönetmeliğin temel felsefesinde sismik izolasyonlu sistemin ankastre yapıya nazaran performansı artırmaktır. UBC 97 yönetmeliği sismik izolasyonlu tasarımın maliyetini düşürmeyi hedeflememek ile birlikte yapının depreme karşı performansı artırmayı öngörmektedir.

Bu tez kapsamında bir bütünlük oluşturması açısından sismik izolasyonlu yapı tasarımda sadece UBC 97 kullanılacaktır. UBC 97 ile ilgili olarak tasarım kriterleri aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

5.1 Tasarım Metodu

UBC 97 yönetmeliğinde iki tip deprem kuvveti tanımlanmıştır. Bunlardan olabilecek maksimum deprem "Maximum Capable Earthquake" (MCE); 100 yıllık bir süre içerisinde aşılma olasılığı %10 olan ve dönüşüm periyodu 1000 yıl olan yer hareketini tanımlamaktadır. Tasarım esaslı deprem "Design Basis Earthquake" (DBE); 50 yıllık süre içerisinde aşılma olasılığı %10 ve dönüşüm periyodu 475 yıl olan yer hareketini tanımlamaktadır. Yönetmeliğin deprem riskine göre bulunan tasarım kuvvetlerini ve deplasmanları dizayn metodunu etkilemektedir.

Sismik izolasyon tasarımında genel olarak deplasmanların yalıtım üzerinde yoğunlaşacağı prensibine dayanır. Bu nedenle birçok yönetmeliklerde tasarım aşamasında eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılmaktadır. Üst yapı rijit davranış göstermekte olup, tasarımın titreşimi tek mod üzerine dayanır. Yalıtım düzeyindeki deplasmanlardan hareketle kuvvetler hesaplanır ve buradan üst yapıya etkiyen kuvvetler de hesaplanır.

UBC 97 yönetmeliğinde statik ve dinamik analiz olmak üzere iki tip analiz yöntemi tanımlanmıştır. UBC 97 de deprem yalıtımı tasarımları için statik analizi zorunlu kılmıştır. Statik analizden elde edilen tasarım deplasmanları ve kuvvetler, minimum düzeydedir. UBC 97 yönetmeliğinde bazı hallerde statik analizin yanında dinamik analizi zorunlu kılmıştır.

5.1.1 Statik analiz

UBC 97 yönetmeliği sismik izolasyon tasarımında statik analizi zorunlu kılmıştır. Sismik izolasyon tasarımda statik analizin yeterli olduğu durumlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1. Sismik izolasyonlu yapının zemin profil tipi S_A , S_B , S_C , S_D olmalıdır.
2. İzolasyon katının üzerindeki yapı 4 kattan veya 19,8 metreden yüksek olmamalıdır.
3. Sismik izolasyonlu yapının olası maksimum deprem düzeyindeki titreşim periyodu T_M , 3 saniyeden fazla olmamalıdır.
4. Yapı aktif fay hattından en az 10 km uzaklıkta olmalıdır.
5. Sismik izolasyonlu yapı düzenli bir yapı olmalıdır.
6. Sismik izolasyonlu yapının tasarım esaslı deprem düzeyindeki titreşim periyodu T_D , ankastre mesnetli yapı periyodunun üç katından büyük olmalıdır.
7. Yukarıdaki tüm kriterlere ek olarak aşağıdaki koşullarda sağlanmalıdır.
 - 7.1. Tasarım deplasmanındaki efektif rijitlik, tasarım deplasmanının %20'sine tekabül eden efektif rijitliğin üçte birinden fazla olmalıdır.
 - 7.2. Toplam tasarım deplasmanındaki geri dönüş kuvveti toplam tasarım deplasmanının %50'sine tekabül eden geri dönüş kuvvetinden 0,025W kadar fazla olmalıdır.
 - 7.3. Sismik izolasyon sisteminin kuvvet - deplasman özellikleri, yükleme oranından bağımsız olmalıdır.
 - 7.4. Sismik izolasyon sisteminin kuvvet - deplasman özellikleri, düşey ve iki yönlü yatay kuvvetlerinden bağımsız olmalıdır.
 - 7.5. Son olarak sismik izolasyon sisteminin toplam tasarım deplasmanı ile C_{VM}/C_{VD} oranından elde edilen değerlerin çarpımı, olası maksimum deprem düzeyindeki deplasmandan küçük olmalıdır.

UBC 97 yönetmeliğine göre hesaplanması gereken iki esas yer değiştirme D_D ve D_M , yani sistemin rijitlik merkezine göre tasarım esaslı deprem ve olası maksimum deprem düzeylerindeki tasarım yer değiştirmeleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VD} T_D}{B_D} \quad (5.1)$$

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VM} T_M}{B_M} \quad (5.2)$$

Denklem 5.1 ve denklem 5.2'de g yer ivmesi, C_{VD} ve C_{VM} deprem spektral katsayıları, T_D sismik izolasyonlu yapıların tasarım esaslı deprem düzeyindeki efektif periyodu, T_M olası maksimum deprem düzeyindeki efektif periyot, B_D ve B_M sırasıyla tasarım esaslı deprem ve olası maksimum deprem düzeyindeki sönüm katsayılarıdır.

W binanın toplam ağırlığı olmak üzere sismik izolasyonlu yapıların efektif titreşim periyotları T_D ve T_M aşağıdaki denklem 5.3 ve denklem 5.4 ile hesaplanır.

$$T_D = 2\pi\sqrt{W/K_{D,min}g} \quad (5.3)$$

$$T_M = 2\pi\sqrt{W/K_{M,min}g} \quad (5.4)$$

Denklem 5.3 ve denklem 5.4'te, $K_{D,min}$ deney sonucu hesaplanan D_D yer değiştirmesindeki K_{eff} değerinin minimumu, $K_{M,min}$ ise deney sonucu hesaplanan D_M yer değiştirmesindeki K_{eff} değerinin minimumunu ifade etmektedir. K_{eff} değeri denklem 5.5 ile hesaplanır.

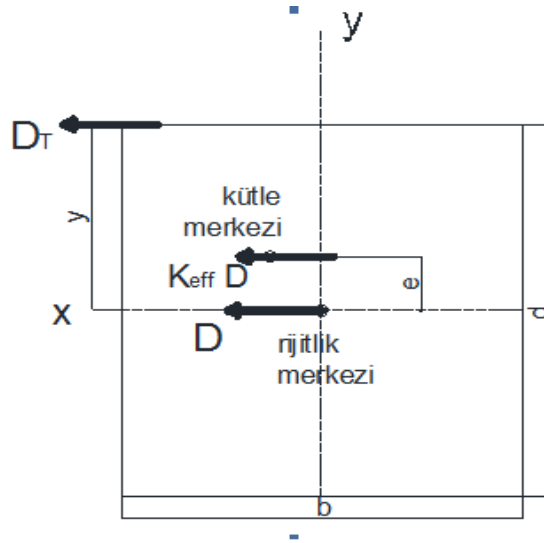
$$K_{eff} = \frac{4\pi^2}{gT_D^2} W \quad (5.5)$$

Tasarım esaslı deprem düzeyindeki tasarım deplasmanı D_D ve olası maksimum deprem düzeyindeki tasarım deplasmanı D_M belirlendikten sonra, sismik izolasyonlu yapıda burulma oluşuyorsa, yönetmelik bu burulma etkilerinin de tasarım deplasmanına eklenmesi gerektiğini belirtir. Tasarım esaslı deprem ve olası maksimum düzeylerindeki toplam deplasmanlar denklem 5.6 ve denklem 5.7 ile hesaplanır.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2+d^2} \right] \quad D_{TD} \geq 1,1D_D \quad (5.6)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2+d^2} \right] \quad D_{TM} \geq 1,1D_M \quad (5.7)$$

Denklem 5.6 ve denklem 5.7 formüllerinde, şekil 5.1'de gösterildiği gibi y bir köşenin deprem yüklemesine dik uzaklığı, e ise dış merkezliği, d binanın deprem yönüne dik olan boyutu, b binanın deprem yönündeki boyutunu gösterir. Bu denklemlerde deprem yükü $K_{eff}D$ 'nin rijitlik merkezine e uzaklıkta kütle merkezine uygulandığı varsayımına dayanır. UBC 97 yönetmeliği, eğer sismik izolasyonlu sistemin gerçek burulması hesaplanıp, D_D ve D_M değerlerinin 1.1 katından az olmamak kaydıyla, yukarıdaki formüllerle hesaplanan toplam yer değiştirme değerlerinde azaltma yapılmasına izin vermektedir.



Şekil 5.1: Kütle merkezi-Rijitlik merkezi.

Sismik izolasyonlu yapılarda izolatör düzeyinde oluşan kuvvetler o düzeydeki deplasmana bağlıdır. İzolatör düzeyinin altındaki sistemler yani temel için oluşan tasarım kesme kuvvetleri, V_b , denklem 5.8 ile hesaplanır.

$$V_b = k_{Dmax}D_D \quad (5.8)$$

İzolasyon sisteminin üstünde bulunan elemanlar, yani üst yapı için tasarım kuvvetleri ise denklem 5.9 ile gösterilir ve bu tasarım kuvvetlerine göre boyutlandırılır.

$$V_s = k_{Dmax}D_D/R_I \quad (5.9)$$

UBC 97 yönetmeliğe göre V_s değeri aşağıdakilerden küçük olmamalıdır.

- Tabanı ankastre mesnetli yapılar için belirlenen taban kesme kuvveti.
- Tasarım rüzgar kuvvetine karşı gelen taban kesme kuvveti.

- İzolasyonlu sistemi tamamen harekete geçirmek için gereken yanal kuvvetin 1,5 katından küçük olamaz (kurşun çekirdekli izolatörün akma kuvveti veya kayıcı tip izolasyonlu sistemlerinde kayma eşiği).

UBC 97 yönetmeliğinde katlara gelen deprem kuvvetleri tıpkı TDY 2007 yönetmeliğinde olduğu gibi dağıtılacaktır. UBC 97 yönetmeliğinde belirtildiği gibi herhangi bir x seviyesindeki yanal kuvvet olan F_x ve V_s taban kesme kuvvetinden denklem 5.10 ile hesaplanır.

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (5.10)$$

Denklem 4.10'da x, yatay deprem yükü hesaplanacak kat numarası, w_i , w_x , i. ve x. katın ağırlığı, h_x , h_i izolasyon seviyesinden itibaren ölçülen, x. ve i. kat yükseklikleridir.

UBC 97 yönetmeliğinde sismik izolasyonlu yapılar için maksimum katlar arası ötelenme sınırı $0,01/R_I$ değerinden fazla olmamalıdır.

5.1.2 Dinamik analiz

Dinamik analiz, statik analiz koşullarını tam olarak sağlanmadığı durumlarda kullanılır. UBC 97 yönetmeliğinde tanımlanan 3 tip dinamik analiz verilmiştir.

1. Tepki Spektrumu Analizi

- Sismik izolasyonlu yapı zemin profil tipi S_A , S_B , S_C , S_D olmalıdır.
- Statik analiz için gerekli olan kriterlerin 7. maddesi sağlanmalıdır.

2. Zaman Tanım Alanı Analizi

- Tepki spektrumu analizi için gereken tüm kriterler sağlanmalıdır.

3. Bölgeye Özel Tepki Spektrumu Analizi

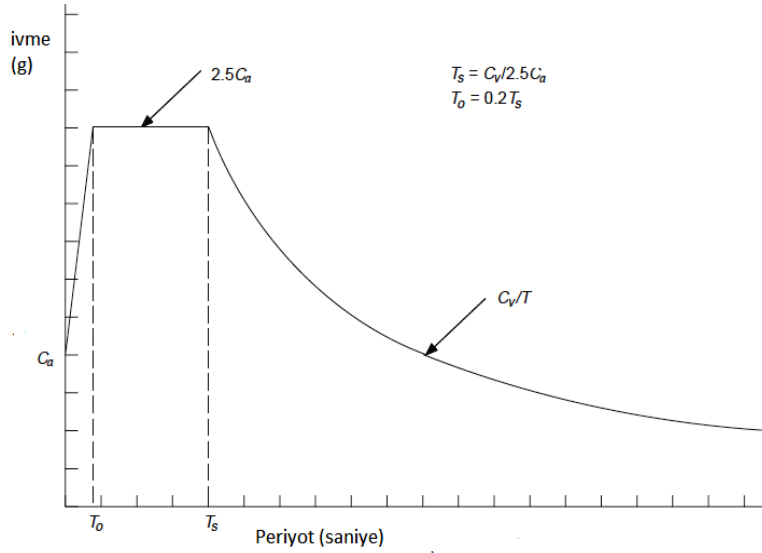
- Eğer olası maksimum deprem düzeyindeki sismik izolasyonlu yapının periyodu $T_M \geq 3$ saniyeden büyükse,
- Zemin profil tipi S_E , S_F ise,
- Sismik izolasyonlu yapı aktif bir faya 10 km yakınlık içerisinde ise bu analiz yöntemi gereklidir.

Dinamik analiz ve statik analiz durumlarında tasarım için gereken minimum koşullar çizelge 5.1'de özet olarak gösterilmiştir. Şekil 5.2'de UBC 97 yönetmeliğine göre tasarım esaslı deprem seviyesindeki ivme spektrumu eğrisini göstermektedir.

Zaman tanım alanı analizinde her yer hareketi uygun bir şekilde ölçeklendirilmelidir. UBC 97 'ye göre yer hareketlerinin iki bileşenleri karelerin toplamının karekökü yöntemiyle birleştirilip buna uygun %5 sönüm oranında tepki spektrum eğrisi oluşturulur. Bu yöntem ile oluşturulan her bir spektrum eğrisinin ortalaması, tasarım tepki spektrumu eğrisinin $0,5T_D$ ile $1,25T_M$ periyot aralığındaki değerlerin 1.3 katından az olmamalıdır. UBC 97 yönetmeliğe göre %10 lük sapma değeri kabul edilebilir.

Çizelge 5.1: Statik ve dinamik analizlerin azaltma katsayıları.

Parametre	Statik	Zaman Tanım Alanı Analizi	Bölgeye Özel Tepki Spektrumu Analizi
D_{TD}	$D_{TD} \geq 1,1D_D$	$0,9D_{TD}$	$0,9D_{TD}$
D_{TM}	$D_{TM} \geq 1,1D_M$	$0,8D_{TM}$	$0,8D_{TM}$
V_b	$V_b = K_{D,max}D_D$	$\geq 0,9V_b$	$\geq 0,9V_b$
V_s (Düzenli yapılarda)	$V_s = K_{D,max}D_D/R_I$	$\geq 0,6V_s$	$\geq 0,8V_s$
V_s (Düzensiz yapılarda)	$V_s = \frac{K_{D,max}D_D}{R_I}$	$\geq 0,8V_s$	$\geq 1V_s$
Görelî Kat Ötelemeleri	$0,01/R_I$	$0,020/R_I$	$0,015/R_I$



Şekil 5.2: İvme spektrumu [26].

5.2 UBC 97 Yönetmeliği İle Tasarım Kriterleri

Sismik izolasyonlu yapı tasarımında tasarım kuvvetlerini, deplasmanlarını ve bununla ilgili tüm hesapları yapmak için UBC 97 yönetmeliğinde göz önüne alınması gereken parametre ve kriterler aşağıda verilmiştir.

5.2.1 Deprem bölge katsayısı

UBC 97 yönetmeliğinde, sismik bölge faktörü, Z , çizelge 5.2'de gösterildiği gibi değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 5.2: Deprem bölge katsayıları.

Bölge	1	2A	2B	3	4
Z	0,0075	0,15	0,20	0,30	0,4

5.2.2 Zemin profil cinsi

UBC 97 yönetmeliğine göre deneysel olarak elde edilen zemin profillerinin tablosu çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3: Zemin profil cinsi.

Zemin Profili Cinsi	Zemin Profil Tanımı	Zemin Yüzeyinden 30,5 metre derindeki tabakanın ortalama zemin özellikleri		
		Kayma Dalgası Hızı, v_s (m/s)	Standart Penetrasyon Testi, N (darbe/30cm)	Drenajsız Kayma Mukavemeti, c_u (kPa)
S_A	Sert kaya	>1500	-	-
S_B	Kaya	760-1500	-	-
S_C	Çok yoğun zemin ve sıkı kum	360-760	>50	>100
S_D	Kum	180-360	15-50	50-100
S_E	Gevşek Kum	<180	<15	<50
S_F	Detaylı incelemeye bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bkz. UBC 1997 Bölüm 1629.3.1			

5.2.3 Sismik kaynak tipleri

UBC 97 yönetmeliğinde fay hatlarının taşıdığı riske göre sismik kaynak tipleri çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4: Sismik kaynak tipleri.

Sismik Kaynak Tipi	Sismik Kaynak Özellikleri	Sismik Kaynak Tanımı	
		Maksimum Moment Büyüklüğü, M	Kayma Oranı, SR (mm/yıl)
A	Büyük magnitüdlü depremler üretebilen ve sismik etkinlik oranı yüksek olan faylar	$M \geq 7.0$	$SR \geq 5$
B	A ve C dışındaki bütün faylar	$M \geq 7.0$ $M < 7.0$ $M \geq 6.5$	$SR < 5$ $SR > 2$ $SR < 2$
C	Büyük magnitüdlü depremler üretemeyen ve sismik etkinlik oranı nispeten düşük olan faylar	$M < 6.5$	$SR \leq 2$

5.2.4 Kaynağa yakınlık katsayısı

UBC 97 yönetmeliğinde kaynağa yakınlık katsayısı N_A, N_V , deprem kaynağının en yakın mesafesi ve sismik kaynak tipine göre değişen katsayı olarak tanımlar. N_A tepki spektrumunda kısa periyot aralığına ve sabit ivmeli kısma denk gelir. N_V tepki spektrumunda sabit hızlı kısma denk gelen ve orta periyotlardaki aralıklardaki katsayıdır. Bu katsayılar çizelge 5.5 ve çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.5: UBC 97 yönetmeliğine kaynağa yakınlık katsayısı N_A değerleri.

Fay Tipi	Fay uzaklığı		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1.5	1.2	1.0
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

Çizelge 5.6: UBC 97 yönetmeliğine kaynağa yakınlık katsayısı N_V değerleri.

Fay Tipi	Fay uzaklığı			
	≤ 2 km	5 km	10 km	≥ 15 km
A	2.0	1.6	1.2	1.0
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

5.2.5 Sismik katsayılar

UBC 97 yönetmeliğinde sismik katsayılar C_A ve C_V , yer hareketi ile ilgili tanımlar yapıldıktan sonra tasarım esaslı depremin spektral grafiğinin ordinatlarını belirlenmesinde kullanılır. Sismik izolasyon tasarımında deplasman hesabında bu değerler göz önünde bulundurulacaktır. Bu değerler çizelge 5.7 ve çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.7: Sismik katsayılar- C_A .

Zemin Sınıfı	Deprem Bölgesi				
	Z=0.075	Z=0.15	Z=0.2	Z=0.3	Z=0.4
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_A$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_A$
S_C	0.09	0.18	0.24	0.33	$0.40N_A$
S_D	0.12	0.22	0.28	0.36	$0.44N_A$
S_E	0.19	0.30	0.34	0.36	$0.36N_A$
S_F	Yerin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizi yapılması sonucu elde edilir.				

Çizelge 5.8: Sismik katsayılar- C_V .

Zemin Sınıfı	Deprem Bölgesi				
	Z=0.075	Z=0.15	Z=0.2	Z=0.3	Z=0.4
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_V$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_V$
S_C	0.13	0.25	0.32	0.45	$0.56N_V$
S_D	0.18	0.32	0.40	0.54	$0.64N_V$
S_E	0.26	0.50	0.64	0.84	$0.96N_V$
S_F	Yerin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizi yapılması sonucu elde edilir.				

5.2.6 Olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı

UBC 97 yönetmeliğinde olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı M_M , tasarım deprem şiddetine bağlı olarak değişen değerlerdir ve çizelge 5.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9: Olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı- M_M .

Tasarım Depremi Sarsıntı Şiddeti (ZN_v)	Olabilecek Maksimum Deprem Katsayısı (M_M)
0,075	2,67
0,15	2,00
0,20	1,75
0,30	1,50
0,40	1,25
$\geq 0,50$	1,20

5.2.7 Olabilecek maksimum depreme göre sismik katsayılar

UBC 97 yönetmeliğinde sismik katsayılar C_{AM} ve C_{VM} , yer hareketi ile ilgili tanımlar yapıldıktan sonra olabilecek maksimum depremin spektral grafiğinin ordinatlarını belirlenmesinde kullanılır. Olabilecek maksimum depreme göre sismik katsayılar C_{AM} ve C_{VM} tepki katsayısı M_M , bölge faktörü Z , ve yakın fay katsayılarına N_A, N_V bağlı bir fonksiyondur ve çizelge 5.10 ve çizelge 5.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.10: Sismik katsayılar- C_{AM} .

Zemin Profil Tipi	Olabilecek Maksimum Deprem Sarsıntı Şiddeti $M_M ZN_a$				
	$M_M ZN_a = 0,075$	$M_M ZN_a = 0,15$	$M_M ZN_a = 0,2$	$M_M ZN_a = 0,3$	$M_M ZN_a = 0,4$
S_A	0,06	0,12	0,16	0,24	$0,8M_M ZN_a$
S_B	0,08	0,15	0,20	0,30	$1,0M_M ZN_a$
S_C	0,09	0,18	0,20	0,30	$1,0M_M ZN_a$
S_D	0,12	0,22	0,28	0,36	$1,1M_M ZN_a$
S_E	0,19	0,30	0,34	0,36	$0,9M_M ZN_a$
S_F	Yerin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizi yapılması sonucu elde edilir.				

Çizelge 5.11: Sismik katsayılar- C_{VM} .

Zemin Profil Tipi	Olabilecek Maksimum Deprem Sarsıntı Şiddeti $M_M ZN_v$				
	$M_M ZN_v$ = 0,075	$M_M ZN_v$ = 0,15	$M_M ZN_v$ = 0,2	$M_M ZN_v$ = 0,3	$M_M ZN_v$ = 0,4
S_A	0,06	0,12	0,16	0,24	$0,8M_M ZN_v$
S_B	0,08	0,15	0,20	0,30	$1,0M_M ZN_v$
S_C	0,13	0,25	0,32	0,45	$1,4M_M ZN_v$
S_D	0,18	0,32	0,40	0,54	$1,6M_M ZN_v$
S_E	0,26	0,50	0,64	0,84	$2,4M_M ZN_v$
S_F	Yerin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizi yapılması sonucu elde edilir.				

5.2.8 Sönüm katsayıları

UBC 97 yönetmeliğinde sönüm katsayıları sırasıyla tasarım esaslı deprem ve olası maksimum deprem seviyesindeki tasarımlar için B_D , B_M ve buna bağlı olarak efektif sönüm katsayıları çizelge 5.12 'de verilmiştir.

Çizelge 5.12: Sönüm katsayıları

Efektif sönüm oranı, β_D, β_M	Sönüm Katsayıları B_D, B_M
≤ 2	0.8
5	1
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

Çizelge 5.12'de gösterilen β_D, β_M sismik izolatörlü sistemde efektif sönüm olmak üzere denklem 5.11 ve denklem 5.12 gibi hesaplanır.

$$\beta_D = \frac{W_D}{2\pi K_{D,max} D_D^2} \quad (5.11)$$

$$\beta_M = \frac{W_D}{2\pi K_{M,max} D_M^2} \quad (5.12)$$

Denklem 5.11 ve denklem 5.12 de gösterilen $K_{D,max}$; D_D , tasarım esaslı deprem seviyesindeki deplasman olmak üzere, bu deplasmandaki efektif rijitliğin maksimumudur ve $K_{M,max}$; D_M , olası maksimum seviyesindeki deplasman olmak üzere, bu deplasmandaki efektif rijitliğin maksimumudur.

5.2.9 Taşıyıcı sistem davranış katsayısı

UBC 97 yönetmeliğinde sismik izolatörlü sistemin davranış katsayısı R_I ve ankastre sistemin taşıyıcı sistem davranış katsayısı R olmak üzere çizelge 5.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.13: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı R_I .

Temel Taşıyıcı Sistem	Yanal Yük Aktaran Sistem Tanımlaması	R_I	R	Deprem Bölgesi 3 ve 4 için Yükseklik Sınırı (m)
1. Taşıyıcı Duvarlı Sistem	1. Kesme panelli hafif çerçeveli duvarlar			
	a. Yapısal ahşap panelli üç veya daha az katlı yapılar	2.0	5.5	19.812
	b. Diğer tüm hafif çerçeveli duvarlar	2.0	4.5	19.812
	2. Perde duvarlar			
	a. Beton	2.0	4.5	48.768
	b. Yığma	2.0	4.5	48.768
	3. Sadece çekme yükünü alacak hafif çelik çerçeveli, taşıyıcı duvar	1.6	2.8	19.812
	4. Ağırlık yüklerini taşıyıcı destekli duvarlar	1.6	4.4	48.768
	a. Çelik	1.6	2.8	-
	b. Beton	1.6	2.8	19.812
	c. Ağır kereste			
2. Bina Çerçeve Sistemi	1. Çelik eksantrik destekli çerçeve	2.0	7.0	73.152
	2. Kesme panelli hafif çerçeveli duvarlar			
	a. Yapısal ahşap panelli üç veya daha az katlı yapılar	2.0	6.5	19.812
	b. Diğer tüm hafif çerçeveli duvarlar	2.0	5.0	19.812
	3. Perde duvarlar			
	a. Beton	2.0	5.5	73.152
	b. Yığma	2.0	5.5	48.768
	4. Sıradan destekli çerçeveler	1.6	5.6	48.768
	a. Çelik	1.6	5.6	-
	b. Beton	1.6	5.6	19.812
	c. Ağır kereste			
3. Moment Aktaran Çerçeve Sistemi	5. Özel eş merkezli destekli çerçeveler	2.0	6.4	73.152
	a. Çelik			
	1. Özel moment aktaran çerçeve	2.0	8.5	limit yok
	a. Çelik	2.0	8.5	limit yok
	b. Beton	2.0	8.5	limit yok
	2. Moment aktaran yığma duvarlı çerçeve	2.0	6.5	48.768
	3. Orta düzeyde moment aktaran beton çerçeve	2.0	5.5	-
	4. Sıradan moment aktaran çerçeve	2.0	4.5	48.768
	a. Çelik	2.0	3.5	-
		2.0	6.5	73.152

5.3 Diğer Yönetmelikler İle Tasarım Kriterleri

Sismik izolasyonlu yapı tasarımında daha önce değinildiği gibi dünyada bir çok yönetmelik bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında sismik izolatörlü yapı tasarımında Eurocode bazında genel bilgi verilecektir. Eurocode, Avrupa yapısal tasarım yönetmeliği olup temelde 10 ana parçadan oluşmaktadır. Bu yönetmeliklerden Eurocode 8 bu ele alınacaktır. Eurocode 8, depreme dayanıklı yapısal tasarım esaslarını belirleyen yönetmeliktir. Bu yönetmeliğin onuncu kısmında yapıların taban yalıtımıyla ilgili güvenlik ve tasarım esaslarının temel gereklilikleri ve ilgili diğer bilgiler bulunmaktadır [27].

Sismik bölgelerde yapılacak yapıların bu yönetmeliğe göre tasarım esasları aşağıda belirtilmiştir.

5.3.1 Göçmeye karşı dayanım koşulu

Eurocode 8 yönetmeliğinde yapının tasarımı, maruz kalabileceği sismik harekete dayanabilecek şekilde yapılmalıdır ve deprem sonrasında da yapı bütünlüğünü kaybetmemeli, yük taşıma kapasitesini koruyabilmelidir. Tasarım aşamasında sismik hareket şu şekilde tanımlanır:

- a) 50 yıl içinde oluşma olasılığı P_{NCR} olarak belirtilen ve T_{NCR} sismik hareket veya dönüş periyodu ile ilişkilendirilen ve,
- b) Önem faktörü γ_1 şeklinde tanımlanır.

Burada önerilen P_{NCR} ve T_{NCR} değerleri şöyledir: $P_{NCR} = \%10$ ve $T_{NCR} = 475$ yıldır. Ayrıca T_L = sismik hareket için yıl sayısı olmak üzere, T_R denklem 5.13 ile gösterilir.

$$T_R = -T_L / \ln(1 - P_R) \quad (5.13)$$

5.3.2 Hasarın sınıflandırılması koşulu

Eurocode 8 yönetmeliğinde yapı tasarımda esas alınan sismik hareketten daha büyük bir değere sahip olan gerçekleşme olasılığına sahip deprem hareketlerine, kullanımı kısıtlayacak ya da fiyata orantılı olarak büyük masraflara yol açmayacak şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir. Bu koşul P_{DLR} aşılma olasılığına ve T_{DLR} 10 yıllık dönüş periyoduna sahiptir.

Burada önerilen P_{DLR} ve T_{DLR} değerleri $P_{DLR} = \%10$ ve $T_{DLR} = 95$ yıldır.

- “Göçme olmaması koşulu” ve “hasarın sınırlandırılması koşulu” için hedeflenen güvenilirlik, yapının tipine göre ulusal yönetmelik ve standartlarla belirlenmektedir.
- Binaların güvenilirlik ayrımı önem sınıflarına yerleştirilerek yapılır. Her bir önem sınıfı için bir önem faktörü γ_1 vardır. Önem faktörü yapıların uygun tasarlanabilmesi için belirlenir.
- Farklı güvenilirlik seviyeleri, referans olarak seçilen deprem hareketinin etkilerinin önem faktörü ile çarpılması ile elde edilir [28].

5.3.3 Taban yalıtımının temel prensipleri

5.3.3.1 Taban izolasyonunun amaçları

Yalıtım sistemleri geçmişten günümüze kadar yatay yükler altındaki yapının esnekliğini sağlamak amacıyla kullanılmıştır:

- Temel modun periyodunu artırmak,
- Temel modal şeklin mutlak yer değiştirmeye en çabuk şekilde geçişini sağlamak,
- Yüksek modların tepkilerini, yapı kütlelerinin temel moda uyumunu enerjideki yüksek seviyedeki düşüşü gözlemlemek için yükseltmek [28].

5.3.3.2 İzolasyon malzemeleri ve tasarımları

Eurocode 8 yönetmeliğinde açıklanan izolasyon malzemeleri; elastomerik izolatörler, elastik-plastik malzemeler, viskoz ya da sürtünmeli sönümleyiciler, sarkaçlar ve bu yalıtım amaçlarına uygun diğer malzemeler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Her bir izolatör tek başına ya da kombinasyonları kullanılacak biçimde aşağıdaki fonksiyonları sağlamalıdır.

- Düşey yükler altında yüksek yanal esneklikleri ve yüksek düşey rijitlik yeteneği
- Histerik ya da viskoz enerji dağılımı
- Yeniden merkezleme yeteneği
- Yeterli yatay rijitlik

İzolasyon malzemeleri yapının servis ömrü boyunca tasarım gereklilikleri ve toleranslarını karşılayabilecek fonksiyonlara sahip olmalıdır. Bu fonksiyonlar,

mekanik, fiziksel, kimyasal, biyolojik ve çevresel şartlar altında uyum sağlayabilmelidir. Yapının servis ömrü boyunca olası bütün denetleme ve yenileme durumlarına uyum sağlayacak şekilde inşa edilmeli ve yüklenmelidir.

İzolasyonlar Eurocode 8’de tanımlanan limit durumlarını sağlamalıdır. Bu limit durumları:

- Sismik hareket etkisi altında yerel ya da genel güç tükenmesi durumlarına karşı koymak
- Hasarın sınırlandırılması koşuluna göre sismik hareket etkisi altında hasar oluşumu ve kullanım kısıtlarının olması durumlarına karşı koymak

Tasarım hareketi etkileri anti-sismik malzemeler ve bunlara ait birleşimlerin bulunduğu yerlerde yapısal sismik analizden çıkarılan sonuca göre değerlendirilmelidir. Bu durumda malzemelerin tasarımında sismik hareket etkileri için emniyet katsayısı γ_x uygulanmalıdır.

5.3.4 Güvenilirlik

Eurocode 8’de izolasyon malzeme seçimi yapılırken güvenilir (emniyetli), izolasyon sistemi üzerindeki üst yapı davranışını değiştirmeyecek malzemeler düşünülmelidir. Bu tasarım yapılırken γ_x büyütme katsayısı sismik yer değiştirme üzerinde her bir birimin tasarımında kullanılmalıdır. Yapılar için önerilen $\gamma_x = 1,2$ dir.

5.3.5 Tasarım kriterleri ve genel düzen

Eurocode 8’de izolasyon sistemlerinin yeterli performansı gösterebilmeleri için bazı dizayn kriterlerinin ve diğer uygun koşulları sağlaması gerekmektedir. Bu koşullar; sismik izolasyonlu yapıların hareket kısıtlarının bulunmaması ile yer değiştirmelerin kontrolü, izolasyonların burulma ve diğer istenmeyen etkilerin göstermemesi ve izolasyon aletlerin bir arada çalışmasını sağlayabilecek rijit diyaframın bulunmasıdır. Eurocode 8 yönetmeliğinde en büyük limit durumunda izolasyonlu sistem ve üst yapı daima elastik alanda kalmalıdır. Yer değiştirmelerin en büyük limit değerlerinde, boru hatları ve alt yapıda bulunan diğer hatların birleşimleri üst yapıyı yerden ya da çevredeki yapılardan ayırmalıdır ve üst yapı ve çevredeki yapılar ve yer arasındaki göreceli yer değiştirmeleri güvenli bir biçimde karşılayabilmelidir. En büyük limit değerlerinde alt yapı ve üst yapı elastik sınırlar içerisinde kalmalıdır.

Yapılarda, alt yapıya ait yapısal elemanların tasarımında sönümleyici olmayan elemanlar kullanılabilir. Buna bağlı olarak, kapasite tasarımında ve yerel ya da genel süneklik koşullarının karşılanmasına gerek yoktur. Üst yapının dayanım tasarımında sismik koşullar altında süneklik değeri en fazla 1.5 değeri alınabilir.

Hasar limit düzeylerinde ise izolasyon sistemi ile tasarlanmış yapıların boru hatları gibi yapısal olmayan birleşimlerinde elastik değerler içinde kaldığını belirtmektedir.

5.3.6 Analiz yöntemleri ve modelleme

Eurocode 8 yönetmeliğinde izolasyon sisteminin modellemesinde izolasyon biriminin konuma bağlı olarak her türlü yatay yer değiştirmeleri ve düşey doğrultudaki devrilme ve dönme momentlerine karşı yeterli dayanımları gösterebilmelidir. Mekanik ve fiziksel özelliklerinin de dikkate alınarak yapı servis ömrü boyunca en elverişsiz koşula göre tasarlanması gerekmekte ve analiz edilmelidir. İzolasyon sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri yapının tüm yaşamı boyunca en uygunsuz koşullarından bir tanesini karşılayacak biçimde analiz edilmelidir. Maksimum rijitlik ve minimum sönüm ve sürtünme katsayılarına karşılık olarak ivmeler ve eylemsizlik hareketleri kontrol edilmelidir. Yine minimum rijitlik, sönüm ve sürtünme katsayılarına karşılık yer değiştirmeler de kontrol edilmelidir. Bunun yanında izolasyon sistemi yükleme değişimlerine, anlık düşey yüklere, zıt yönde anlık yatay yüklere, sıcaklık değişimlerine, ve servis ömrü boyunca fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişimlerine karşı kontrol edilmelidir.

5.3.6.1 Sismik hareket

Eurocode 8 yönetmeliğine göre sismik izolasyon tasarımında deprem kuvvetleri hem yatayda hem de düşey bileşenlerinin de etkileri göz önüne alınır. Dolayısıyla deprem kuvvetlerinin tüm kombinasyonları kullanılarak daha güvenli tasarım yapmayı amaçlar.

$M_s \geq 6,5$ büyüklüğü üretebilen ve 15 km'den daha az uzaklıkta faya yakınlığı bulunan 4. dereceden öneme sahip binalarda yakın fay etkisi de göz önüne alınarak bölgeye özel tepki spektrumları oluşturulmalıdır.

5.3.6.2 Eşdeğer lineer analiz

Eurocode 8 yönetmeliğinde sismik izolasyonlu sistemlerde eşdeğer lineer analiz izolatörlerin toplam rijitliği ve modelin efektif sönüm oranıyla tanımlanır. Etkili sönüm oranı, izolasyon sisteminin enerji sönümleme yeteneği olarak tanımlanmaktadır.

Pek çok durumda, izolasyon sistemi eşdeğer lineer visko-elastik davranış baz alınarak modellenmektedir. Bu duruma ait koşullar aşağıda belirtildiği gibi olmalıdır.

- d_{dc} kabul edilen yöndeki efektif rijitliğin tasarım yer değiştirme değerini tanımlamak üzere, izolasyon sisteminin etkili rijitlik değerinin en az %50'si $0,2d_{dc}$ yer değiştirmede olmalıdır.
- Etkili sönüm oranı %30'u aşmamalıdır (önerilen değer %15).
- Kuvvet-yer değiştirme özellikleri yükleme oranları ya da düşey yüklere göre %10 dan fazla farklılık göstermemelidir.
- İzolasyon sistemindeki $0,5d_{dc}$ ve d_{dc} arasındaki yer değiştirmelerdeki artış sistem üzerindeki toplam düşey yükünün en az %2.5 kadar olmalıdır.

Bu tipteki bir analiz için, davranış katsayısı $q=1$ eşitliği kabul edilerek yapılır. Bu durumda elastik spektrum ve sönümleme düzenlemeleri kullanılmış olur.

Analiz türleri

Eşdeğer lineer analiz için, aşağıda belirtilen analiz türleri dikkate alınmaktadır.

- Basitleştirilmiş modal analiz
- Basitleştirilmiş analiz
- Tüm modal analiz
- Zaman tanım alanı analizi

Basitleştirilmiş modal analiz

Bu analiz türünde üst yapı ve alt yapı koşullarının yanında rijit olarak kabul edilen temel koşulları göz önünde bulundurulur. Düşey rijitliklerin yatay rijitliklere göre daha yüksek olduğu kabul edilir. Bu durumda yapının esnekliği izolasyon ara yüzünde odaklandığı ve hareketlerin üç serbestlik derecesine sahip olduğu tanımlanır. İki yatay yer değiştirme ve burulma momentinin düşey eksen etrafında olduğu kabul edilir.

Efektif periyot $T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}}$ şeklinde bulunur.

Analizdeki bu kabullerin geçerli olması için aşağıdaki koşulların sağlanmış olması gerekmektedir.

- En yakın potansiyel aktif fay hattının büyüklüğü $M_s \geq 6,5$ olan arazilere yakınlık 15 km'den büyük olmalıdır.
- Plandaki üst yapı yüksekliği 50 m den büyük olmamalıdır.
- Alt yapı yerin farklı yer değiştirmelerinin etkilerini minimuma düşürecek kadar rijit olmalıdır.
- Tüm izolatörler düşey yükleri destekleyen alt yapı elemanlarının üzerinde konumlandırılmış olmalıdır.
- T_{eff} efektif periyodu ankastre mesnetli yapının en az 3 katı ile 3 saniye arasında olmalıdır.
- Yapı her iki yönde simetrik olmalıdır.
- İzolasyon katındaki devrilme momentleri ihmal edilmelidir.
- Düşey ve yatay rijitlik arasındaki oran en az 150 olmalıdır.
- $T_v = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_v}}$ eşitliği ile verilen düşey yöndeki ana periyot 0,1 saniyeden uzun olmamalıdır.

Basitleştirilmiş analiz

Eurocode yönetmeliğinde bahsi geçen basitleştirilmiş analiz bir önceki analiz türünün basitleştirilmiş halidir. Statik lineer analiz olarak da tanımlanan bu analiz türünde doğal eksantrisite sınırlandırılmıştır. Uygulama koşulları basitleştirilmiş modal analizle aynıdır. Ancak ek bir koşul olarak, her iki yönde de, rijitlik merkezi ve üst yapının kütle merkezinin izdüşümü arasındaki toplam eksantrisite (ani eksantrisite de dahil olmak üzere) üst yapının yatay veya buna dik olan yöndeki zıt doğrultulu uzunluğunun %7.5 ini aşmamalıdır.

Bu durumda mutlak yer değiştirme hareketinin iki dik yüzeydeki aynı periyot, aynı yer değiştirme ve aynı eylemsizlik kuvvetleri şeklinde düşünülür.

- Üst yapının yer değiştirmesi (S_e , elastik spektrumu göstermektedir).

$$d_{dc} = \frac{MS_e(T_{eff}, \xi_{eff})}{K_{eff,min}} \quad (5.14)$$

- Yanal kuvvetler üst yapının her katında uygulanmalıdır ve m_j , j katına ait kütleyi tanımlamak üzere denklem 5.15 şartı sağlanmalıdır.

$$f_j = m_j S_e(T_{eff}, \xi_{eff}) \quad (5.15)$$

Bunun yanı sıra burulma hali de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durum her bir izolatörün her bir yöndeki hareketinin etkilerini bir δ katsayısıyla büyütülmelidir.

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_y^2} y_i \quad (5.16)$$

Denklem 5.16'da;

- y yatay yöndeki x kabulünün zıt yönünü
- (x_i, y_i) izolatörün etkili rijitlik merkezine göre i birim koordinatlarını
- $e_{tot,y}$ y yönündeki toplam eksantrisiteyi
- r_y izolasyon sisteminin burkulma yarıçapını ifade etmektedir.

$$r_y = \sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi}) / \sum K_{xi} \quad (5.17)$$

Denklem 5.17'de K_{xi} ve K_{yi} gösterimleri i birimdeki ve x ve y yönündeki etkili rijitlik değerlerini ifade etmektedir ve genellikle iki değer birbirine eşittir [27]

Tüm modal analiz

Eurocode 8 yönetmeliğinde basitleştirilmiş analiz ve basitleştirilmiş modal analiz gereksinimlerinin karşılanmadığı durumlarda kullanılabilir. Yapının türüne ve kullanılan izolatörlerin türüne bağlı olarak bu analiz türünde tüm modlar kullanılacak olup, efektif sönüm ve efektif rijitlik göz önünde bulundurularak hesap yapılacaktır.

Zaman tanım alanı analizi

Eurocode 8 yönetmeliğinde zaman tanım alanı analizi kullanımında herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır. Eşdeğer lineer analizlerin koşullarını sağlanmadığı durumlarda kullanılması zorunludur. Zaman tanım alanı analizinde izolatörlerin zaman başlı olarak gerçek deplasman ve kuvvet histerik eğrileri kullanılması gerekmektedir.

Diğer yönetmelikler ve karşılaştırmalar

Sismik izolasyon tasarımında dünyada bir çok yönetmelik mevcut ve gün geçtikçe her gün yenilenmektedir. Güncel yönetmelikler sismik izolasyon tasarımında bazı sınır değerlerin dışında genelde aynı konsepti kullanmaktadır. Çizelge 5.14'de güncel yönetmeliklerin statik lineer analiz için minimum şartları ve bunlar arasındaki karşılaştırmalarını vermiştir.

Çizelge 5.14: IC 2003, EC 8, IBC 2000 Statik analiz kriterleri.

Kriterler	IC 2003	EC 8	IBC 2000
1 Maximum kütle-rijitlik eksantirisitesi	%8.0	%7.5	Tanımlı değil
2 Arazi depremselliğinin kısıtlamaları	Gerekli değil	$M \geq 6.5$ $F_{ay} > 15$ km	$S_1 < 0.6$ g
3 Yapının plandaki düzenliliği ve simetrikliği	Gerekli	Gerekli	Gerekli
4 Maksimum plan boyutları	50 m	50 m	Gerekli değil
5 Maksimum üstyapı yüksekliği	20 m	Tanımlı değil	19.8 m
6 Maksimum kat sayısı	5	Tanımlı değil	4
7 T_{eff} in periyot aralığı	$4T_s - 3.0s$	$3T_s - 3.0s$	$3T_s - 3.0s$
8 İzolasyon sisteminin $\frac{K_v}{K_{eff}}$ oranı	≥ 800	≥ 150	Gerekli değil
9 Maksimum düşey titreşim periyodu T_v	0.1s	0.1s	Gerekli değil
10 Zemin sınıfı kısıtlaması	-	-	A,B,C ya da D
11 İzolatörlerdeki gerilmeler	İzin verilmiyor	İzin veriliyor	İzin veriliyor
12 Tüm izolatörlerin düşey yükleri destekleyen alt yapı elemanlarının üstünde bulunması gerekliliği	Gerekli değil	Gerekli	Gerekli değil

6. SİSMİK İZOLATÖRLÜ YAPI TASARIMI

Sismik izolatör tasarımı yapılırken bir çok yönetmelik öncelikle yapının statik olarak çözümlenmesini şart koşturmuştur. UBC 97 yönetmeliğinde de yapı izolatörlü olarak tasarımı yapılmadan önce eşdeğer deprem yöntemine göre analizi şart koşturmuştur. Bu çalışmada tipik bir hastane yapısının önce TDY 2007'ye göre ankastreli sistem olarak tasarımı ve gerekli analiz ve tahkikleri yapıp daha sonra UBC 97 normlarına göre tasarım esaslı deprem düzeyinde izolatörlü olarak modellenmiştir.

6.1 TDY 2007'ye Göre Tasarım

Bu bölümde 5 katlı olan tipik bir hastane yapısının TDY 2007 yönetmelik şartlarına göre ankastre mesnetli olarak modellenip gerekli yönetmelik şartlarını sağlayıp sağlamadığı kontrolleri yapılmıştır. Yapı Kocaeli ili içerisinde hastane 18 ayrı bloklardan oluşmuştur. Tez kapsamında bu bloklardan sadece bir tanesi için çözüm yapılmıştır. Çerçeve sistemli, betonarme yapısında, toplam 5 kat ve her iki yönde simetrik, toplam oturum alanı 516,12 m² olan bu yapıda X yönünde 5 aks ile uzunluğu 20,4 metre ve Y yönünde 6 aks ile uzunluğu 25,3 metre, her kat yüksekliği 3,3 metre ve toplam yapı yüksekliği 16,5 metredir. Yapının düşey ve planda herhangi bir düzensizliği bulunmamış olup sonraki bölümlerde bu düzensizlikler kontrol edilecektir. Birinci deprem bölgesinde yapılacak olan bu yapı öncelikle ETABS bilgisayar destekli analiz programında TDY 2007 yönetmeliğine göre ön tasarımı yapılmıştır. Yapı ETABS programında modellendikten sonra eşdeğer deprem yükü yöntemine göre analiz edilmiştir. Bunun ile birlikte ETABS programıyla kolon giriş donatı tahkikleri yapılmış olup, böylece daha sonra izolatörlü olarak tasarlanmıştır. Binaya ait özellikler çizelge 6.1, 6.2, 6.3 ve çerçeve sistemin kalıp planı şekil 6.1'de verilmiştir. ETABS programında ankastre mesnetli sistem olarak 3 boyutlu olarak tasarlanan yapı şekil 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1: Yapı bilgileri.

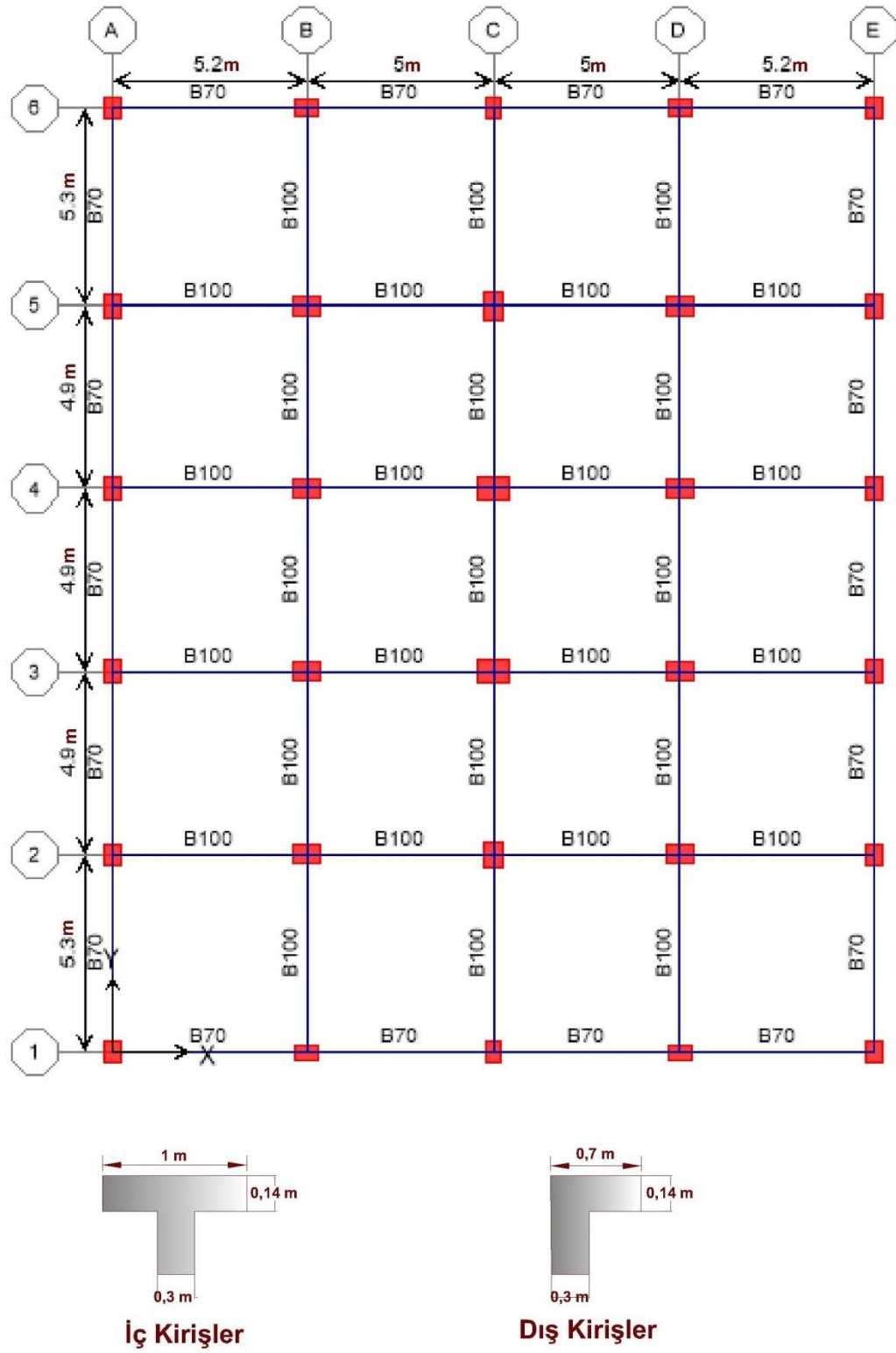
Deprem Bölgesi	1
Zemin Tipi Profili	Z4
Spektrum Tepki Katsayısı	$T_A=0,2$ ile $T_B=0,9$
Etkin Yer İvmesi Katsayısı	0,4
Hareketli Yük Katılım Sayısı	0,3
Bina Önem Katsayısı	1.5
Taşıyıcı Sistem Davranışı	7
Beton Sınıfı	C30
Döşeme Kalınlığı	0.14 m
Kat Yüksekliği	3.3 m
Kaplama+Sıva Yüğü	1.2 kN/m ²
Hareketli Yük	5 kN/m ²
Pas payı	4 cm
Bina Ağırlığı (G+0,3Q)	29785,7 kN

Çizelge 6.2: Yapı kolon yerleşim bilgileri.

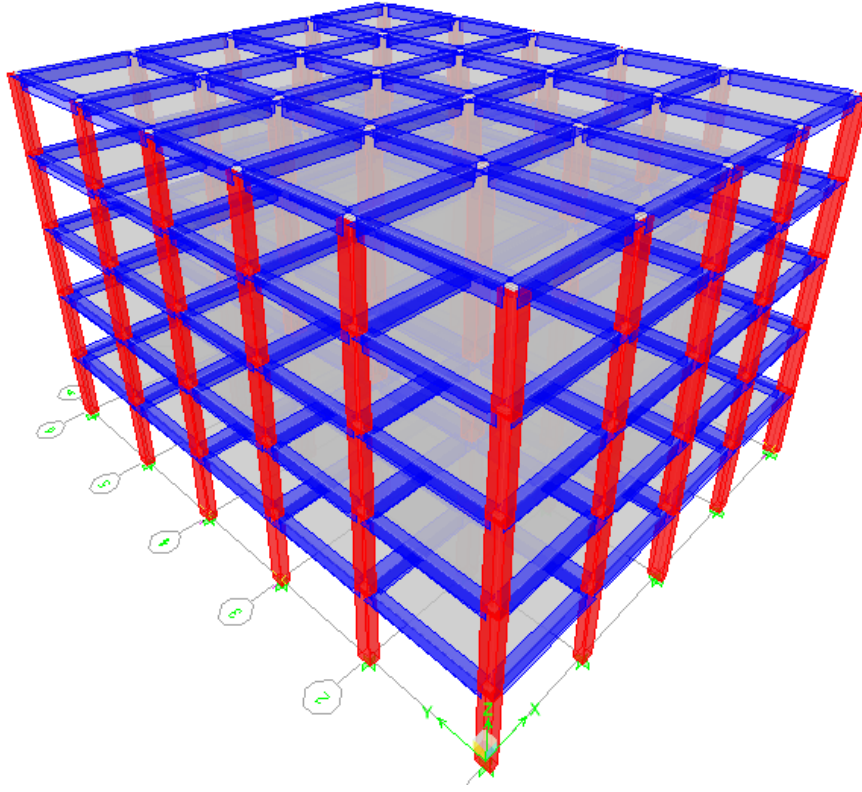
Kolon Boyutları	Lokasyon	Kesit
Tüm Katlarda	Kenar Akslarda	40x60
	5B-5C-5D-4B-4D -3B-3D-2B-2C-2D	50x60
	4C-3C	60x80

Çizelge 6.3: Yapı kiriş bilgileri.

Kiriş	bw (m)	b (m)	t (m)	h (m)
Dış kenar kirişleri	0,3	0,7	0,14	0,6
İç kirişler	0,3	1	0,14	0,6



Şekil 6.1: Çerçeve sistemin kalıp planı ve kirişler.



Şekil 6.2: Üç boyutlu betonarme hastane binası.

6.1.1 Eşdeğer deprem yükü hesabı

TDY 2007'de açıklandığı üzere birinci ve ikinci dereceden deprem bölgesinde yapılacak binaların tasarımında, toplam bina yüksekliği 25 metreyi aşmayan ve tüm katlarda burulma düzensizliği bulunmayan yapılarda eşdeğer deprem yükü yönteminin yeterli olacağını belirtmektedir. Dolayısıyla bu yapı modelinde ön tasarım için hesaplanan eşdeğer deprem yükleri yeterli olacak ve başka hesap yöntemine gerek olmayacaktır.

Yapı ETABS programında modellenip analiz edildiğinde X doğrultusundaki periyot $T_x=0,507$ saniye, Y doğrultusundaki periyot ise $T_y=0,505$ saniye, ve burulma periyodu ise $T_b=0,49$ saniye olarak bulunmuştur.

Eşdeğer deprem yükü hesabında spektrum tepki katsayıları bulunan periyotlar göre belirlenir. Bulunan periyotlara göre her iki doğrultuda spektrum tepki katsayısı $S(T)=2,5$ olmaktadır. Dolayısıyla X ve Y doğrultusundaki toplam eşdeğer deprem yükleri denklem 6.1 ve 6.2 ile belirlenir.

$$V_{tx} = \frac{W \cdot A_0 \cdot I \cdot S(T)}{R} \geq 0,1 \cdot A_0 \cdot I \cdot W \quad (6.1)$$

$$V_{ty} = \frac{W \cdot A_0 \cdot I \cdot S(T)}{R} \geq 0,1 \cdot A_0 \cdot I \cdot W \quad (6.2)$$

$$V_{tx} = \frac{(29785,7) \cdot (0,4) \cdot (1,5) \cdot (2,5)}{7} = 6382,7 \text{ kN} \geq 0,1 \cdot (0,4) \cdot (1,5) \cdot (29785,7) \\ = 1787,7 \text{ kN}$$

$$V_{ty} = \frac{(29785,7) \cdot (0,4) \cdot (1,5) \cdot (2,5)}{7} = 6382,7 \text{ kN} \geq 0,1 \cdot (0,4) \cdot (1,5) \cdot (29785,7) \\ = 1787,7 \text{ kN}$$

N toplam katsayısını göstermek üzere en üst kata etki eden eşdeğer deprem yükü denklem 6.3 ile hesaplanır.

$$\Delta F_N = 0,0075 N V_t \quad (6.3)$$

$$\Delta F_{Nx} = 0,0075(5)(6382,7) = 239,3 \text{ kN}$$

$$\Delta F_{Ny} = 0,0075(5)(6382,7) = 239,3 \text{ kN}$$

Her kata etkiyen eşdeğer deprem yükü hesaplanırken TDY 2007 belirtilen denklem 6.4 ve denklem 6.5 formülasyonlarına göre yapılır.

$$V_t = \Delta F_N + \sum_{i=1}^N F_i \quad (6.4)$$

$$F_i = (V_t - \Delta F_N) \frac{w_i H_i}{\sum_{j=1}^N w_j H_j} \quad (6.5)$$

Yukarıdaki denklem 6.4 ve denklem 6.5 formülasyonlarından yararlanılarak X ve Y doğrultusundaki her kata etkiyen eşdeğer deprem yükü çizelge 6.4'de verilmektedir.

Çizelge 6.4: Eşdeğer deprem yüküne göre kat kesme kuvvetleri.

Kat	h_i (m)	H_i (m)	w_i (kN)	$w_i \cdot H_i$	Oran	F_{ix} (kN)	F_{iy} (kN)	$F_{ix} + \Delta F_{Nx}$ (kN)	$F_{iy} + \Delta F_{Ny}$ (kN)
5	3.3	16.5	5079.7	83815.1	0.291	1790.1	1790.1	2029.4	2029.4
4	3.3	13.2	6176.5	81529.9	0.283	1741.3	1741.3	1980.6	1980.6
3	3.3	9.9	6176.5	61147.4	0.213	1306.0	1306.0	1545.3	1545.3
2	3.3	6.6	6176.5	40765.0	0.142	870.6	870.6	1110.0	1110.0
1	3.3	3.3	6176.5	20382.5	0.071	435.3	435.3	674.7	674.7
Toplam			29785.7	287639.7		6143.3	6143.3	7340.1	7340.1

TDY 2007'de belirtildiği gibi döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalıştığı binalarda, her katta iki yatay yer değiştirme bileşeni ile düşey eksen etrafındaki dönme, bağımsız yer değiştirme bileşenleri olarak göz önüne alınacaktır. Her katta yukarıdaki gibi bulunan eşdeğer deprem yükleri, ek dışmerkezlik etkisinin hesaba katılabilmesi amacı ile, göz önüne alınan deprem doğrultusuna dik doğrultudaki kat boyutunun +%5'i ve -%5'i kadar kaydırılması ile belirlenen noktalara ve ayrıca kat kütle merkezine uygulanacaktır. Dolayısıyla yapı modellenirken toplamda 4 adet olmak üzere hem X, hem de Y doğrultusunda kat kütle merkezlerine +%5 ve -%5 eksantrisite kuvvetleri çizelge 6.5'te olduğu gibi tanımlanacaktır.

Çizelge 6.5: Yapıya gelen %5 dış merkezli yükleme kombinasyonları.

Yükleme	Uygulama Şekli
EXP	X yönünde +%5 dış merkezli yükleme
EXN	X yönünde -%5 dış merkezli yükleme
EYP	Y yönünde +%5 dış merkezli yükleme
EYN	Y yönünde -%5 dış merkezli yükleme

Tanımlanan yüklemelere göre TDY 2007 uyarınca düzensizlik kontrolleri yapılır.

6.1.2 Yapıdaki düzensizliklerin tahkiki

TDY 2007 uyarınca yapıdaki gerekli olan tüm düzensizlikler kontrol edilmelidir.

6.1.2.1 A1 burulma düzensizliklerin tahkiki

TDY 2007'de birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük göreceli kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama göreceli

ötelemeye oranını ifade eden burulma düzensizliği katsayısı η_{bi} nin 1.2'den büyük olması şeklinde tanımlamaktadır.

$$\eta_{bi} = \frac{(\Delta_i)_{\max}}{(\Delta_i)_{\text{ort}}} > 1.2 \quad (6.6)$$

Eşdeğer deprem yükü statik analizine göre oluşturulan tüm yükleme kombinasyonlarda hiç bir A1 burulma düzensizliğine rastlanmamıştır. Sırasıyla EXP, EXN, EYP ve EYN yüklemeleri altında burulma düzensizliği katsayıları çizelge 6.6, 6.7, 6.8, 6.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6: EXP yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları.

Kat	Yükleme	$(\Delta_i)_{\max}$	$(\Delta_i)_{\min}$	η_{bi}
		mm	mm	
Kat5	EXP	2,80	2,50	1,12
Kat4	EXP	5,00	4,40	1,14
Kat3	EXP	6,90	6,10	1,13
Kat2	EXP	8,00	7,00	1,14
Kat1	EXP	5,90	5,10	1,16

Çizelge 6.7: EXN yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları.

Kat	Yükleme	$(\Delta_i)_{\max}$	$(\Delta_i)_{\min}$	η_{bi}
		mm	mm	
Kat5	EXN	2,9	2,5	1,16
Kat4	EXN	5,0	4,4	1,14
Kat3	EXN	6,9	6,1	1,13
Kat2	EXN	8,0	7,0	1,14
Kat1	EXN	5,9	5,1	1,16

Çizelge 6.8: EYP yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları.

Kat	Yükleme	$(\Delta_i)_{\max}$	$(\Delta_i)_{\min}$	η_{bi}
		mm	mm	
Kat5	EYP	2,6	2,4	1,08
Kat4	EYP	4,7	4,3	1,09
Kat3	EYP	6,4	5,9	1,08
Kat2	EYP	7,5	6,9	1,09
Kat1	EYP	5,7	5,2	1,10

Çizelge 6.9: EYN yüklemesi burulma düzensizliği katsayıları.

Kat	Yükleme	$(\Delta_i)_{\max}$	$(\Delta_i)_{\min}$	η_{bi}
		mm	mm	
Kat5	EYN	2,6	2,4	1,08
Kat4	EYN	4,7	4,3	1,09
Kat3	EYN	6,5	5,9	1,10
Kat2	EYN	7,5	6,9	1,09
Kat1	EYN	5,7	5,2	1,10

6.1.2.2 A2 döşeme süreksizliklerin tahkiki

TDY 2007'de A2 düzensizliği herhangi bir kattaki döşemede; merdiven ve asansör boşlukları dahil, boşluk alanları toplamının kat brüt alanının 1/3'ünden fazla olması durumu veya deprem yüklerinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarına güvenle aktarılabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşluklarının bulunması durumu veya döşemenin düzlem içi rijitlik ve dayanımında ani azalmaların olması durumu şeklinde tanımlanmaktadır. Modellenen yapıda A2 döşeme süreksizliği yoktur.

6.1.2.3 A3 planda çıkıntılar bulunmaması tahkiki

TDY 2007'de A3 düzensizliği bina kat planlarında çıkıntı yapan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de, binanın o katının aynı doğrultulardaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumu olarak tanımlanır. Modellenen yapıda böyle bir düzensizlik mevcut değildir.

6.1.2.4 B1 komşu katlar arasında dayanım düzensizliği (zayıf kat) tahkiki

TDY 2007'de betonarme binalarda, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi birinde, herhangi bir kattaki etkili kesme alanının, bir üst kattaki etkili kesme alanına oranı olarak tanımlanan dayanım düzensizliği katsayısı η_{ci} 'nin 0.80'den küçük olması durumunda dayanım düzensizliği olarak tanımlanmaktadır. Modelde herhangi zayıf kat düzensizliği bulunmamaktadır.

$$\eta_{ci} = \frac{\Sigma(A_e)_i}{\Sigma(A_e)_{i+1}} < 0,8 \quad (6.7)$$

6.1.2.5 B2 komşu katlar arasında rijitlik düzensizliği (yumuşak kat) tahkiki

TDY 2007'de birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir i'inci kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan rijitlik düzensizliği

katsayısı η_{ki} 'nin 2.0'den fazla olması durumudur. Göreli kat ötelemelerinin hesabında $\pm$ %5 ek dışmerkezlilik etkileri göz önüne bulundurulacaktır. Denklem 6.8 ve denklem 6.9 yumuşak kat için gerekli formülasyonları göstermektedir. Çizelge 6.10, 6.11, 6.12 ve 6.13 yapıda komşu katlar arası rijitlik düzensizlik tahkiklerini göstermektedir.

$$\eta_{ki} = \frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}} > 2 \quad (6.8)$$

$$\eta_{ki} = \frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}} > 2 \quad (6.9)$$

Çizelge 6.10: EXP yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği.

Kat	Yükleme	Ortalama (Δ_i) _{ort}	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}}$	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}}$
		mm		
Kat5	EXP	2,50	0,57	
Kat4	EXP	4,40	0,72	1,76
Kat3	EXP	6,10	0,87	1,39
Kat2	EXP	7,00	1,37	1,15
Kat1	EXP	5,10		0,73

Çizelge 6.11: EXN yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği.

Kat	Yükleme	Ortalama (Δ_i) _{ort}	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}}$	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}}$
		mm		
Kat5	EXN	2,50	0,57	
Kat4	EXN	4,40	0,72	1,76
Kat3	EXN	6,10	0,87	1,39
Kat2	EXN	7,00	1,37	1,15
Kat1	EXN	5,10		0,73

Çizelge 6.12: EYP yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği.

Kat	Yükleme	Ortalama (Δ_i) _{ort}	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}}$	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}}$
			Mm	
Kat5	EYP	2,40	0,56	
Kat4	EYP	4,30	0,73	1,79
Kat3	EYP	5,90	0,86	1,37
Kat2	EYP	6,90	1,33	1,17
Kat1	EYP	5,20		0,75

Çizelge 6.13: EYN yüklemesi için komşu katlar arası rijitlik düzensizliği.

Kat	Yükleme	Ortalama (Δ_i) _{ort}	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}}$	$\frac{(\Delta_i/h_i)_{ort}}{(\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}}$
			Mm	
Kat5	EYN	2,40	0,56	
Kat4	EYN	4,30	0,73	1,79
Kat3	EYN	5,90	0,86	1,37
Kat2	EYN	6,90	1,33	1,17
Kat1	EYN	5,20		0,75

Yukarıdaki çizelgelerde görüldüğü gibi komşu katlar arası rijitlik düzensizliği yoktur.

6.1.2.6 B3 taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği tahkiki

TDY 2007'de taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının (kolon veya perdelerin) bazı katlarda kaldırılarak kirişlerin veya guseli kolonların üstüne veya ucuna oturtulması, ya da üst kattaki perdelerin altta kolonlara oturtulması durumu B3 taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği şeklinde tanımlanmaktadır.

Yapı modelinde böyle bir durum bulunmadığından B3 düzensizliği yoktur.

6.1.3 Göreli yer değiştirme tahkiki

TDY 2007'de göreli kat ötelemeleri; herhangi bir kolon veya perde için, ardışık iki kat arasındaki yer değiştirme farkını ifade eden azaltılmış göreli kat ötelemesi, denklem 6.10 ile ifade edilir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \quad (6.10)$$

Denklem 6.10'da d_i ve d_{i-1} her bir deprem doğrultusu için binanın i 'inci ve $(i-1)$ 'inci katlarında herhangi bir kolon veya perdenin uçlarında azaltılmış deprem yüklerine göre hesaplanan yatay yer değiştirmeleri göstermektedir. Her bir deprem doğrultusu için, binanın i 'inci katındaki kolon veya perdeler için etkin görelî kat öteleme, δ_i ; denklem 6.11 ile gösterilir.

$$\delta_i = R \cdot \Delta_i \quad (6.11)$$

Her bir deprem doğrultusu için, binanın herhangi bir i 'inci katındaki kolon veya perdelerde, hesaplanan δ_i etkin görelî kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri $(\delta_i)_{\max}$ denklem 6.12 koşulu sağlayacaktır:

$$\frac{(\delta_i)_{\max}}{h_i} \leq 0,02 \quad (6.12)$$

Yapı modelinde görelî kat öteleme koşulu tüm katlarda ve noktalarda sağlamaktadır. EXP, EXN EYP ve EYN yüklemelerinden kaynaklanan yapının 26 nolu birleşim doğrultusundaki görelî kat öteleme çizelge 6.14'te verilmiştir.

Çizelge 6.14: X ve Y doğrultusundaki 26 nolu noktanın görelî ötelemeleri.

Kat	Doğrultu	Yükleme	Görelî Öteleme (X)	Görelî Öteleme (Y)
			X	Y
Kat5	26	EXP	0,006	0,001
Kat5	26	EXN	0,005	0,001
Kat5	26	EYP	0,001	0,005
Kat5	26	EYN	0,001	0,005
Kat4	26	EXP	0,011	0,001
Kat4	26	EXN	0,008	0,001
Kat4	26	EYP	0,001	0,008
Kat4	26	EYN	0,001	0,010
Kat3	26	EXP	0,015	0,001
Kat3	26	EXN	0,011	0,001
Kat3	26	EYP	0,001	0,011
Kat3	26	EYN	0,001	0,014
Kat2	26	EXP	0,017	0,002
Kat2	26	EXN	0,013	0,002
Kat2	26	EYP	0,002	0,013
Kat2	26	EYN	0,002	0,016
Kat1	26	EXP	0,013	0,001
Kat1	26	EXN	0,009	0,001
Kat1	26	EYP	0,001	0,010
Kat1	26	EYN	0,001	0,012

6.1.4 İkinci mertebe etkileri tahkiki

TDY 2007'de taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal elastik olmayan davranışını esas alan daha kesin bir hesap yapılmadıkça, ikinci mertebe etkileri yaklaşık olarak denklem 6.13 ile hesaplanır.

$$\theta_i = \frac{(\Delta_i)_{ort} \cdot \sum_{j=i}^N w_j}{V_i h_i} \leq 0,12 \quad (6.13)$$

EXP, EXN, EYP, EYN yüklemelerinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri çizelge 6.15, 6.16, 6.17 ve 6.18'de görüldüğü gibi kabul edilebilir değerlerdedir.

Çizelge 6.15: EXP yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri.

Yükleme	Kat	h_i (m)	w_i (kN)	$(\Delta_i)_{ort}$ (mm)	V_i (kN)	θ_i
EXP	5	3,3	5079,7	2,5	2029,4	0,00190
EXP	4	3,3	6176,5	4,4	4010,1	0,00374
EXP	3	3,3	6176,5	6,1	5555,4	0,00580
EXP	2	3,3	6176,5	7,0	6665,4	0,00751
EXP	1	3,3	6176,5	5,1	7340,1	0,00627

Çizelge 6.16: EXN yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri.

Yükleme	Kat	h_i (m)	w_i (kN)	$(\Delta_i)_{ort}$ (mm)	V_i (kN)	θ_i
EXN	5	3,3	5079,7	2,5	2029,4	0,00190
EXN	4	3,3	6176,5	4,4	4010,1	0,00374
EXN	3	3,3	6176,5	6,1	5555,4	0,00580
EXN	2	3,3	6176,5	7,0	6665,4	0,00751
EXN	1	3,3	6176,5	5,1	7340,1	0,00627

Çizelge 6.17: EYP yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri.

Yükleme	Kat	h_i (m)	w_i (kN)	$(\Delta_i)_{ort}$ (mm)	V_i (kN)	θ_i
EYP	5	3,3	5079,7	2,4	2029,4	0,00182
EYP	4	3,3	6176,5	4,3	4010,1	0,00366
EYP	3	3,3	6176,5	5,9	5555,4	0,00561
EYP	2	3,3	6176,5	6,9	6665,4	0,00741
EYP	1	3,3	6176,5	5,2	7340,1	0,00639

Çizelge 6.18: EYN yüklemesinden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri.

Yükleme	Kat	h_i (m)	w_i (kN)	$(\Delta_i)_{ort}$ (mm)	V_i (kN)	θ_i
EYN	5	3,3	5079,7	2,4	2029,4	0,00182
EYN	4	3,3	6176,5	4,3	4010,1	0,00366
EYN	3	3,3	6176,5	5,9	5555,4	0,00561
EYN	2	3,3	6176,5	6,9	6665,4	0,00741
EYN	1	3,3	6176,5	5,2	7340,1	0,00639

6.2 Sismik İzolatör Tasarımı

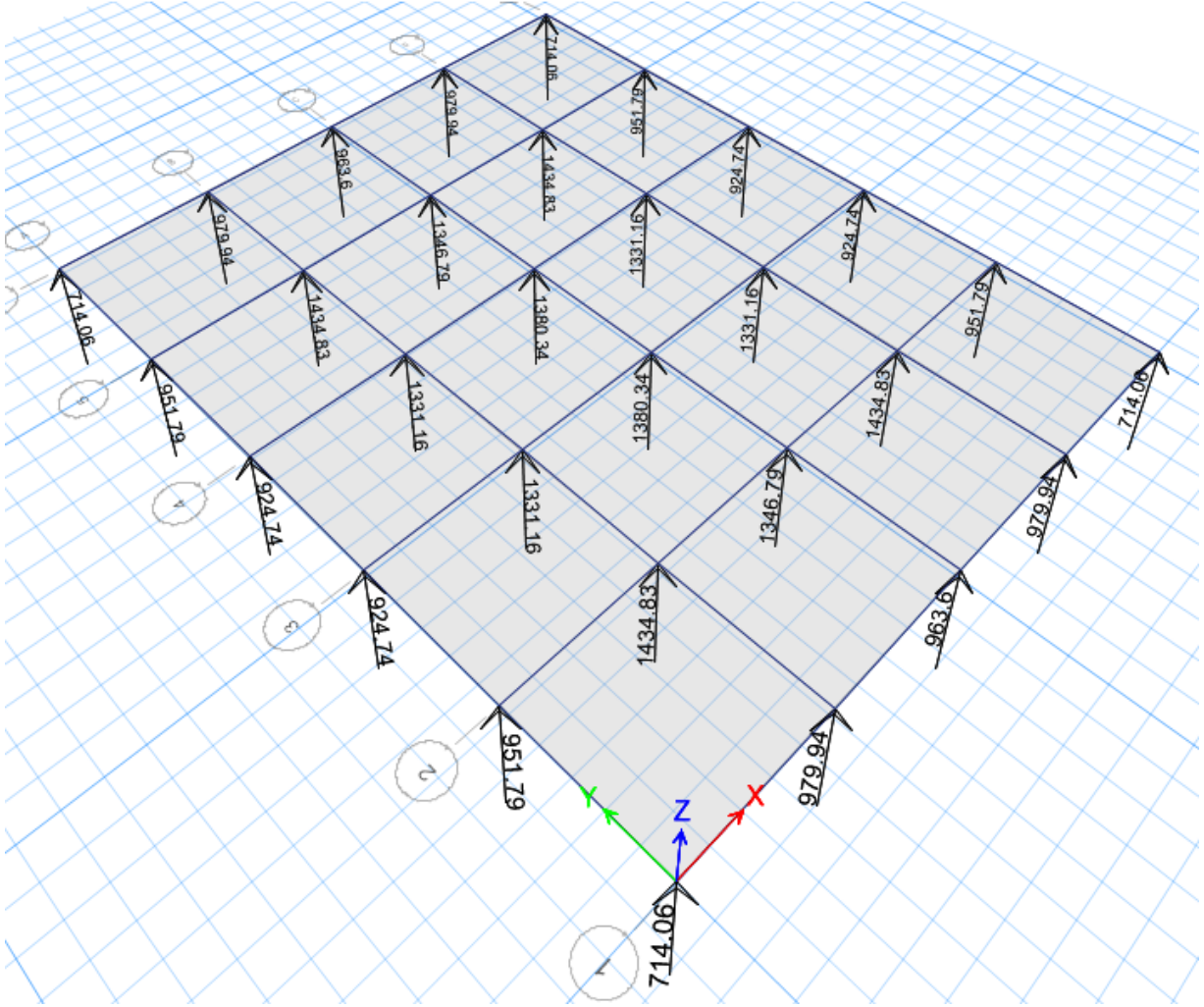
TDY 2007'de sismik yalıtım tasarımı ile ilgili olarak diğer uluslararası yönetmelikleri önerdiğinden, izolatör tasarımı için UBC 97 yönetmeliği kullanılacaktır. Yapının ankastreli sistemde doğal periyodu $T_x=0,507$ ve $T_y=0,505$ sn olarak bulunmuştur. Sismik izolatörlü yapı sadece tasarım temelli deprem seviyesindeki durum için tasarlanacak ve yapının izolasyonlu sistemle hedeflenen periyodu $T_D=2.0$ olarak seçilmiştir. Oluşturulan modelde UBC 97 yönetmeliğinden seçilen değerler aşağıdaki gibidir.

- Sismik bölge faktörü $Z=0,4$ (çizelge 5.2)
- Zemin tipi profili: S_D (Çizelge 5.3)
- Kaynağa yakınlık katsayıları (kaynak fay uzaklığı>15km; kayma hızı>5mm/yıl):
 - $N_A=1$ (Çizelge 5.5)
 - $N_V=1$ (Çizelge 5.6)
- Sismik kaynak tipi: A (Çizelge 5.4)
- Sismik yer katsayıları:
 - $C_A = C_{AD}=0,44$ (Çizelge 5.7)
 - $C_V = C_{VD}=0,64$ (Çizelge 5.8)
 - $C_{AM}=0,55$ (Çizelge 5.10)
 - $C_{VM}=0,8$ (Çizelge 5.11)
- Olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı: $M_M=1,25$ (Çizelge 5.9)

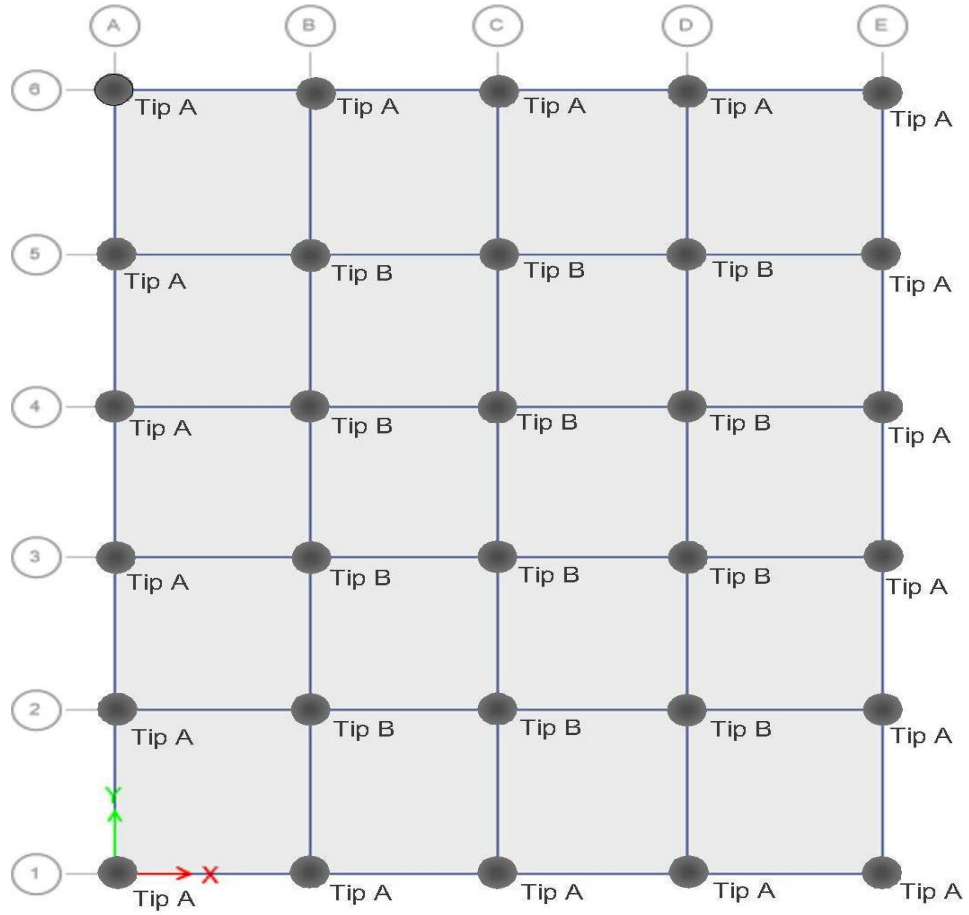
6.2.1 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin tasarımı

Yapının sismik izolatör tasarımında iki tür izolatör kullanılacaktır. Bu tez çalışmasında sadece tasarım temelli deprem seviyesindeki yükler için izolatörlü model tasarlanacaktır. Tasarım temelli deprem seviyesindeki en elverişsiz koşullarda birinci tip izolatör, köşe ve kenar aks kolonlarına gelen ve diğer kolonlara göre daha az yük taşıyan en büyük eksenel yükü $W^A=973,1$ kN olan kurşun çekirdekli kauçuk izolatör A tipi izolatördür. Orta kolonlara eksenel yükü en büyük $W^B=1435,6$ kN taşıyan B tipinde kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanılacaktır. İzolatörlere gelen diğer yüklemeler şekil 6.3'de verilmiştir. İzolatörlerin planda yerleşimi şekil 6.4'deki gibi olacaktır. Kurşun çekirdekli izolatörlerin kayma modülleri maksimum kayma

yer deşistirmelerinde 0,5 MPa ve tasarım yapılırken sönüm çarpanları her ikisinde $\beta = 0,20$ şeklinde alınacaktır. Tasarımda depreminde hedeflenen periyot $T_D = 2,0$ saniye olacaktır.



Şekil 6.3: İzolatörlere gelen en büyük düşey yükler



Şekil 6.4: İzolatör yerleşimi.

Kurşun çekirdekli izolatörlerin yer değiştirmeleri denklem 5.1 ve denklem 5.2 ile bulunur.

$$D_D = \frac{gC_{VD}T_D}{B4\pi^2} = \frac{9,81(0,64)(2,0)}{(1,5)4\pi^2} = 0,212 \text{ m}$$

İzolatörlerin efektif rijitlikleri denklem 5.5 ile hesaplanır.

$$K_{\text{eff}}^A = \frac{4\pi^2 W^A}{g(T_D)^2} = \frac{4\pi^2(973,1)}{(9,81)(2,0)^2} = 979,0 \text{ kN/m}$$

$$K_{\text{eff}}^B = \frac{4\pi^2 W^B}{g(T_D)^2} = \frac{4\pi^2(1435,6)}{(9,81)(2,0)^2} = 1444,3 \text{ kN/m}$$

İzolatörlerin çevrim alanı denklem 4.4 denkleminde ile hesaplanır.

$$W_D^A = 2\pi K_{\text{eff}}^A (D_D)^2 \beta_{\text{eff}} = 2\pi(979)(0,212)(0,2) = 55,3 \text{ kNm}$$

$$W_D^B = 2\pi K_{\text{eff}}^B (D_D)^2 \beta_{\text{eff}} = 2\pi(1444,3)(0,212)(0,2) = 81,6 \text{ kNm}$$

Karakteristik dayanım Q denklem 4.3 ile hesaplanır.

$$Q^A = \frac{W_D^A}{4(D_D - D_y^A)}$$

$$Q^B = \frac{W_D^B}{4(D_D - D_y^B)}$$

D_y^A ve D_y^B değerlerinin bulunması iteratif yöntemdir. $D_y^A = 0,01174$ ve $D_y^B = 0,01175$ alınır;

$$Q^A = \frac{W_D^A}{4(D_D - D_y^A)} = \frac{55,3}{4(0,212 - 0,01174)} = 69,0 \text{ kN}$$

$$Q^B = \frac{W_D^B}{4(D_D - D_y^B)} = \frac{81,6}{4(0,212 - 0,01174)} = 101,9 \text{ kN}$$

Dolayısıyla denklem 4.1 ile akma sonrası rijitlik hesaplanır.

$$K_p^A = K_{\text{eff}}^A - \frac{Q^A}{D_D} = 979 - \frac{69,0}{0,212} = 653,4 \text{ kN/m}$$

$$K_p^B = K_{\text{eff}}^B - \frac{Q^B}{D_D} = 1444,3 - \frac{101,9}{0,212} = 964,0 \text{ kN/m}$$

DeneySEL çalışmalardan elde edilen verilere göre elastik rijitlik K_e , yaklaşık olarak akma sonrası rijitlik K_p 'nin 6,5 ile 10 katı arasında olmaktadır. $K_e = 10K_p$ alınır; denklem 4.2'den akma deplasmanı bulunur.

$$D_y^A = \frac{Q^A}{K_e^A - K_p^A} = \frac{Q^A}{9K_p^A} = \frac{69}{9(653,4)} = 0,01174 \text{ m}$$

$$D_y^B = \frac{Q^B}{K_e^B - K_p^B} = \frac{Q^B}{9K_p^B} = \frac{101,9}{9(964)} = 0,01175 \text{ m}$$

Başlangıçtaki ve bulunan D_y^A ve D_y^B değerleri aynı olduğundan iteratif yöntem burada sonlandırılır. Kurşun çekirdeğin akma rijitliği $f_{y1}=10000 \text{ kN/m}$ olmak üzere, kurşun çekirdeğin alanı ve yarıçapı denklem 4.15 ile hesaplanır.

$$A_l^A = \frac{Q^A}{f_{y1}} = \frac{69}{10000} = 0,0069 \text{ m}^2 \rightarrow R_L^A = 0,046 \text{ m}$$

$$A_l^B = \frac{Q^B}{f_{y1}} = \frac{101,9}{10000} = 0,0102 \text{ m}^2 \rightarrow R_L^B = 0,057 \text{ m}$$

Kurşun çekirdeklerin yarıçapı $R_L^A = 0,05$ m ve $R_L^B = 0,06$ m seçilir ve yeniden denklem 4.15 ile karakteristik Q^A ve Q^B bulunur, izolatörlerin kauçuk kısmı için rijitlik K_p^A ve K_p^B tekrar denklem 4.1 ile hesaplanır.

$$Q^A = f_{y1}A_1^A = 10000(0,05)^2\pi = 78,5 \text{ kN}$$

$$Q^B = f_{y1}A_1^B = 10000(0,06)^2\pi = 113,1 \text{ kN}$$

$$K_p^A = K_{eff}^A - \frac{Q^A}{D_D} = 979 - \frac{78,5}{0,212} = 608,6 \text{ kN/m}$$

$$K_p^B = K_{eff}^B - \frac{Q^B}{D_D} = 1444,3 - \frac{113,1}{0,212} = 910,6 \text{ kN/m}$$

Kauçuk izolatörün yarıçap belirlenirken kauçuk malzemenin kopma uzama şekil değiştirmesi dikkate alınır. A tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatör için ve B tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatör yarıçapları sırasıyla $R^A = 0,30$ ve $R^B = 0,35$ m seçilirse, toplam yükseklik t_r^A ve t_r^B denklem 4.16 ile hesaplanır.

$$t_r^A = \frac{AG}{K_p^A} = \frac{(0,30^2 - 0,05^2)\pi 500}{608,6} = 0,225 \text{ m}$$

$$t_r^B = \frac{AG}{K_p^B} = \frac{(0,35^2 - 0,06^2)\pi 500}{910,6} = 0,205 \text{ m}$$

Kurşun çekirdekli kauçuk çekirdeğin toplam kalınlığı A tipi için 0,23 m ve B tipi 0,21 m seçilirse ve bu durumda kauçuk izolatörün rijitliği denklem 4.16 tekrar hesaplanır.

$$K_p^A = \frac{AG}{t_r^A} = \frac{(0,30^2 - 0,05^2)\pi 500}{0,23} = 597,6 \text{ kN}$$

$$K_p^B = \frac{AG}{t_r^B} = \frac{(0,35^2 - 0,06^2)\pi 500}{0,21} = 889,6 \text{ kN}$$

İzolatörlerin elastik rijitlikleri kauçuk rijitliklerin 10 katı kadar varsayılmıştı. Bu durumda elastik rijitlikler bulunur.

$$K_e^A = 10K_p^A = 10(597,6) = 5976 \text{ kN/m}$$

$$K_e^B = 10K_p^B = 10(889,6) = 8896 \text{ kN/m}$$

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin akma kuvvetleri ve efektif rijitlikleri denklem 4.17 ve denklem 4.18 ile hesaplanır.

$$F_{yl}^A = K_p^A D_y^A + Q^A = 597,6(0,01174) + 78,5 = 85,5 \text{ kN}$$

$$F_{yl}^B = K_p^B D_y^B + Q^B = 889,6(0,01175) + 113,1 = 123,5 \text{ kN}$$

$$K_{eff}^A = K_p^A + \frac{Q^A}{D_D} = 597,6 + \frac{78,5}{0,212} = 968 \text{ kN/m}$$

$$K_{eff}^B = K_p^B + \frac{Q^B}{D_D} = 889,6 + \frac{113,1}{0,212} = 1422,7 \text{ kN/m}$$

Sistemde toplam 18 adet A tipi ve 12 adet B tipi izolatör bulunmaktadır. Sistemin toplam rijitliği, periyodu denklem 5.3 ve dolayısıyla sistemin efektif sönümü denklem 4.19 ile hesaplanırsa;

$$K_{eff}^A + K_{eff}^B = 18(968) + 12(1422,7) = 34496 \text{ kN/m}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{9,81(K_{eff}^A + K_{eff}^B)}} = \sqrt{\frac{32727}{9,81(34496)}} = 1,96 \text{ sn}$$

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi k_{eff} D_D^2} = \frac{4Q(D_D - D_y)}{2\pi k_{eff} D_D^2}$$

$$= \frac{18(4)(78,5)(0,212 - 0,01174) + 12(4)(113,1)(0,212 - 0,01175)}{2\pi(34496)(0,212)^2} = 0,227$$

$\beta_{eff}=0,227$ değerine karşılık çizelge 5.12'de interpolasyon ile sönüm katsayısı $B=1,65$ olarak bulunmuştur. Sistemin tasarım yer değiştirmesi, denklem 5.1 ile hesaplanır.

$$D_D = \frac{g C_{VD} T_D}{B 4\pi^2} = \frac{9,81(0,64)(1,96)}{(1,65)4\pi^2} = 0,189 \text{ m}$$

Bulunan tasarım deplasmanı tahmin edilen tasarım deplasmanından uzaktadır. İteratif yöntemle tekrar tasarım deplasmanı hesaplanmak istenirse, başlangıç olarak $D_D = 0,180$ kabul edilir ve hesaplar tekrar edilirse, denklem 4.18 ile efektif rijitlik;

$$K_{eff}^A = K_p^A + \frac{Q^A}{D_D} = 597,6 + \frac{78,5}{0,180} = 1033,9 \text{ kN/m}$$

$$K_{eff}^B = K_p^B + \frac{Q^B}{D_D} = 889,6 + \frac{113,1}{0,180} = 1517,7 \text{ kN/m}$$

$$K_{eff}^A + K_{eff}^B = 18(1033,91) + 12(1517,7) = 36822,8 \text{ kN/m}$$

Sistemin periyodu denklem 5.3 ile tekrar hesap yapılır.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{9,81(K_{\text{eff}}^A + K_{\text{eff}}^B)}} = \sqrt{\frac{32727}{9,81(36822,8)}} = 1,92 \text{ sn}$$

Denklem 4.19 ile sistemin efektif sönümü tekrar hesaplanır.

$$\begin{aligned} \beta_{\text{eff}} &= \frac{W_D}{2\pi k_{\text{eff}} D_D^2} = \frac{4Q(D_D - D_y)}{2\pi k_{\text{eff}} D_D^2} \\ &= \frac{18(4)(78,5)(0,180 - 0,01174) + 12(4)(113,1)(0,180 - 0,01175)}{2\pi(36822,8)(0,180)^2} = 0,248 \end{aligned}$$

$\beta_{\text{eff}}=0,248$ değerine karşılık çizelge 5.12'de interpolasyon ile sönüm katsayısı $B=1,67$ olarak bulunmuştur. Sistemin tasarım yer değiştirmesi, denklem 5.1 ile hesaplanırsa;

$$D_D = \frac{gC_{VD}T_D}{B4\pi^2} = \frac{9,81(0,64)(1,92)}{(1,67)4\pi^2} = 0,180 \text{ m}$$

şeklinde bulunur ve başlangıç değeri ile bulunan değer aynı olduğundan iterasyon burada sonlandırılır. Burulma toleransı denklem 5.6 ile hesaplanır.

$$D_{DT} = D_D \left(1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) = 0,180 \left(1 + 12,65 \frac{12(25,3)(0,05)}{25,3^2 + 20,4^2} \right) = 0,212 \text{ m}$$

Bulunan D_D değerine karşılık $\gamma_{\text{max}} = 1,5$ kayma şekil değiştirmesi denklem 4.7 ile tahkiki yapılırsa,

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{D_D}{t_r^A} = \frac{0,18}{0,23} = 0,78 < 1,5$$

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{D_D}{t_r^B} = \frac{0,18}{0,21} = 0,85 < 1,5$$

Seçilen yarıçaplara bağlı olarak her bir kauçuk tabakasının kalınlığı $t=5$ mm seçilirse, denklem 4.8 ile kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin şekil faktörleri hesaplanır.

$$S^A = \frac{R^A}{2t} = \frac{0,30}{2(0,005)} = 30$$

$$S^B = \frac{R^B}{2t} = \frac{0,35}{2(0,005)} = 35$$

Buna göre A tipi izolatörde ve B tipi izolatörde 1,5 mm çelik levhalar ve 2,5 cm çelik alt ve üst başlıklar kullanılacaktır. A tipi izolatörde toplam 46 kat ve B tipi

izolatörde ise 42 kat 0,005 m'lik kauçuk kullanılacaktır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin toplam yükseklikleri;

$$h^A = 0,005(46) + 0,0015(45) + 0,025(2) = 0,347 \text{ m}$$

$$h^B = 0,005(42) + 0,0015(41) + 0,025(2) = 0,321 \text{ m}$$

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin düşey rijitliğini hesaplayabilmek için basınç modülünü hesaplamak gerekir. Bulk modülü $K=2000 \text{ MPa}$ olarak alınır ve denklem 4.8 ile yerinde konursa düşey rijitlik bulunmuş olur.

$$E_c^A = \frac{6GS^2K}{6GS^2 + K} = \frac{6(0,5)(30)^2(2000)}{6(0,5)(30)^2 + (2000)} = 1149 \text{ MPa}$$

$$E_c^B = \frac{6GS^2K}{6GS^2 + K} = \frac{6(0,5)(35)^2(2000)}{6(0,5)(35)^2 + (2000)} = 1295,15 \text{ MPa}$$

$$K_V^A = \frac{E_c^A A}{t_r^A} = \frac{1149 \text{ 000 } (0,30)^2 \pi}{0,23} = 1438469 \text{ kN/m}$$

$$K_V^B = \frac{E_c^B A}{t_r^B} = \frac{1295 \text{ 150 } (0,35)^2 \pi}{0,21} = 2431073 \text{ kN/m}$$

UBC 97 yönetmeliğine göre izolatörlere gelen taban kesme kuvveti ve üst yapıya gelen kuvvet hesaplanmalıdır. Denklem 5.8 ve denklem 5.9 ile sisteme gelen taban kesme kuvveti ve üst yapıya gelen tasarım kuvveti hesaplanır.

$$k_{D\max} = 36822,8 \text{ kN/m}$$

$$V_b = k_{D\max} D_D = (36822,8)(0,18) = 6620 \text{ kN}$$

Üst yapıya gelen tasarım kuvvetleri;

$$V_s = \frac{k_{D,\max} D_D}{R_I} = \frac{6620}{2} = 3310 \text{ kN}$$

UBC 97 yönetmeliğinde sismik izolasyonlu yapıda üst yapıya gelen kuvvetler, aynı periyottaki ankastre mesnetli yapıya gelen üst yapı kuvvetlerinden küçük olmamalıdır. 1,92 saniye için ankastre mesnetli yapıya gelen kesme kuvveti V_{sf} , hesaplanırsa

$$V_{sf} = \frac{C_v I W}{R_{IT}} = \frac{0,64(1,5)(32727)}{7(1,92)} = 2337,6 \text{ kN} \leq V_s = 3310 \text{ kN}$$

Düşey yükler altında maksimum kopma uzaması ϵ_b ile güvenlik tahkiki denklem 4.10 ve denklem 4.13 birlikte kullanılır ve düşey şekil değiştirme tahkiki yapılır.

$$\gamma_c = 6S^A \varepsilon_c = 6S^A \frac{W^A}{E_c^A A} = 6 (30) \frac{973,3}{(143846)(0,30^2)\pi} = 0,54 \leq \frac{\varepsilon_b}{3} = \frac{\%450}{3} = 1,5$$

$$\gamma_c = 6S^B \varepsilon_c = 6S^B \frac{W^B}{E_c^B A} = 6 (35) \frac{1435,6}{(2471073)(0,35^2)\pi} = 0,4 \leq \frac{\varepsilon_b}{3} = \frac{\%450}{3} = 1,5$$

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörde düşey gerilmelerden kaynaklanan stabilite sorunlarını ortadan kaldırmak için ortalama düşey gerilmeler denklem 6.13 koşulunu sağlamalıdır [4]

$$\frac{W}{A} \leq \frac{GSR}{2\sqrt{2}t_r} \quad (6.13)$$

$$\frac{W^A}{A} = \frac{973,3}{(0,30)^2\pi} = 3441,6 \text{ kN/m}^2 \leq \frac{GSR^A}{2\sqrt{2}t_r^A} = \frac{(500)(30)(0,30)}{2\sqrt{2}(0,23)} = 7045 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{W^B}{A} = \frac{1435,6}{(0,35)^2\pi} = 2528,5 \text{ kN/m}^2 \leq \frac{2GSR^A}{2\sqrt{2}t_r^A} = \frac{(500)(35)(0,35)}{2\sqrt{2}(0,21)} = 10562 \text{ kN/m}^2$$

Başlangıç rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesi kurşun çekirdeğin çapına bağlıdır. Kurşun çekirdeğin çapı denklem 6.14 koşulunu sağlamak zorundadır [4].

$$1,25 \leq \frac{t_r}{2R_L} \leq 5 \quad (6.14)$$

$$1,25 \leq \frac{t_r^A}{2R_L^A} = \frac{0,23}{2(0,05)} = 2,26 \leq 5 \checkmark$$

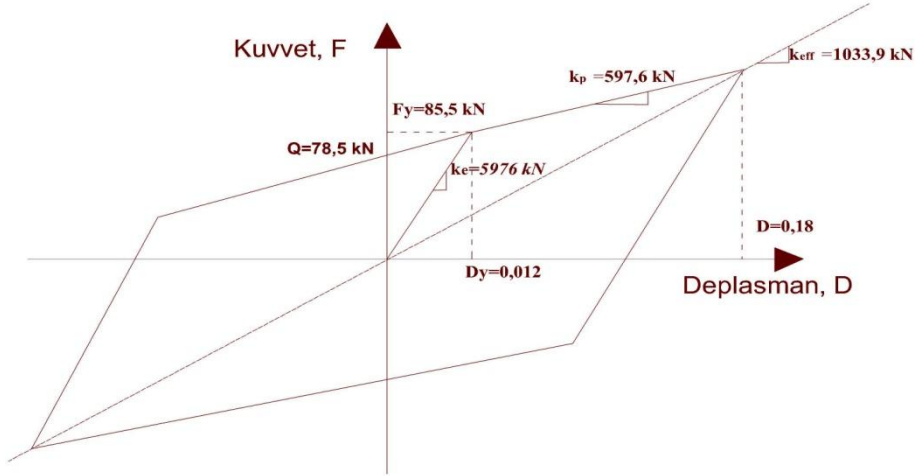
$$1,25 \leq \frac{t_r^B}{2R_L^B} = \frac{0,21}{2(0,06)} = 1,71 \leq 5 \checkmark$$

Burkulma stabilite tahkiki denklem 4.14 ile sağlanır.

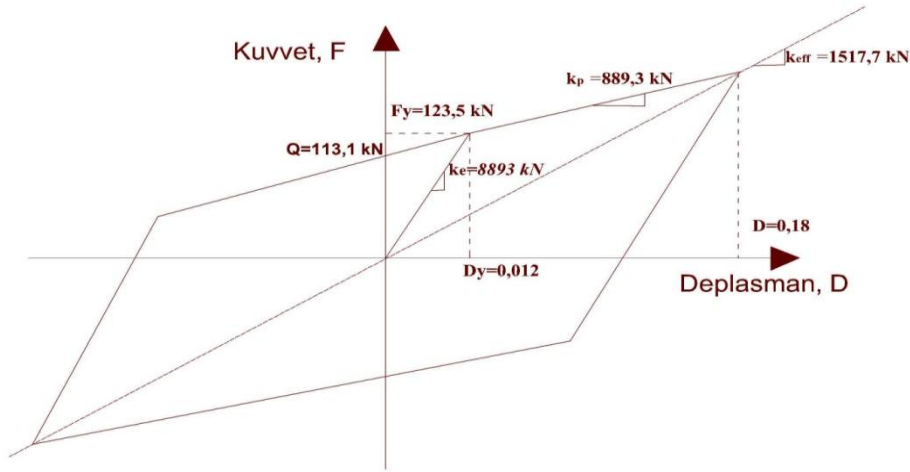
$$P_{cr}^A = \left(\frac{A\pi G S^A R^A}{\sqrt{2}t_r^A} \right) = \frac{(0,30)^2\pi^2(500)(30)(0,30)}{\sqrt{2}(0,23)} = 3983,5 \text{ kN} \geq 973,3 \text{ kN}$$

$$P_{cr}^B = \left(\frac{A\pi G S^B R^B}{\sqrt{2}t_r^B} \right) = \frac{(0,35)^2\pi^2(500)(35)(0,35)}{\sqrt{2}(0,21)} = 8129,6 \text{ kN} \geq 1435,6 \text{ kN}$$

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin histerik kuvvet deplasman grafiği şekil 6.5 ve şekil 6.6 ile gösterilir.



Şekil 6.5: A tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün kuvvet-deplasman grafiği.



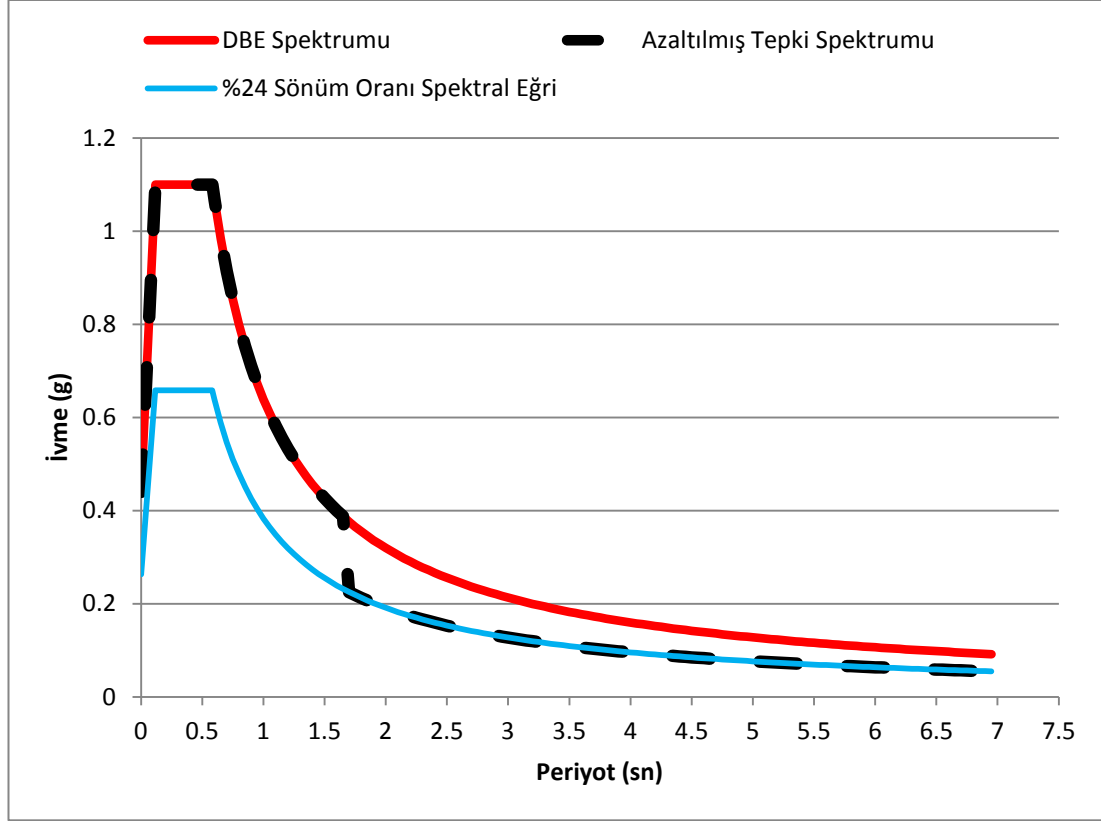
Şekil 6.6: B tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün kuvvet-deplasman grafiği.

6.2.2 Tepki spektrum analizi ile tasarım

UBC 97 yönetmeliğinde sismik izolatörlü yapı tasarlarken ön dizayn için eşdeğer deprem yükünü zorunlu kılmıştır. Bir önceki bölümde eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılarak sismik izolatörlü yapının izolasyonlu bölümündeki tasarım kuvvetleri ve yer değiştirmeleri bulunmuştu. Buna ek olarak UBC 97 yönetmeliği 4 kattan büyük sismik izolatörlü yapının dinamik analizlerle kontrol ve tasarım yapılmasını vurgulamaktadır.

Tepki spektrumu analizinde 5.1.2 bölümünde UBC 97 yönetmeliğinde açıklandığı üzere tasarım temelli deprem ve olabilecek maksimum depremlerin tepki spektrumu oluşturulacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken UBC 97 yönetmeliğinin %5 sönüm oranına göre oluşturulan tasarım tepki spektrumunun, sismik izolasyonlu yapının sönüm oranına karşılık olarak sönüm katsayısı oranında azaltılması gerekmektedir.

Şekil 6.7'de görüldüğü oluşturulan kompozit spektrumda %5 tasarım tepki eğrisi, sismik izolasyonlu yapı periyodu olan 1,9 saniyesinde daha önce hesaplanan efektif %24 sönüm oranına bağlı olarak çizelge 5.12'de interpolasyon yapılarak sönüm katsayısı olan $B=1,67$ ile azaltılmıştır.



Şekil 6.7: Kompozit tasarım tepki spektrumu

UBC 97 yönetmeliği tepki spektrumu analizi yapılırken yükleme yapılan kritik doğrultunun yanında kritik doğrultuya dik olan diğer doğrultunun da %30 kadar aynı anda ve birleştirilmesi ile yükleme yapılmasını dile getirmektedir. Bu iki yöndeki vektörlerin toplanmasıyla elde edilen maksimum değerler eşdeğer deprem yükü yöntemine elde edilen değerlerden az olmamalıdır.

6.2.3 Zaman tanım alanı analizi ile tasarım

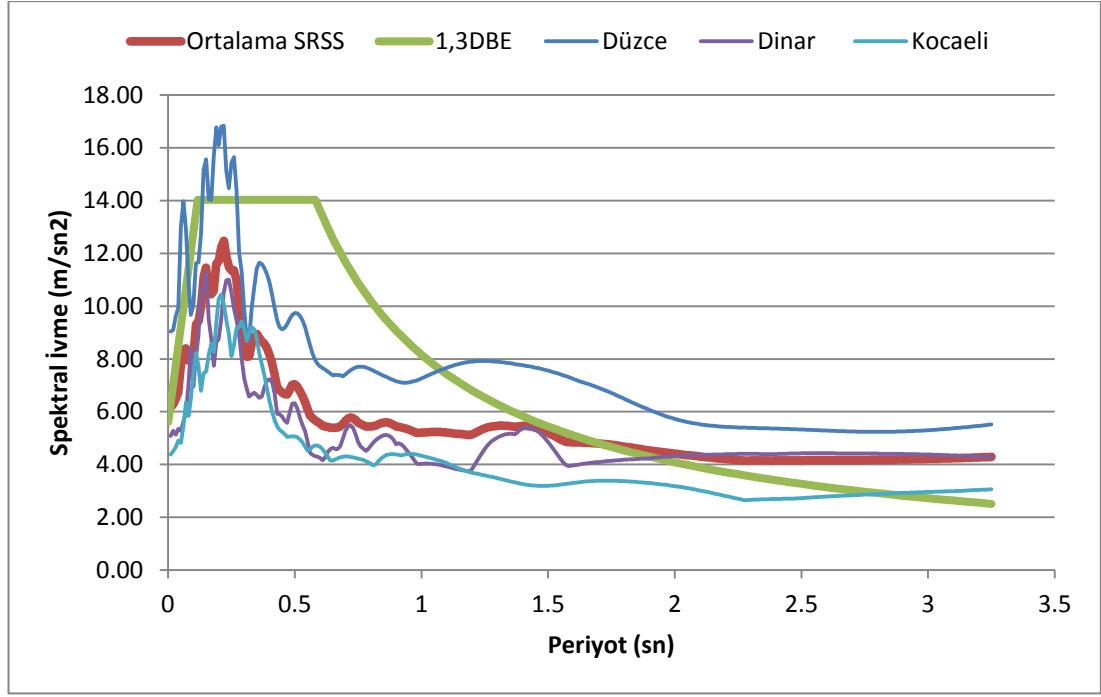
Genelde sismik izolatörlü yapı tasarlanarak, eşdeğer deprem yükü ve tepki spektrumu analizinden sonra seçilen izolatörlerin kontrolü için zaman tanım alanı analizini uygulanmaktadır. UBC 97 yönetmeliği zaman tanım alanında analiz yapılacağında en az üç adet kaydedilmiş yatay ivme kaydı bileşen çiftleri gerektiğini belirtmektedir. Zaman tanım alanı tasarımında yatay bileşenler aynı anda uygulanır. Her bir doğrultuda hesaplanan kuvvetler ve deplasmanların vektörel toplamı analizin

maksimum değerini oluşturmaktadır. Hesaplamalarda göz önüne alınan kayıtların fay hattına mesafeleri, kaynak karakteristikleri ve kayıtların büyüklükleri kendi aralarında tutarlı olması gerektiğini belirtir. Analiz sonucunda elde edilen büyüklüklerin en elverişsiz olana göre tasarım yapılması gerektiğini söyler.

Bu tez çalışmasında zaman tanım alanı analizinin tepki spektrumu ile karşılaştırmak ve seçilen sismik izolatörlü yapının hakim periyodu etrafında izolatörlerin performanslarını kontrol etmek adına deprem kayıtlarının leklendirmesi için $0,5T_D = 1,3$ saniye olarak alınacaktır. 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan tasarım depremi seviyesi özelliklerini taşıyan ve seçilen her bir deprem kayıt çiftlerinin karelerinin toplamının kareköklerinin ortalaması tasarım tepki spektrumunun 1,3 saniye ile 3,25 saniye arasında 1.3 katından az olmamak kaydıyla leklendirip izelge 6.19 gösterildiği gibi 3 adet deprem kaydı kullanılacaktır. leklendirilen kayıtlar iki yatay bileşenli olarak aynı anda uygulanacaktır. Buna göre 3 kayıt çiftinden en elverişsiz olana göre tasarım yapılabilir. şekil 6.8'de artırılmış tasarım depremin ile karelerin toplamının karekökü yöntemi ile oluşturulmuş ortalama deprem kayıtlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 6.19: Zaman tanım alanı analizinde kullanılacak deprem kayıtları.

Deprem Kaydı	Kayıt Tarihi	Büyüklük (Mw)	Faya Uzaklık (km)	En büyük İvme (m/s ²)			lek Katsayısı
				Kuzey-Güney İştikameti	Doğu-Batı İştikameti	Düşey İştikameti	
Düzce-1605	12.11.1999	7.2	17	7.39	8.05	2.00	1
Dinar-Merkez	01.11.1995	6.2	10	2.81	3.29	1.50	1.5
Kocaeli Merkez	17.08.1999	7.6	15.9	3.53	3.73	4.79	1.1



Şekil 6.8: Ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları.

6.3 Analiz Sonuçları Ve Bulgular

6.3.1 Giriş

Hastane gibi önem derecesi yüksek yapı tasarımında kat kuvvetlerini ve görelî kat ötelemelerini azaltmak adına, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanılmıştır. Taban ankastreli yani izolatör kullanılmadığı durumunda yapı TDY 2007 'ye göre tasarımılandırılmış olup eşdeğer deprem yükü yöntemine göre analiz edilmiştir. Tasarımılandırılan yapıda yönetmelik şartlarını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Yapının tüm modelleri ve analizleri ETABS programı vasıtasıyla lineer elastik yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra yapı bir önceki bölümde anlatıldığı gibi tasarlanan izolatörlerle modellenip UBC 97 yönetmeliği uyarınca yapı 4 kattan fazla olduğundan dinamik analizi gerektirdiğinden, tepki spektrumu ve zaman tanım alanı yöntemine göre çözümlenmiş ve ankastre mesnetli sisteme göre karşılaştırılmıştır.

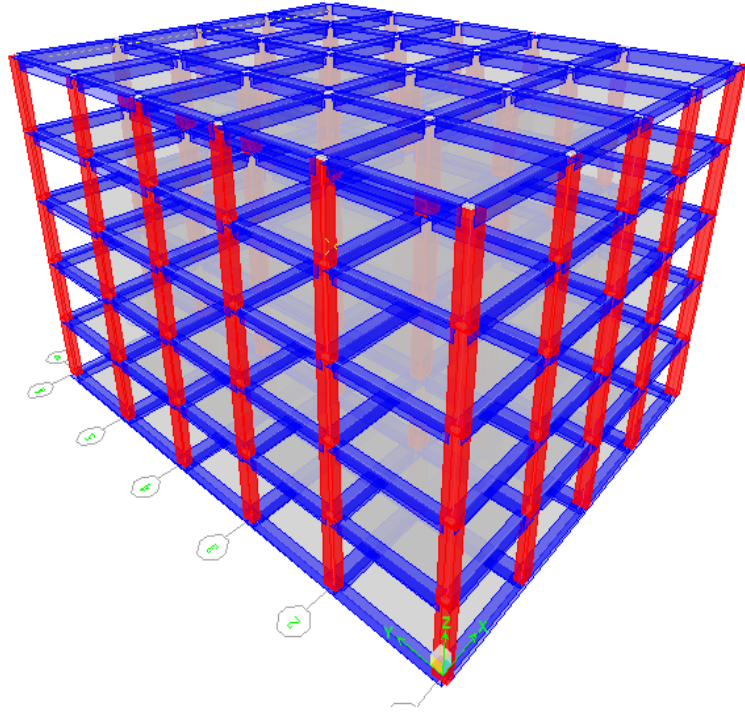
Sismik izolatörlü yapıların ETABS programında hesaplanan her bir izolatörlere ilişkin özellikleri tanımlarken çizelge 6.20 ve çizelge 6.21'den yararlanılır. Sismik izolatörlü yapının 3 boyutlu modeli şekil 6.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.20: A tipi izolatör modelleme mekanik karakteristikler.

İzolatör Tanımı	A Tipi Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör (LRB)		
Doğrultu	Özellikler	Lineer	Nonlineer
U1 (Düşey)	Düşey Rijitlik (K_v)	1438469 kN	-
U2 ve U3 (Yatay)	Efektif Rijitlik (K_{eff})	1133,91 kN	597,6 kN
	Efektif Sönüm (β_{eff})	0,251	
	Akma Kuvveti (F_y)	85,55 kN	
	Akma sonrası rijitliğin akma öncesi rijitliğe oranı	0,1	

Çizelge 6.21: B tipi izolatör modelleme mekanik karakteristikler.

İzolatör Tanımı	B Tipi Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör (LRB)		
Doğrultu	Özellikler	Lineer	Nonlineer
U1 (Düşey)	Düşey Rijitlik (K_v)	2431073 kN	-
U2 ve U3 (Yatay)	Efektif Rijitlik (K_{eff})	1517.7 kN	889.4 kN
	Efektif Sönüm (β_{eff})	0,246	
	Akma Kuvveti (F_y)	123,5 kN	
	Akma sonrası rijitliğin akma öncesi rijitliğe oranı	0,1	



Şekil 6.9: 3 boyutlu izolatörlü model.

6.3.2 Analizin irdelenmesi

6.3.2.1 Ankastre mesnetli yapı analizi

Ankastre mesnetli yapı analizinde daha önce açıklandığı gibi X yönündeki doğal periyot $T_x=0,507$ saniye, Y yönündeki doğal periyot $T_y=0,505$ saniye ve burulma periyodu $T_b=0,49$ saniye olarak bulunmuştur. Tepki spektrumu analizinde yükleme yapılan doğrultunun yanında bu doğrultuya dik olan yönünün %30'u kadar eklenerek yükleme aynı anda yapılmıştır. Ankastre mesnetli yapının tepki spektrumu analizi (TSA) ve zaman tanım alanı (ZTA) analizine ilişkin yapıdaki X ve Y yönündeki taban kesme kuvvetleri çizelge 6.22'deki gibidir.

Çizelge 6.22: ZTA analizinde maksimum x ve y taban kesme kuvvetleri.

Deprem Adı	Ankastre mesnetli yapı	
	X yönündeki Maksimum Taban Kesme Kuvveti (kN)	Y yönündeki Maksimum Taban Kesme Kuvveti (kN)
Kocaeli Depremi	19373.1	22321.0
Dinar Depremi	21525.8	16148.1
Düzce Depremi	34006.9	49634.3
(TSA)	24820.6	24945.5

Zaman tanım alanı ve tepki spektrumu analizinde ankastre mesnetli yapı için maksimum kat yer değiştirmeleri de çizelge 6.23'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.23: Deprem kayıtlarına ilişkin maksimum kat yer değiştirmeleri.

Deprem Adı	Maksimum kat yer değiştirmesi (mm)							
	Düzce Depremi		Kocaeli Depremi		Dinar Depremi		Tepki Spektrumu Analizi	
Katlar	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Kat 5	-120.9	-160.1	66.4	-76.5	82.3	55.2	84.7	83.6
Kat 4	-108.7	-146.4	60.4	-69.7	74	50.4	77	76.3
Kat 3	-86.7	-119.5	48.8	-56.5	58.6	40.9	62.2	62
Kat 2	-57.3	-81	32.5	-37.7	37.9	27.4	41.5	41.7
Kat 1	-24.1	-35.3	13.7	-16.1	15.5	11.7	17.5	18
Temel	0	0	0	0	0	0	0	0

Deprem kayıtları ve tepki spektrumu yöntemi ile yapılan dinamik analizde, ankastre mesnetli yapının kat ivmeleri de göz önüne alınmıştır. Ankastre mesnetli yapıdaki her bir kat ivmeleri çizelge 6.24'te verilmiştir.

Çizelge 6.24: Ankastre mesnetli yapının 1. ve 5. kattaki ivme değerleri.

Deprem Adı	Ankastre mesnetli yapı			
	1. Kat İvmesi (m/s ²)		5. Kat İvmesi (m/s ²)	
	X Doğrultusu	Y Doğrultusu	X Doğrultusu	Y Doğrultusu
Düzce Depremi	-8.14	-8.97	23.01	26.97
Kocaeli Depremi	3.74	4.77	-10.98	12.91
Dinar Depremi	-5.32	-3.53	-15.36	-9.25

Ankastre mesnetli olarak tasarlanan yapının, zaman tanım alanı ve tepki spektrumu analizine ilişkin maksimum görelî kat ötelemeleri ve kat kesme kuvvetleri sırasıyla çizelge 6.25 ve çizelge 6.26'daki gibidir.

Çizelge 6.25: Deprem kayıtlarına ilişkin maksimum görelî kat ötelemeleri.

Deprem Adı	Maksimum görelî kat ötelemesi (mm)			
	Dinar Depremi	Kocaeli Depremi	Düzce Depremi	TSA
Kat 5	0.001475	0.001851	0.004243	0.002298
Kat 4	0.002893	0.003672	0.008252	0.004415
Kat 3	0.0041	0.005293	0.011763	0.006189
Kat 2	0.00475	0.00628	0.01398	0.007196
Kat 1	0.003538	0.004821	0.010773	0.00544

Çizelge 6.26: Ankastre mesnetli yapının ZTA ve TSA karşılaştırılması.

Kat Kesme Kuvvetleri	Ankastre mesnetli yapı							
	Düzce		Kocaeli		Dinar		TSA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Kat 5	9855	11508	4264	5013	6532	3986	6364	6336
Kat 4	20058	25084	9465	11178	14087	8834	13559	13548
Kat 3	26954	36337	13637	16059	19219	12752	19218	19242
Kat 2	31900	45005	16426	19190	21504	15338	23139	23212
Kat 1	34223	49937	17722	20419	21670	16249	24974	25099
Taban	34006	49634	19373	22321	21525	16148	24820	24945

6.3.2.2 Sismik izolasyonlu yapı analizi

Yapıda tabana yerleştirilen izolatörlerle oluşturulan sismik izolatörlü yapının periyot artışı, kat ivmelerinde azalma ve kat kesme kuvvetlerinde azalma sağlanmıştır. Bilgisayar analiz programında modellenen ve tabana yerleştirilen kurşun çekirdekli

kauçuk izolatörlerle tasarlanan yapının periyotları ve ankastre mesnetli yapının periyotlarına göre kıyası çizelge 6.27'de verilmiştir.

Çizelge 6.27: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların periyotları.

Periyot (sn)	Ankastre Mesnetli Yapı	Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlü Yapı
T_x	0.507	1.86
T_y	0.505	1.86
T_b	0.49	1.81

Tabana yerleştirilen kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerle tasarlanan yapının dinamik analizinde maksimum kat yer değiştirmeleri, kat kesme kuvvetleri, ve 1. ve 5. katların ivmeleri sırasıyla çizelge 6.28 çizelge 6.29 ve çizelge 6.30'da verilmiştir.

Çizelge 6.28: İzolasyonlu yapı dinamik analizleri maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması.

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör yapısında maksimum kat yer değiştirmesi (mm)								
Dinamik Analiz	Düzce Depremi		Kocaeli Depremi		Dinar Depremi		TSA	
Katlar	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Kat 5	-169.5	158.9	-154.3	147.9	149.3	-158	182.5	182.1
Kat 4	-168	158.2	-153.2	147.0	148.8	-157.2	181.2	181
Kat 3	-165.1	156.6	-151.2	145.3	147.6	-155.3	178.8	178.6
Kat 2	-161.4	154	-148.1	142.8	145.4	-152.4	175.1	175.1
Kat 1	-157.5	150.5	-144	139.6	142.1	-148.3	170.3	170.4
Temel	-154.1	146.8	-139.7	136.5	138.1	-143.8	165.4	165.5

Çizelge 6.29: İzolasyonlu yapının dinamik analizlerinin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Dinamik Analiz	Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör yapısında taban kesme kuvvetleri (kN)							
	Düzce		Kocaeli		Dinar		Tepki Sp. Analizi	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Kat 5	1772.3	1123.8	999.8	779.2	1321.6	1394.8	912.5083	910.7917
Kat 4	3500.1	2502.5	2213.6	1778.1	2864.8	2787.7	2117.904	2115.748
Kat 3	4495.2	3624.6	3217.3	2731.2	3983.4	3513.9	3288.646	3287.334
Kat 2	4790.9	4451.0	4016.0	3641.9	4684.3	4363.9	4426.518	4427.033
Kat 1	4673.8	5105.2	4805.2	4574.4	5111.2	5132.4	5537.206	5539.951
Taban	4715.4	5437.4	5280.9	4994.6	5525.3	5722.9	6088.684	6092.558

Çizelge 6.30: İzolasyonlu yapının 1. ve 5. kattaki ivmeler.

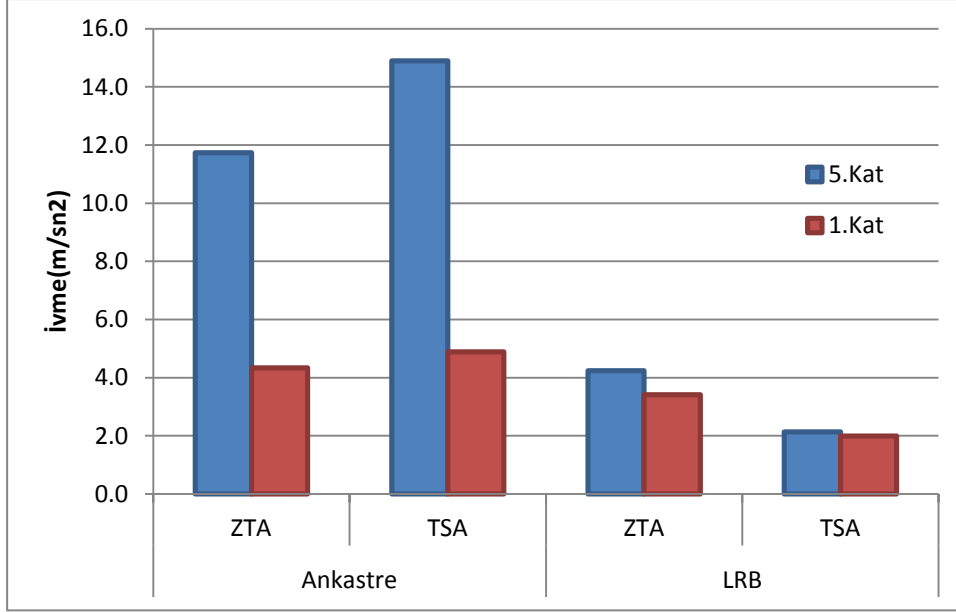
Deprem Adı	Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü maksimum kat ivmeleri			
	1. Kat İvmesi (m/s ²)		5. Kat İvmesi (m/s ²)	
	X	Y	X	Y
	Doğrultusu	Doğrultusu	Doğrultusu	Doğrultusu
Düzce Depremi	3.41	2.10	4.25	-2.69
Kocaeli Depremi	-2.59	-1.69	-2.93	-1.86
Dinar Depremi	-2.61	3.00	-3.22	3.36

6.3.2.3 Sismik izolasyonlu ve ankastre mesnetli yapı karşılaştırması

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör (LRB) ve ankastre mesnetli olarak tasarlanan yapıda katlara etkiyen kat ivmeleri çizelge 6.31 ve şekil 6.10'da verilmiştir. Buna göre ankastreli mesnet olarak tasarlanan tepki spektrumu analizinde kat 5. kat ivmesi 14,9 m/sn² iken kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü tasarlanan yapıda ise yaklaşık 7 kat azalarak 2.1 m/sn² olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.31: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapının katlara etkiyen maksimum ivmeleri.

Katlara etkiyen maksimum ivme (m/sn ²)				
Katlar	Ankastre		LRB	
	ZTA	TSA	ZTA	TSA
5	11.7	14.9	4.2	2.1
1	4.3	4.9	3.4	2.0

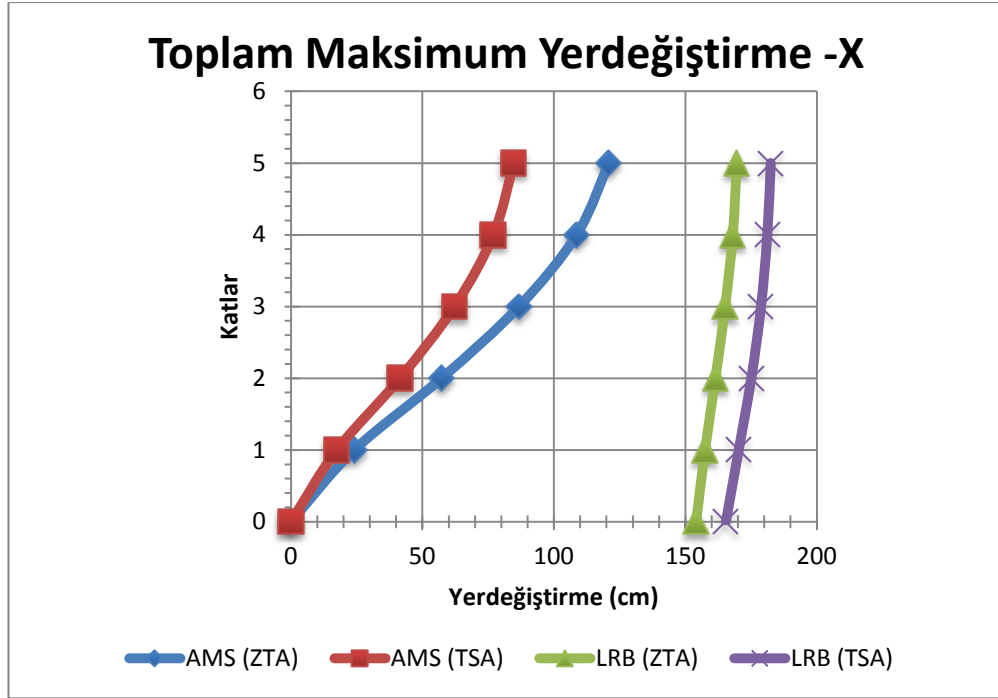


Şekil 6.10: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların ivme karşılaştırması.

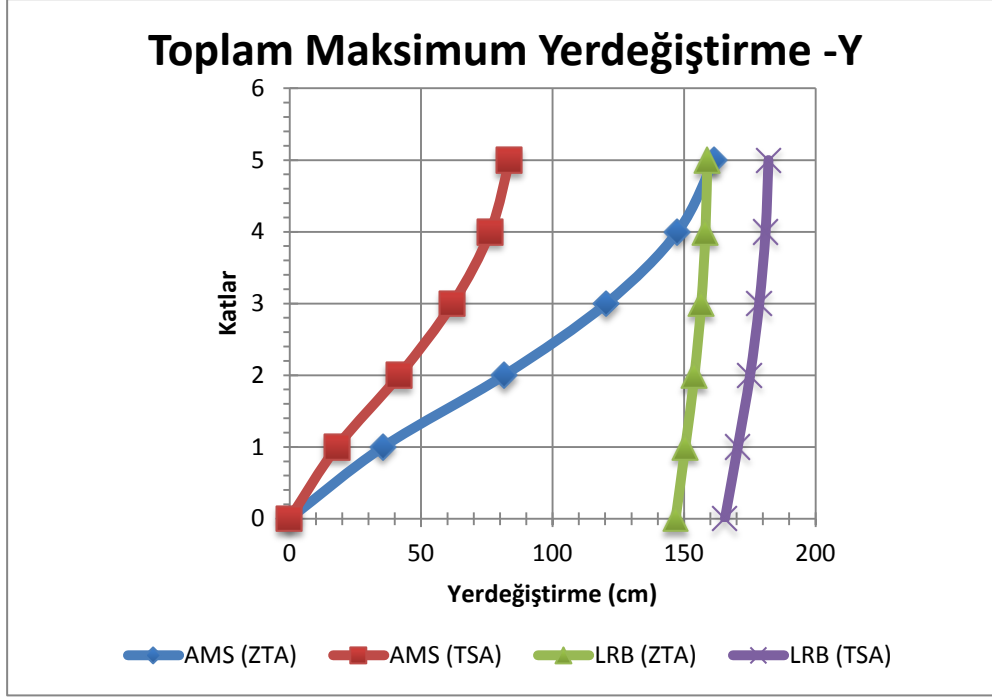
Çizelge 6.32, şekil 6.11 ve şekil 6.12'de görüldüğü gibi ankastre mesnetli yapı ile sismik izolatörlü olarak tasarlanan yapının dinamik analizleri yapılarak x ve y yönü için en büyük kat deplasmanları karşılaştırılmıştır. Buna göre en büyük taban deplasmanları tepki spektrumu analizinde y yönündedir.

Çizelge 6.32: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların dinamik analizlerine ait kat yer değiştirmeleri.

Kat deplasmanları (mm)								
Katlar	Ankastre Mesnetli Yapı				LRB izolatörlü yapı			
	ZTA Analizi		TSA		ZTA Analizi		TSA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Kat 5	-120.8	-161.3	84.7	83.6	-169.5	158.9	182.5	182.1
Kat 4	-108.6	-147.6	77	76.3	-168	158.2	181.2	181
Kat 3	-86.7	-120.5	62.2	62	-165.1	156.6	178.8	178.6
Kat 2	-57.3	-81.7	41.5	41.7	-161.4	154	175.1	175.1
Kat 1	-24.1	-35.6	17.5	18	-157.5	150.5	170.3	170.4
Taban	0	0	0	0	-154.1	146.8	165.4	165.5

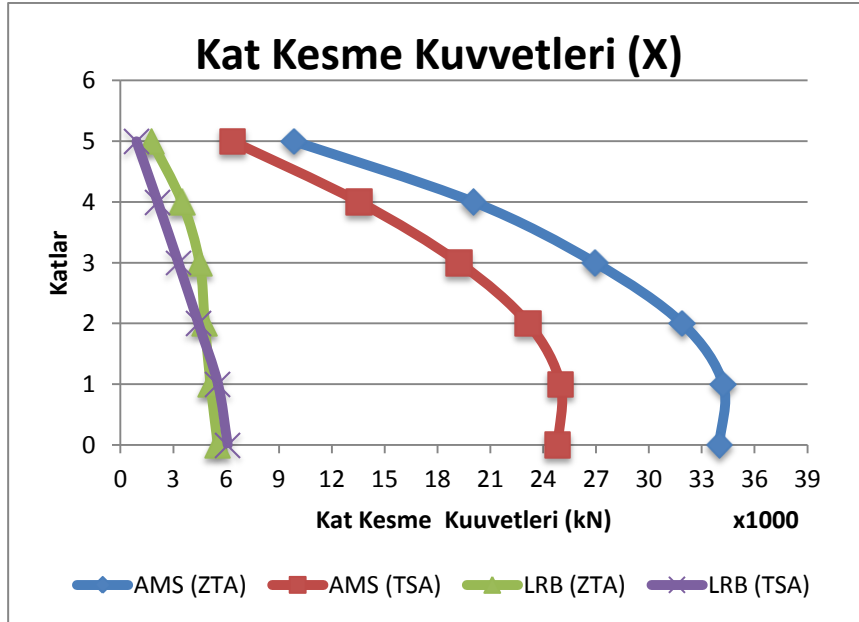


Şekil 6.11: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların toplam max yer değiştirmesi-x.

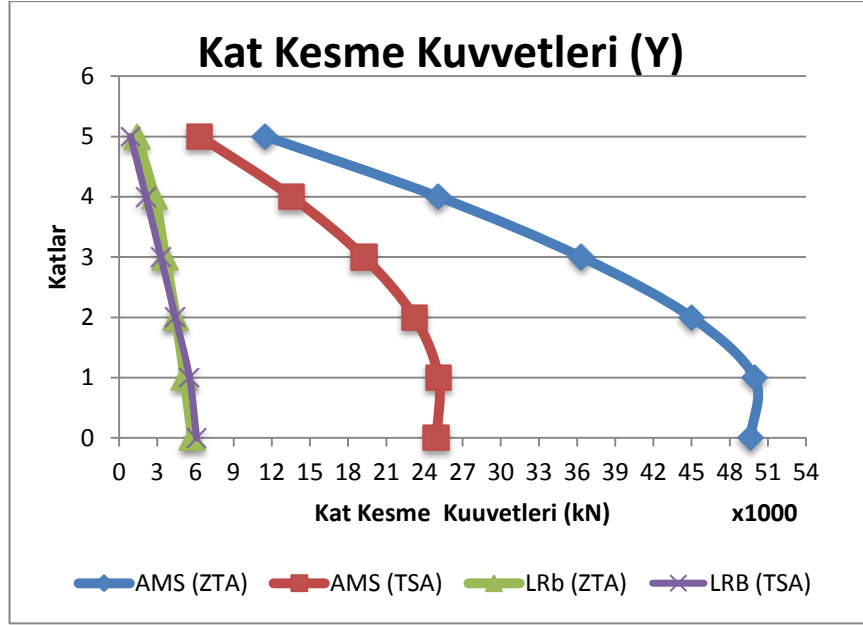


Şekil 6.12: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların toplam max yer değıştirmesi-y.

Çizelge 6.33, ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu yapılar için her bir deprem kaydına ait doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi ile tepki spektrumu analizi gerçekleştirilmiş, taban ve kat kesme kuvvetleri gösterilmiştir. şekil 6.13 ve şekil 6.14'te ise taban ve kat kesme kuvvetlerin karşılaştırması yapılmıştır. Buna göre sismik izolatörlü yapıda en büyük kat kesme kuvvetleri tepki spektrumu analizinde ve y yönünde olmaktadır.



Şekil 6.13: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların kat kesme kuvvetleri-x.



Şekil 6.14: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların kat kesme kuvvetleri-y.

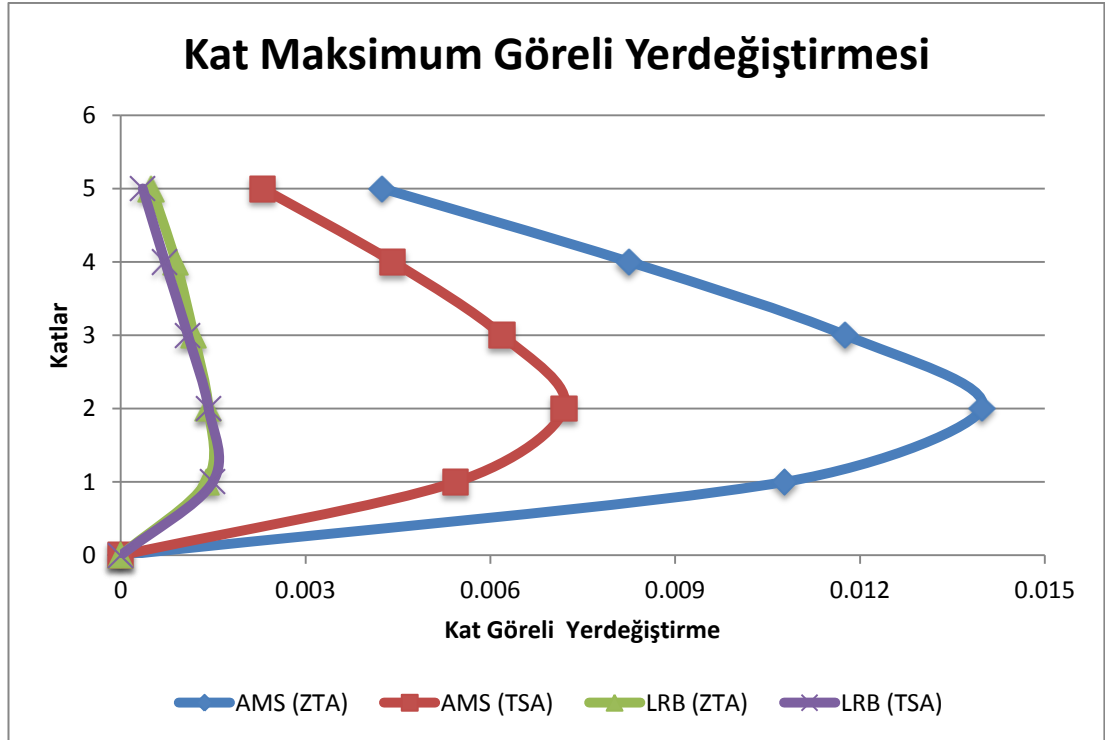
Çizelge 6.33: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların dinamik analizlerine ait kat kesme kuvvetleri.

Kat Kesme Kuvveti	LRB izolatörlü yapı								Ankastre mesnetli yapı							
	Düzce		Kocaeli		Dinar		TSA		Düzce		Kocaeli		Dinar		TSA	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Kat 5	1772.3	1123.8	999.8	779.2	1321.6	1394.8	912.5	910.8	9855.0	11508.8	4264.7	5013.3	6532.5	3986.3	6365.0	6336.5
Kat 4	3500.1	2502.5	2213.6	1778.1	2864.8	2787.7	2117.9	2115.7	20058.8	25084.8	9465.3	11178.9	14087.3	8834.0	13559.4	13548.4
Kat 3	4495.2	3624.6	3217.3	2731.2	3983.4	3513.9	3288.6	3287.3	26954.7	36337.3	13637.7	16059.1	19219.7	12752.8	19218.3	19242.5
Kat 2	4790.9	4451.0	4016.0	3641.9	4684.3	4363.9	4426.5	4427.0	31900.3	45005.8	16426.5	19190.3	21504.2	15338.1	23139.8	23212.2
Kat 1	4673.8	5105.2	4805.2	4574.4	5111.2	5132.4	5537.2	5540.0	34223.0	49937.1	17722.4	20419.8	21670.1	16249.9	24974.8	25099.9
Taban	4715.4	5437.4	5280.9	4994.6	5525.3	5722.9	6088.7	6092.6	34006.9	49634.3	19373.1	22321.0	21525.8	16148.1	24820.6	24945.5

Çizelge 6.34'te sismik izolatörlü yapının ankastre mesnetli yapıya göre dinamik analiz karşılaştırması yapılmış olup şekil 6.15'te bu karşılaştırmaların grafiği çizilmiştir. Buna göre en büyük görelî kat ötelemesi ankastre mesnetli yapıda olmaktadır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü olarak tasarlanan binada görelî kat ötelemeleri 10 kata kadar düşmektedir. Yine kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü olarak tasarlanan yapıda görelî kat ötelemeleri zaman tanım alanında tepki spektrumu analizine göre daha fazla olmaktadır.

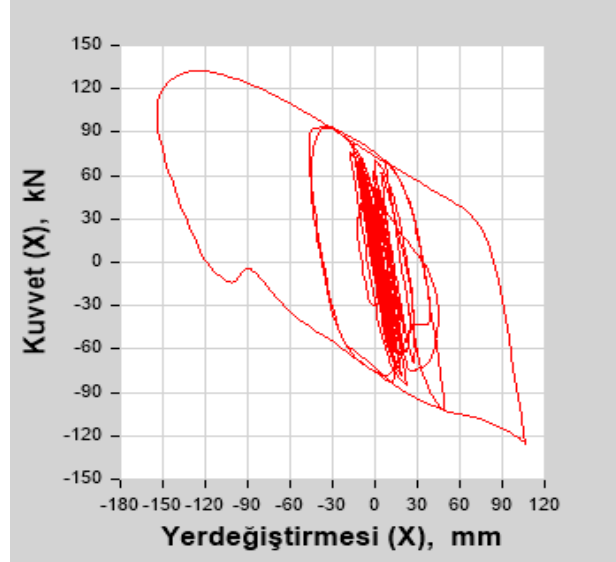
Çizelge 6.34: Her iki yapının dinamik analizine ait max görelî kat ötelemeleri.

Katlar	Maksimum görelî kat ötelemesi (mm)			
	Ankastre Mesnetli		LRB İzolatörlü	
	ZTA	TSA	ZTA	TSA
Kat 5	0.004243	0.00230	0.000499	0.000356
Kat 4	0.008252	0.00442	0.000892	0.000717
Kat 3	0.011763	0.00619	0.001182	0.00109
Kat 2	0.01398	0.00720	0.001424	0.001426
Kat 1	0.010773	0.00544	0.001388	0.001494

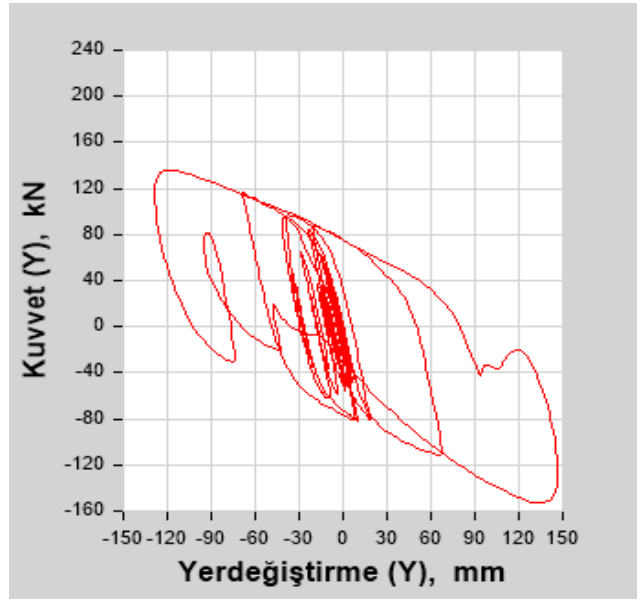


Şekil 6.15: İzolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların kat max görelî yer değiştirmesi.

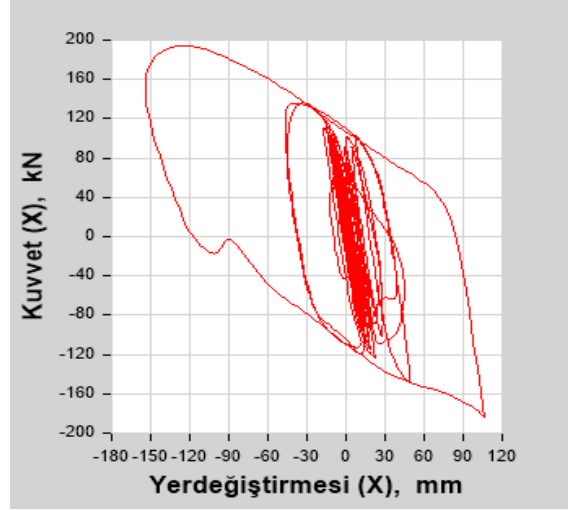
Sismik izolatörlü binada kullanılan A tipi ve B tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin Düzce depremi kaydına göre x ve y yönlerindeki kuvvet-deplasman grafiği çizdirilmiş olup, şekil 6.16 şekil 6.17, şekil 6.18, ve şekil 6.19'da gösterilmiştir.



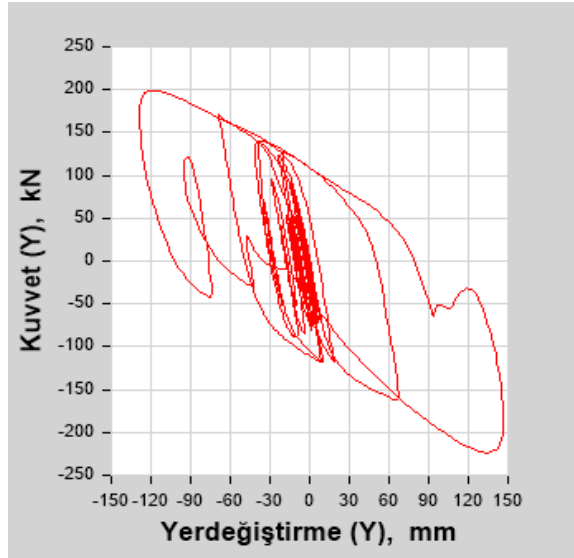
Şekil 6.16: A tipi köşe izolatörün Düzce-x yönünde kuvvet-yer değiştirmesi.



Şekil 6.17: A tipi köşe izolatörün Düzce-y yönündeki kuvvet-yer değiştirmesi.



Şekil 6.18: B tipi orta izolatörün Düzce-x yönündeki kuvvet-yer değiştmesi



Şekil 6.19: B tipi orta izolatörün Düzce-y yönündeki kuvvet-yer değiştmesi.

7. SONUÇ

Bu çalışmada ülkemizde tehdit oluşturan depremlere karşı sismik izolatörler kullanılarak depreme dayanıklı tasarım yapılmıştır. Sağlık bakanlığının 2013'te yayımladığı genelge ile 100 yataklı hastane binalarının sismik izolatörlerle tasarımı zorunlu kılması nedeniyle bu çalışmada hastane binası seçilmiştir. Çalışmanın başında sismik izolatörlerin mekanik özellikleri ve bunların modellenmesi hakkında genel bilgi verilmiş, daha sonra örnek olarak seçilen bir hastane binasının TDY 2007 yönetmeliğine göre ankastre mesnetli olarak tasarlanmıştır. TDY 2007 yönetmeliğine göre ankastre mesnetli olarak tasarlanan bu yapı daha sonra UBC 97 yönetmeliğine göre tasarım esaslı deprem düzeyindeki kriterlere göre sismik izolatörlü olarak tasarlanmıştır. 50 yılda aşılma olasılığı % 10 ve dönüş periyodu 475 yıl olan tasarım esaslı deprem seviyesine göre tasarlanan hastane binasının temeline iki ayrı tip olmak üzere toplam 30 adet kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler yerleştirilmiş, UBC 97 yönetmeliğine göre eşdeğer deprem yükü yönteminde ön tasarım yapılmıştır. Sismik izolatörlü hastane binasındaki kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler eşdeğer deprem yükü yöntemine göre belirlendikten daha sonra, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanı yöntemiyle seçilen izolatörlerin binadaki performansları kontrol edilmiştir. Tepki spektrumu analizinde, ankastre mesnetli sistem olarak yönetmelikçe belirlenen %5'lik sönüm oranı tasarım eğrisi, modellenen kurşun çekirdekli izolatörlü yapının efektif sönüm oranına bağlı olarak katsayı ile bölünerek azaltma yapılmıştır. Tepki spektrumu analizinde kritik doğrultudaki yüklemelerin yanında bu doğrultuya dik olarak %30 oranında aynı anda ek yükleme yapılmıştır.

Zaman tanım alanı analizinde; bölgeye uygun olarak, 12 Kasım 1999 Düzce depremi, 17 Ağustos Kocaeli Depremi ve 1 Ekim 1995 Dinar Depremi seçilerek yönetmelik gereğince ölçeklendirmeleri yapılmıştır. Her bir depremin yatay çifti bileşenleri yatay ve dikey olarak aynı anda uygulanarak seçilen kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin performansları incelenmiştir. Daha sonra ankastre mesnetli yapı ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü yapıda dinamik analiz olan tepki spektrumu ve zaman tanım analiz yöntemleri ile uygulanarak birbirileri ile karşılaştırılması

yapılmıştır. 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan bu tasarım deprem seviyelerinde en elverişsiz yüklemeler belirlenmiş olup sismik izolatörlerin tahkikleri tamamlanmıştır. Ankastre mesnetli olarak tasarlanan 5 katlı çerçeve sistemli hastane binasında yapının periyodu 0,506 saniye ve eşdeğer yükü yönteminde belirlenen taban kesme kuvvetleri 6382,7 kN olarak bulunmuştur. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerle tasarlanan modelde yapının periyodu 1,92 saniye ve eşdeğer yükü yöntemine göre sismik izolatör düzeyindeki taban kesme kuvvetleri 6620 kN olarak bulunmuş olup ankastre mesnetli yapıya göre taban kesme kuvvetleri daha büyüktür. Bunun temel nedeni tasarım aşamasında ankastre mesnetli yapıda süneklik katsayısı, sismik izolatörlü yapıya göre yüksek alınmasıdır.

Ankastre mesnetli yapı eşdeğer deprem yüküne göre statik olarak çözüldükten sonra yapının tabanına yerleştirilen kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler tepki spektrumu analizi ve seçilen deprem kayıtları ölçeklendirilmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri yapılmıştır. Tepki spektrumu analizinde taban kesme kuvvetleri maksimum y yönünde olup 6092.55 kN olmuştur. Yine kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü yapının tepki spektrumu analizinde görelî kat ötelemeleri ve kat ivmeleri ankastre mesnetli yapıya göre çok küçük düzeyde kalmıştır. Özellikle hastane binası gibi içinde sismik aktivitelere karşı çok hassas olan aletler içeren bu yapıda kat ivmelerinin 1/7 oranında azalması sismik izolatörlerin önemini göstermektedir. Sismik izolatörlerle azaltılan görelî kat ötelemeleri binanın büyük depremlerden sonra yapısal elemanlarında hiç hasar almamasını sağlayacaktır. Sismik izolatörlü yapının ankastreli yapıya göre azalan kat görelî öteleme, kat ivmeleri ve kat kesme kuvvetlerinin çok küçük değerlerde olması sismik izolasyon sisteminin etkin performansını gözler önüne sermektedir.

Zaman tanım alanı analizinde yönetmeliğe ve deprem bölgesine uygun en az 3 adet deprem çifti seçilmiş ve 1,3 ve 3,25 saniye arasında tasarım deprem seviyesini aşacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirilen depremler hem ankastre mesnetli yapı hem de kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü yapıda, her iki doğrultuda aynı anda olmak üzere doğrusal olmayan yöntem ile analizi yapılmıştır. Çıkan değerlerin en büyüğe göre seçilen değerler tepki spektrumu analizi ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Buna göre ankastre mesnetli sistemli yapıda zaman tanım alanı analizinde elde edilen maksimum değerler, tepki spektrumu analizine göre çok yüksek olmaktadır. Bunun temel nedeni, ankastre mesnetli yapının periyoduna bağlı olarak zaman tanım alanı analizinde bu periyotlara karşı gelen

ivmelerin tepki spektrum elastik eğrisinden büyük olmasıdır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü olarak tasarlanan yapıda ölçeklendirilen deprem kayıtlarına ilişkin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinde taban ve kat kesme kuvvetleri, kat deplasmanları tepki spektrumu analizine göre daha düşük olmuştur. Sismik izolatörlü yapının doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinde 1. ve 5. kat ivmeleri ve 3. kattan sonraki görelî kat ötelemeleri tepki spektrumu analizine göre yüksek çıkmıştır. Yine kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü yapının doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinin ankastre mesnetli yapıya göre taban ve kat kesme kuvvetleri, kat deplasmanları, görelî kat ötelemeleri ve en önemlisi kat ivmelerinde ciddi oranda azalış meydana gelmiştir. Bu da sismik izolatörlü yapının ne kadar etkin olduğunu göstermektedir.

Tüm analizler sonucunda kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün tasarımının yeterli performansı ve yapılan tüm tahkiklerin sağladığı görülüp, bu sismik izolatörün kullanılmasına karar verilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yang, Y.B., Lu, L.Y., ve Yau J.D.**, 2005. Vibration and Shock Handbook, CRC Press/Taylor & Francis Group, New York.
- [2] **Skinner, R.I., Robinson W.H., ve Mc Verry G.H.**, 1999. An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons Inc., West Sussex, England.
- [3] **Coşkun, E.**, 2004. Yapıların Depreme Karşı Korunmasında Etkin Bir Çözüm Sismik İzolasyon, Seminer Sunumu, Bursa İMO.
- [4] **Naeim, F. and Kelly, J.M.**, 1999. Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [5] **Alku, Ö.Z., Keskin, A.**, 2007. Sismik İzolatörler, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [6] **Kelly, J.M.**, 1998. Seismic Isolation As An Innovative Approach For The Protection Of Engineered Structures, Proceedings of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam.
- [7] **Mayes, R.L., Naeim, F.**, 2009. Design Structures of Seismic with Seismic Isolation, NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples, California
- [8] **Naderzadeh, A.**, 2009. Application of Seismic Base Isolation Technology in Iran, MENSIN Journal, No.63, 2009.2, pp.40-47, JSSI, Japonya
- [9] **Url-1** <<http://buildcivil.wordpress.com/2013/11/06/earth-quake-design-seismic-isolation/>>, alındığı tarih: 08.02.2014
- [10] **Zekioğlu, A., Darama, H., Erkuş, B.**, 2009. Performance-Based Seismic Design of a Large Seismically Isolated Structure: Istanbul Sabiha Gökçen International Airport Terminal Building, SEAOC 2009 Convention Proceedings, California.
- [11] **Url-2** <http://www.sanyohomes.co.jp/release/sandouble_x/>, alındığı tarih: 08.03.2014.
- [12] **Sato, E., Furikawa, S., Kakahi, A., Nakashima, M.**, 2011. Full-Scale Shaking Table Test for Examination of Safety and Functionality of Base-isolated Medical Facilities, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40, 1435-1455.
- [13] **Mayes, R.L., Brown, A.G., Pietra, D.**, 2012. Using Seismic Isolation and Energy Dissipation to Create Earthquake-Resilient Buildings, NZSEE Conference, Yeni Zelanda.
- [14] **Kubin, J., Kubin, D., Özman, A., Şadan, O.B., Eroğlu, E., Sucuoğlu, H., Akkar, S.**, 2012. Seismic Isolated Hospital Design Practice in Turkey, Erzurum Medical Hospital, 15 WCEE Conference, Lizbon.
- [15] **Toniolo, R.**, 2008. THK:CLB Crossed Linear Bearing Seismic Isolators. In Proceedings of the 2008, Seismic Engineering Conference: Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, Reggio Calabria, İtalya.

- [16] **Doğan, Ö.**, 2007. Sismik Taban İzolasyon Sistemleri ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.
- [17] **Tokuç, M.O.**, 2008. Mevcut Betonarme Bir Okul Binasının Performansının Değerlendirilmesi ve Sismik İzolasyon Kullanılarak Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [18] **Yücesoy, A.**, 2005. Sismik İzolatörler ile Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, MKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.
- [19] **Nakamura, Y., Saruta M., Wada A., Takeuchi T., Hikone S., Takahashi T.**, 2011. Development of the Core-Suspended Isolation System. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40(4), 429-447.
- [20] **Timur, T.**, 2010. Evaluation of Seismic Behaviour of Base Isolated Cylindrical Liquid Storage of Tanks. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Pınarbaşı, S. ve Akyüz, U.**, 2005. Sismik İzolasyon ve Elastomerik Yastık Deneyi, İMO Teknik Dergi, 3581-3598, Ankara.
- [22] **Sağlam, A. R. ve Özkul, H.**, 2000, Elastomer Mesnetlerin Zamana Bağlı Davranışı, İTÜ İnşaat Fakültesi Yayınları, 372-389, İstanbul.
- [23] **Warn, G. P., Whittaker, A. S., and Constantinou, M. C.**, 2007. Vertical Stiffness of Elastomeric and Lead-Rubber Seismic Isolation Bearings, Journal of Structural Engineering, 133(9), 1227-1236.
- [24] **Pınarbaşı, S. ve Akyüz, U.**, 2004. Elastomerik Köprü Yastıklarının Düşük Sıcaklıklardaki Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma, ODTÜ, Ankara.
- [25] **FEMA-274**, 1997. Seismic Isolation and Energy Dissipation, Federal Emergency Management Agency, Washington.
- [26] **UBC**, 1997. Uniform Building Code, Volume 2, Structural Engineering Design Provisions. California.
- [27] **Eurocode 8**, 2004. Design of Structures for Earthquake Resistance, European Standard Norme Européenne Europäische Norm.
- [28] **Carvalho, Fardis ve diğerleri**, 2012. JRC Scientific and Technical Reports, Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ali DOĞRU
Adres: Sarıyer/İstanbul
E-Posta: alidasd@gmail.com
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi- İnşaat Mühendisliği