

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİSMİK TABAN YALITIMLI BİNALARIN MODELLENMESİ,
TASARIMINDA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER VE PRATİK
MÜHENDİSLİK ÇÖZÜMLERİ**

MURAT ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİSMİK TABAN YALITIMLI BİNALARIN
MODELLENMESİ, TASARIMINDA
KARŞILAŞILAN PROBLEMLER VE PRATİK
MÜHENDİSLİK ÇÖZÜMLERİ

MURAT ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMANI
PROF. DR. YASİN FAHJAN

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF DESIGN PROBLEMS
OF BASE ISOLATED BUILDINGS**

MURAT ÇELİK
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING PROGRAM

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. YASİN FAHJAN

GEBZE

2019

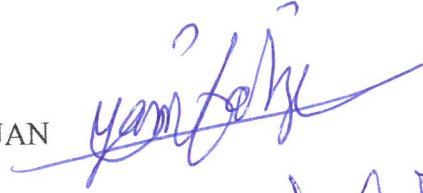
GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/07/2019 tarih ve 2019/30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/07/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Murat ÇELİK'in tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Prof. Dr. Yasin FAHJAN



ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Can ZÜLFİKAR



ÜYE

: Prof. Dr. Kemal BEYEN



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
/ /2019 tarih ve 2019/ sayılı kararı.

ÖZET

Türkiye’de özellikle son dönemlerde sağlık yapıları sismik taban yalıtımlı binalar olarak inşa edilmektedir. Sağlık yapılarının büyük bir deprem sonrası hizmete devam edebilir olması, bu binaların sismik taban yalıtımlı olarak inşa edilmesini gerekli kılmaktadır. Taban yalıtımlı sistemlerin modellenmesi, analizi ve tasarımı standart yapılardan önemli ölçüde ayrılmaktadır. Bu tür yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar ve karşılaşılan tasarım sorunlarıyla ilgili çözümler hakkında alternatif tasarım yaklaşımlarına gereksinim duyulabilmektedir. Örneğin yakın fay yönelim etkilerine maruz sismik taban yalıtımlı binalarda izolatörlerdeki aşırı yüksek deplasman taleplerinin azaltılabilmesi için izolasyon kotunda sönümleyici damperlerin sisteme ilave edilmesine ihtiyaç olabilmektedir. Analizlerde yer ivmesi kayıtlarının düşey bileşeninin kullanılması zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçlarını değiştirebilmekte ve sürtünmeli sarkaç tip izolatörlü sistemlerde tasarım taban kesme kuvvetlerini artırabilmektedir. Ortak izolasyon döşemesi üzerinde yer alan genleşme derzleriyle birbirinden ayrılmış bina bloklarında yatay rijitliği diğerlerine nispeten az olan blokların tasarım taban kesme kuvvetleri yüksek mod etkileri nedeniyle önemli mertebelerde artabilmektedir. Bu tip yapılaşma Türkiye’deki hastane binalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Söz konusu problemlerin tasarım aşamasında tespit edilmesi ve uygun çözüm yaklaşımlarının belirlenmesi deprem sonrası hemen kullanımı beklenen hastane yapıları için kritik öneme sahip görülmektedir.

Bu tez kapsamında taban yalıtımlı binaların tasarımında karşılaşılan söz konusu sorunlarla ilgili tespit ve çözüm önerileri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sismik izolasyonlu yapıların tasarımı, yakın fay etkisi, düşey yer ivmesi, ortak izolasyon döşemesi, ortak taban yalıtımlı ayırık bloklar.

SUMMARY

In Turkey, especially in recent years, hospital buildings are being built as base isolated buildings. The base isolated hospital buildings are important to ensure that they can continue to service after a major earthquake. The modeling, analysis and design of such systems differs from standard buildings. Alternative design approaches may be required for the design of such structures. For example, in order to reduce the extremely high lateral displacement demands on the isolators due to the near fault directivity effect, supplementary damping system may be required to be installed at the isolation level. The use of vertical ground motion may change the time history analysis results. The design base shear may increase due to consideration of the vertical ground motions (Friction Pendulum or Sliders). At the multiple blocks separated by the expansion joints located on the common isolation floor, design base shear may significantly increase in some of the relatively flexible blocks due to the heavy base mat and excitation of higher superstructure vibration modes. Such structures are widely used for the hospital buildings in Turkey.

Identifying the aforementioned problems at the design stage and determining appropriate solution approaches are critical for hospital buildings that are expected to be operational immediately after the earthquake.

In this thesis, studies have been carried out on the identification and solution of the problems related to the design of base isolated buildings

Keywords: Design of base isolated structures, near fault effect, vertical ground acceleration, multiple blocks on a common isolation floor.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışması süresince gösterdiği sabır ve anlayış nedeniyle sevgili eşim Dilek Çelik'e ve sevgili oğlum Can Çelik'e, yüksek lisans eğitimi boyunca her zaman samimi bir arkadaş gibi davranan, bildiklerini ve tecrübelerini öğrencileriyle paylaşmaktan çekinmeyen değerli meslektaşım ve çok kıymetli hocam Prof. Dr. Yasin FAHJAN'a, tez savunma sınavında yorumlarıyla tez çalışmasına ilave katkılar sağlayan Prof. Dr. Kemal BEYEN'e, Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Can ZÜLFİKAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Anıl Dindar'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLOLAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. SİSMİK TABAN YALITIMI VE SİSTEMLERİ	4
2.1. Elastomer Esaslı Sistemler	5
2.2. Sürtünme Esaslı Kayıcı İzolatörler	7
2.2.1. Düz Yüzeyli Kayıcı İzolatörler (Flat Sliders)	7
2.2.2. Eğri Yüzeyli Sürtünmeli Sarkaç İzolatörler (FPS)	9
2.2.3. Lineer Bilyalı Kayar İzolatör (Roller Bearings)	10
2.3. Sönümleyici Damperler	12
3. TASARIM PERFORMANS HEDEFLERİ	14
3.1. Yapısal Tasarımda Yenilikçi Yaklaşımlar	16
4. ANALİZ YÖNTEMLERİ	17
4.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi	18
4.2. Mod Birleştirme Yöntemi	20
4.3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz	21
5. ANALİZ VE TASARIM PROBLEMLERİ	23
5.1. Faya Yakın Taban Yalıtımlı Binalarda Yüksek Deplasman Talepleri	23
5.1.1 Örnek Çalışma	24
5.2. Çoklu Bloklarda Taban Kesme Büyütmesi	46
5.2.1 Örnek Çalışma	47
5.3. Düşey Yer Bileşeninin Taban Kesme Oranına Etkisi	65
5.3.1 Örnek Çalışma	65
5.3.2 Üç Boyutlu Sismik Taban Yalıtımı	71

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	74
7. İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	84

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
b	: Yapının en uzun plan boyu d'ye dik doğrultudaki en kısa plan boyu.
C	: Damper sönüm katsayısı.
$C_{Cr, M}$	: Maksimum deprem yerdeğiştirmesinde eşdeğer tek serbestlik dereceli yalıtım sistemindeki kritik viskoz sönüm değeri.
$C_{M, VD}$	: Maksimum deprem yerdeğiştirmesinde eşdeğer tek serbestlik dereceli yalıtım sisteminde ilave viskoz damperler ile sağlanan sönüm değeri.
DBE	: Tasarım depremi (DD-2).
D	: Yalıtım birimi için yerdeğiştirme değeri.
DD-1	: 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi.
DD-2	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi.
DD-3	: 50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi.
DD-4	: 50 yılda aşılma olasılığı %68 (tekrarlanma periyodu 43 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi.
D_D	: Tasarım depremi seviyesinde göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak yerdeğiştirme.
D_M	: En büyük deprem seviyesinde, göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak yerdeğiştirme
D_{TD}	: Tasarım deprem yer hareketi seviyesinde, göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak yerdeğiştirme.
D_{TM}	: En büyük deprem yer hareketi seviyesinde, göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak yerdeğiştirme.
D_{Maks}	: Yalıtım biriminin maksimum yatay deplasman kapasitesi.
D_y	: Yalıtım biriminin etkin akma yerdeğiştirmesi.

d	: Yapının en uzun plan boyu.
e	: Üst yapı ağırlık merkezi ile yalıtım sistemi rijitlik merkezi arasında ölçülen dış merkezlik ile deprem yüklemesine dik doğrultudaki plan boyutunun %5'i olarak hesaplanan ek dış merkezliğin toplamı.
F	: Yalıtım biriminde “D” yerdeğiştirmesine karşı gelen dayanım.
F_i	: i katı seviyesinde göz önüne alınan deprem yönündeki yatay kuvvet.
$F_{(Lock\&Up)}$	: “Lock&Up” cihazında oluşan maksimum eksenel kuvvet.
$F_{VD, Maks}$	: Viskoz damperde oluşan maksimum eksenel kuvvet.
FPS	: Sürtünmeli sarkaç tip izolator.
G	: Sabit yük.
g	: Yer çekimi ivmesi.
h	: Perde toplam yüksekliği.
h_1, h_2	: Çift yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatorün alt ve üst kaide iç yüzeyleri ile çekirdek merkezi arası mesafeler .
k_d	: Yalıtım biriminin akma sonrası yatay rijitliği.
K_D	: Tasarım deprem yer hareketi yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin etkin rijitliği.
K_M	: Maksimum deprem yer hareketi yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin etkin rijitliği.
l_w	: Perdenin plandaki uzunluğu.
m_i	: Yapı bloğuna ait i 'inci kat kütlesi.
MCE	: Maksimum deprem (DD-1).
$NLTHA$	: Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz.
R_1, R_2	: Çift yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatorün alt ve üst kaidesi yüzey eğrilik yarıçapları.
R_{eff}	: Çift yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatorün eşdeğer eğrilik yarıçapı.
$S_a(T_n)$	: Titreşim moduna ilişkin spektral ivme.
$S_{ae}^{(DD-1)}(T_M)$	: En büyük deprem seviyesinde T_M periyodundaki spektral ivme (g).
$S_{ae}^{(DD-2)}(T_D)$	: Tasarım deprem seviyesinde T_D periyodundaki spektral ivme (g).
$S_{v, M}$	: Maksimum (DD-1) deprem yer hareketi düzeyinde izolasyon sistemindeki sözde spektral hız.
T	: Periyot (s).
T_A	: Deprem spektrumu birinci köşe periyodu.

T_D	: Deprem yalıtımlı binanın tasarım yerdeğiştirmesi seviyesinde etkin titreşim periyodu.
T_L	: Uzun periyot bölgesine geçiş periyodu.
T_M	: En büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodu.
T_s	: Yalıtım uygulanmamış binanın brüt kesit rijitliği kullanılarak hesaplanmış hakim mod titreşim periyodu.
T_v	: Elastomer yalıtım birimleri ile yalıtılmış yapının dūřey doğrultudaki titreşim periyodu.
V	: Damper piston hızı.
V_B	: B-Blok zemin kat taban kesme kuvveti.
$V_{B, \text{ Damper}}$	: Viskoz damper ilavesi yapılan B-Blok modeli zemin kat taban kesme kuvveti.
$V_{B, \text{ Lock\&Up}}$	: “Lock\&Up” ilavesi yapılan B-Blok modeli zemin kat taban kesme kuvveti.
V_D	: Tasarım yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminde oluşacak kesme kuvveti.
W	: Binanın deprem sırasındaki toplam kütleye karşı gelen ağırlığı.
W_B	: B-Blok üst yapısının deprem sırasındaki toplam kütleye karşı gelen ağırlığı.
W_d	: Bir kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinin içinde kalan alan .
W_i	: Bir izolatör birimi üzerindeki toplam kütleye karşı gelen ağırlık.
w_i	: Binanın i’nci katının sabit yükü.
W_z	: Depremin dūřey bileřen etkisiyle birlikte toplam kütleye etkiyen dūřey aęırlık.
y	: Yalıtım sistemi rijitlik merkezi ile ilgili eleman arasındaki deprem yüklemesine dik doğrultudaki uzaklık.
α	: Damper üstel katsayısı.
β_M, β_D	: Maksimum (DD-1) ve tasarım (DD-2) deprem yer hareketi düzeyindeki yalıtım birimi için ASCE7-16 [6] yönetmeliğine göre hesaplanan ölçeklendirme katsayısı.
Γ_n	: Titreşim moduna ilişkin modal katkı çarpanı.
η_{bi}	: i’inci katta tanımlanan burulma düzensizliği katsayısı.

η_D	: Tasarım deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısı.
η_M	: En büyük deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısı.
λ_{maks}	: İzolatör üst limit katsayısı.
λ_{min}	: İzolatör alt limit katsayısı.
μ	: Sürtünmeli sarkaç izolatör sürtünme katsayısı.
μ_1, μ_2	: Çift yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörün alt ve üst kaidesindeki sürtünme katsayıları.
$\mu_{Alt\ Limit}$	: Sürtünmeli sarkaç izolatör alt limit sürtünme katsayısı.
$\mu_{Nominal}$	: Sürtünmeli sarkaç izolatör nominal sürtünme katsayısı.
$\mu_{Üst\ Limit}$	: Sürtünmeli sarkaç izolatör alt limit sürtünme katsayısı .
ξ_D, FPS	: Tasarım (DD-2) deprem yer hareketi düzeyinde sürtünmeli sarkaç izolatörler için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi.
ξ_D, VD	: Tasarım (DD-2) deprem yer hareketi düzeyinde viskoz damperlerle sağlanan ilave etkin sönüm yüzdesi.
$\xi_D, (FPS+VD)$	: Tasarım (DD-2) deprem yer hareketi düzeyinde viskoz damperli sürtünmeli sarkaç izolatör sistemi için hesaplanan toplam etkin sönüm yüzdesi.
ξ_M, ξ_D	: Maksimum (DD-1) ve tasarım (DD-2) deprem yer hareketi düzeyindeki yalıtım birimi için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi.
ξ_M, FPS	: Maksimum (DD-1) deprem yer hareketi düzeyinde sürtünmeli sarkaç izolatörler için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi.
ξ_M, VD	: Maksimum (DD-1) deprem yer hareketi düzeyinde viskoz damperlerle sağlanan ilave etkin sönüm yüzdesi.
$\xi_M, (FPS+VD)$	: Maksimum (DD-1) deprem yer hareketi düzeyinde viskoz damperli sürtünmeli sarkaç izolatör sistemi için hesaplanan toplam etkin sönüm yüzdesi.
$\xi_{vd, B-Blok}$	: Viskoz damper ilavesi yapılmış B-Blok yapısının etkin sönüm oranı.
Φ_{ixn}	: Yapı katlarına ait modal yerdeğiştirme genlikleri.
ω_M	: En büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin açılal titreşim frekansı.

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Sismik taban yalıtımlı yapı ve tabana ankastre yapı.	4
2.2: %2, %5 ve %10 sönümlü elastik ivme ve deplasman spektrumu.	6
2.3: Kauçuk izolatör (HDRB).	6
2.4: Elastomerik izolatörler için tipik kuvvet-deplasman eğrisi.	7
2.5: Düz kayıcı izolatör örneği.	8
2.6: Düz yüzeyli kayıcı izolatör kuvvet-deplasman eğrisi.	8
2.7: Çift eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç örneği.	9
2.8: Eğri yüzeyli kayıcı izolatör kuvvet-deplasman eğrisi.	10
2.9: Lineer bilyalı kayar izolatör mekanizması.	11
2.10: Sürtünme katsayısının düşey yükde değişimi.	11
2.11: İzolatörle birlikte kullanılan viskoz damper örneği.	12
2.12: İzolatörle kullanılan “U” şekilli damper örneği.	13
2.13: İzolatörle kullanılan kurşun ve helisel şekilli damper örneği.	13
3.1: 3B sismik yalıtım, “Loma Linda Medical Center” modeli.	15
4.1: İzolasyon sistemi kapasite eğrisi ve deprem tasarım spektrumu.	18
4.2: İzolatör yatay kuvvet deplasman eğrisi.	21
5.1: Örnek bina kat kalıp planı.	24
5.2: 3-Boyutlu bina analiz modeli.	25
5.3: Bina konumu ve bölgedeki faylanma mekanizmaları.	25
5.4: Tasarım depremi (T _r : 475 yıl) deprem spektrumları.	26
5.5: Maksimum deprem ivme spektrumları.	27
5.6: Spektral ivmelerin fay yırtılma yönelimine göre değişimi.	27
5.7: Fay yönelim çarpanıyla büyütülmüş deprem ivme spektrumları.	28
5.8: Fay hattına göre konum ve yer hareketi ivme bileşenleri.	28
5.9: %5-%40 sönümlü tasarım ivmesi spektrumları.	29
5.10: %5-%40 sönümlü maksimum deprem deplasman spektrumları.	29
5.11: Sürtünmeli sarkaç izolatör karakteristik parametreleri.	31
5.12: Seçilen izolatör ve maks. deplasman kapasitesi (D _{maks} : 1230 mm).	31
5.13: İzolatör alt limit ve üst limit yük-deplasman eğrileri.	32
5.14: Eşdeğer sistem davranış eğrisi ve ivme-deplasman spektrumu.	33
5.15: Viskoz damper özellikleri.	34

5.16: Modele ilave edilen viskoz damper link elemanları.	36
5.17: Viskoz damper modeli link eleman özellikleri (kN/m).	36
5.18: Maksimum deprem için seçilen yer kayıtlarının ivme spektrumları.	36
5.19: Tasarım depremi için seçilen yer kayıtlarının ivme spektrumları.	37
5.20: Kayıtlara ait (MCE) izolatör deplasmanları (C:1220, $\alpha=1.0$).	38
5.21: Tasarım depremi maks. kat ivmeleri (C:1220, $\alpha=1.0$).	39
5.22: Tasarım depremi maks. kat ötelenme oranları (C:1220, $\alpha=1.0$).	39
5.23: Kayıtlara ait (MCE) izolatör deplasmanları (C:1600, $\alpha=0.5$).	40
5.24: C:1220 ^{$\alpha=1$} ve C:1600 ^{$\alpha=0.5$} damperli modellerde maks. ötelenmeler.	41
5.25: C:1220 ^{$\alpha=1.0$} ve C:1600 ^{$\alpha=0.5$} damperli modellerde maks. kat ivmeleri.	41
5.26: Genelge doğrultusunda bırakılmış sismik boşluk ($B>1.5 \times D_M$).	43
5.27: İzolatörlerin maks. deplasman (D_{Maks}) kapasitesine ulaştığı durum.	43
5.28: Deprem talebinin izolatör deplasman kapasitesini aştığı durum.	44
5.29: Kauçuk izolatör için çarpma duvarı örneği (stub wall).	44
5.30: İleri deformasyonlarda rijitleşen izolatör.	45
5.31: FPS tip izolatörlü binanın çevre duvarına çarpma durumu.	45
5.32: Yapısal analiz modeli.	47
5.33: 1.Titreşim mod (T_1 : 3.22 s.) şekli.	51
5.34: 2.Titreşim mod (T_2 : 3.20 s.) şekli.	51
5.35: 3.Titreşim mod (T_3 : 3.18 s.) şekli.	52
5.36: 4.Titreşim mod (T_4 : 1.27 s.) şekli (aktif mod: “B” blok X yönü).	52
5.37: DBE için seçilen yer hareketi kayıtlarının ivme spektrumları.	53
5.38: RSN-932, zemin kat taban kesme oranı (“X” yönü).	54
5.39: RSN-932, zemin kat taban kesme oranı (“Y” yönü).	54
5.40: RSN-923, zemin kat taban kesme oranı (“X” yönü).	55
5.41: İvme kayıtların “X” bileşenine ait %2 sönümlü ivme spektrumu.	55
5.42: RSN-923, zemin kat taban kesme oranı (“Y” yönü).	56
5.43: RSN-907, zemin kat taban kesme oranı (“X” yönü).	56
5.44: RSN-907, zemin kat taban kesme oranı (“Y” yönü).	56
5.45: RSN-932, izolasyon döşemesi “X” ve “Y” yönü deplasmanları.	57
5.46: RSN-923, izolasyon döşemesi “X” ve “Y” yönü deplasmanları.	57
5.47: RSN-907, izolasyon döşemesi “X” ve “Y” yönü deplasmanları.	57
5.48: Viskoz damper ilaveli yapısal model.	60
5.49: RSN-932, damper kuvvetleri, $F_{VD,maks}$: 1800 kN.	61

5.50: RSN-932, damperli ve mevcut model zemin kat kesme oranı (“X”).	61
5.51: “Lock-Up” ilaveli yapısal model.	62
5.52: RSN-932, Damperli ve “Lock&Up” model z. kat kesme oranı (“X”).	62
5.53: RSN-932, “Lock-Up” kuvvetleri (kN).	63
5.54: “A” blok yapısal analiz modeli.	65
5.55: İvme kayıtlarının düşey bileşenine ait %2 sönümlü ivme spektrumu.	67
5.56: RSN-932, düşey bileşenli/bileşensiz “X” yönü taban kesme oranı.	67
5.57: RSN-932, düşey bileşenli/bileşensiz “Y” yönü taban kesme oranı.	68
5.58: RSN-932, düşey bileşenli model düşey yük değişim oranı.	68
5.59: RSN-923, düşey bileşenli/bileşensiz “X” yönü taban kesme oranı.	68
5.60: RSN-923, düşey bileşenli/bileşensiz “Y” yönü taban kesme oranı.	69
5.61: RSN-923, düşey bileşenli model, düşey yük değişim oranı.	69
5.62: RSN-907, düşey bileşenli/bileşensiz “X” yönü taban kesme oranı.	69
5.63: RSN-907, düşey bileşenli/bileşensiz “Y” yönü taban kesme oranı.	70
5.64: RSN-907, düşey bileşenli model düşey yük değişim oranı.	70
5.65: RSN-932, 3B ve 2B yalıtımlı modellerde düşey yük değişim oranı.	72
5.66: RSN-932, 3B ve 2B yalıtımlı modellerde “X” yönü taban kesme oranı.	72
5.67: RSN-932, 3B ve 2B yalıtımlı modellerde “Y” yönü taban kesme oranı.	72
5.68: RSN-932 , 3B yalıtımlı yapıda oluşan düşey yer değişime.	73

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
5.1: Deprem spektrum parametreleri (NEHRP – B).	26
5.2: MCE NLTHA sonuçları (C:1220, $\alpha=1.0$).	37
5.3: DBE NLTHA sonuçları (C:1220, $\alpha=1.0$).	38
5.4: C:1220 ^{$\alpha=1.0$} ve C:1600 ^{$\alpha=0.5$} modellerde MCE NLTHA sonuçları.	40
5.5: C:1220 ^{$\alpha=1.0$} ve C:1600 ^{$\alpha=0.5$} damperli modellerde taban kesmeler.	42
5.6: Blokların tabana ankastre durumdaki doğal titreşim periyotları.	48
5.7: Yalıtım periyodunun blokların doğal titreşim periyotlarına oranı.	49
5.8: Örnek yapı modal analiz sonuçları-1.	50
5.9: Örnek yapı modal analiz sonuçları-2.	51
5.10: 4. Modun (yüksek mod) “B” blokta oluşturduğu kesme kuvvetleri.	58
5.11: 1. Modun (yalıtım modu) “B” blokta oluşturduğu kesme kuvvetleri.	58
5.12: Analiz sonuçları kıyaslama tablosu.	59
5.13: Bloklar bazında maksimum taban kesme oranları.	60
5.14: “A” blok modal analiz sonuçları.	66
5.15: Düşey bileşenin olduğu ve olmadığı durumda taban kesme oranları.	71

1. GİRİŞ

Deprem etkisiyle oluşan kuvvetli yer hareketi, yapılarda yıkım veya ağır hasarlar meydana getirerek önemli oranlarda can ve mal kayıplarına yol açmakta, ülke ekonomilerini etkileyebilecek ölçüde mali kayıplar doğurabilmektedir. Bu nedenle depremlerin binalar ve içerikleri üzerindeki etkilerini azaltmak, inşaat ve yapı mühendisliği alanındaki önemli konulardan biri olarak görülmektedir.

Sismik taban yalıtımı, binaların ve bina içinde yer alan yapısal olmayan elemanların deprem etkilerine karşı korunmasında kendini kanıtlamış en etkin yöntemlerden biri olarak kabul görmektedir. Sismik izolasyonda temel amaç, deprem kuvvetlerinin yapıya iletimini büyük ölçüde azaltmaktır. Bu nedenle sismik taban yalıtımlı binalarda kat ivmeleri ve kat içi ötelenme oranları geleneksel binalara göre oldukça düşüktür. Bu sayede hem yapısal sistem hem de bina içinde yer alan yapısal olmayan eleman ve ekipmanlardaki hasar riskleri etkin bir biçimde azaltılabilmektedir.

Türkiye’de özellikle son yıllarda deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelerde büyük ölçekli hastane binaları, deprem risklerinin azaltılması amacıyla sismik taban yalıtımlı binalar olarak inşa edilmektedir. Orta veya büyük ölçekli bir deprem sonrasında hizmete devam edebilir olması bakımından hastane binalarının sismik taban yalıtımlı olarak yapılması öncelikli olarak tercih edilmektedir. Bu tercih Sağlık Bakanlığı’nca 2013 yılında hazırlanan genelge [1] ile zorunlu kılınmış ve sonrasında sismik taban yalıtımlı bina sayısında ani bir artış meydana gelmiştir. Ancak, bu talebe karşılık, taban yalıtımlı yapıların tasarımında yeterli sayı ve nitelikte tecrübeli mimarlar ve mühendis bulunmamaktadır. Bu nedenle taban yalıtımlı binalardaki yapısal tasarım tecrübesi, tasarım yükleniciliğine hak tanınmış firmaların bina projelerini hazırlarken edindiği bilgiler doğrultusunda kazanılmaktadır.

2018 yılı itibariyle toplamda 120 adet yapının sismik taban yalıtım sistemi kullanılarak inşa edildiği veya güçlendirildiği bilinmektedir [2]. Bu sayısının büyük bir kısmını kamu ve kamu özel sektör ortaklığı (PPP) ile inşa edilen hastane binaları oluşturmaktadır. Diğer yapılar ise banka veya haberleşme firmalarına ait veri merkezi binaları, havalimanı terminal binaları (Sabiha Gökçen, Atatürk Havalimanı ve Antalya Havalimanı), LNG depolama tankları, otoyol-demiryolu viyadükleri ve konut yapılarıdır. Sismik taban yalıtım sistemi ülkemizde konut yapılarında nadir olarak tercih edilmekte olup bilinen iki (Aykent Loft Konut Binası [3] ve Moda Apartmanı [4]) uygulama örneği mevcuttur.

Ülkemizde sismik taban yalıtımlı binaların tasarımında genellikle A.B.D. (ASCE7-16 [5] ve ASCE41-16 [6]) ve Avrupa’da (EC-8 [7]) kullanılan tasarım yönetmelikleri takip edilmektedir. 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde de [8] sismik taban yalıtımlı binalara özgü tasarım ve test kurallarının yer aldığı ayrı bir bölüm yer almaktadır. Bu yönetmeliklerde modelleme, analiz ve tasarıma ilişkin genel tanım ve kurallar verilmekte olup taban yalıtımlı binalarda karşılaşılabilecek tasarım problemlerine çoğu zaman cevap bulunamamaktadır.

Bu çalışma kapsamında taban yalıtımlı binalarda sıklıkla karşılaşılan analiz ve tasarım problemleri ortaya koyularak, bu problemlerin çözümleriyle ilgili tasarım yaklaşımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tasarım ve analiz problemlerinin tanımlanması öncesinde sismik taban yalıtımı, yalıtım sistemleri, tasarım kriterleri, analiz ve tasarım yöntemleri hakkında genel tanımlar yapılacaktır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmada taban yalıtımlı sistemlerin analiz ve tasarımı konusunda edinilmiş tecrübelerin paylaşılması amaçlanmakta olup belirli tasarım problemleriyle ilgili farkındalığın artırılması hedeflenmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmaların tasarım mühendislerine sınırlı da olsa katkıda bulunacağı ümit edilmektedir. Tez çalışması kapsamında taban yalıtımlı sistemlere özgü özel problemlere değinilmiş, ancak sismik taban yalıtımıyla ilgili temel konulara detaylı olarak girilmemiştir. Sismik taban yalıtımı ilgili temel bilgilere ve analiz detaylarıyla ilgili konulara referanslar bölümünde verilen kaynaklardan ulaşılabilir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde sismik taban yalıtımı konusunda genel tanımlar yapılmış, taban yalıtımlı bina uygulamalarının ülkemizdeki gelişimi, uygulama yapılan yapı türleri ve yaklaşık sayıları hakkında genel veriler paylaşılmıştır. Ayrıca bu tür sistemlerin tasarımında takip edilen ulusal ve uluslararası yönetmelikler hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde sismik taban yalıtımı ve yalıtım sistemleri hakkında kısa tanımlamalarda bulunulmuş, sistemin konvansiyonel sistemlere karşı bilinen avantajlarına ve dezavantajlarına değinilmiştir. Bunlara ilaveten sismik yalıtım sistemleri ve izolatör tiplerine ilişkin temel tanımlarda bulunulmuş, farklı izolatör tiplerinin tasarım açısından avantaj ve dezavantajlı yanlarına değinilmiştir. Ülkemizde

sıklıkla kullanılan veya kullanımı nadir tercih edilen izolatör tipleri ayrıca belirtilmiştir.

Üçüncü bölümde sismik taban yalıtımlı binaların tasarım kriterleri ve performans hedefleri çeşitli yönetmelikler ve tasarım genelgelerinden örnekler verilerek açıklanmıştır. Uluslararası alanda, özellikle A.B.D.' de taban yalıtımlı sistemlerin tasarımı için yeni nesil performans hedefleri ve bina performans derecelendirme sistemlerine dair kısa bilgiler verilmiştir.

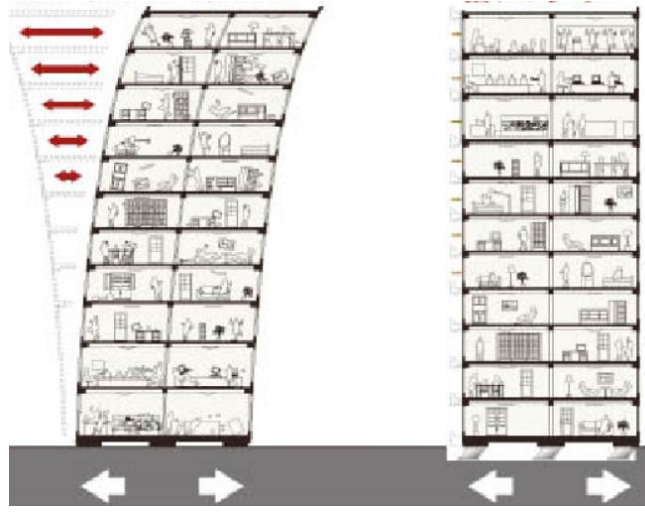
Dördüncü bölümde sismik taban yalıtımlı sistemlerin ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde tanımlanan analiz yöntemleri için genel tanımlar yapılarak her bir analiz yönteminin uygulama sınır ve şartları hakkında bilgiler verilmiştir. 2019 yılı başında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin [4] 14.Bölüm'ünde (Deprem Etkisi Altında Yalıtımlı Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar) verilen denklem ve kıstaslara ayrıca değinilmiştir. Tez kapsamının sınırlı olması nedeniyle izolatör ve izolasyon sistemi tasarımına, kat kuvvetlerinin belirlenmesine ilişkin farklı yönetmeliklerdeki yaklaşımlara, izolatör testleri ve bu gibi birçok konuya değinme fırsatı bulunamamıştır. İlave bilgi edinmek için referans bölümünde verilen ilgili kaynaklara başvurulabilir.

Beşinci bölümde taban yalıtımlı binaların tasarımında karşılaşılan sorunlarla ilgili tespit ve çözüm önerileri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde, seçilen üç farklı tasarım konusu için çalışmalar yapılmıştır. Bu konulardan birincisi, fay yönelim etkisine maruz taban yalıtımlı binalarda elde edilen yüksek deplasman talepleri ve bu taleplerin azaltılmasına dönük çözümlerin bulunmasına yönelik hazırlanmıştır. İkinci örnek konu ise ülkemizde yaygın olarak tercih edilen ortak izolasyon döşemesi üzerinde yer alan ayrık bina bloklarının davranışı ve tasarımı üzerine yapılmıştır. Söz konusu bu problemlerin tasarım aşamasında tespit edilmesi ve uygun çözüm yaklaşımlarının belirlenmesi kapsamında değerlendirmelerde bulunulmuştur. Son örnek çalışma ise düşey ivme bileşenin doğrusal olmayan dinamik analizlerde taban kesme kuvvetlerine olan etkilerinin araştırılması üzerinedir.

Altıncı ve son bölümde ise tez kapsamında değinilen tasarım problemleriyle ilgili elde edilen sonuçlar özetlenmiş, bu sonuçlara ilişkin tasarım önerilerinde bulunulmuş, ileriye dönük tasarım problemleri ve yaklaşımlarıyla ilgili olası çalışma konuları hakkında bilgiler verilmiştir.

2. SİSMİK TABAN YALITIMI ve SİSTEMLERİ

Sismik taban yalıtımı, alt yapı ile üst yapı arasına çeşitli düzeylerde yerleştirilebilen, yatay rijitliği düşük yalıtım katmanı vasıtasıyla üst yapıya etkiyen deprem yüklerini azaltmayı amaçlayan depreme dayanıklı yapı tasarımı yöntemidir [9]. Sismik taban yalıtımı genellikle depremin binalar üzerindeki yatay etkilerini azaltmaya yönelik yapılmaktadır. Günümüzde deprem düşey etkilerine karşı sismik yalıtım uygulamaları da yaygınlaşmaya başlamıştır.



Şekil 2.1: Sismik taban yalıtımlı yapı ve tabana ankastre yapı.

Konvansiyonel yapılarda sismik tasarım yaklaşımı, orta büyüklükteki deprem yer hareketlerine karşı yapıda oluşabilecek can ve mal kayıplarını önlemek, büyük deprem yer hareketlerine karşı ise binanın toptan göçmesini önlemek üzerine kuruludur. Büyük depremlerde Şekil 2.1’de görüldüğü gibi yer hareketiyle binaya etkiyen sismik enerjinin yapısal elemanlarda oluşacak kontrollü hasar mekanizmalarıyla (betonun çatlaması ve çeliğin akması) sönmelenmesi amaçlanmaktadır. Bir binanın kat ivmeleri ve katlar arası göreceli ötelenme oranları büyük olduğunda, binada toptan göçme meydana gelebilir veya yapı stabilitesini koruyabilse de depremden sonra binada kalıcı deformasyonlar görülebilir. Bu tür durumlarda binanın işlevlerini eski haline getirmek zordur ve bina güçlendirme maliyeti oldukça yüksek olabilir [11]. Sismik taban yalıtımlı binalarda ise yatay deformasyon talebinin büyük bir kısmı yalıtım biriminde oluşur ve üst yapı kat ivmeleri birbirine yakın olur [12]. Taban yalıtımlı binaların tasarımında ise deprem etkisiyle üst yapıya etkiyen yatay kuvvet, konvansiyonel yapılara göre oldukça

küçüktür. Bu nedenle üst yapıdaki yatay kuvvetler için elastik tasarım mümkün olabilmektedir.

Sismik taban yalıtımının yumuşak zeminlerde (ZE ve ZF) veya uzun salınım periyotlarına sahip yüksek yapılarda ($T_s > 2.0 \sim 2.5$ sn) uygulanması üst yapı sistemine avantaj yerine dezavantaj getirebilmektedir. Bu nedenle bu tür yapılarda sismik taban yalıtımı yerine üst yapıda sismik sönümleyiciler kullanılarak deprem etkisi daha etkin bir şekilde azaltılabilmektedir.

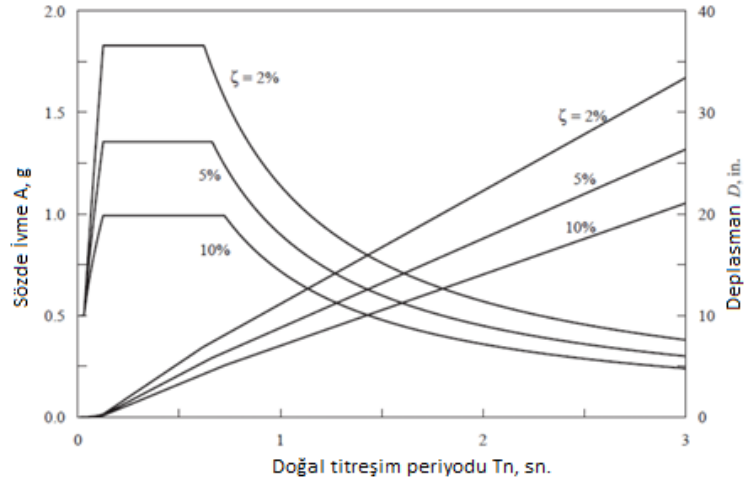
Sismik taban yalıtım sistemleri aktif, yarı aktif kontrol sistemleri ve pasif kontrol sistemleri olmak üzere üç tip sistemden oluşmaktadır. Burada yapılarda yaygın olarak kullanılan pasif kontrol sistemlerine değinilmiş olup, aktif ve yarı aktif kontrol sistemleri bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

Bu çalışma kapsamında sismik taban yalıtım sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiş olup, bu sistemlerin kullanımı, gelişimi ve uygulama örnekleriyle ilgili konulara referanslar bölümünde verilen kaynaklardan ulaşılabilir [2], [9], [12]-[14].

2.1. Elastomer Esaslı Sistemler

Elastomer esaslı izolatörler doğal kauçuk izolatörler (NRB), kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler (LRB) ve yüksek sönümlü kauçuk izolatörler (HDRB) olmak üzere üç farklı tipte üretilmektedir.

Bu sistemler yapıların sismik izolasyon kotuna yerleştirilerek (temel seviyesi veya üst kat seviyelerinde) ilave sönümleme katkısı ile birlikte yapı sisteminin ana salınım periyotlarının uzamasını sağlayarak üst yapı ivmelenmelerini azaltmakta (bkz. Şekil 2.2 [13]) ve yapı elemanlarında oluşacak iç kuvvet ve deformasyon taleplerini azaltılabilmektedir.



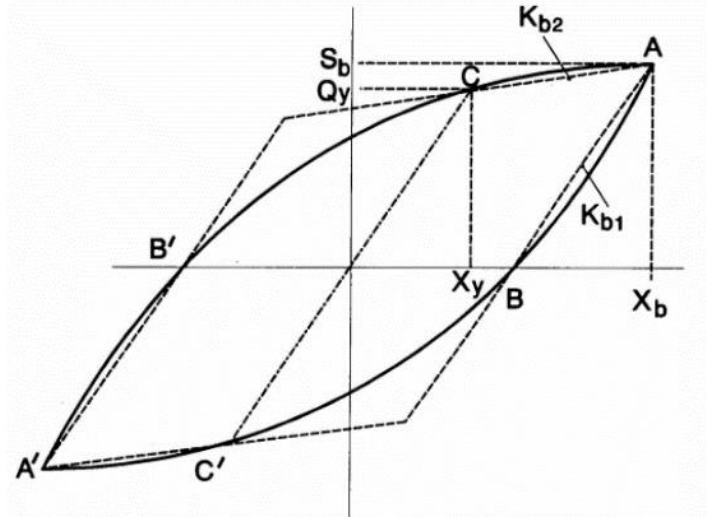
Şekil 2.2: %2, %5 ve %10 sönümlü elastik ivme ve deplasman spektrumu.

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler Türkiye’deki sismik yalıtımlı hastane binalarında ve otoyol viyadüklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip izolatörlerin üretici kataloglarında verilen yatay deplasman kapasitesi 30cm~90cm aralığındadır [15]. Kurşun çekirdekli izolatörlerde eşdeğer sönüm oranı %10~%25 arasında sağlanabilmektedir. Bu tip kauçuk esaslı izolatörlerin yanal rijitlikleri yükleme hızına ve yaşlanma etkilerine bağlı olarak değişebilmektedir.

Doğal kauçuk izolatörler taban yalıtım uygulamalarında genellikle sönümleyici damperlerle veya düz sürtünmeli kayıcı izolatörle birlikte kullanılmaktadır. Doğal kauçuk ve yüksek sönümlü kauçuk izolatörler (bkz. Şekil 2.3 [16]) Japonya’daki sismik yalıtımlı yapı uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmekte ise de bu tür izolatörlerin ülkemizde bina türü yapılarda herhangi bir uygulama örneği bulunmamaktadır.



Şekil 2.3: Kauçuk izolatör (HDRB).



Şekil 2.4: Elastomerik izolatörler için tipik kuvvet-deplasman eğrisi.

Kauçuk izolatörler; uygun yatay deplasman sınırları içerisinde basınç etkileri altında kararlı bir davranış ve direnç gösterirken, çekme etkisine karşı sınırlı bir dayanıma sahiptirler. Bu nedenle bu tip yalıtım sistemlerinin kullanıldığı binalarda izolatörlerde çekme etkisinin oluşmasından mümkün mertebede kaçınılmakta veya çekme gerilmesinin izin verilen sınır değerler içinde kalması istenmektedir. Elastomerik izolatörlerin yatay kuvvet yerdeğiştirme grafiği Şekil 2.4'te [16] verilmektedir.

2.2. Sürtünme Esaslı Kayıcı İzolatörler

Sürtünmeli kayıcı izolatörlerde sürtünme ne kadar az ise üst yapıya iletilen yatay kuvvetler o mertebede az olmaktadır. Bu tip izolatörlerde paslanmaz çelik düz veya eğimli plaka yüzeyleri deprem etkisi altında birbirini üzerinde kayar. Kaymanın başlaması için yapıya etkiyen yatay deprem kuvveti izolatörün sürtünme kuvvetinden daha fazla olmalıdır.

2.2.1. Düz Yüzeyli Kayıcı İzolatörler (Flat Sliders)

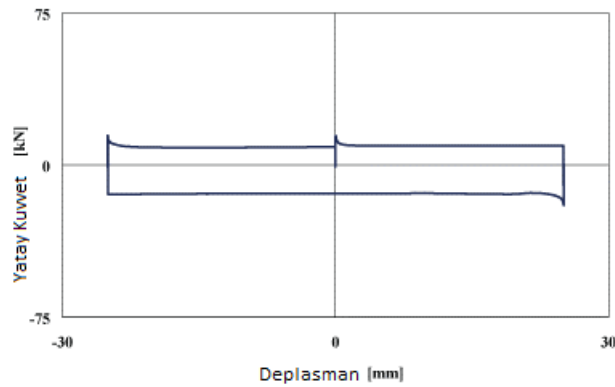
Düz yüzeyli kayıcı izolatörler tamamen sürtünme prensibine göre çalışmaktadır. İki düz yüzey birbirini üzerinde kaymaktadır. İzolatörün tetiklenmesi için gereken tek şart, izolatörün sürtünme kuvvetinden daha büyük bir yatay kuvvete maruz kalmasıdır. Bu nedenle üst yapı sistemine etkiyen yatay kuvvetler sürtünme kuvvetiyle sınırlı olup

deprem yatay ivmesinin büyüklüğü ve frekansından bağımsızdır. Örnek bir düz yüzeyli kayıcı izolatör Şekil 2.5'te [17] görülmektedir.



Şekil 2.5: Düz kayıcı izolatör örneği.

Çelik yüzeyler arası sürtünmenin azaltılabilmesi için teflon (PTFE) ya da düşük sürtünmeli kimyasallar kullanılmaktadır. Teflon yüzeyler elastomere göre daha fazla normal gerilme taşıyabilirler. Kayıcı izolatörler yüksek basınç etkilerine karşı tasarlanabilmektedir. Ancak, yüzey basınç gerilmesi arttıkça teflon yüzey ile çelik yüzey arasındaki sürtünme katsayısı azalmaktadır. Sürtünme katsayısı ortam sıcaklığına, yükleme hızlarına, eksenel basınç ve yüzey temizliğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Düz yüzeyli kayıcı izolatörlerin yatay kuvvet yerdeğiştirme grafiği Şekil 2.6'da [17] verilmektedir.



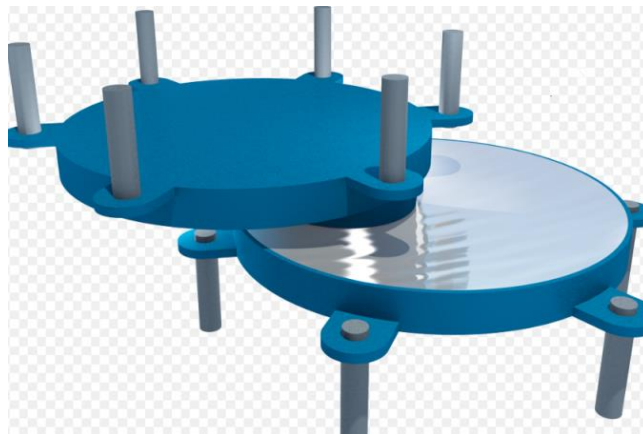
Şekil 2.6: Düz yüzeyli kayıcı izolatör kuvvet-deplasman eğrisi.

Çekme etkisine karşı direnç göstermezler. Bu tip izolatörlerde sönüm sürtünme ile sağlanır. Deprem sonrasında yapının tümünde kalıcı deplasmanlar oluşabilir. Ancak, kalıcı deplasmanların deprem sonrası binada müdahale yapılarak düzeltilebilmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle izolasyon kotunda kalıcı deplasmanların oluşmaması/sınırlandırılması ve geri merkezlemenin sağlanabilmesi için düz yüzeyli kayıcı izolatörler kauçuk esaslı izolatörle birlikte kullanılmaktadır. Bina taşıyıcı sisteminde yüksek eksenel yük taleplerinin olduğu lokasyonlarda (perde ve çapraz başlıkları vb.) kauçuk esaslı izolatör birimlerinin yerine de kullanılabilmektedir.

2.2.2. Eğri Yüzeyli Sürtünmeli Sarkaç İzolatörler (FPS)

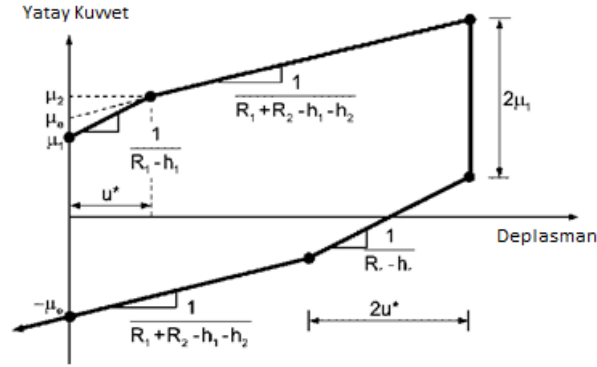
Eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörler, düz yüzeyli kayıcı izolatörün geri merkezleme özelliği kazandırılmış halidir. Sarkaç hareketinin iyi bilinen prensibine dayanır. Bu tip izolatörler yapı periyodunun uzatılması, enerji sönümü ve geri merkezleme mekanizmasını içeren etkili bir titreşim kontrol sistemi olarak ortaya çıkmıştır [18].

Sürtünmeli sarkaç tip izolatörler küresel bir içbükey yüzeye ve kaydırıcı olarak eğrisel formda bir çelik çekirdek elemana sahiptir. Depremde eğrisel formdaki çelik çekirdek küresel iç bükey yüzey üzerinde kayar. İç bükey yüzey nedeniyle, deprem sonunda üst yapı sistemi geri merkezleyici kuvvet etkisi altında orijinal konumuna geri dönebilmektedir. Bu sistemlerde yapı orijinal pozisyonuna geri dönerek deprem sonrası kalıcı yer değiştirme en aza indirgenebilmektedir. Örnek bir eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatör Şekil 2.7’de [19] görülmektedir.



Şekil 2.7: Çift eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç örneği.

Bu sistemlerde taban yalıtım sisteminin etkin periyodu yapı kütlesinden bağımsız olarak küresel kayma yüzeyinin eğrilik yarıçapına ve yüzey sürtünme katsayısına bağlıdır. İzolatörlere etkiyen yatay yükler düşey üst yapı yükleriyle orantılı olduğundan izolasyon döşemesindeki burulma düzensizlikleri bu doğal mekanizma nedeniyle büyük oranda elimine edilmektedir. Eğri yüzeyli kayıcı izolatörlere ait tipik yatay kuvvet yerdeğiştirme grafiği Şekil 2.8’de [18] verilmektedir.



Şekil 2.8: Eğri yüzeyli kayıcı izolatör kuvvet-deplasman eğrisi.

Bu elemanların çekme rijitlikleri yoktur ve çekme etkisine karşı direnç göstermezler. Bu nedenle çekme etkileri altında izolatörlerde kısa süreli kalkmalar oluşabilmektedir.

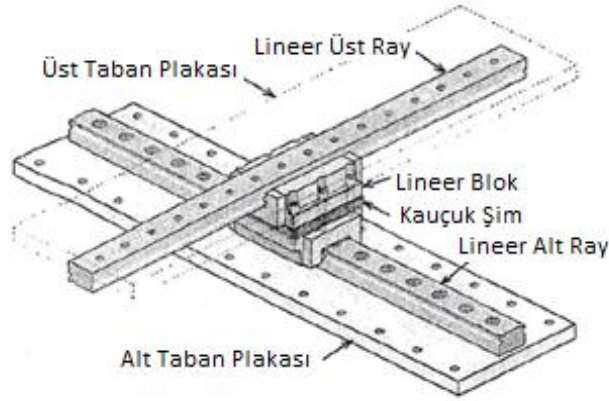
Eğri yüzeyli kayıcı izolatörler Türkiye’de birçok yapıda (hastaneler, havalimanı terminalleri, otoyol ve demiryolu viyadükleri) yaygın olarak kullanılmıştır. Bu tip izolatörler kauçuk izolatörlerin aksine yüksek mertebedeki yatay deplasman taleplerine (120cm~140cm) cevap verebilecek kapasitede üretilebilmektedir. İzolatörlerin eksenel yük kapasiteleri de oldukça yüksektir. Yüzey sürtünme katsayısı, eksenel basınca, zamana ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Statik durumdan kayma durumuna geçişlerde sürtünme (“Breakaway Friction”) ani olarak artış gösterebilmekte ve üst yapıya etkiyen yatay kuvvetlerde ani artışlara neden olabilmektedir.

2.2.3. Lineer Bilyalı Kayar İzolatör (Roller Bearings)

Lineer bilyalı kayar izolatörler, çelik bilyaların dönme hareketini kullanan izolatörlerdir ve doğrusal hareket (lineer) tipi ve düz plaka tipi olarak sınıflandırılabilir [11].

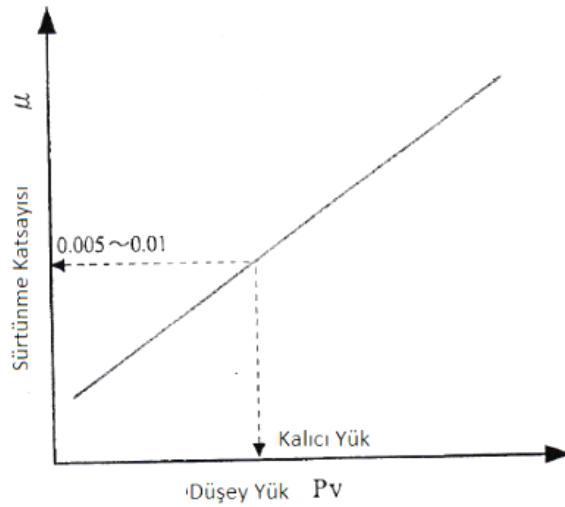
Şekil 2.9’da [11] gösterildiği gibi lineer tip, raylardan ve lineer sisteme monte edilmiş bir bloktan oluşur. Diğer kayar izolatörlerin aksine hem basınç hem de çekme etkilerine karşı rijitlikleri yüksektir.

Histeretik davranış döngüsü, sismik tepki analizinde elastik mükemmel plastik malzeme olarak modellenen bir şekle sahiptir. Geri merkezleme özelliği yoktur, bu nedenle yalıtım sistemi içinde sık sık kauçuk tip izolatörlerle birlikte kullanılır.



Şekil 2.9: Lineer bilyalı kayar izolatör mekanizması.

Uzun süreli yükler altında lineer bilyalı izolatörlerin sürtünme katsayısı 0.005 ile 0.01 arasındadır ve Şekil 2.10’da [11] gösterildiği gibi, sürtünme katsayısı düşey yüklerle doğru orantılı olarak daha büyük hale gelir. Üretimde değişiklik, 0.002 gibi düşük bir değerdedir, ancak yatağın eğilmesinden, bükülmesinden veya deformasyondan dolayı sürtünme katsayısındaki olası değişiklikleri dikkate almak gerekir [11].



Şekil 2.10: Sürtünme katsayısının düşey yüklerle değişimi.

Lineer bilyalı kayar izolatör düşey rijitliği, elemanların boyutuna (düşey yük taşıma kapasitesi) bağlıdır. Bu tipteki izolatörlerin düşey rijitlikleri kauçuk izolatörlerden 2 ila 5 kat daha yüksektir. Örneğin, 10.000 kN'luk uzun süreli bir yük (eksenel yük) durumunda, kauçuk izolatörlerin düşey rijitliği (G : 0.39 MPA, S_2 : 5.1) 4.09×10^6 MPA iken lineer kayıcı tip izolatörün düşey rijitliği 1.20×10^7 MPA (2.9 kat) olmaktadır [11].

2.3. Sönümleyici Damperler

Sönümleyici damperler hız bağımlı (viskoz) ve deplasman bağımlı (histeretik) damperler olarak iki grupta incelenebilirler. Hız bağımlı sönümleyicilere yağ veya silikon bazlı damperler (bkz. Şekil 2.11 [20]), deplasman bağımlı damperlere ise “U” (bkz. Şekil 2.12 [21]), helisel şekilli çelik damperler ve kurşun damperler (bkz. Şekil 2.13 [21]), örnek gösterilebilir.



Şekil 2.11: İzolatörle birlikte kullanılan viskoz damper örneği.

Viskoz veya deplasman bağımlı sönümleyicilerle taban yalıtım sisteminin eşdeğer kritik sönüm oranı %10~%25 mertebesinde artırılabilir. Özellikle yakın fay etkilerine maruz yapılarda izolatörlerdeki yatay deformasyon taleplerinin azaltılmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Deplasman bazlı damperlerin büyük bir deprem sonrasında değiştirilmesine ihtiyaç duyulabilmektedir.



Şekil 2.12: İzolatörle kullanılan “U” şekilli damper örneği.



Şekil 2.13: İzolatörle kullanılan kurşun ve helisel şekilli damper örneği.

3. TASARIM PERFORMANS HEDEFLERİ

Binaların yapısal tasarımında, yakın gelecekte meydana gelebilecek ve saha üzerinde önemli bir etkisi olan büyük ölçekli depremler tahmin edilmekte ve bu depremlerin neden olduğu yer hareketlerine göre yapısal sistemin depreme karşı dayanımı ve güvenliği değerlendirilmektedir.

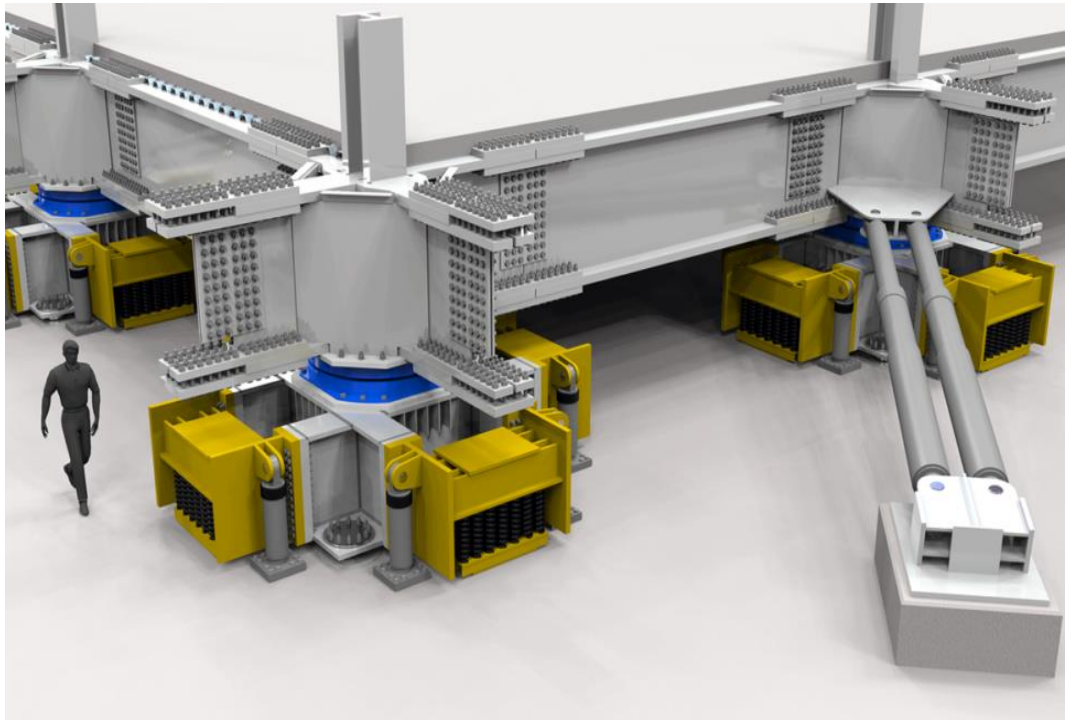
Öte yandan, binalardan istenen performans sadece yapısal sistem veya yapısal elemanlarla ilgili olan emniyet değil, aynı zamanda binanın kendisinin veya yapısal olmayan elemanların bütünlüğü ve kullanılabilirliği gibi çok çeşitli performanslar gerektirir (işlevsellik, konut konforu vb.). Bu nedenle, tasarım kriterleri sadece maksimum yer hareketi seviyesine göre değil, daha düşük ve meydana gelme sıklığı yüksek yer hareketleri (DD-3 ve DD-4 deprem düzeyleri) açısından da belirlenmelidir. Örneğin, sismik taban yalıtımlı bina sistemi maksimum deprem etkisine göre büyük bir akma kuvvetine göre tasarlanırsa, söz konusu bina tasarım depremi veya daha düşük deprem seviyelerinde sismik izolasyonun sağladığı faydadan yararlanılamayabilir. Bu doğrultuda binada kat ivmeleri ve kat görelî deplasmanlar artar ve bina tabana ankastre davranışa yakın bir davranış gösterir. Bu nedenle tasarım kriterleri birden çok deprem seviyesine göre belirlenmektedir [11].

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [8] sismik taban yalıtımlı bina taşıyıcı sistemi için tasarım kriterleri kat ötelenme oranlarının sınırları ve üst yapı tasarımında kullanılacak deprem yükü azaltma katsayısı ile ilişkilendirilmiştir. Üst yapıdaki görelî kat ötelenmeleri, kesintisiz kullanım (KK) performans seviyesi için $h/200$ (h :kat yüksekliği) sınırlı hasar (SH) performans seviyesi için $h/100$, Kontrollü Hasar performans seviyesi için ise $h/66$ değerleri ile sınırlandırılmıştır. Üst yapı tasarımı için deprem yükü azaltma katsayı "R" kesintisiz kullanım performans seviyesi için $R=1.2$, sınırlı hasar performans seviyesi için $R=1.5$ olarak alınmaktadır.

Sağlık Bakanlığınca 2013 yılında yayınlanan sismik taban yalıtımlı hastane binalarına ilişkin genelgede [1] sismik taban yalıtımlı hastane binalarında tasarım deprem etkisi altında kat ötelenmeleri $h/200$, yatay kat ivmeleri üst sınırı $0.3g$, tasarım taban kesme oranı ise $0.20W$ ile sınırlandırılmıştır. Japon yönetmeliğinde de [11] yatay kat ivmelerinin sınırlandırılmasıyla ilgili benzer performans kriterleri mevcuttur.

Yatay yöndeki deprem yer hareketlerinin konvansiyonel tabana ankastre yapılarda hasar oluşturma potansiyeli yüksektir. Bu tip binalarda büyük bir deprem

sonrasında tadilat/takviye maliyetleri binanın yıkımını gerektirebilecek hayli yüksek mertebelere ulaşabilmektedir. Ancak sismik taban yalıtımlı binalarda yatay yöndeki deprem yer hareketinin yapısal elemanlar üzerinde etkisi çok daha küçüktür. Bununla birlikte, deprem düşey yer hareketinin sismik taban yalıtımlı binada oluşturduğu etkiler konvansiyonel bir yapıyla hemen hemen aynıdır ve bazı durumlarda eleman tasarımında etkin yük kombinasyonu olarak dikkate alınabilmektedir. Sismik taban yalıtımının tercih edilmesi halinde depremin hem yatay hem de düşey etkisine karşı uygulanması da mümkündür. Ancak, sismik izolasyon birimlerine ilişkin maliyet ciddi mertebede artabilmektedir.



Şekil 3.1: 3B sismik yalıtım, “Loma Linda Medical Center” modeli.

Yakın saha fay etkisine maruz bölgelerde deprem düşey yer ivmelerinin yatay yer ivmelerine eşit veya büyük olabildiği bilinmektedir [22]. Bu bölgelerde düşey yönde sismik yalıtım yapılmasına ihtiyaç duyulabilir. Özellikle deprem sonrası faaliyetlerine devam etmesi gereken haberleşme, afet yönetim ve hastane binalarında ivme hassasiyetli kritik ekipmanlardaki hasar risklerinin azaltılması kapsamında düşey yönde de sismik yalıtım (bkz. Şekil 3.1 [23]) tercih edilebilir. Düşey doğrultuda sismik yalıtımın önemli ekipmanlar için ekipman bazında ayrı ayrı yapılması da mümkündür.

3.1. Yapısal Tasarımda Yenilikçi Yaklaşımlar

Uluslararası alanda, özellikle A.B.D’de yapı sistemlerinin tasarımında (taban yalıtımlı sistemler de dahil) mevcut yönetmeliklerin performans yaklaşımlarından farklı olarak süreklilik esaslı tasarım (Resilience Based Design) hedef tasarım kriteri olarak kabul edilmeye başlanmıştır.

Mevcut yönetmelikler bir depremden sonra can kaybının minimum olacağına dair güvence sağlarken, hayatta kalan insanlar için ne tür bir yaşamın sürdürüleceği sorusuna cevap verememektedir [24]. Süreklilik esaslı tasarım bu sorunun cevabını bina derecelendirme (REDi TM Rating ve U.S. Resiliency Council Building Rating System) veya puanlama (U.S. Resiliency Council’s rating system) yöntemiyle karşılamayı hedeflemektedir. Söz konusu tasarım bu hedef doğrultusunda yapısal ve yapısal olmayan elemanların (mimar bileşenler, cepheler, mekanik-elektrik ekipmanlar) tasarım ve performans doğrulamasının belirlenmesini amaçlamaktadır.

Süreklilik esaslı tasarımda bina derecesi veya puanı deprem sonrası olası finansal kayıplar ve bina duruş kayıpları baz alınarak tespit edilmektedir. Söz konusu kayıplar FEMA-P58 [25] projesi kapsamında geliştirilen bir kayıp değerlendirme metodolojisi kullanılarak hesaplanmaktadır. FEMA-P58 [25] projesi kapsamında yapısal ve yapısal olmayan elemanların tiplerine göre birçok elemanın ön tanımlı hasar görülebilirlik eğrileri, kat ivmesi ve deplasman girdileri ile değerlendirilmekte ve değerlendirme neticesinde yapısal ve yapısal olmayan elemanlara ilişkin olası maksimum kayıplar hesaplanabilmektedir.

Hesaplamalar neticesinde binanın işletmeye dönme hızı birden beşe kadar olan yıldız puanlama (U.S. Resiliency Council’s rating system) sistemiyle derecelendirilmektedir. Bu türdeki tasarım yaklaşımları mühendis ve mühendis olmayan tüm tarafların kolayca anlayabileceği ortak bir dil yaratmakta ve yapı kullanıcılarının veya yatırımcılarının ihtiyaçlarına cevap veren performans hedefleri sunmaktadır. Üstelik bu tip tasarım hedefleri, yapı sahiplerini ve yatırımcıları nispeten yüksek ön maliyete rağmen daha yüksek puanlı binalar inşa etmeye teşvik edebilmektedir (bkz. Şekil 3.1 [23]).

4. ANALİZ YÖNTEMLERİ

Tasarım standartlarında sismik taban yalıtımlı yapıların tasarımı, eşdeğer deprem yükü yöntemi, mod birleştirme yöntemi veya zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemlerine dayanmaktadır. Yalıtım birimleri yatay yükler altında doğrusal davranış göstermedikleri için doğrusal analiz yöntemlerinde (eşdeğer deprem yükü yöntemi ve mod birleştirme) doğrusal olmayan yalıtım sisteminin eşdeğer özellikleri (Eşdeğer rijitlik ve eşdeğer sönüm) dikkate alınarak analiz yapılır.

Eşdeğer deprem yükü yöntemi öncelikle asgari tasarım kriterlerini belirlemeyi amaçlar ve çok sınırlı tipteki taban yalıtımlı yapı sınıfının tasarımı için kullanılabilir (doğrulamalı dinamik analizler olmadan). Eşdeğer deprem yükü yönteminin basit denklemleri, ön tasarım için kullanışlı araçlardır ve daha karmaşık hesaplamaların hızlı bir şekilde gözden geçirilmesi ve kontrol edilmesi için bir imkan sağlar. Tasarım standartları, eşdeğer deprem yükü yöntemi denklemlerini dinamik analiz sonuçlarına sınırlar koymak için de kullanmaktadır.

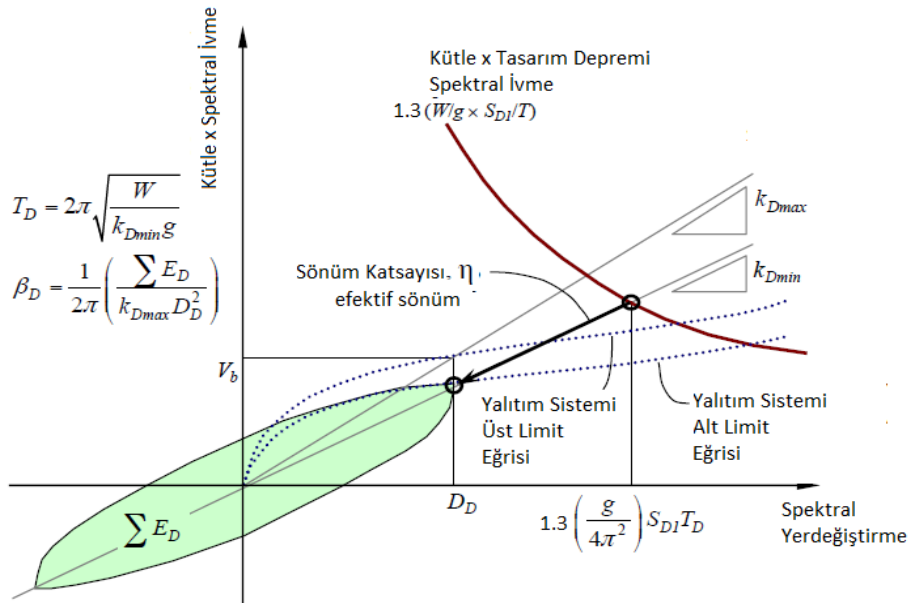
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [8] eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanabileceği koşullar aşağıdaki gibi verilmiştir. Diğer uluslararası yönetmeliklerde de benzer koşullar verilmektedir. Bu koşulların sağlanamaması durumunda mod birleştirme yöntemi, mod birleştirme yöntemine ilişkin koşulların sağlanamaması durumunda ise tasarımın doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemiyle yapılması gerekmektedir.

- Bina, ZA, ZB, ZC veya ZD türü zeminde bulunmaktadır.
- Yalıtımlı binanın DD-1 deprem yer hareketi etkisi altındaki etkin periyodu 4.0 saniyeden küçüktür.
- Yalıtım birimlerinde kalkma veya çekme oluşmamaktadır.
- Etkin sönüm oranı %30 değerinin altındadır.
- Yalıtım sistemi üzerindeki binanın kat adedi en fazla 4, yalıtım ara yüzü üzerindeki toplam yüksekliği ise en fazla 20 metredir.
- Yalıtım sistemi üzerindeki binanın her katında burulma düzensizliği katsayısı $\eta_{bi} < 2.0$ koşulu sağlanmaktadır ve binada B2 türü düzensizlik yoktur.
- Binanın düşey doğrultudaki titreşim periyodu $T_v \leq 0.1s$ 'dir.

Yukarıda verilen ilk dört koşulun sağlandığı durumlarda üstyapı ve altyapı mod birleştirme yöntemi ile hesaplanabilir.

4.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi

Eşdeğer deprem yüğü yöntemi, sismik yalıtımlı yapının davranışını belirlemek için basit denklemleri kullanan yer değiştirme tabanlı bir yöntemdir. Her ne kadar bu yöntem prosedürü lineer bir analiz metodu olarak kabul edilse de, kullanılan denklemler izolasyon sisteminin doğrusal olmayan özelliklerini dolaylı olarak hesaba katacak şekilde deformasyon talebine bağlı olarak hesaplanan etkin rijitlik ve sönüm değerlerini içerir. Denklemler, üst yapının rijit olduğu varsayılarak tüm yatay deformasyonların yalıtım katmanında oluştuğu kabul edilerek doğrusal olmayan bir yaklaşımla kapasite spektrum yöntemi (bkz. Şekil 4.1 [26]) kullanılarak belirlenmektedir.



Şekil 4.1: İzolasyon sistemi kapasite eğrisi ve deprem tasarım spektrumu.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019'a [8] göre tasarım deprem yer hareketi ve maksimum deprem yer hareketi düzeyleri için yalıtım birimi yerdeğiştirmesi D_D ve D_M Denk.(4.1) ve Denk.(4.2) ile hesaplanmaktadır. Denklemlerde yer alan 1.3 katsayısı depremin yön etkisine ilişkin spektrum büyütme katsayısıdır.

$$D_D = 1.3 \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) T_D^2 \eta_D S_{ae}^{(DD-2)}(T_D) \quad (4.1)$$

$$D_M = 1.3 \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) T_M^2 \eta_M S_{ae}^{(DD-1)}(T_M) \quad (4.2)$$

Tasarım deprem yer hareketi ve maksimum deprem yer hareketi düzeyleri için bina etkin periyodu T_D ve T_M Denk.(4.3) ve Denk.(4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g K_D}} \quad (4.3)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g K_M}} \quad (4.4)$$

Sönüm ölçeklendirme katsayıları η_D ve η_M Denk.(4.5) ile elde edilmektedir.

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (4.5)$$

Tasarım ve maksimum deprem yer hareketi düzeylerindeki yalıtım ara yüzü toplam yerdeğiştirmesi, Denk.(4.1) ve Denk.(4.2)'den hesaplanan yerdeğiştirme değerlerine üstyapı ve yalıtım sistemi burulmasından gelen ilave yer değiştirmelerin eklenmesi ile hesaplanmaktadır.. Düzgün bir dağılım olması durumunda toplam yerdeğiştirmeler Denk.(4.6)ve Denk.(4.7) ile hesaplanan değerlerden daha az olamaz. Burulmaların dikkate alınması ile hesaplanan yerdeğiştirme değerlerinin Denk.(4.6) ve Denk.(4.7) ile hesaplanan değerlerden daha küçük olması durumunda Denk.(4.6) ve Denk.(4.7) ile hesaplanan değerler yerine, hesaptan elde edilen değerler ile $1.1D_M$ ve $1.1D_D$ değerlerinden büyük olanları dikkate alınabilmektedir.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (4.6)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (4.7)$$

Üstyapıya etkiyen kuvvet, tasarım deprem yer hareketi ve maksimum deprem yer hareketi düzeyi için Denk.(4.8) ve Denk.(4.9) ile hesaplanacaktır. Ancak, bu denklemlerde deplasman hesaplarında olduğu gibi maksimum yön düzeltmesine ilişkin bir katsayı yer almamaktadır.

$$V_D = \frac{S_{ae}^{(DD-2)}(T_D)W\eta_D}{R} \quad (4.8)$$

$$V_M = \frac{S_{ae}^{(DD-1)}(T_M)W\eta_M}{R} \quad (4.9)$$

Üstyapı tasarım taban kesme kuvveti hiçbir durumda tasarım rüzgar kuvvetinden veya yalıtım sisteminin akma duruma geçmesi için gerekli olan kuvvet değerinin altında olmayacak, ve bu kuvvetler katlara Denk.(4.10)'a göre dağıtılacaktır (ters üçgen).

$$F_S = \frac{V_D w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (4.10)$$

Taban kesme kuvvetinin belirlenmesiyle ilgili ASCE7-16 [5] tasarım yönetmeliğinde aşağıdaki ilave koşullardan elde edilen maksimum taban kesme oranı tasarımda dikkate alınmaktadır. Bu yönetmelikte kat tasarım kuvvetlerinin dağılımı, izolasyon kotu döşemesinin kütlesi, sönüm oranı ve tabana ankastre yapı periyoduna bağlı değişmektedir.

- Aynı etkin sismik ağırlığa ve TD periyoduna sahip geleneksel, tabana ankastre bir yapının tasarımı için gereken kesme kuvveti.
- Rüzgar tasarımı için gereken kesme kuvveti.
- İzolasyon sisteminin aktivasyonu için gereken kesme kuvvetinin 1,5 katı.

4.2. Mod Birleştirme Yöntemi

Mod birleştirme yönteminde eşdeğer deprem yöntemine benzer olarak yalıtım birimlerinin hedef deplasmandaki etkin rijitlik ve sönüm değerleri kullanılmaktadır. Yöntemin kullanılabilmesi için yalıtımlı bina titreşim modlarında kritik etkin sönümün %30'dan büyük olmaması gerekmektedir. Daha yüksek titreşim modlarının büyük

analizlerinde kullanılmaktadır. En az on bir çift yer hareketi bileşeni kullanıldığı takdirde, her bir kayıttan elde edilen maksimum tepkilerin ortalaması nihai tasarım değeri olarak kullanılabilir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, sonuçların karmaşıklığı, gerekli analizlerin sayısı (farklı kütle eksantritesi için farklı model analizleri), zamanın her anı için farklı tepki türlerini bir araya getirme ihtiyacı, vb. nedeniyle kullanışlı bir tasarım aracı değildir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler izolasyon kotu yer değiştirme, devrilme momenti, izolatörlerde kalkma/çekme ve kat ivmeleri/kesme kuvvetleri gibi birkaç temel tasarım parametresini kontrol etmek amacıyla bir tasarımı doğrulamak için kullanıldığında en faydalı analiz yöntemidir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde binanın zaman tanım analizlerinde bina düşey doğrultudaki titreşim periyodunun $0.1s$ 'den küçük olması durumunda depremin iki yatay bileşeni, düşey titreşim periyodunun kurala uymadığı durumlarda ise depremin iki yatay bileşenine ek olarak düşey bileşeni de kullanılması istenmektedir.

Deprem yalıtımlı binaların zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçiminde kayıt tepki spektrumlarının $0.5T_D-1.25T_M$ periyot aralığında deprem spektrumlarıyla uyumlu olması istenmektedir.

Zeminin Z_D 'den daha zayıf olduğu durumlarda, üç boyutlu dinamik yapı-zemin etkileşim hesapları yapılacak ve sonuçlar bina hesaplarında dikkate alınacaktır. Doğrusal olmayan hesap her deprem yer hareketi seviyesinde ve her doğrultuda en az on bir kayıt çifti için tekrarlanacak, ilgili deprem seviyesinde ve doğrultuda yapılan hesaplarda elde edilen en büyük değerlerin ortalamaları tasarıma esas değer olarak dikkate alınması istenmektedir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap sonucunda elde edilen yalıtım birimi yerdeğiştirmeleri, her bir zaman adımında meydana gelen birbirine dik doğrultudaki yerdeğiştirmelerin vektörel bileşkesi olarak belirlenmesi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap sonucunda yalıtım arayüzünde hesaplanan yerdeğiştirmeler eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplan değerlerin %80'inden az olmaması şart koşulmaktadır.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap sonucunda elde edilen üstyapı ve altyapı kuvvetleri, binada düzensizlik bulunmaması halinde eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplanan değerlerin %80'inden az olmaması istenmektedir.

5. ANALİZ VE TASARIM PROBLEMLERİ

Taban yalıtımlı yapıların tasarımı, kullanılan analiz yöntemine bağlı olarak önemli farklılıklar doğurabilmektedir. Taban yalıtımlı sistemlerin modellenmesi, analizi ve tasarımı standart yapılardan önemli ölçüde ayrılmaktadır. Bu tür yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar ve karşılaşılan tasarım sorunlarıyla ilgili çözümler hakkında alternatif tasarım yaklaşımlarına çoğu zaman gereksinim duyulmaktadır. Bu bölüm kapsamında taban yalıtımlı sistemlerde karşılaşılabilecek ve aşağıda maddeler halinde tanımlanan üç farklı tasarım problemi ve çözüm yollarının belirlenmesiyle ilgili incelemeler yapılacaktır.

- Fay yönelim etkilerine maruz sismik taban yalıtımlı binalarda izolatörlerdeki yüksek deplasman talepleri
- Ortak izolasyon döşemesi üzerinde yer alan genleşme derzleriyle birbirinden ayrılmış bina bloklarının davranışı ve tasarımı
- Taban yalıtımlı binalarda düşey yer hareketinin taban kesme kuvvetlerine olan etkisi

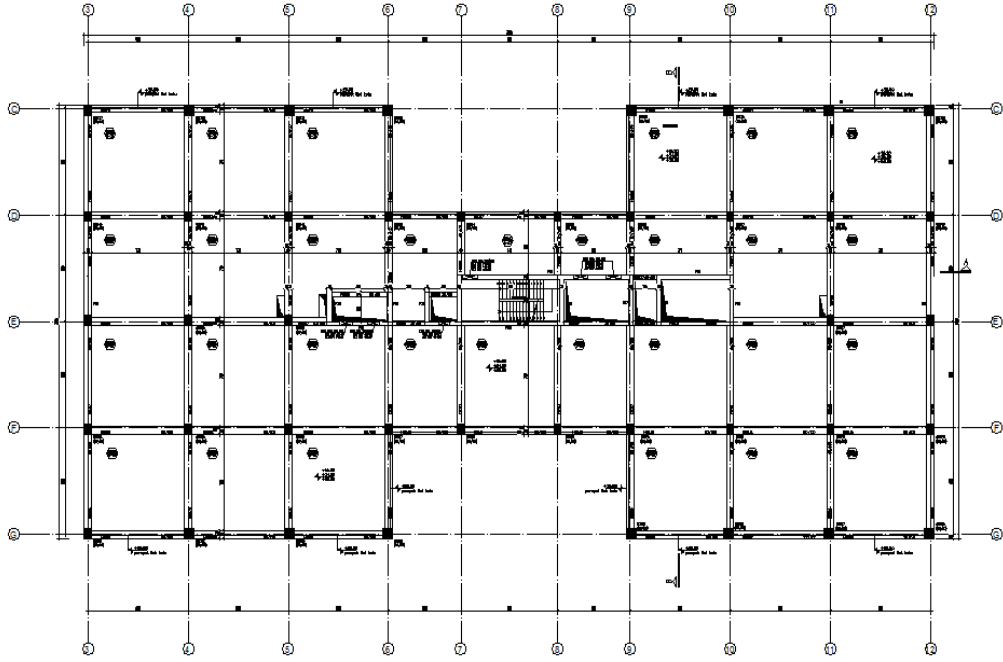
Söz konusu problemlerin tasarım aşamasında tespit edilmesi ve uygun çözüm yaklaşımlarının belirlenmesi deprem sonrası hemen kullanımı beklenen sismik taban yalıtımlı binalar için kritik öneme sahip görülmektedir. Örneklere ilişkin yapısal modellerin analizlerinde SAP2000 yapısal analiz programı kullanılmıştır.

5.1. Faya Yakın Taban Yalıtımlı Binalarda Yüksek Deplasman Talepleri

Yakın fay yönelim etkisine maruz sismik taban yalıtımlı binalarda maksimum deprem etkisi altında izolatörlerdeki deplasman talepleri 2.00m mertebelerine kadar ulaşabilmektedir. Bu mertebede deplasman kapasitelerine sahip sarkaç tipi izolatörlerin üretilebilmesi teorik olarak mümkün olabilse de izolatör maliyetleri aşırı yüksek mertebelere ulaşabilmektedir. Bu tür sismik taban yalıtımlı binalarda yatay deplasman taleplerinin azaltılabilmesi ve izolatörlerin ekonomize edilebilmesi amacıyla izolasyon ara yüzünde ilave sönümleyici damperler kullanılmaktadır.

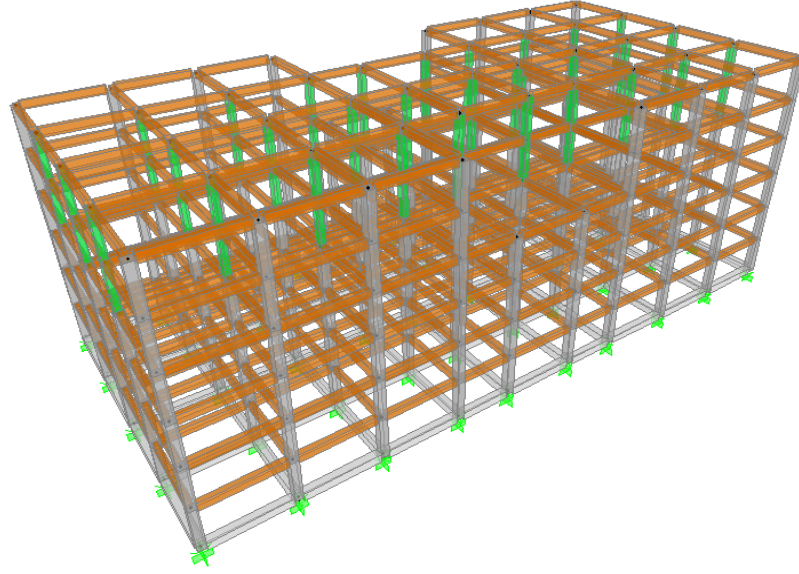
5.1.1 Örnek Çalışma

Bu örnek çalışmada yakın fay etkisine maruz taban yalıtımlı bir bina için analizler yürütülecek ve analiz sonuçlarıyla ilgili değerlendirmeler yapılacaktır. Örnek çalışma konusu yapı hastane binası olarak inşa edilecek olup, Sakarya ilinde yer almakta ve aktif fay hattına 5km uzaklıkta yer almaktadır (bkz. Şekil 5.3 [27]). Bina oturum alanı 33.2m x 70m ebatlarında olup, yapı betonarme karkas moment çerçevelerinden oluşan altı katlı bir binadır. Binada aks açıklıkları 8.3m ve 6m olarak teşkil edilmiştir. Kat yükseklikleri tüm katlarda 4.8m olup toplam bina yüksekliği yaklaşık 30m'dir. Binada her bir betonarme kolon altında bir izolatör bulunmakta olup sistemde toplam 50 Adet izolatör mevcuttur. Taban yalıtım katı günlük kullanıma kapalı olup, izolatörlerde bakım veya yenilenme işlerinin gerçekleştirilebilmesi için kat yüksekliği 2.5m olarak tutulmuştur.



Şekil 5.1: Örnek bina kat kalıp planı.

Yapının bilgisayar modelinde kolon ve kirişler çubuk eleman, perdeler kabuk (shell) eleman, damper ve izolatörler ise link eleman olarak modellenmiştir.



Şekil 5.2: 3-Boyutlu bina analiz modeli.

İzolatörler düşey ve yatay etkin rijitlikleri ve doğrusal olmayan özellikleri tanımlanarak, damperler ise sadece eksenel yöndeki sönüm katsayıları kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 5.3: Bina konumu ve bölgedeki faylanma mekanizmaları.

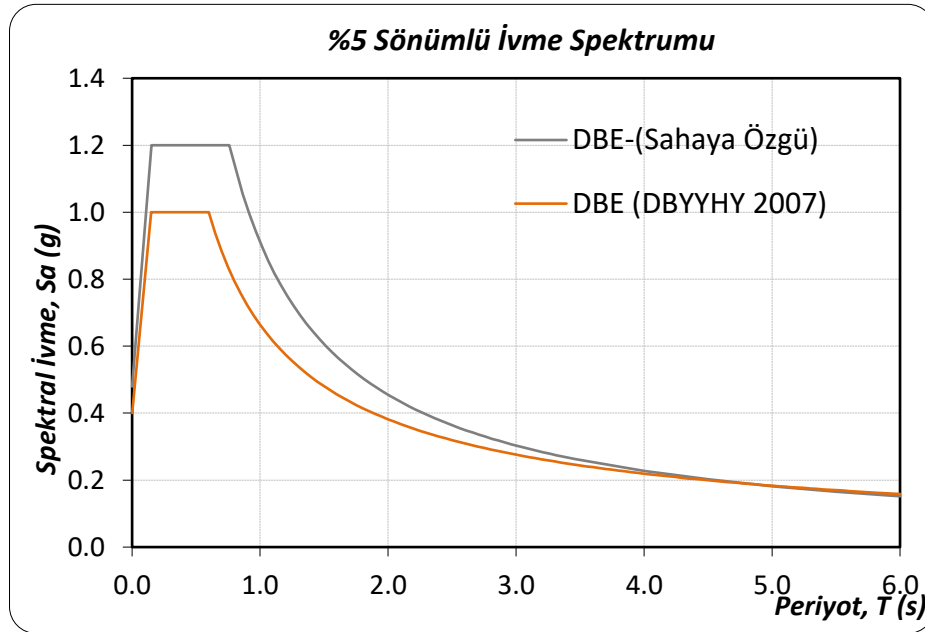
2013 yılında Sağlık Bakanlığı tarafından yayınlanan tasarım kriterlerine [1] göre üst yapıdaki elastik ($R=1$) tasarım taban kesme oranını etkin bina ağırlığının %20'sinden fazla alınmasına izin verilmemektedir. Rölatif kat ötelenmelerinin oranı maksimum %0.5, kat ivmelerinin ise $0.30g$ 'yi aşmaması istenmektedir. Tasarımın çerçevesini belirleyen bu kriterler üst yapının depremde elastik davranış göstermesini

amaçlamakta ve yapısal olmayan elemanlarda hasar risklerinin azaltılmasını hedeflemektedir.

Binanın bulunduğu bölgede deprem spektrum parametreleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Tablo 5.1: Deprem spektrum parametreleri (NEHRP – B).

Deprem Yenileme Süresi ve Aşılma Olasılığı	Spektral İvmeler	
	Ss:0.2s	S1:1.0s
475 Yıl, 50 Yılda %10	1.2g	0.7g
2475 Yıl, 50 Yılda %2	1.6g	1.0g

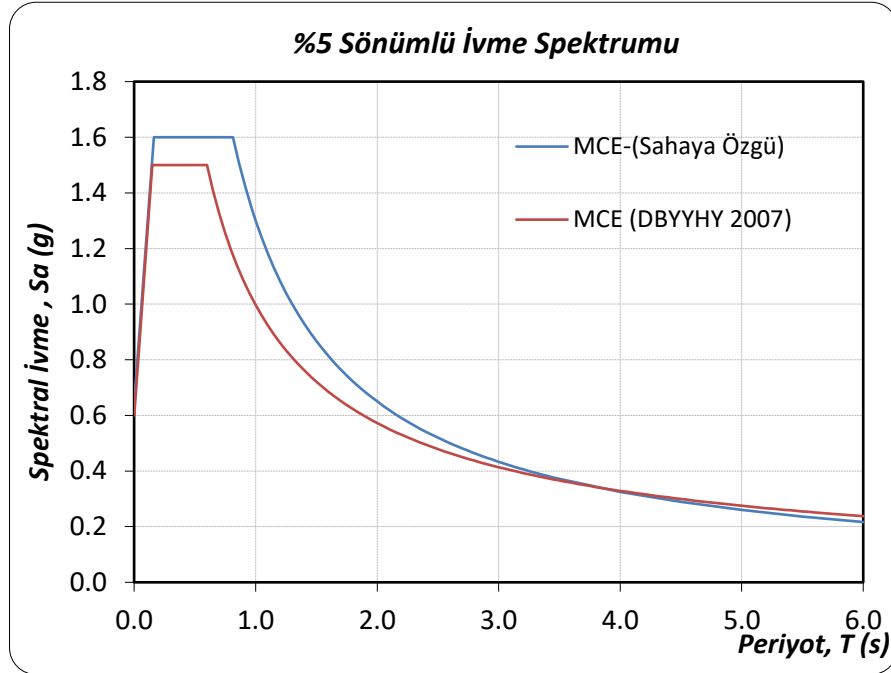


Şekil 5.4: Tasarım depremi (T_r : 475 yıl) deprem spektrumları.

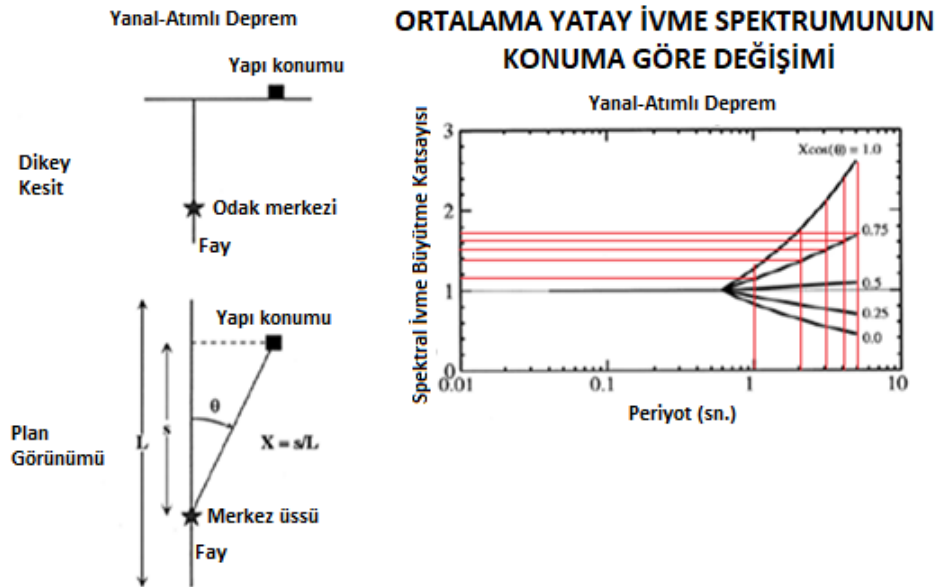
Sağlık Bakanlığı Genelgesinde [1], binaların yakın fay bölgesinde bulunduğu ve yırtılma yönelimi etkisi altına kalabileceği konumlarda fay yırtılma yönelimi içeren yer hareketi özelliklerinin spektrum şekline yansıtılması gerektiği belirtilmektedir. Fay hattı, merkez üssü ve proje mahalli arasındaki geometrik özelliklere bağlı olarak periyodun 0.6s'den daha yüksek olduğu bölgelerde ortalama spektrum genlikleri büyümektedir [28].

Yinelenme periyodu 475 ve 2475 yıllık depremler için ortalama bir değer olarak $L=80\text{km}-110\text{km}$ (Fay kırılma uzunluğu), $s=60\text{km}-80\text{km}$ (Bina ile deprem odağı arasındaki yatay mesafe) ve fay uzaklığı 5km kabul edilirse $X_{\cos(\theta)}=0.75$ olarak

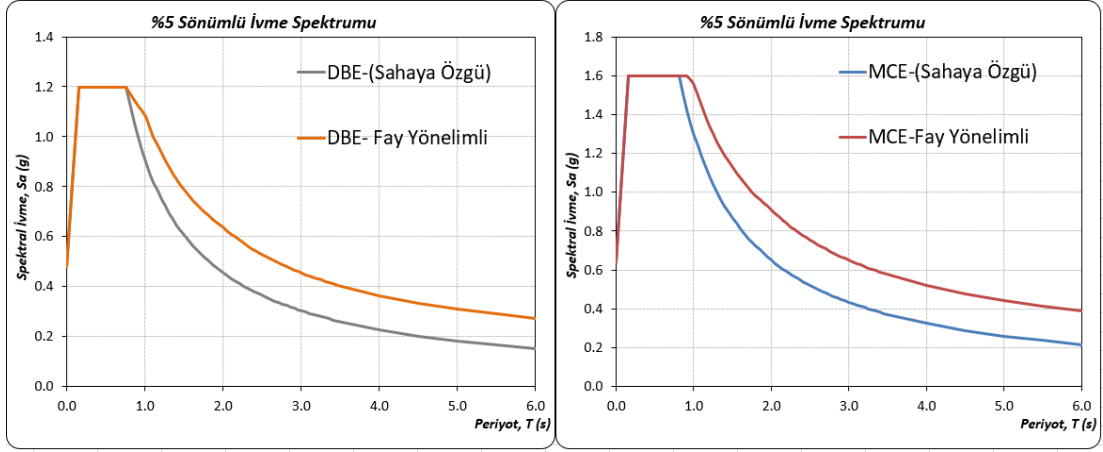
bulunur. Bu durumda yer-bağımlı tasarım bazlı deprem spektrumlarındaki spektral genlikleri 1s için 1.2, 2s için 1.4, 3s için 1.5, 4s için 1.6 ve 5s için 1.7 faktörü ile büyütülmesi gerekecektir (bkz. Şekil 5.6 [28]). Fay yırtılma yönelim etkisi (Directivity) de göz önünde bulundurularak hazırlanmış tasarım spektrumları aşağıdaki şekillerde verilmiştir (bkz. Şekil 5.7).



Şekil 5.5: Maksimum deprem ivme spektrumları.

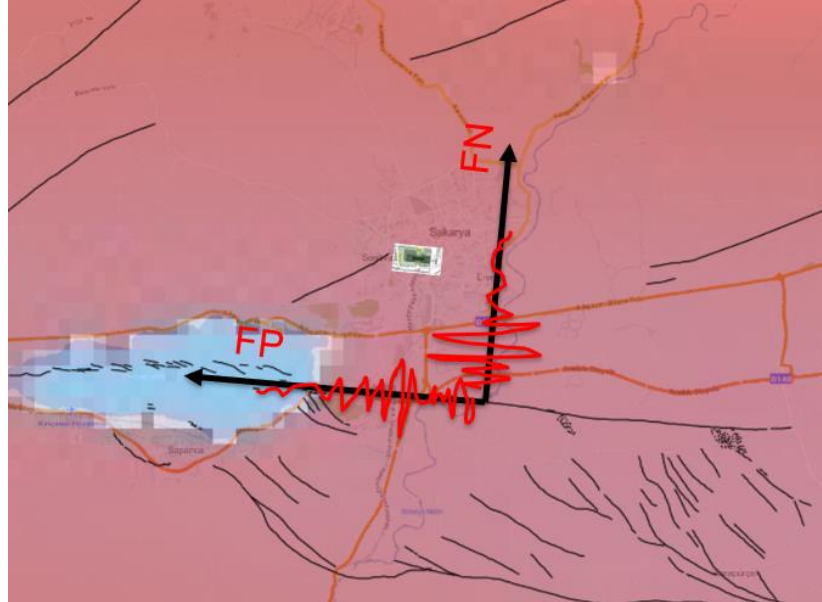


Şekil 5.6: Spektral ivmelerin fay yırtılma yönelimine göre değişimi.



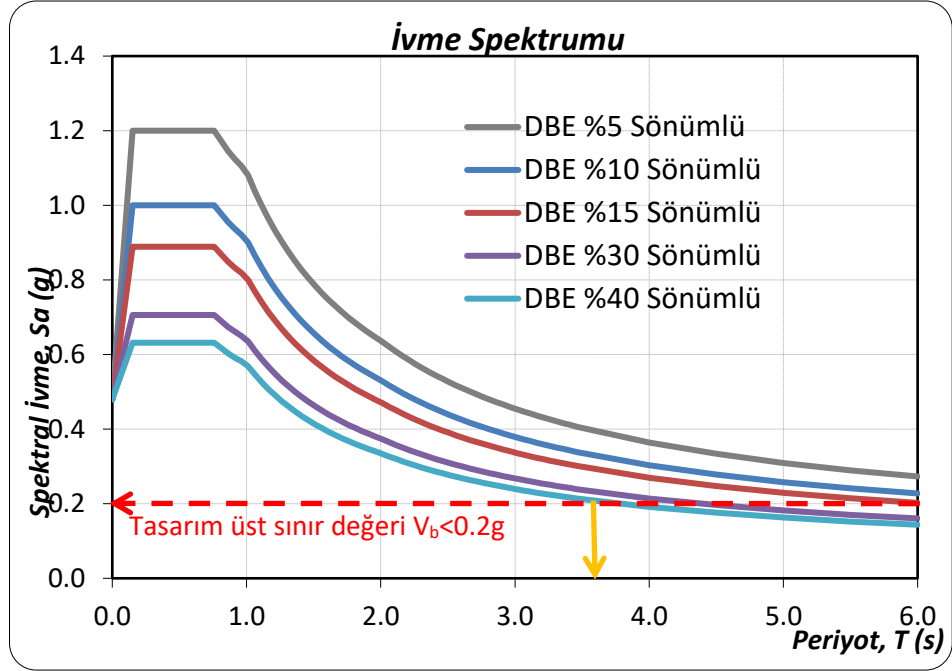
Şekil 5.7: Fay yönelim çarpanıyla büyütülmüş deprem ivme spektrumları.

Deprem yakın saha etkilerini içeren (fay yönelimi vb.) tehlike analizlerinde faya normal ve faya paralel yer hareketi bileşenleri için ayrı ivme spektrumları tanımlanmaktadır [28]. Yakın saha fay etkilerine maruz bölgelerden alınmış kayıtlardan faya dik yöndeki (Fault Normal) yer hareketi faya paralel (Fault Parallel) yöndeki yer hareketine göre çok daha büyük olmaktadır. Bu nedenle faya dik ve faya paralel ivme kayıtlarının ölçeklendirilmesinde her iki bileşen için de farklı ivme spektrumlarına göre ölçekleme yapılmaktadır. Örnek binanın aktif faya göre konumu Şekil 5.8’de [29] verilmektedir.

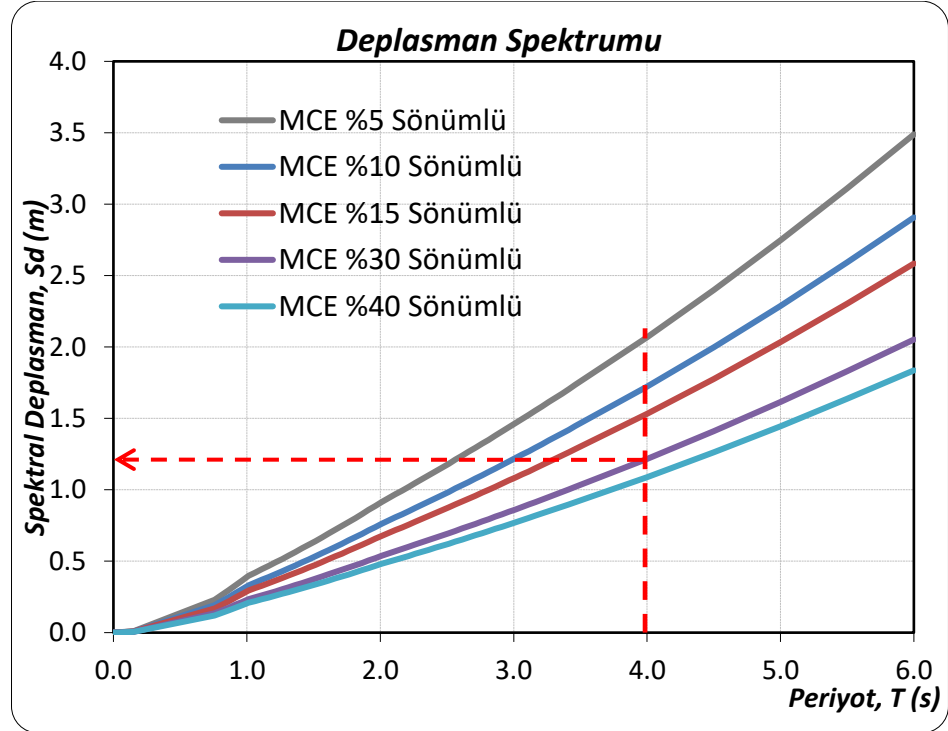


Şekil 5.8: Fay hattına göre konum ve yer hareketi ivme bileşenleri.

Yakın saha fay etkilerini içeren ivme kayıtlarının ölçeklenmesinde faya dik ve faya normal yer hareketi bileşenlerinde ayrı ölçekleme katsayılarının kullanılması tercih edilmiştir (Somerville vd.). İvme kayıtlarının ölçeklendirilmesinde basit ölçekleme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 5.9: %5-%40 sönümlü tasarım ivmesi spektrumları.



Şekil 5.10: %5-%40 sönümlü maksimum deprem deplasman spektrumları.

Tasarım kriterlerinin sağlanabilmesi için tasarım deprem etkisi altında kabul edilebilir maksimum taban kesme oranının 0.2g ile sınırlı olması gerekmektedir. Bu doğrultuda çeşitli sönüm oranları için elde edilen tasarım spektrumlarına göre %40 sönümlü bir sistemde etkin yapı periyodu 3.5s, %30 sönümlü sistemde ise etkin yapı periyodu 4.3s olmaktadır. Maksimum deprem etkisinde (MCE) izolatör deplasman talepleri ise %40 sönümlü sistemde 1.00m, %30 sönümlü sistemde ise 1.2m olarak elde edilmektedir. Sönüm oranlarına ilişkin ivme ve deplasman azaltma katsayıları için ASCE7-16 [5] yönetmeliği esas alınmıştır.

Bu mertebedeki deplasman talepleri kauçuk tipteki izolatörler için uygun olmamaktadır. Kauçuk izolatörlerde 1.0m~1.2m yatay deplasmanların sağlanabilmesi için izolatör çaplarının stabilite şartları gereği yaklaşık 1.8m~2.4m ebatlarında olması gerekmektedir. Bu boyutlarda izolatör üretilebilse dahi, izolatör çap artışı nedeniyle artan yatay rijitlikler taban kesme oranı üst limitlerini sağlamayacaktır. Ancak, söz konusu deplasman talepleri sürtünmeli sarkaç tip (FPS) izolatörlerle (1, 2 veya 3 yüzeyli) karşılanabilmektedir. Bu nedenle inceleme konusu örnek yapıda izolatörler çift yüzeyli sürtünmeli sarkaç tip izolatörler olarak seçilmiştir. Çift yüzeyli sürtünmeli sarkaç tip izolatörlerin eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem olarak idealize edilmesi için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır (bkz. Şekil 5.11 [18]).

$$Q_d (\mu_1=\mu_2) = \mu W \quad (5.1)$$

$$k_d = \frac{W}{2(R_1-h_1)} = \frac{W}{2R_{eff}} , (h_2=h_1, R_1=R_2) \quad (5.2)$$

$$F = (\mu + 1/R_{eff} D) W \quad (5.3)$$

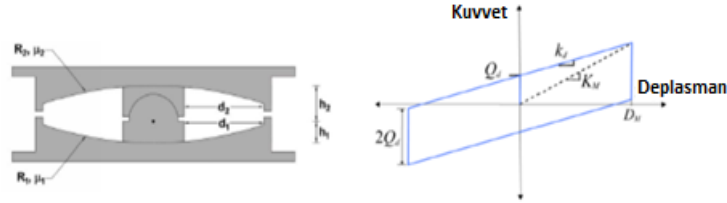
$$K_D = F/D_D \quad (5.4)$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g K_D}} \quad (5.5)$$

$$\xi_D = \frac{2\mu}{\pi(\frac{D_D}{R_{eff}} + \mu)} \quad (5.6)$$

$$D_{\text{maks}} = \frac{2(R_1 - h_1)}{2R_1} 2d_1 = \frac{R_{\text{eff}}}{R_1} d_1 \quad (5.7)$$

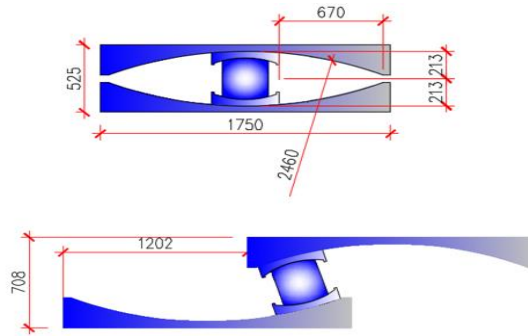
$$R_{\text{eff}} = (R_1 + R_2 - h_1 - h_2) \quad (5.8)$$



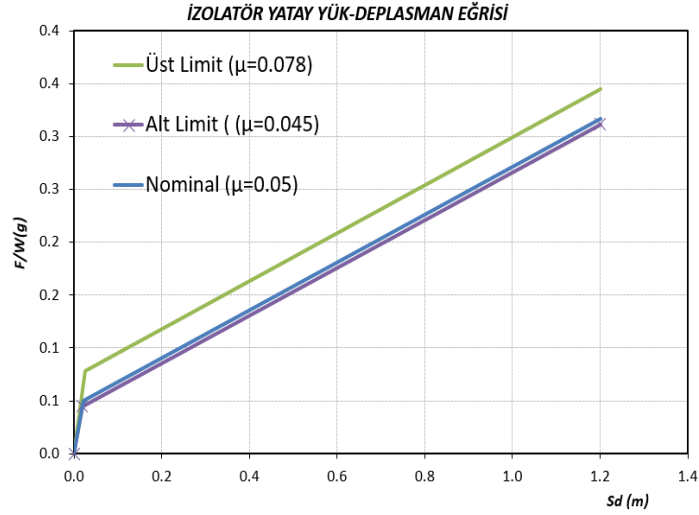
Şekil 5.11: Sürtünmeli sarkaç izolatör karakteristik parametreleri.

Sismik yalıtım birimi olarak üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler kullanılacak olup, izolatörlere ilişkin karakteristik özellikler aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Üç yüzeyli sürtünmeli sarkacın iç çekirdeği hesapların basitleştirilmesi amacıyla dikkate alınmamıştır.

- R_1 ve R_2 : 2.46 m.
- R_{eff} : $2(2.46 - 0.21) \rightarrow 4.5$ m.
- μ_{nominal} : 0.05
- $\mu_{\text{üst limit}}$: 0.078 (DBE için λ_{maks} : 1.56)
- $\mu_{\text{alt limit}}$: 0.045 (MCE için λ_{min} : 0.9)
- W : 239,130.0 kN
- Toplam FPS adedi: 50
- D_{maks} : $(4.5/2.46) \times 0.67 \rightarrow 1.23$ m. (İzolatör maksimum deplasman kapasitesi)
- W_i : 4782.6 kN



Şekil 5.12: Seçilen izolatör ve maks. deplasman kapasitesi (D_{maks} : 1230 mm).



Şekil 5.13: İzolatör alt limit ve üst limit yük-deplasman eğrileri.

Eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem kabulüyle izolatör üst limit özellikleri kullanılarak tasarım deplasman talebi ve tasarım taban kesme oranı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

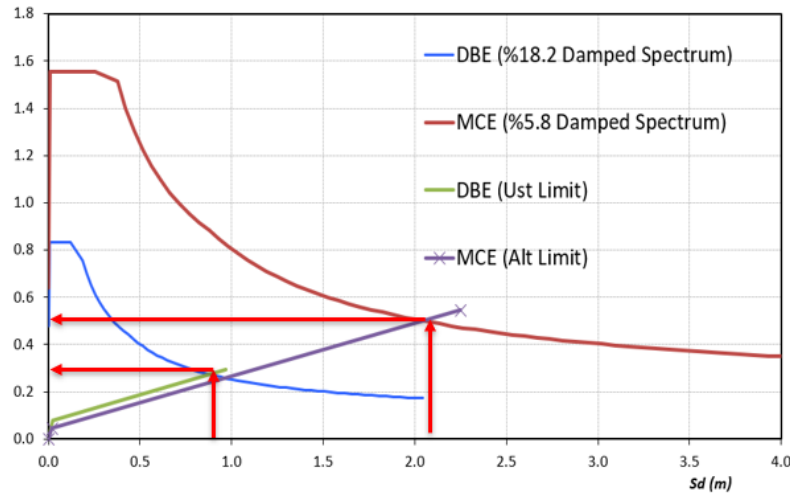
- $D_D: 0.88 \text{ m.}$
- $V_D: (0.078 + 1/4.5 \times 0.88) \text{ W} \rightarrow 0.273 \text{ W}$
- $K_D: 0.273 \text{ W} / 0.88 \text{ m.} \rightarrow 0.310 \text{ W/m.}$
- $T_D: 2\pi \sqrt{\frac{1}{9.81 \times 0.31}} \rightarrow 3.6 \text{ sn.}$
- $\xi_D: \frac{2 \times 0.078}{\pi(\frac{0.88}{4.5} + 0.078)} \rightarrow 0.18$
- $\beta_D: 1.44$ ($\xi_D: 0.18$ için)
- $V_D/W: 0.273$ ($T_D: 3.6 \text{ sn.}$ için)

Eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem kabulüyle izolatör alt limit özellikleri kullanılarak maksimum deplasman talebi ve taban kesme oranı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- $D_M: 2.045 \text{ m.}$
- $V_M: (0.045 + 1/4.5 \times 2.054) \text{ W} \rightarrow 0.50 \text{ W}$
- $K_M: 0.50 \text{ W} / 2.045 \text{ m} \rightarrow 0.244 \text{ W/m.}$
- $T_M: 2\pi \sqrt{\frac{1}{9.81 \times 0.244}} \rightarrow 4.06 \text{ sn.}$

- $\xi_M: \frac{2 \times 0.045}{\pi(\frac{2.045}{4.5} + 0.045)} \rightarrow 0.057$
- $\beta_M: 1.03$ ($\xi_M: 0.057$ için)
- $V_M/W = 0.500$ ($T_M: 4.06$ sn. için)

Seçilen izolatör özellikleri için yürütülen eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem analizlerine göre tasarım deprem etkisi altında taban kesme oranı 0.27g, maksimum deprem etkisi altında izolatör deplasman talebi 2.05m hesaplanmıştır. Sağlık bakanlığı genelgesi şartlarına göre bina taban kesme oranı üst limiti olan 0.2g değeri %35 oranında aşılmaktadır. Ayrıca, maksimum deprem etkisi altındaki deplasman talebi oldukça yüksek bulunmuştur. Taban kesme oranı şartlarının sağlanabilmesi ve maksimum deplasman taleplerinin azaltılması için sisteme ilave viskoz sönümleyiciler eklenecektir.



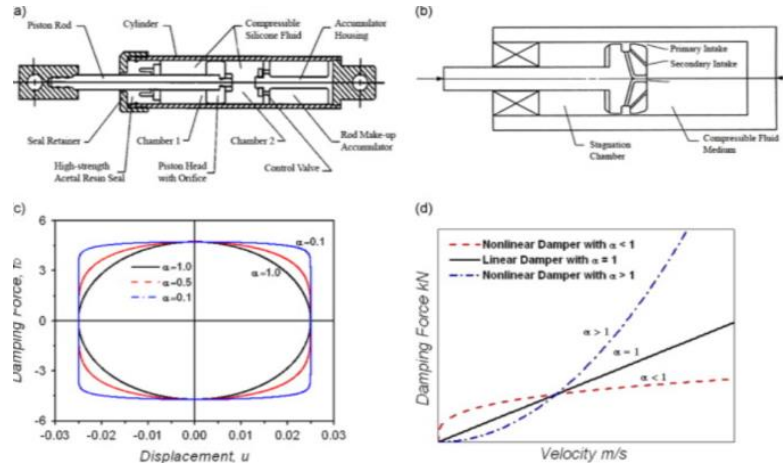
Şekil 5.14: Eşdeğer sistem davranış eğrisi ve ivme-deplasman spektrumu.

Sisteme ilave edilecek sönümleyici miktarı seçilen izolatörlerin maksimum yatay deplasman kapasitesine göre aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Maksimum izolatör deplasman kapasitesi D_{maks} : 1.23m,
- Kütle merkezindeki deplasman kapasitesi: $1.23m / 1.1 \rightarrow 1.12m$
- Burulma düzensizliği katsayısı 1.1 alınmıştır.
- D_M : 1.12 m. İçin gereken ilave sönüm hesaplanacaktır;
- V_M : $(0.045 + 1/4.5 \times 1.12) W \rightarrow 0.294 W$
- K_M : $0.294 W / 1.12 m \rightarrow 0.263 W / m$.

- $T_M: 2\pi \sqrt{\frac{1}{9.81 \times 0.263}} \rightarrow 3.91 \text{ sn.}$
- $\omega_M: 1.607 \text{ rad./sn.}$
- $T_M: 3.91 \text{ sn. için } V_M \rightarrow 0.528g \text{ (%5 sönümlü spektrum)}$
- $\beta_M: 0.528 g / 0.294 g \rightarrow 1.795$
- $\beta_M: 1.795 \text{ için gerekli eşdeğer sönüm oranı } \xi_{M, (FPS+VD)}: \%34.7 \text{ (ASCE7-16 [5])}$
- $\xi_{M, FPS}: \left(\frac{2 \times 0.045}{\pi \left(\frac{1.12}{4.5} + 0.045 \right)} \right) \rightarrow 0.097 \text{ (FPS eşdeğer sönüm katkısı)}$
- $\xi_{M, VD}: (\%34.7 - \%9.7) \rightarrow \%25 \text{ (Gerekli ilave eşdeğer viskoz sönüm katkısı)}$

Yapılan hesaplar sonucunda sönümleyiciler ile sağlanması gerekli ilave eşdeğer sönüm oranı %25 olarak hesaplanmıştır. Lineer ve doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerle ilgili kuvvet-deplasman ve kuvvet-hız genel ilişkileri Şekil 5.15'te [30] verilmiştir.



Şekil 5.15: Viskoz damper özellikleri.

%25 ilave eşdeğer sönüm için viskoz damper özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

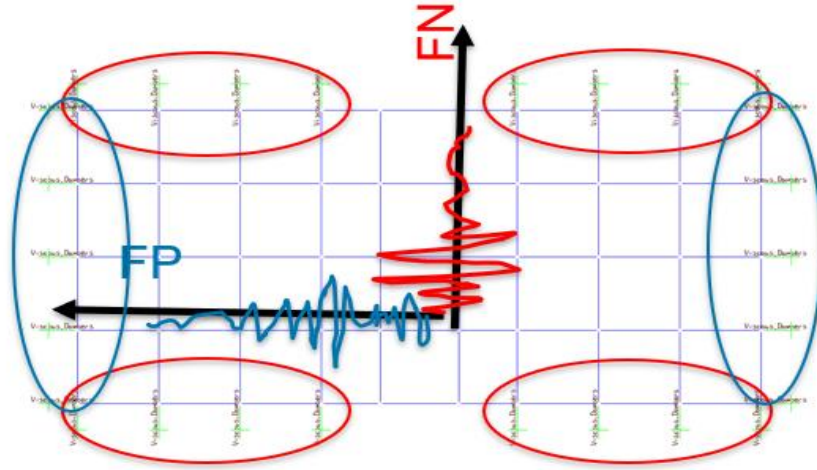
- Eşdeğer sistem kritik sönüm değeri, $C_{cr, M}: 2 \times K_M / \omega_M \rightarrow 78,219.0 \text{ KN} \times \text{sn./m.}$
- Gerekli ilave eşdeğer viskoz sönüm, $C_{M, VD}: \xi_{M, VD} \times C_{cr, M}$
- $C_{M, VD}: 19,555.0 \text{ KN} \times \text{sn./m.}$
- Maksimum spektral hız, $S_{v, M}: \omega_M \times D_M \rightarrow 1.79 \text{ m./sn.}$
- Maksimum damper kuvveti, $F_{VD, maks}: C \times S_v^\alpha \text{ (} F_{VD, maks}: C \times V^\alpha \text{)}$
- $F_{VD, maks}: 35,139.0 \text{ kN } (\alpha=1.0)$

- $\pm 1200\text{mm}$ deplasman kapasiteli viskoz damper yaklaşık üretim sınırları;
- $F_{VD,\text{maks}} < 2500\text{kN}$, $0.4 < \alpha < 1.0$,
- Proje için seçilen damper adedi: 16 Adet
- $F_{VD,\text{maks}}: 35139 \text{ kN} / 16 \rightarrow 2196 \text{ kN}$ (Bir adet damperde maksimum kuvvet)
- $C: 19.555 / 16 \rightarrow 1220 \text{ KN.sn/m}$ (Bir adet damper için sönüm katsayısı)

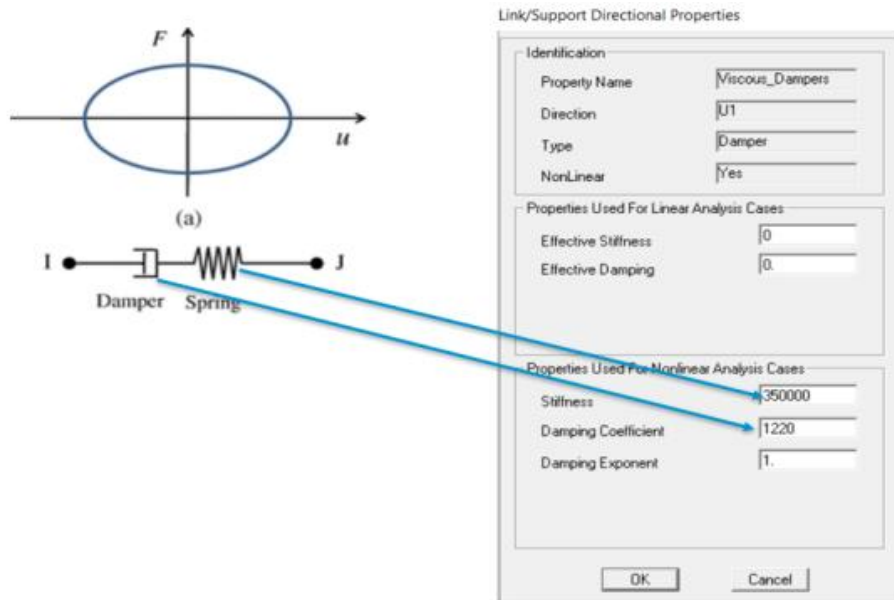
Yapılan hesaplar sonucunda faya dik doğrultuda yerleştirilmek üzere 16 adet, $\pm 1200 \text{ mm}$. deplasman kapasiteli, 2200 kN eksenel yük kapasiteli viskoz damper kullanılması yeterli bulunmuştur. Damper hız katsayısı $C: 1220 \text{ KN.sn./m}$. olarak belirlenmiş olup damper üstel katsayısı $\alpha: 1.0$ seçilmiştir (lineer viskoz damper). Seçilen bu damper özelliklerine göre tasarım deplasman talebi ve taban kesme oranı aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- $D_D: 0.605 \text{ m}$.
- $V_D: (0.078 + 1/4.5 \times 0.605) W \rightarrow 0.212 W$
- $K_D: 0.212 W / 0.605 \text{ m} \rightarrow 0.350 W / \text{m}$.
- $T_D: 2\pi \sqrt{\frac{1}{9.81 \times 0.350}} \rightarrow 3.38 \text{ sn}$.
- $\xi_{D,\text{FPS}}: \left(\frac{2 \times 0.078}{\pi \left(\frac{0.61}{4.5} + 0.078 \right)} \right) \rightarrow 0.23$ (Üst limit sürtünme için FPS eşdeğer sönüm katkısı)
- $C: 1.220 \times 16 \rightarrow 19.520 \text{ KN.sn/m}$,
- $\xi_{D,\text{VD}}: C / (2 \times K_D / \omega_D) \rightarrow 0.22$
- $\xi_{D,\text{(FPS+VD)}}: \%45 (\%23 + \%22)$
- $\beta_D = 1.95$ (ASCE7-16 [6])
- $V_D/W = 0.212$ ($T_D: 3.38 \text{ sn}$. için)

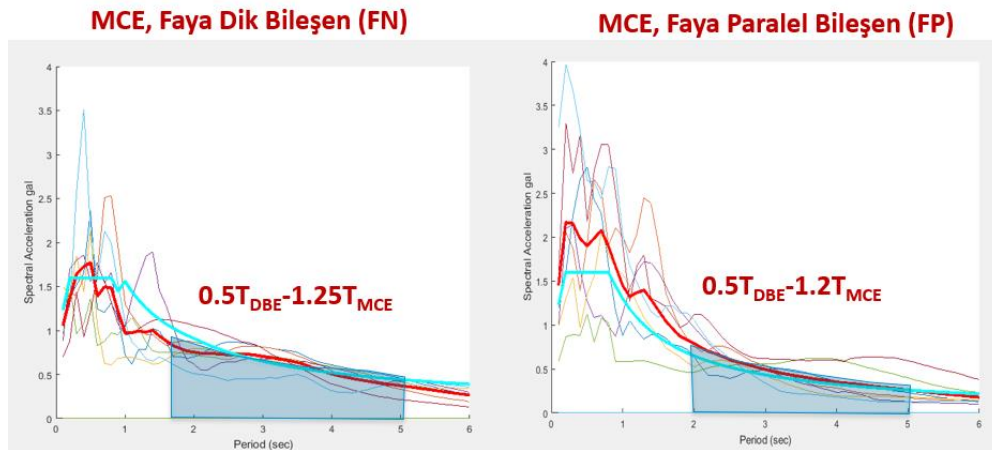
Seçilen damper özelliklerine göre tasarım depremi etkisi altında elde edilen etkin sönüm oranı $\xi_{D,\text{(FPS+VD)}}: \%45$ taban kesme oranı ise $0.21g$ olarak hesaplanmıştır. Yapısal modelde faya dik yön doğrultusunda 16 adet viskoz damper sisteme ilave edilmiştir. Faya paralel yöndeki yer hareketi büyüklüklerinin faya dik yöne nazaran düşük olması nedeniyle faya paralel doğrultuda aynı özelliklere sahip 10 adet viskoz damper kullanılmıştır.



Şekil 5.16: Modele ilave edilen viskoz damper link elemanları.

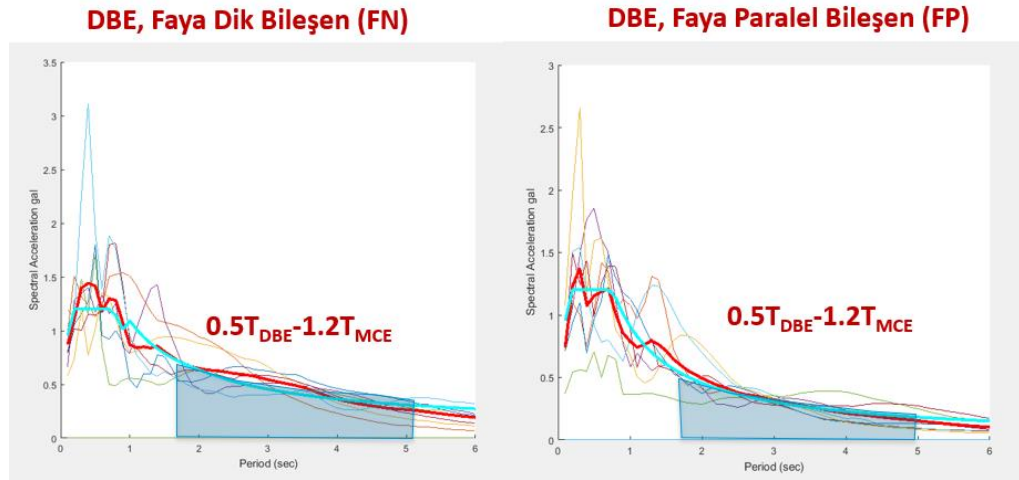


Şekil 5.17: Viskoz damper modeli link eleman özellikleri (kN/m).



Şekil 5.18: Maksimum deprem için seçilen yer kayıtlarının ivme spektrumları.

Yakın saha fay etkilerini içeren ivme spektrumlarının ölçeklenmesinde faya dik ve faya normal yer hareketi bileşenlerinde ayrı ölçekleme katsayıları kullanılmıştır.

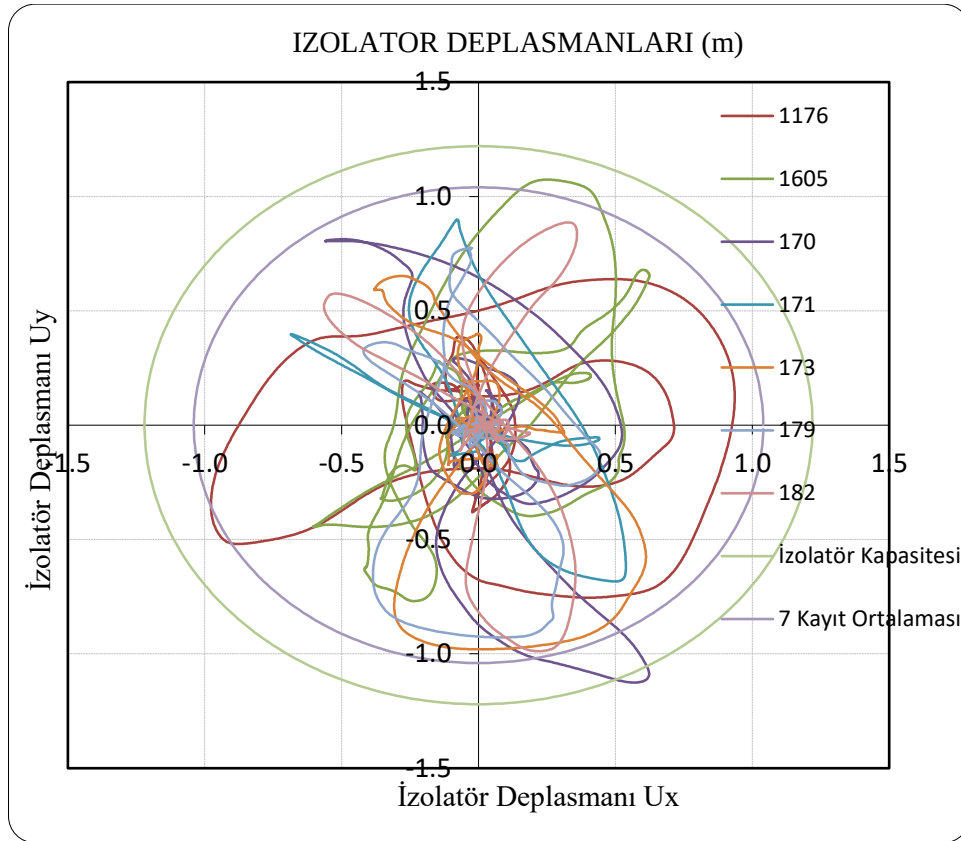


Şekil 5.19: Tasarım depremi için seçilen yer kayıtlarının ivme spektrumları.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler farklı damper özellikleri için de kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Damper özelliklerinin farklı tanımlandığı modelde damper hız katsayısı $C = 1600 \text{ kN.s/m}$ olarak belirlenmiş olup üstel damper katsayısı $\alpha=0.5$ seçilmiştir (doğrusal olmayan viskoz damper). Toplam damper sayısında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Tablo 5.2: MCE NLTHA sonuçları ($C:1220$, $\alpha=1.0$).

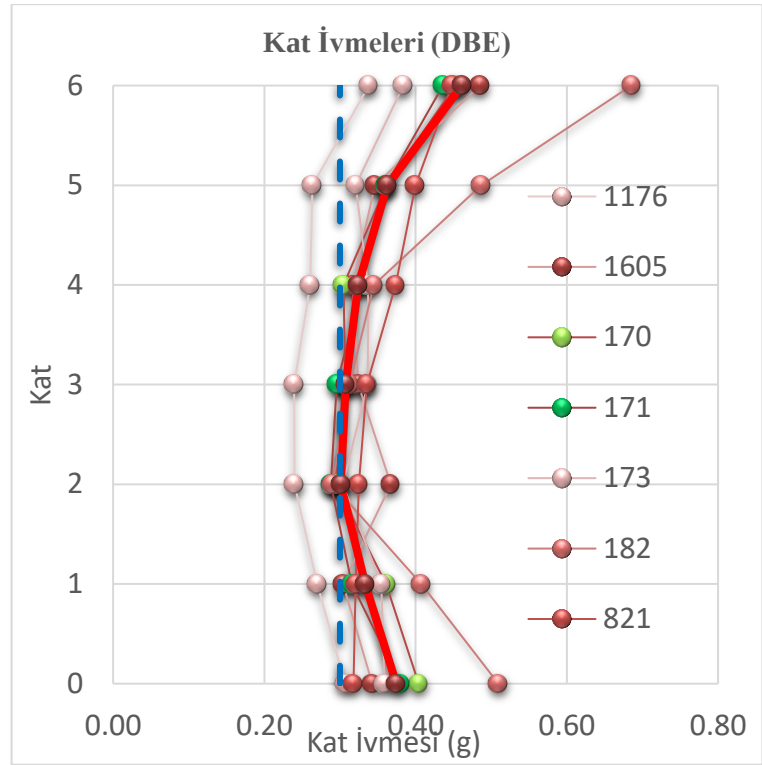
MCE Deprem Kayıtları	Maksimum Deplasman (m)	Maksimum Damper Kuvveti (kN)	X Yönü Maksimum Taban Kesme Oranı (V_x/W)	Y Yönü Maksimum Taban Kesme Oranı (V_y/W)
1176	1.06	2280	0.28	0.27
1605	1.11	2107	0.19	0.33
170	1.27	2325	0.18	0.30
171	0.90	2083	0.18	0.27
173	1.00	2153	0.21	0.32
179	0.94	2111	0.21	0.31
182	1.02	2003	0.20	0.33
Ortalama	1.04	2152	0.21	0.31



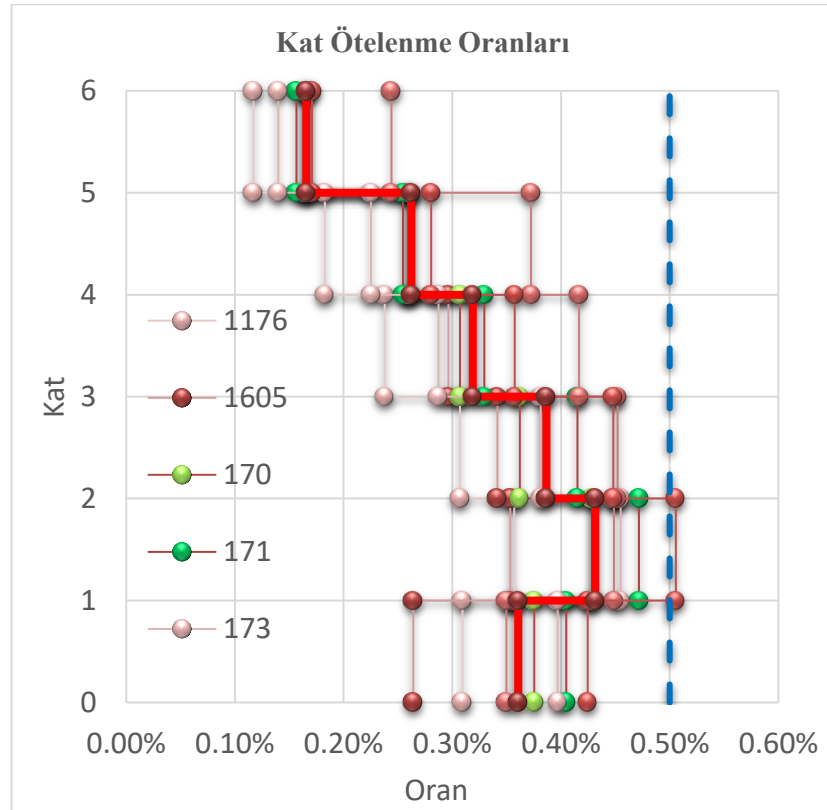
Şekil 5.20: Kayıtlara ait (MCE) izolatör deplasmanları (C:1220, $\alpha=1.0$).

Tablo 5.3: DBE NLTHA sonuçları (C:1220, $\alpha=1.0$).

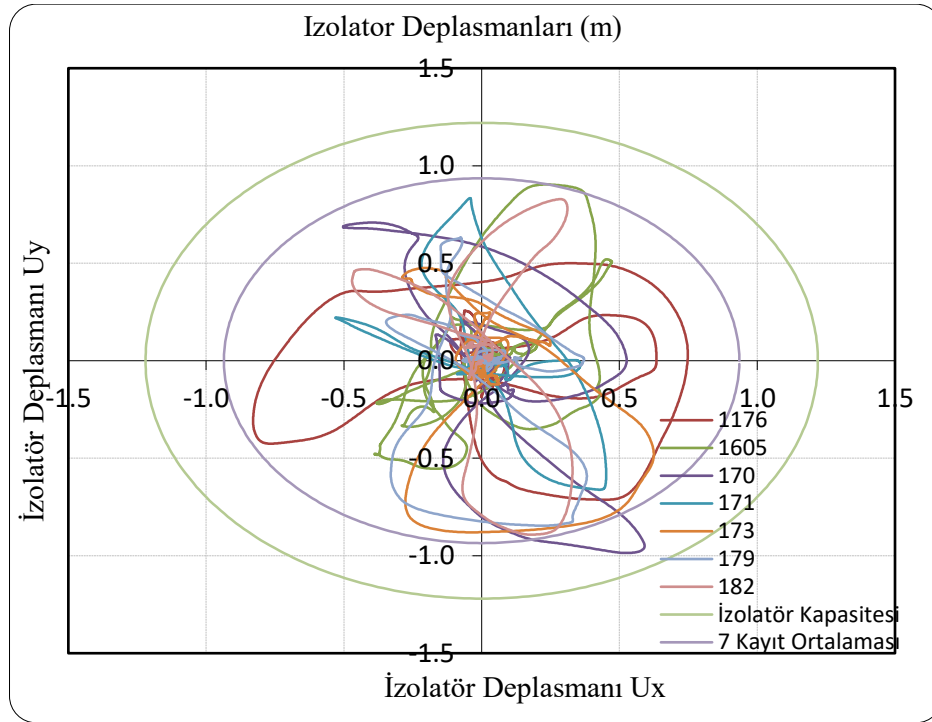
DBE Deprem Kayıtları	X Yönü Maksimum Taban Kesme Oranı (V_x/W)	Y Yönü Maksimum Taban Kesme Oranı (V_y/W)
1176	0.16	0.22
1605	0.15	0.17
170	0.15	0.29
171	0.14	0.23
173	0.17	0.27
179	0.14	0.27
182	0.15	0.26
Ortalama	0.15	0.34



Şekil 5.21: Tasarım depremi maks. kat ivmeleri (C:1220, $\alpha=1.0$).



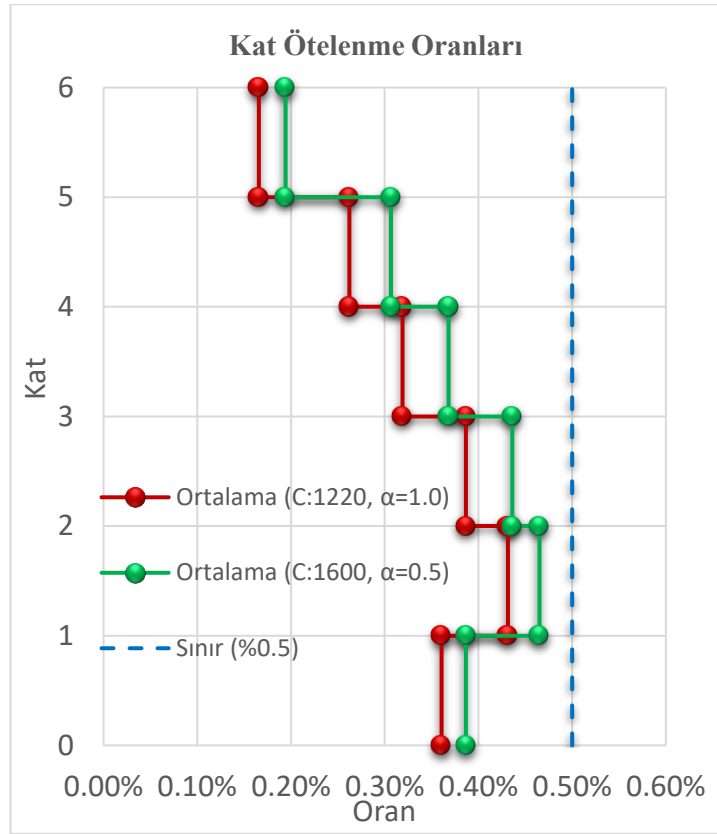
Şekil 5.22: Tasarım depremi maks. kat ötelenme oranları (C:1220, $\alpha=1.0$).



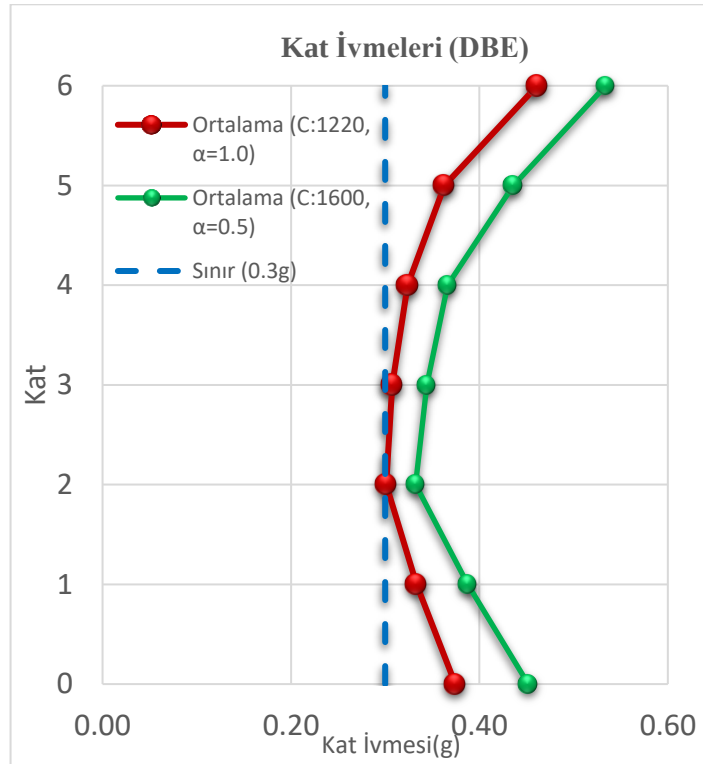
Şekil 5.23: Kayıtlara ait (MCE) izolatör deplasmanları (C:1600, $\alpha=0.5$).

Tablo 5.4: C:1220 $^{\alpha=1.0}$ ve C:1600 $^{\alpha=0.5}$ modellerde MCE NLTHA sonuçları.

MCE Deprem Kayıtları	C=1220 $^{\alpha=1.0}$ Maksimum Deplasman (m)	C=1600 $^{\alpha=0.5}$ Maksimum Deplasman (m)	C=1220 $^{\alpha=1.0}$ Maksimum Damper Kuvveti (kN)	C=1600 $^{\alpha=0.5}$ Maksimum Damper Kuvveti (kN)
1176	1.06	0.90	2280	2091
1605	1.11	0.95	2107	2037
170	1.27	1.13	2325	2098
171	0.90	0.83	2083	2062
173	1.00	0.92	2153	2159
179	0.94	0.89	2111	2065
182	1.02	0.92	2003	2098
Ortalama	1.04	0.94	2152	2087



Şekil 5.24: $C:1220^{\alpha=1}$ ve $C:1600^{\alpha=0.5}$ damperli modellerde maks. ötelenmeler.



Şekil 5.25: $C:1220^{\alpha=1.0}$ ve $C:1600^{\alpha=0.5}$ damperli modellerde maks. kat ivmeleri.

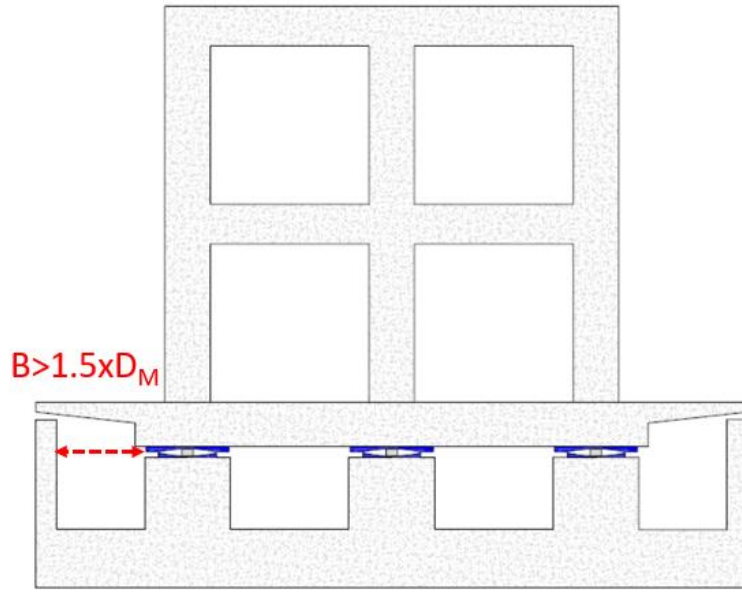
Tablo 5.5: C:1220 $\alpha=1.0$ ve C:1600 $\alpha=0.5$ damperli modellerde taban kesmeler.

DBE Deprem Kayıtları	C=1220 $\alpha=1.0$ Maksimum Taban Kesme Oranı (Vy/W)	C=1600 $\alpha=0.5$ Maksimum Taban Kesme Oranı (Vy/W)
1176	0.22	0.23
1605	0.17	0.20
170	0.29	0.30
171	0.23	0.23
173	0.27	0.27
179	0.27	0.27
182	0.26	0.25
Ortalama	0.24	0.25

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerin ortalama sonuçlarına göre tasarım taban kesme oranı her iki modelde de 0.24g~0.25g olarak elde edilmiştir. Maksimum deplasmanlar ise birinci damper modelinde (C:1220 $\alpha=1.0$) 1.05m, ikinci modelde (C:1600 $\alpha=0.5$) ise 0.94m olarak elde edilmiştir. Kat ivmeleri her iki modelde de 0.3g-0.5g aralığında hesaplanmış, katlardaki ötelenme oranları ise %0.5 oranının altında bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre kat ivmeleriyle ilgili tasarım sınırları ~%50 mertebesinde aşılmış, taban kesme oranında ise izin verilen maksimum üst sınır %25 oranında aşılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yakın saha fay etkilerine maruz bir binada genelge tarafından özellikle kat ivmeleri için şart koşulan ivme sınırlarının sağlanabilmesinin kolaylıkla mümkün olmadığı anlaşılmaktadır.

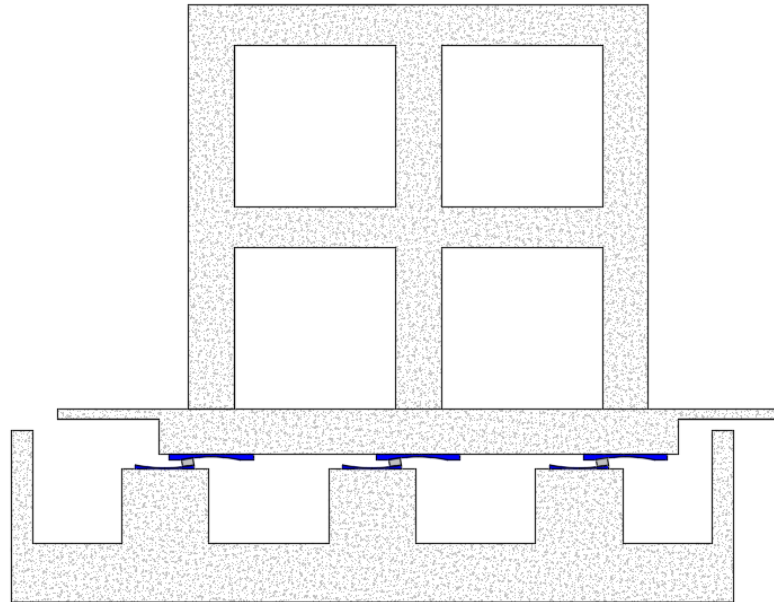
Yatay kat ivmelerinin ve taban kesme oranlarının Sağlık Bakanlığı Genelgesince [1] verilen sınır değerlere indirgenebilmesi için izolatör periyotlarının daha fazla uzatılmasına (4.5s~5s) gereksinim oluşacaktır. Bu durumun izolatörlerdeki maksimum deplasmanları %20~%30 oranında artırması ve sismik izolasyon sistemi maliyetlerini 1.5~2.0 kat mertebesinde artırması beklenmektedir.

Doğrusal olmayan viskoz damperlerin seçildiği ikinci modelde (C:1600 $\alpha=0.5$) elde edilen maksimum ortalama deplasman talepleri %10 oranında daha düşük bulunmuştur. Bu durum izolatör ve damper maliyetlerinde belli bir ölçüde ekonomi sağlayabileceğinden nihai tasarım da damper özelliklerinin ikinci model doğrultusunda belirlenmesi tercih edilebilir.

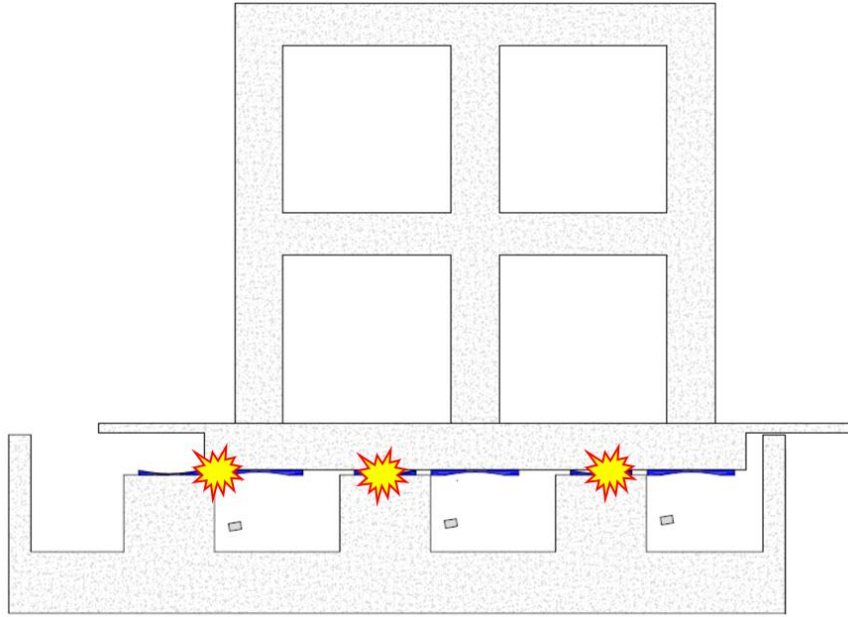


Şekil 5.26: Genelge doğrultusunda bırakılmış sismik boşluk ($B > 1.5 \times D_M$).

Maksimum senaryo depremi veya olası maksimum deprem büyüklüğüne ($T_r=2475$ Yıl) göre izolatörler için hesaplanan deplasman taleplerinin aşılma ihtimali söz konusu olabilmektedir. Özellikle yakın saha fay etkilerine maruz bölgelerde deplasman taleplerinin izolatörlerin maksimum deplasman kapasitesinden daha yüksek olması her zaman olası görülmelidir.

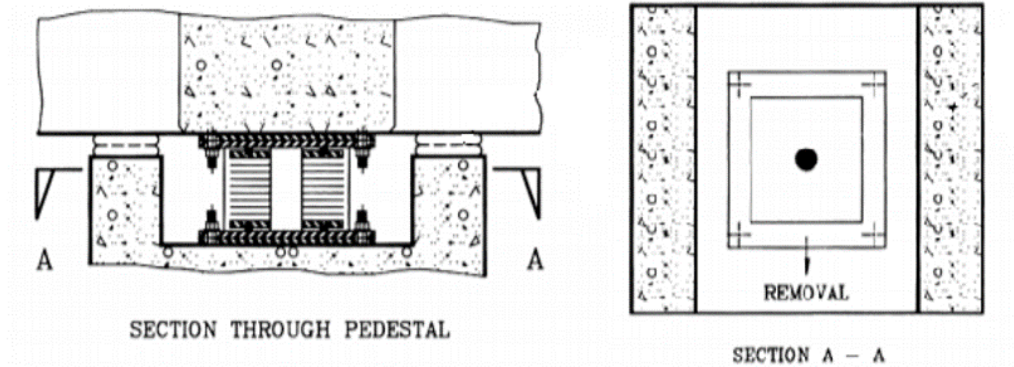


Şekil 5.27: İzolatörlerin maks. deplasman (D_{Maks}) kapasitesine ulaştığı durum.

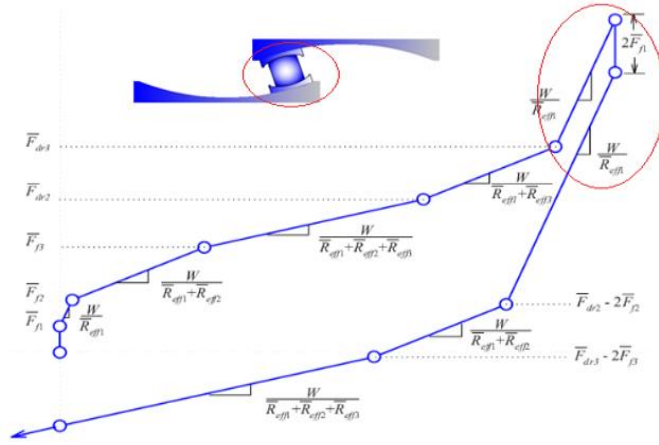


Şekil 5.28: Deprem talebinin izolatör deplasman kapasitesini aştığı durum.

Bu nedenle, taban izolasyonlu binaların izolatörler üzerinden kayıp düşmemesi (kayıcı tip izolatörler) veya izolatörlerin düşey stabilitesinin yitirilmemesi (kauçuk esaslı izolatörler) için deplasman durdurucu duvar (bkz. Şekil 5.29 [35]) veya tamponlarla (buffer stopper) veya bünyesinde deplasman sınırlayıcı bir mekanizmaya sahip izolatörler (Örneğin Triple Pendulum, EPS [14]) kullanılarak gerekli önlemlerin alınması sağlanmalıdır.

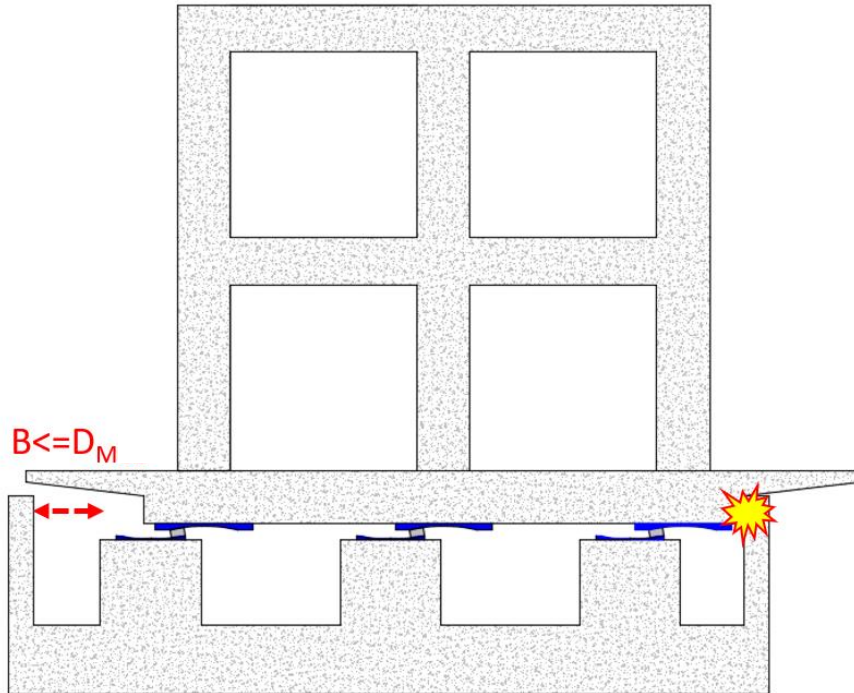


Şekil 5.29: Kauçuk izolatör için çarpma duvarı örneği (stub wall).



Şekil 5.30: İleri deformasyonlarda rijitleşen izolatör.

Çevre duvarı ile yalıtımlı bina arasındaki boşluk mesafesinin, izolatörlerin deplasman kapasitesine eşit veya bir miktar daha düşük bırakılması ($\sim 5\text{cm}$) söz konusu riske karşı alınabilecek en ekonomik önlemdir. Ancak, böyle bir durumda üst yapının olası çarpışma etkileri nedeniyle hasar alması söz konusu olsa da kapasite tasarım ilkesi yaklaşımıyla binada can güvenliği performans seviyesi halen sağlanabilir. Buna göre maksimum depremde deplasman taleplerinin sismik boşluktan fazla olduğu bir durumda, bina çevre duvarlarına çarparak üst yapı taşıyıcı sisteminde elastik ötesi deplasman talepleri oluşturacaktır.



Şekil 5.31: FPS tip izolatörlü binanın çevre duvarına çarpma durumu.

Benzer plastikleşme talepleri, deplasman sınırlayıcı mekanizması bulunan izolatörler veya durdurucu tampon sisteminin kullanıldığı sistemler için de geçerli olup, bu durum üst yapının her koşulda kapasite tasarım ilkelerine göre tasarlanmasını gerekli kılmaktadır.

Sağlık Bakanlığı'nın taban yalıtımlı sistemlerin tasarımıyla ilgili genelgesi 3.2.4 maddesi [1], bırakılacak sismik boşluklarla ilgili burada değinilenin tam tersi bir yaklaşımı içermektedir. Bu maddenin değiştirilmesi veya kesinlikle uygulanmaması önerilmektedir.

“Madde 3.2.4, Taban yalıtım sistemi, üst yapı kısmında deprem yalıtım hareketinin emniyetli şekilde sağlanması, yapı dış kısmı yalıtım seviyesinde çarpma etkisinin olmaması için yeterli boşluk bırakılmalıdır. Boşluk miktarı veya kanal genişliği maksimum deprem kuvveti etkisi altında ötelenme miktarının 1.5-2 misli (emniyet katsayısı çarpanıyla bulunacak) ve minimum 50 cm olacaktır.”

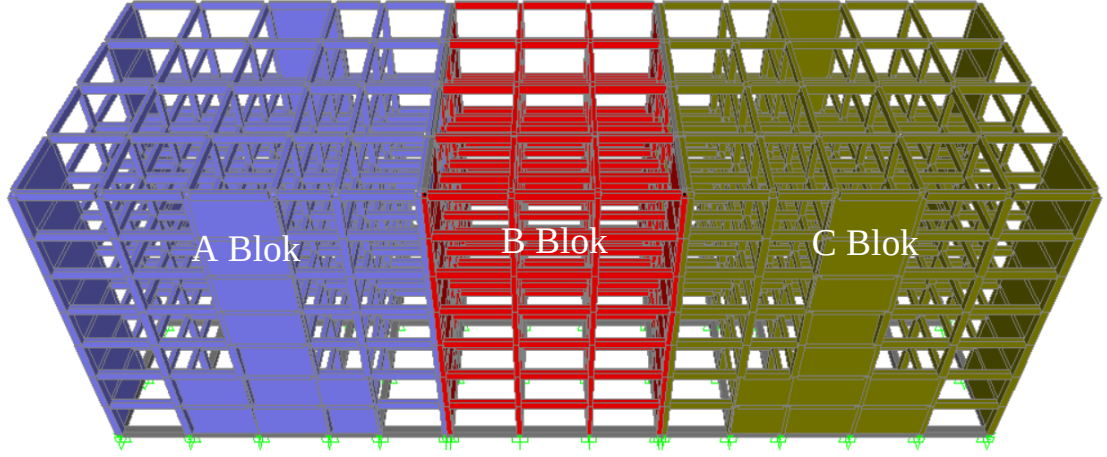
5.2. Çoklu Bloklarda Taban Kesme Büyütmesi

Geniş oturma alanına veya planda değişik geometrik şekillere sahip büyük yapılar deprem, farklı oturma, büzülme, genişleme ve titreşimler nedeniyle oluşabilecek olumsuz etkilere karşı belirli aralıklarla (30m~40m) dilatasyon derzleri ile birbirinden ayrılmaktadır. Genelde konvansiyonel binalarda takip edilen bu tasarım yaklaşımı ülkemizde büyük ölçekli taban yalıtımlı binalarda da benzer şekilde devam ettirilebilmektedir. Bloklar arası mekanik elektrik ekipman çözümlerinin zorluğu, cephe sistemleri, çatı ve döşeme geçişlerinde yüksek sismik derz boşluklarına ihtiyaç duyulması nedeniyle bu tip yapılarda genellikle izolasyon döşemesi ortak, üst yapılar ayırık olarak planlanmaktadır.

Ortak izolasyon döşemesi üzerinde yer alan ancak üst yapıda genişleme derzleriyle ayrılmış üst yapı bloklarında deprem etkisi altında gerçekleşen karşılıklı etkileşim, bloklardaki taban kesme oranlarını artırabilmektedir. Taban yalıtım sisteminin tek serbestlik dereceli rijit cisim hareketi yaptığı kabulüne göre ayırık bloklarda belirlenen taban kesme oranları dinamik analiz sonuçlarına oranla çok düşük elde edilebilmektedir. Bu bölümde örnek bir yapı modeli üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yürütülmüş ve ayırık bloklardaki taban kesme kuvvetlerinde oluşan büyütme taleplerinin azaltılmasına yönelik geliştirilen pratik mühendislik çözümleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

5.2.1 Örnek Çalışma

Çalışma yapılan örnek bina birbirine izolasyon kotu döşemesinde bağlı, üst yapıda ise bağımsız üç bloktan oluşmaktadır. Bloklar arası boşluk 50 cm'dir. Taban yalıtım sisteminde toplamda 80 adet eğri yüzeyli sürtünme sarkaç izolatör kullanılmıştır.



Şekil 5.32: Yapısal analiz modeli.

Bina blokları yedi kattan oluşmaktadır. Kat yükseklikleri tüm bloklarda 4.8m'dir. Blokların taşıyıcı sistemi betonarme çerçeve (kolon-kiriş) ve perde duvarlardan oluşmaktadır. "A" ve "C" olarak adlandırılan blokların taşıyıcı sistemleri tamamen aynı olup birbirlerinin ayna simetriğidir. Bu bloklarda her iki plan doğrultusunda da rijit betonarme perdeler yer almaktadır. "B" blok taşıyıcı sistemi ise plan uzun doğrultusunda üç açıklıklı betonarme çerçevelerden, diğer doğrultuda ise rijit betonarme perdelerden oluşturulmuştur.

Tasarım ivme spektrumuna ilişkin karakteristik spektral ivmeler S_{ds} : 0.83g ve S_{d1} : 0.475g olarak belirlenmiştir.

Sismik yalıtım sisteminde iki yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler kullanılacaktır. Toplam bina kütlelerinin tek serbestlik dereceli bir sistemde yığılı olduğu kabulüne dayanarak hesaplanan izolasyon sistemi karakteristikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Hesaplarda izolatörlerin nominal sürtünme değerleri kullanılmış olup hesaplar yalnızca tasarım deprem düzeyi için yapılmıştır. Sürtünmeli sarkaç izolatörlere ait parametreler;

- R_1 ve R_2 : 2.46 m.
- R_{eff} : $2 (2.46-0.21) \rightarrow 4.5$ m.
- $\mu_{nominal}$: 0.042
- W : 498,410.0 kN
- Toplam FPS Adedi: 80
- W_i : 6,230.1 kN

Tasarım deprem etkisi altında taban yalıtım sisteminde oluşan deplasman talepleri ve taban kesme oranı, izolatörlerin nominal özellikleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

- D_D : 0.215 m.
- V_D : $(0.042 + 0.215/4.5) W \rightarrow 0.090 W$
- K_D : $0.090 W / 0.215 m \rightarrow 0.418 W / m$.
- T_D : $2\pi \sqrt{\frac{1}{9.81 \times 0.418}} \rightarrow 3.10$ sn.
- ξ_D : $(\frac{2 \times 0.042}{\pi(\frac{0.215}{4.5} + 0.042)}) \rightarrow 0.30$
- β_D : 1.70 (ξ_D : 0.30 için)
- V_D/W : 0.090 (T_D : 3.10 sn. için)

Seçilen izolatör özellikleri için yürütülen eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem analizlerine göre tasarım deprem etkisi altında taban yalıtım sistemi etkin periyodu T_D : 3.10 sn., taban kesme oranı $V_D/W = 0.090$ olarak hesaplanmıştır.

Blokların tabana ankastre durumdaki doğal titreşim periyotları aşağıdaki tabloda verilmektedir. “B” blok yapısının “X” yönündeki doğal titreşim periyodu bu yönde yalnızca moment çerçevelerinin bulunması nedeniyle diğer bloklara göre daha yüksek bulunmuştur.

Tablo 5.6: Blokların tabana ankastre durumdaki doğal titreşim periyotları.

Titreşim Modu	A Blok T_s	B Blok T_s	C Blok T_s
X Yönü	0.56 s.	1.40 s.	0.56 s.
Y Yönü	0.74 s.	0.74 s.	0.74 s.
RZ	0.43 s.	0.63 s.	0.43 s.

Yalıtımlı sistem periyodunun “B” blok yapısının “X” yönündeki doğal titreşim periyoduna oranı T_D/T_S : 2.2 olarak bulunmuştur (Tablo 5.7). Yönetmelikler $T_D/T_S < 3$ olan sistemler için üst yapıda taban kesme oranlarının eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem kabulü yerine dinamik analizlerle belirlenmesini istemektedir [5], [6], [7], [8], [11].

Tablo 5.7: Yalıtım periyodunun blokların doğal titreşim periyotlarına oranı.

Titreşim Modu	A Blok T_D/T_S	B Blok T_D/T_S	C Blok T_D/T_S
X Yönü	5.5	2.2	5.5
Y Yönü	4.2	4.2	4.2
RZ	7.2	4.9	7.2

Yapısal model üzerinde izolatör sisteminin tasarım deplasmanındaki eşdeğer rijitlik özellikleri kullanılarak yapılan modal analiz sonuçlarına göre ilk üç titreşim periyodu yalıtım sistemine ait ana titreşim modları olarak elde edilmiştir. Diğer yüksek modlar ise üst yapı bloklarına ait titreşim modlarıdır.

Üst yapılara ait yüksek titreşim modları, yalıtım periyodundan yeterince ayrıık değilse ($T_D/T_S < 3$), bu durum üst yapıların dinamik davranışlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Özellikle izolasyon döşemesi kütlesinin çok büyük olduğu bu tip bitişik düzende oluşturulmuş yapılarda yüksek modların etkinliği önemli ölçülerde artabilmektedir. Yüksek titreşim modlarının, üst yapıların taban kesme kuvvetine (V_{txn}) olan etkisi ise titreşim moduna ilişkin modal katkı çarpanı (Γ_n), modal yerdeğiştirme genlikleri (Φ_{ixn}) ve titreşim moduna ilişkin spektral ivme ($S_a(T_n)$) büyüklükleriyle orantılı olarak artmaktadır (Denklemler 5.1). Bu durum nispeten uzun periyotlara sahip üst yapı bloklarındaki taban kesme oranının, eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplanan değerlerden 2~3 kat mertebelerine varan oranlarda büyük olmasına neden olabilmektedir.

İzolasyon döşeme kütlesinin üst yapı toplam kütlesine yakın olduğu, yatay rijitliği nispeten düşük olan, tek bloktan oluşan yapılarda da yüksek titreşim modlarının etkinliği önemli ölçüde artabilmektedir (Yatay rijitliği düşük moment çerçeveli az veya çok katlı yapılar). Buna ilaveten, seçilen ivme kayıtlarının izolasyonlu uzun periyot aralıklarında ölçeklendirilmesi gerçekleştirildiğinde ivme kaydının nispeten kısa periyotlarla ilişki genlikleri tanımlanan hedef tasarım

spektrumundan daha büyük elde edilebilmektedir. Bu duruma yüksek modlardaki düşük sönüm oranları eklenince kısa periyotlarla ilişkili spektral ivmeler hedeflenenden çok daha büyük olmaktadır.

$$V_{\text{txn}}^X = \Gamma_n^{(X)} \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i\text{xn}} S_a(T_n) \quad (5.1)$$

Tablo 5.8: Örnek yapı modal analiz sonuçları-1.

Modal Analiz Sonuçları-1					
Etkin Modlar	Periyot (s.)	Modal Kütle Katılım Oranı			Etkin Sistem
		U_x	U_y	R_z (Burulma)	
1	3.22	93.388%	0.097%	11.978%	İzolasyon Sistemi
2	3.20	0.642%	95.499%	78.620%	İzolasyon Sistemi
3	3.18	5.391%	4.314%	9.198%	İzolasyon Sistemi
4	1.27	0.539%	0.000%	0.126%	B Blok X Yönü
9	0.48	0.000%	0.026%	0.016%	B Blok (Y Yönü) A-C Blok (Burulma)
11	0.47	0.000%	0.060%	0.040%	A-B-C Blok (Y Yönü ve Burulma)
12	0.40	0.028%	0.000%	0.005%	A-C Blok X Yönü
	Σ	99.988%	99.996%	99.983%	

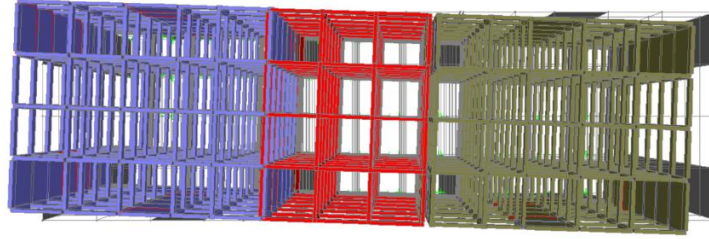
İnceleme konusu örnek bina modelinde 4. Titreşim modunun (“B” blok “X” yönü ana periyodu) “B” blok yapısında taban kesme kuvvetlerinde büyütme yapabilecek etkide bir karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Bu titreşim modunda “B” bloktaki kat deplasman genlikleri diğer blokların ve izolasyon döşemesinin genlikleri ile zıt yönlüdür (bkz. Şekil 5.36). Söz konusu zıtlık nedeniyle bloklardaki ters yönlü taban kesmeleri toplamda birbirini elimine etmekte ve izolasyon sistemindeki taban kesme kuvveti önemli ölçüde değişmemektedir. Ancak, “B” blok zemin katındaki taban kesme kuvvetleri büyük kat genliklileri nedeniyle yüksek mertebelere ulaşabilmektedir.

Spektral ivme kaynaklı büyütmelerin belli bir oranda elimine edilebilmesi için seçilecek yer kayıtlarının kısa periyot spektral ivmelenmelerinin nispeten düşük

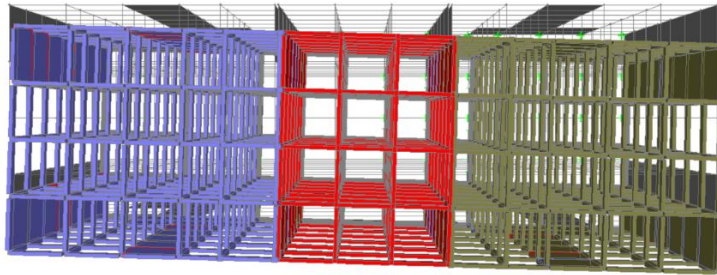
olduğu kayıtlar kullanılabilir. Ancak böyle bir durumda da yapının oturduğu zemin özellikleriyle uyumsuz zayıf zemin üzerinde yer alan yer kayıtlarının kullanımı söz konusu olacaktır.

Tablo 5.9: Örnek yapı modal analiz sonuçları-2.

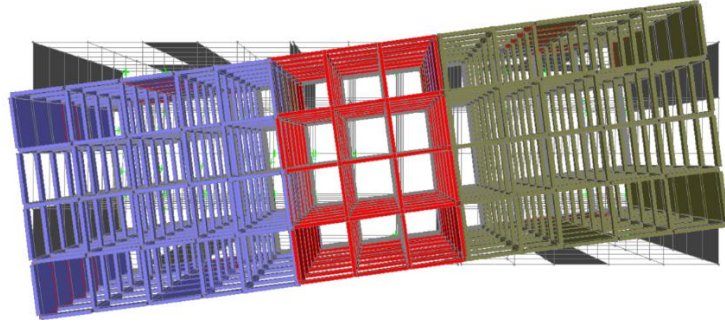
Modal Analiz Sonuçları-2						
Mod	Periyot (s.)	Modal Katkı Çarpanı			Modal Kütle ton	Modal Rijitlik kN/m
		U_x	U_y	R_z (Burulma)		
1	3.22	217.9	7.0	-6736.6	1	3.81
2	3.20	-18.1	220.3	17259.1	1	3.86
3	3.18	52.3	46.8	-5903.5	1	3.89
4	1.27	16.6	0.0	-689.8	1	24.31
9	0.48	0.0	-3.7	-249.6	1	171.92
11	0.47	-0.3	5.5	390.7	1	180.73
12	0.40	-3.8	0.0	136.5	1	250.84



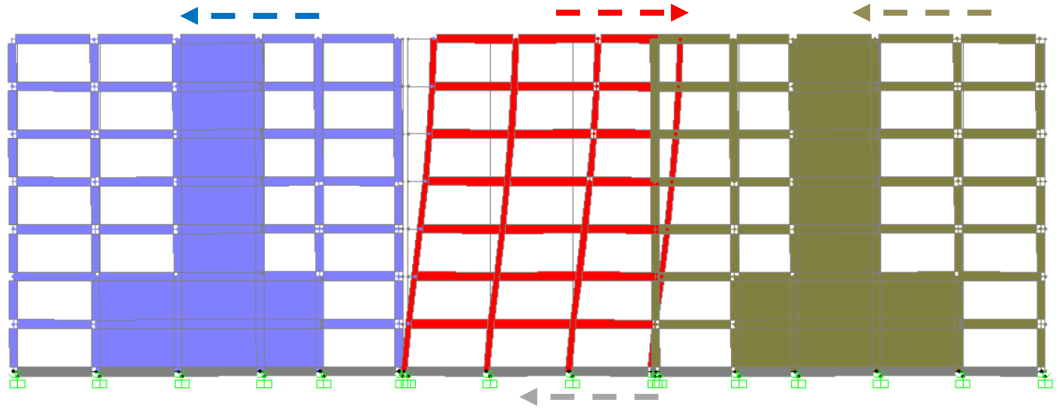
Şekil 5.33: 1.Titreşim mod (T_1 : 3.22 s.) şekli.



Şekil 5.34: 2.Titreşim mod (T_2 : 3.20 s.) şekli.



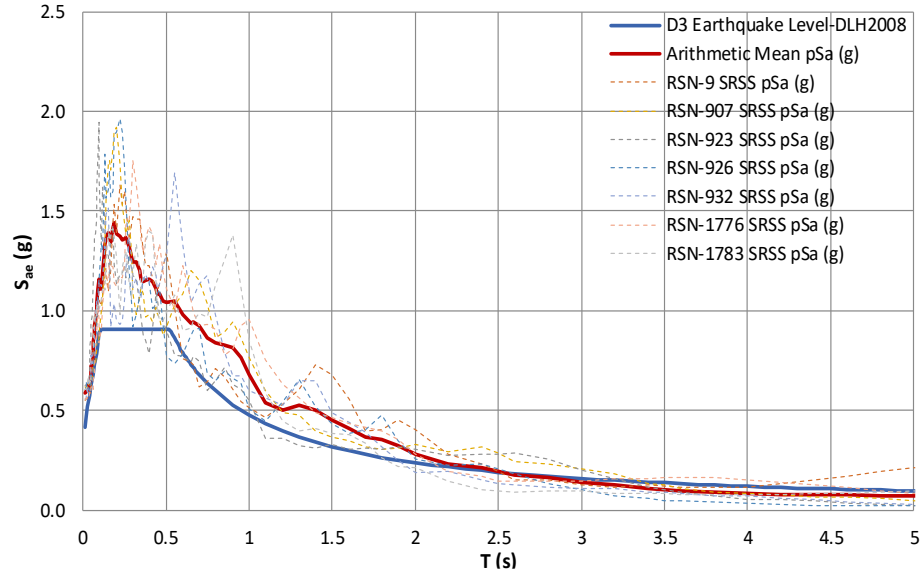
Şekil 5.35: 3.Titreşim mod (T_3 : 3.18 s.) şekli.



Şekil 5.36: 4.Titreşim mod (T_4 : 1.27 s.) şekli (aktif mod: “B” blok X yönü).

Bloklardaki taban kesme oranlarının zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerle belirlenmesi kapsamında tasarım spektrumuyla uyumlu ölçeklendirilmiş yedi adet yer hareketi seçilmiştir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, ayrı bloklerde taban kesme oranlarındaki değişimlerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirileceğinden ölçeklendirilmiş yedi kayıt çifti yerine üç kayıt çiftinin (RSN-907, RSN-923 ve RSN 932 ivme kayıtları) kullanılması yeterli görülmüştür.

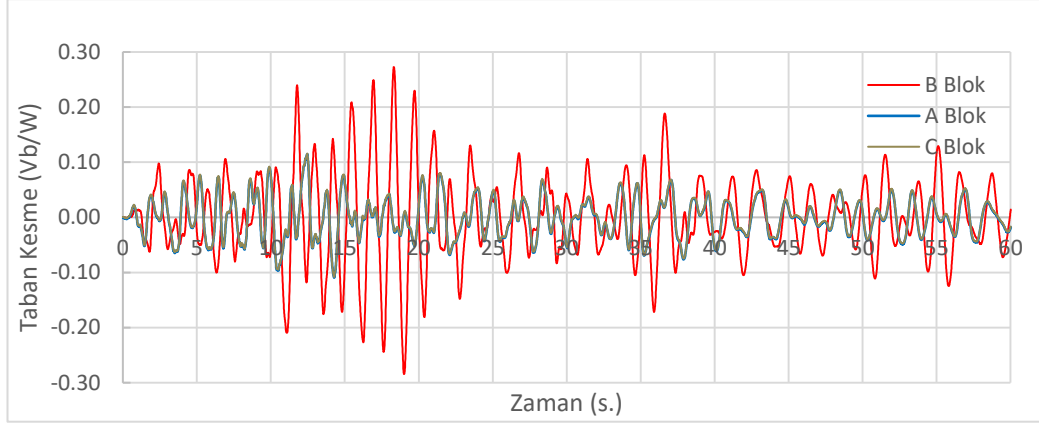


Şekil 5.37: DBE için seçilen yer hareketi kayıtlarının ivme spektrumları.

Zaman tanım alanında yürütülen analizler doğrusal olmayan “Modal Fast Nonlinear Time History Analysis” yöntemi kullanılarak yapılmıştır. “Modal Fast Nonlinear Analysis” yöntemi link elemanlarındaki doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisini dikkate almakta ancak çubuk ve shell elemanlarının elastik olduğunu kabul etmektedir. Link elemanları hareket denkleminde ayrı bir terim olarak temsil edilmekte olup, sistem rijitlik ve sönüm matrisinin her adım için yenilenmesine gerek kalmamaktadır. Böylelikle, bu tip taban yalıtımlı sistemlerde zaman tanım alanındaki analizler çok daha kısa bir sürede ve yeterli doğrulukta elde edilebilmektedir.

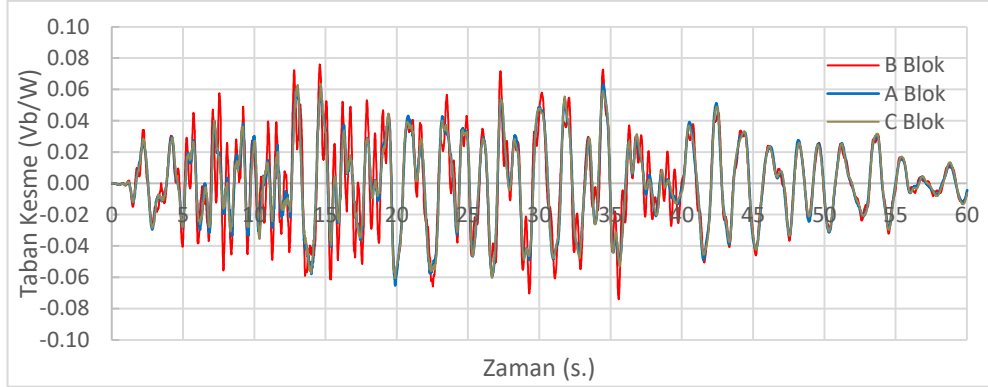
Deprem yer hareketinin bileşenleri iki doğrultuda eş zamanlı olarak sisteme etkilmiştir. Yapısal modelde ilk üç titreşim modu (izolasyon modu) sönümsüz olarak dikkate alınmıştır. İzolatörler doğrusal olmayan link elemanlarıyla modellendiğinden sönüm, çevrimsel davranışla doğrudan temsil edilebilmektedir. Üst yapılarla ilişkili diğer titreşim modlarında %2 modal sönüm oranı kullanılmıştır.

Analizler sonucu bloklar için elde edilen “X” ve “Y” yönü taban kesme kuvveti-zaman grafikleri ve tüm blokların maksimum taban kesme kuvveti oranlarını içeren özet tablo aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.38: RSN-932, zemin kat taban kesme oranı (“X” yönü).

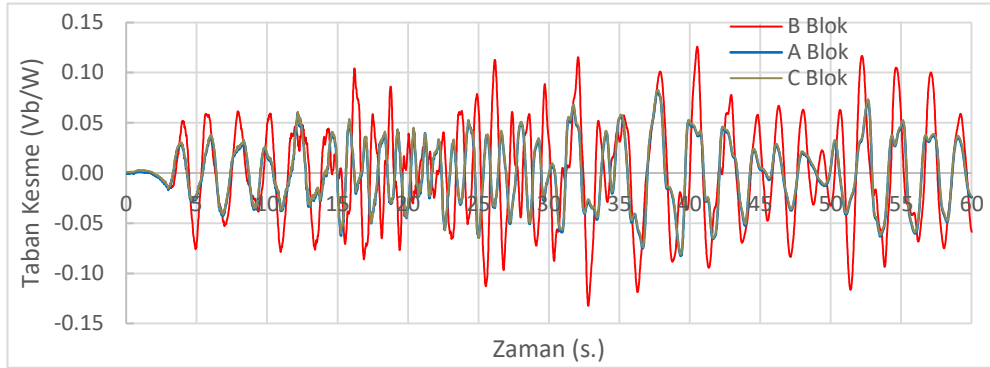
“A”, “B” ve “C” blokların “X” yönü zemin kat taban kesme oranının değişimi RSN-932 yer ivme kaydı için yukarıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği üzere “B” blok yapısında elde edilen maksimum taban kesme oranı (V_B/W_B : %28 t: 19.05s) eşdeğer sistem için hesaplanan orandan (%9) yaklaşık üç kat yüksek bulunmuştur. “A” ve “C” bloklarda ise maksimum taban kesme oranı %11 olarak elde edilmiş olup eşdeğer yöntemle göre hesaplanan (%9) orandan önemli bir sapma oluşmamıştır. Buna ilaveten grafikte belirli zaman aralıklarında bloklardaki taban kesme kuvvetleri arasında faz farkları olduğu görülmektedir.



Şekil 5.39: RSN-932, zemin kat taban kesme oranı (“Y” yönü).

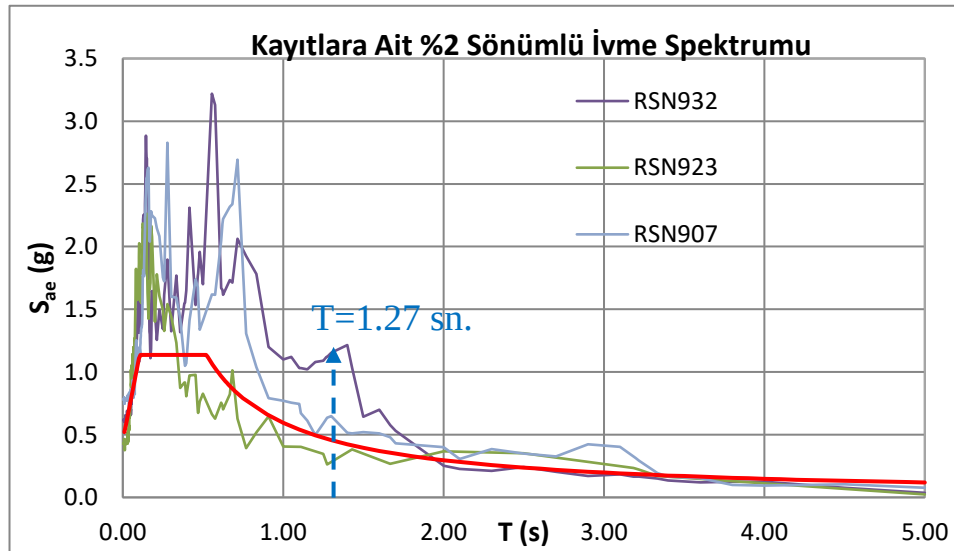
Aynı deprem kaydının (RSN-932) “Y” yönü zemin kat taban kesme oranı değişimleri incelendiğinde, bloklardaki taban kesme oranlarının büyük ölçüde benzer olduğu görülmektedir. “B” blokta belirli zaman aralıklarında küçük farklılıklar oluşsa da bu blokla diğer bloklar arasında taban kesme oranları bakımından bir uyumun olduğu söylenebilir. “A”, “B” ve “C” bloklarının zemin katında elde edilen maksimum

taban kesme oranları sırasıyla %8, %10 ve %8 olarak elde edilmiş olup, bu değerler eşdeğer yöntemle hesaplanan taban kesme oranına (%9) yakın bulunmuştur.

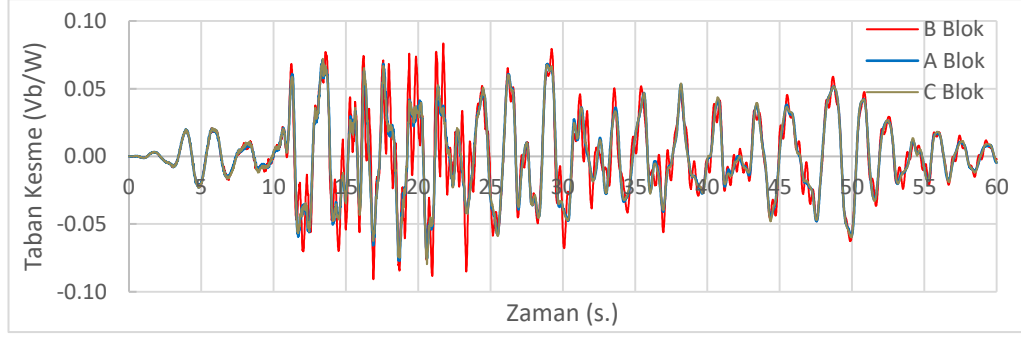


Şekil 5.40: RSN-923, zemin kat taban kesme oranı ("X" yönü).

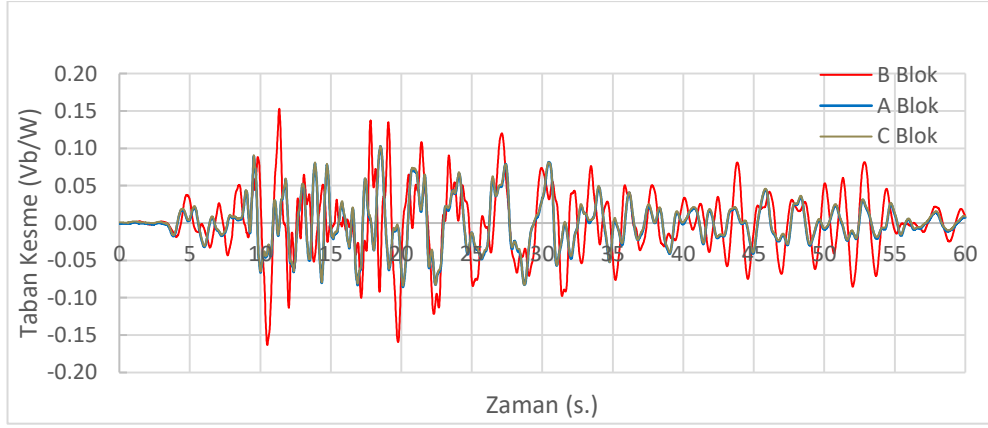
"A", "B" ve "C" blokların "X" yönü zemin kat taban kesme oranının değişimi RSN-923 ve RSN-907 yer ivme kayıtları için aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Her iki yer kaydı kullanılarak elde edilen taban kesme oranlarının bir önceki analiz sonuçlarıyla benzer nitelikte olduğu görülmektedir. "B" blok yapısının zemin katındaki maksimum taban kesme oranı RSN-923 kaydı için %13.2, RSN-907 kaydı için ise %16.3 bulunmuş olup, bu oranlar eşdeğer yöntemle hesaplanan değerden yaklaşık 1.5~1.8 kat büyük bulunmuştur. Bu oran bir önceki yer kaydıyla (RSN-932) elde edilen orandan daha düşük elde edilmiştir. Bu durum RSN-923 ve RSN-907 ivme kayıtlarının "B" blok hakim titreşim periyodu (4.Mod $T=1.27$ sn) ile ilgili spektral genliklerinin nispeten daha düşük olmasıyla ilişkilendirilebilir (Şekil 5.34).



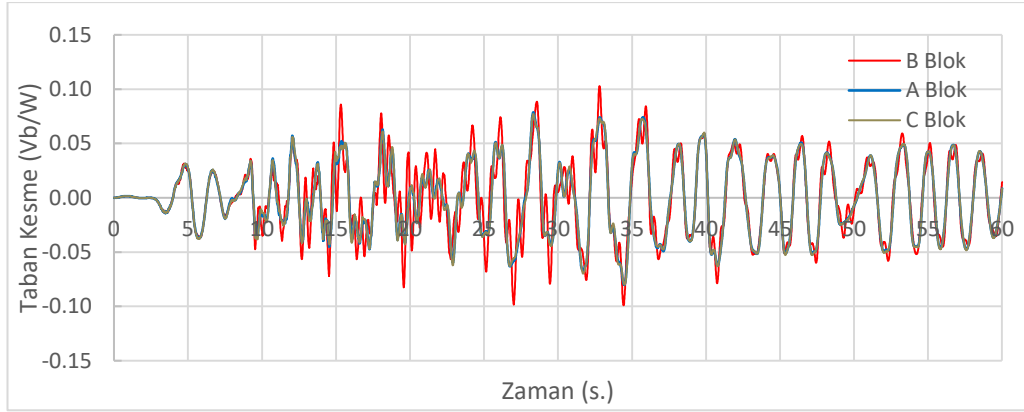
Şekil 5.41: İvme kayıtların "X" bileşenine ait %2 sönümlü ivme spektrumu.



Şekil 5.42: RSN-923, zemin kat taban kesme oranı (“Y” yönü).



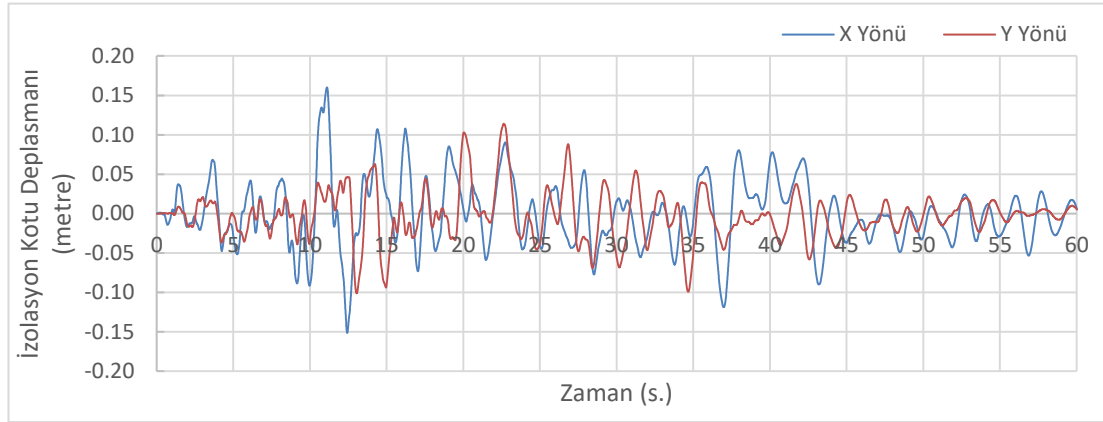
Şekil 5.43: RSN-907, zemin kat taban kesme oranı (“X” yönü).



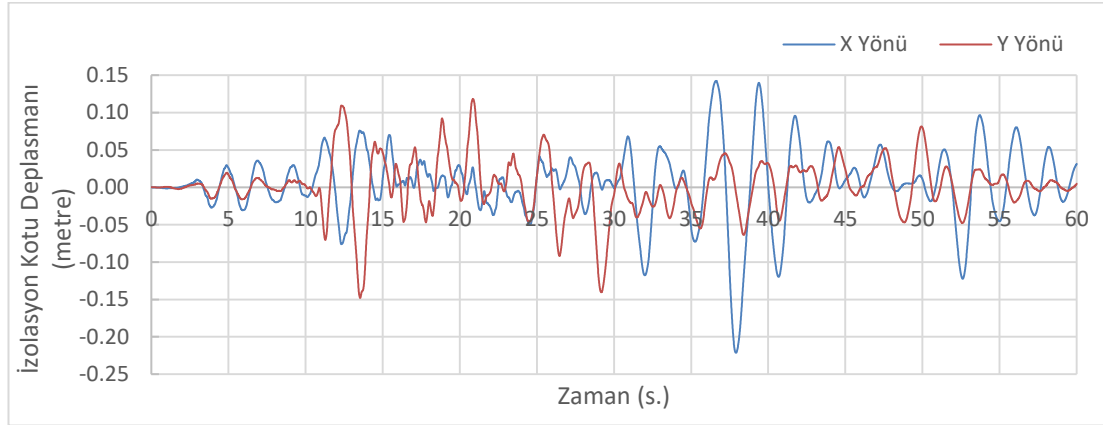
Şekil 5.44: RSN-907, zemin kat taban kesme oranı (“Y” yönü).

RSN-923 ve RSN-907 kayıtları için “Y” yönü zemin kat taban kesme oranı değişimleri incelendiğinde, analiz sonuçlarının RSN-932 kaydı analiz sonuçlarıyla benzerlik teşkil ettiği görülmektedir. “A”, “B” ve “C” bloklarının zemin katında elde edilen maksimum taban kesme oranları %8~%10 arasında elde edilmiştir. Bu değerler eşdeğer yöntemle hesaplanan (%9) taban kesme oranına yakın bulunmuştur. İzolasyon

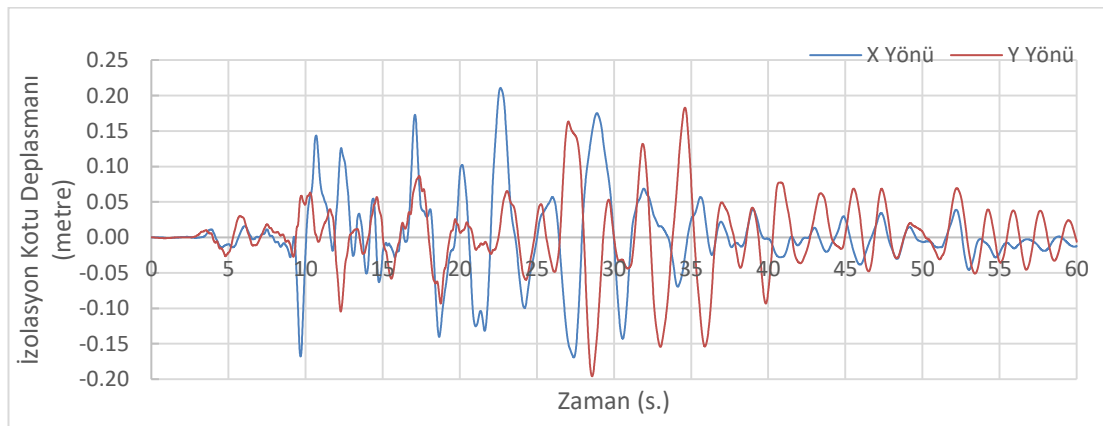
döşemesi üzerinde rijitlik merkezine yakın bir noktada elde edilen deplasmanlar ise aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 5.45: RSN-932, izolasyon döşemesi “X” ve “Y” yönü deplasmanları.



Şekil 5.46: RSN-923, izolasyon döşemesi “X” ve “Y” yönü deplasmanları.



Şekil 5.47: RSN-907, izolasyon döşemesi “X” ve “Y” yönü deplasmanları.

Zaman tanım alanında yapılan analizlere ilave olarak yapı modeli mod birleştirme yöntemi kullanılarak da analiz edilmiştir. Üç farklı mod birleştirme yöntemi kullanılmış olup, analiz sonuçları zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Spektral ivmelerin belirlenmesinde yer kayıtlarının ivme spektrumları dikkate alınmış olup, bu ivme spektrumları %30 sönümlü (izolasyonlu mod) ve %2 (yüksek mod) sönümlü spektrumlar olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.10: 4. Modun (yüksek mod) “B” blokta oluşturduğu kesme kuvvetleri.

4. Modun (Yüksek Mod) B Blokta Oluşturduğu Kesme Kuvvetleri						
Kat	Modal Katkı Çarpanı Γ_4	Kat Kütlesi m (KN s ² /m)	Modal Genlik Φ_{ix4}	Kat Kuvvetleri (KN) TH932 Sa(T ₄) (1.12g)	Kat Kuvvetleri (KN) TH923 Sa(T ₄) (0.34g)	Kat Kuvvetleri (KN) TH907 Sa(T ₄) (0.63g)
7	16.6	1310	0.01279	3056	928	1719
6	16.6	1436	0.01202	3148	956	1771
5	16.6	1435	0.01065	2787	846	1568
4	16.6	1555	0.0087	2467	749	1388
3	16.6	1476	0.00616	1658	503	933
2	16.6	1504	0.00327	897	272	505
1	16.6	1564	0.000265	76	23	43
	Σm_i	10280	Vb	14090	4277	7925
			Vb/W	0.140	0.042	0.079

Tablo 5.11: 1. Modun (yalıtım modu) “B” blokta oluşturduğu kesme kuvvetleri.

1. Modun (İzolasyon Modu) B Blokta Oluşturduğu Kesme Kuvvetleri						
Kat	Modal Katkı Çarpanı Γ_4	Kat Kütlesi m (KN s ² /m)	Modal Genlik Φ_{ix1}	Kat Kuvvetleri (KN) TH932 Sa(T ₁) (0.061g)	Kat Kuvvetleri (KN) TH923 Sa(T ₁) (0.070g)	Kat Kuvvetleri (KN) TH907 Sa(T ₁) (0.078g)
7	217.86	1310	0.00522	891	1023	1140
6	217.86	1436	0.00517	968	1111	1238
5	217.86	1435	0.00508	950	1091	1215
4	217.86	1555	0.00495	1003	1152	1283
3	217.86	1476	0.00476	916	1051	1171
2	217.86	1504	0.00453	888	1019	1136
1	217.86	1564	0.00427	871	999	1113
	Σm_i	10280	Vb	6488	7445	8296
			Vb/W	0.064	0.074	0.082

Tablo 5.12: Analiz sonuçları kıyaslama tablosu.

Yer Kaydı	“1” & “4” Mod Birleştirme			Dinamik Analiz Sonucu (g)	Eşdeğer Yöntem Analiz Sonucu
	“ABS Sum” (g)	“SSRS” (g)	“CQC” (g)		
TH932	0.204	0.154	0.163	0.284	0.09
TH923	0.116	0.085	0.091	0.132	0.09
TH907	0.161	0.114	0.122	0.163	0.09

Üç ayrı ivme kaydı için yapılan analiz sonuçları “B” blok “X” yönü zemin kat taban kesme oranları, eşdeğer yöntemle göre hesaplanan orandan 1.5~3.0 kat daha büyük bulunmuştur. Tepki spektrumu yönteminde modlarda mutlak toplama (“ABS Sum”) yöntemi kullanıldığında zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Mod birleştirme yönteminde “B” blokla ilişkili yüksek modun taban kesme kuvvetine katkısı izolatör modundan daha yüksek bulunmuştur. Sistemde izolatör sistemi titreşimleri dışındaki yüksek modların etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir. İzolatörlerin rijit davranış gösterdiği yük boşalımı (“Unloading”) ve yeniden yükleme (“Reloading”) fazlarında yüksek titreşim modlarının da belli bir ölçüde (%10-%40) taban kesme kuvvetlerini artırdığı anlaşılmaktadır.

Netice itibarıyla ortak izolasyon döşemesi üzerinde yer alan ayırık yapı sistemlerinde mod birleştirme veya eşdeğer deprem yükü yöntemlerine göre taban kesme oranının belirlenmesi yetersiz tasarım yapılmasına neden olabilmektedir. Bu tip çoklu bloklar için tasarıma esas taban kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçlarının kullanılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Zaman tanım alanında yürütülen dinamik analizlerden bulunan maksimum taban kesme kuvvetlerinin ortalama değeri (7-11 adet kaydın ortalaması [7], [8]) bina katlarına eşdeğer deprem yükü yöntemine göre dağıtılarak (ters üçgen) tasarımın güvenli yönde kalacak şekilde gerçekleştirilmesi mümkün görülmektedir.

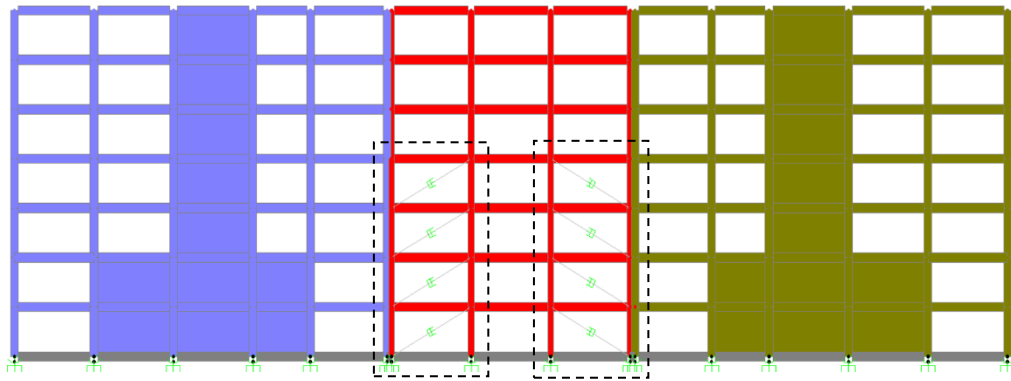
Maksimumlarının ortalaması olarak elde edilen taban kesme kuvvetlerinin her bir blokta aynı anda oluşmadığı bilinmektedir. Bunun en önemli nedeni üst yapı bloklarının dinamik özelliklerinin farklı olması izolasyon döşemesi hareketine karşı tepkilerinde faz farkı yaratmaktadır. Tüm maksimum etkilerin aynı anda oluşmaması nedeniyle izolasyon katında oluşabilecek kuvvetlerin tüm blokların maksimum toplamlarından küçük olması beklenmektedir. Ancak, izolasyon döşemesinin

tasarımında güvenli tarafta kalmak için maksimum taban kesme etkilerinin aynı anda olduğu kabulünün yapılabileceği düşünülmektedir.

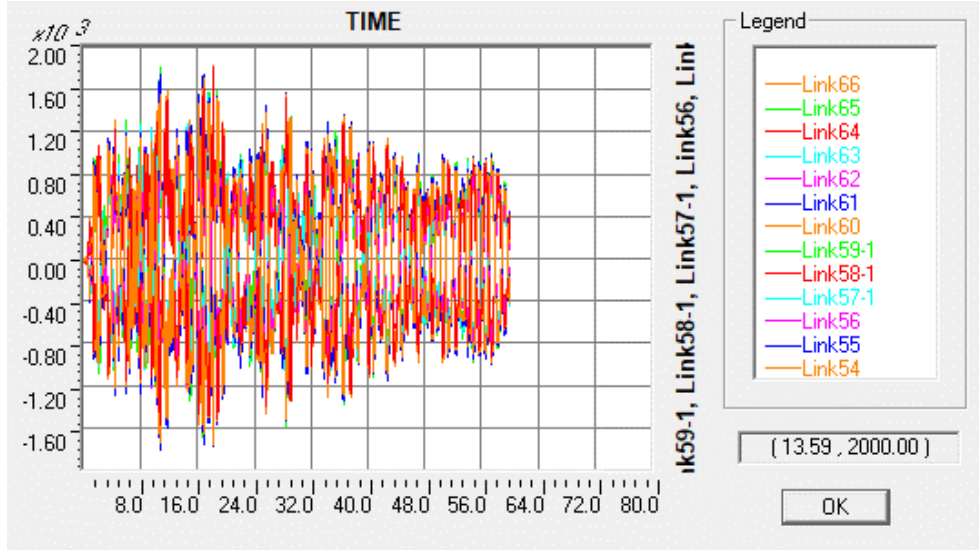
Tablo 5.13: Bloklar bazında maksimum taban kesme oranları.

Blok Adı	RSN 932 Yer Hareketi		RSN 923 Yer Hareketi		RSN 907 Yer Hareketi		Eşdeğer Yöntem
	Maksimum Taban Kesme Oranı X Yönü (W)	Maksimum Taban Kesme Oranı Y Yönü (W)	Maksimum Taban Kesme Oranı X Yönü (W)	Maksimum Taban Kesme Oranı Y Yönü (W)	Maksimum Taban Kesme Oranı X Yönü (W)	Maksimum Taban Kesme Oranı Y Yönü (W)	Maksimum Taban Kesme Oranı X ve Y Yönü (W)
A	11.45%	6.55%	8.27%	7.73%	10.26%	8.01%	9.00%
B	28.44%	7.59%	13.23%	9.08%	16.34%	10.28%	9.00%
C	11.55%	6.34%	8.25%	7.99%	10.30%	8.00%	9.00%

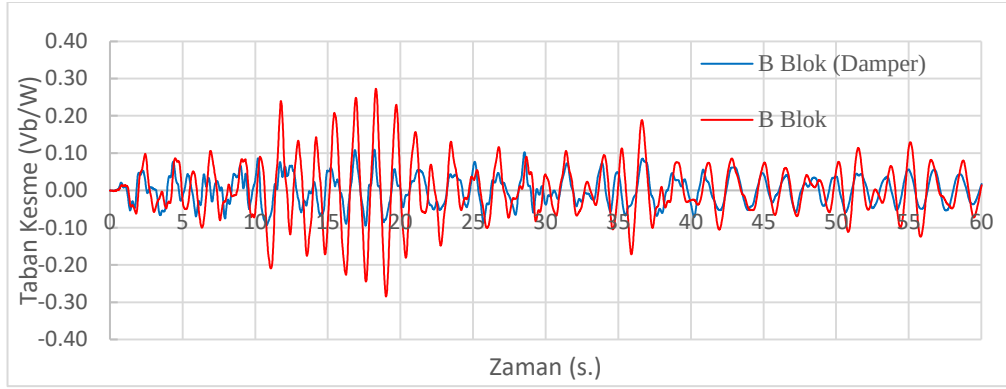
“B” blok “X” yönü taban kesme oranındaki yüksek titreşim modlarının etkinliğinin azaltılabilmesi için üst yapının sönüm oranı ilave sönümleyiciler kullanılarak artırılmıştır. “B” blok çerçeve sistemine “X” yönünde çapraz konfigürasyonda sönümleyiciler ilave edilerek taban kesme büyütme oranı önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Modele toplamda sekiz adet ön cephe de sekiz adet ise arka cephede olmak üzere toplamda 16 adet viskoz damper kullanılmıştır. Damper hız çarpanı katsayısı ve üstel katsayı tüm damperlerde $C: 10000^{\alpha=0.5}$ kN.s/m olarak seçilmiştir. RSN932 kaydı için yapılan analizlerde maksimum damper kuvveti $F_{VD,maks}$: 1800 kN olarak bulunmuştur. Söz konusu damperlerin sisteme ilavesiyle 4.Modu ait kritik sönüm oranı ξ : %2 iken ξ_{vd} : %10 mertebesine yükselmiş, taban kesme oranı ise V_B : %28W iken $V_{B,Damper}$: %9W mertebelerine gerilemiştir.



Şekil 5.48: Viskoz damper ilaveli yapısal model.

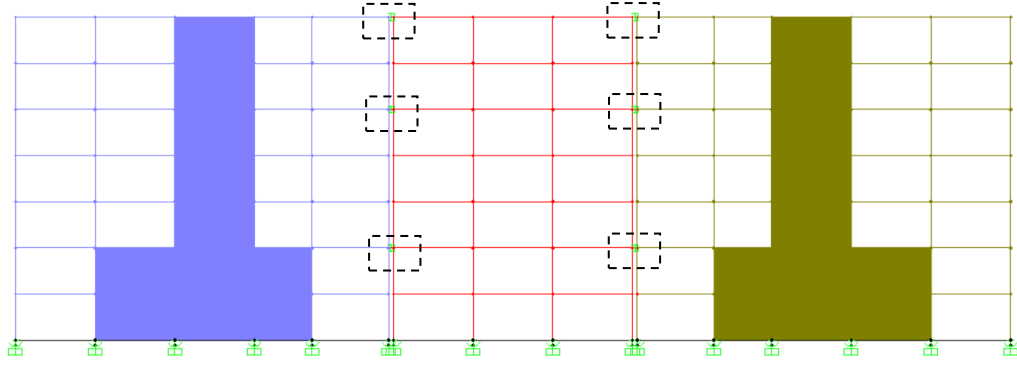


Şekil 5.49: RSN-932, damper kuvvetleri, $F_{VD,max}$: 1800 kN.

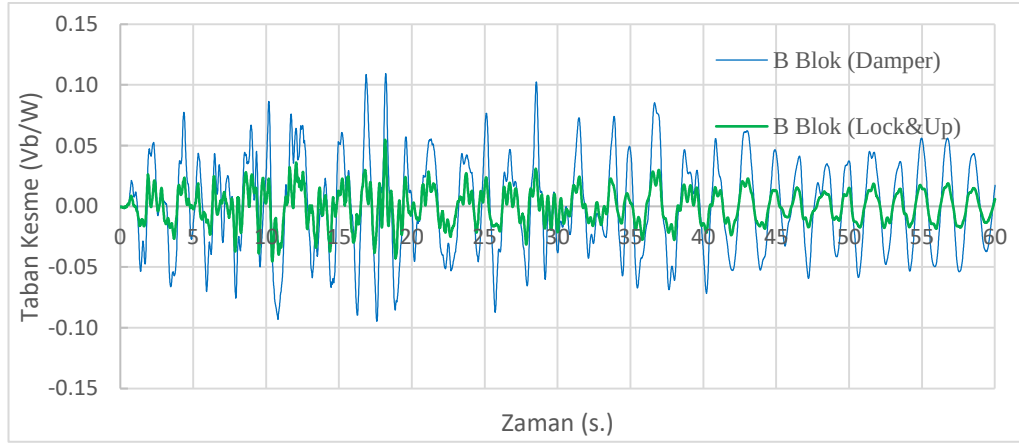


Şekil 5.50: RSN-932, damperli ve mevcut model zemin kat kesme oranı (“X”).

“B” blok “X” yönü taban kesme oranındaki yüksek titreşim modlarının etkinliğinin azaltılabilmesi için damperli çözüme alternatif olarak “B” blok yapısı diğer komşu bloklara belli kotlarda “Lock-Up” cihazlarıyla bağlanmıştır. Bu cihazların çalışma prensibi araçlardaki emniyet kemerlerine benzemektedir. Deprem hareketi gibi ani ve hızlı etkilerde cihaz kendini kitlemekte, ısı etkisiyle genleşme gibi yavaş etkilerde ise serbest harekete izin vermektedir. Modelde ikinci katta altı adet, beşinci katta altı adet ve son katta iki adet olmak üzere toplamda “16 adet” “Lock-Up” cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.51: “Lock-Up” ilaveli yapısal model.

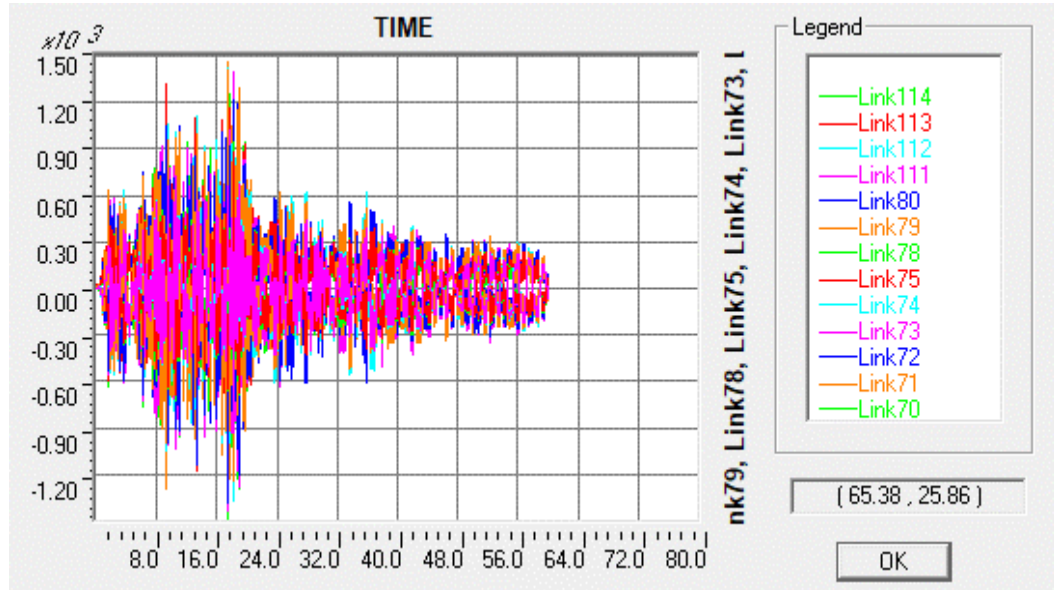


Şekil 5.52: RSN-932, Damperli ve “Lock&Up” modellerde z. kat kesme oranı (“X”).

RSN932 kaydı için yapılan analizlerde maksimum “Lock&Up” kuvveti $F_{(Lock\&Up)}$: 1440 kN olarak bulunmuştur. Söz konusu cihazların sisteme ilavesiyle 4.Mod etkinliği tamamen ortadan kalkmıştır. “B” blok taban kesme oranları ise damperli modelin yarısı kadar ($V_{B,Lock\&Up}$: %5.4) elde edilmiştir. “Lock&Up” cihazları, montajda damperler gibi ilave çelik çaprazlara ihtiyaç duymamakta olup, maksimum eksenel yük kapasite ihtiyacı damperlerden ~400 kN daha az bulunmuştur. Bu cihazların kullanımı, “B” blok taban kesme oranlarını önemli ölçüde düşürülerek üst yapı tasarımında ekonomi sağlayabilmiştir. Bu duruma göre bu tip bir yapıda damperli çözüm yerine “Lock&Up” kullanılmasının daha ekonomik olacağı görülmektedir. Damper ve “Lock&Up” cihazlarında deplasman taleplerinin nispeten düşük olması nedeniyle “Stroke” kontrolü yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır.

Blokların izolasyon döşemesinde de dilatasyon derzleri ile ayrılarak “Lock&Up” cihazlarıyla bağlanması, cihazlarda oluşacak eksenel yük taleplerinin azaltılması, izolasyon döşemesinde rötre ve genleşme nedeniyle oluşacak ilave taleplerin

azaltılması ve yapıların statik durumda tamamen birbirinden bağımsız davranış gösterebilmesi bakımından daha uygun bir çözüm olarak görülmektedir.



Şekil 5.53: RSN-932, “Lock-Up” kuvvetleri (kN).

“B” blok “X” yönü taban kesme oranındaki yüksek titreşim modlarının etkinliğinin azaltılabilmesi için “B” blok yapı sistemine “X” yönünde ilave betonarme perdeler (bina kullanımını önemli ölçülerde etkilemiyor ise) yerleştirilmesi de düşünülebilir. Ancak, bu yöntemle kesme büyütmelelerinin azaltılabilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Örneğin ilgili blok yapısına komşu ve yatayda rijitliği düşük bir blok yapısına da perde ilave edilmesine ihtiyaç duyulabilmektedir. Taban yalıtımlı binalarda perde altlarında oldukça yüksek basınç ve çekme talepleri oluşabilmektedir. Özellikle yüksekliğinin genişliğine oranı büyük ($h/l_w > 3$) olan perdelerde (asansör perdeleri vb.) basınç ve çekme talepleri aşırı yüksek mertebelere ulaşabilmektedir.

İzolatörlerin sınırlı (LRB vb.) veya sıfır çekme (FPS vb.) kapasitesine sahip olması nedeniyle perde elemanının taşıyıcı sisteme olan yatay rijitlik katkısı büyük oranda izolasyon döşemesinin eğilme rijitliğine bağlı kalmaktadır. İzolasyon döşemesi eğilme rijitliğinin nispeten zayıf olduğu perdeli sistemlerde moment çerçevelerinde yüksek iç kuvvet talepleri oluşabilmektedir. Bu etkiler ise izolatörlerin çekme ve basınçtaki düşey rijitliklerinin farklı olması nedeniyle lineer analiz yapılarak belirlenememektedir. Bu nedenle tüm tasarım yük kombinasyonlarının yatay yükler altında doğrusal olmayan statik analizlerle (Pushover) belirlenmesine ihtiyaç doğmaktadır. Uygulamada çoğu tasarımcı lineer yöntemlerle analiz ve tasarım

gerçekleştirmekte, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerle de genel mühendislik parametrelerini (taban kesme oranı, ötelenmeler vb.) kontrol etmektedir. Zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçlarına göre yapısal eleman bazında bir tasarım kontrolü genellikle gerçekleştirilmemektedir. Söz konusu bu durum çoğu moment çerçevelerinin yetersiz tasarımına neden olabilmektedir.

Çoklu bloklardan oluşan sistemlerin üst yapıda da birleştirilerek taşıyıcı sistemin perdelerin olmadığı rijit moment çerçevelerinden oluşturulması uygun bir çözüm olarak görülmektedir. Taşıyıcı sistemde üst yapı deformasyonlarının sınırlandırılması amacıyla perde kullanımı bir gereksinim oluşturuyor ise perdelerin mümkün mertebelerde bina iç konumlarında yer almasına, perde toplam yüksekliğinin plandaki uzunluğuna oranının ikiden ($h/l_w < 2$) küçük olmasına veya perdelerin alt katlara doğru planda uzunluklarının artırılarak büyütülmesine dikkat edilmelidir. Sıcaklığa bağlı genleşme etkileri tasarım aşamasında dikkate alınarak gerekli önlemler (döşeme veya kiriş ilave genleşme donatıları) alınabilir. Bu yapılarda dökümler yeterli düzeyde aşamaya bölünerek rötre etkileri önemli ölçüde azaltılabilir. Isıl genleşme veya büzölmeler neticesinde hesaplanan ilave donatı maliyetleri bu tür bir yapıda çok beklenmese de nispeten daha büyük ölçekli yapılarda ciddi maliyetler doğurabilmektedir.

Büyük ölçekli yapılarda (planda uzunlukları 80m'den büyük yapılar), rötre, ısı genleşme veya büzölmeler nedeniyle izolatörlerde kalıcı deplasmanlar oluşabilmektedir. Söz konusu kalıcı deplasmanlar nedeniyle oluşan "P-Delta" etkilerinin düşey yük kombinasyonları dahilinde kaide ve izolasyon döşemesi tasarımında dikkate alınması gerekebilir.

Zemin yapısının homojen olmadığı (zemin tabakalarının eğimli olması, yumuşak zemin ve sert zemin gibi farklı zemin yapılanmaları) bölgelerde üst yapı bloklarının birleştirilmesi üst yapıda tasarım problemlerine neden olabilir. Böyle bir durumda farklı zemine oturan yapı gruplarının birbirinden temel düzeyinden itibaren ayrılarak bu binaların "Lock-Up" cihazlarıyla birbirine bağlanması düşünülebilir. Alternatif olarak zeminde farklı oturmaları engelleyebilecek zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulabilir.

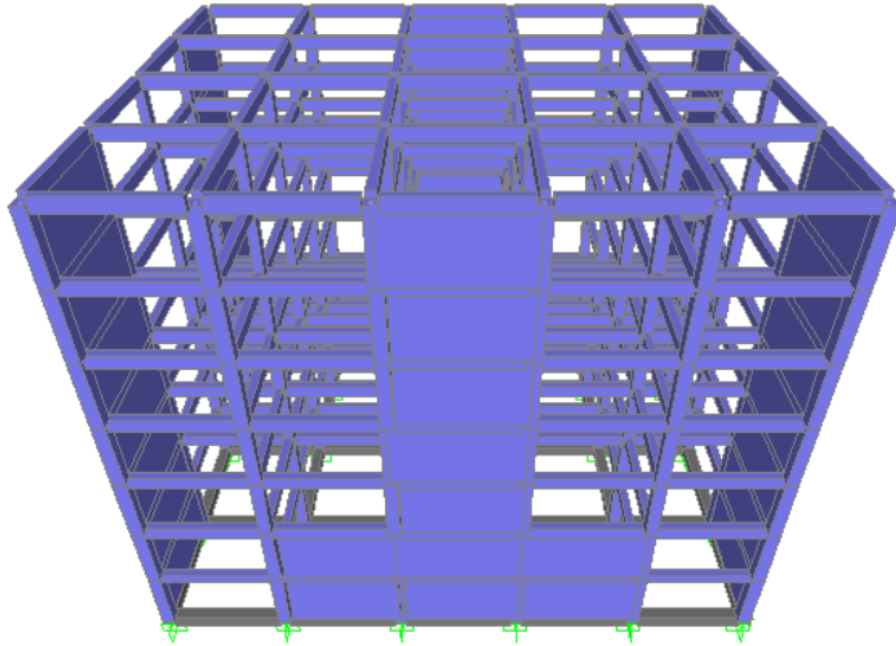
Bu nedenle bu tür büyük oturma alanlarına sahip yapılar için taban yalıtımlı yapıların tasarımı konusunda tecrübeli yapısal tasarım mühendisleri tarafından mimari tasarım aşamasında fizibilite çalışmaları yapılarak bina tasarımına ilişkin uygun ve ekonomik çözüm yollarının aranması en uygun yöntem olarak görülmektedir.

5.3. Düşey Yer Bileşeninin Taban Kesme Oranına Etkisi

Sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kullanıldığı taban yalıtımlı yapılarda depremin düşey yer ivmesi bileşeninin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde dikkate alınması tasarım taban kesme oranlarını artırabilmektedir. Bu çalışmada, örnek bir yapısal model üzerinde söz konusu artışın mertebesi belirlenecek ve bu durumun bina tasarımına olan etkileri değerlendirilecektir.

5.3.1 Örnek Çalışma

Bu çalışma kapsamında yapısal model olarak bir önceki bölümde “A” blok olarak adlandırılan bina modeli dikkate alınmıştır. Bina taban yalıtım sisteminde toplamda 30 adet eğri yüzeyli sürtünme sarkaç izolatör kullanılmış olup, izolatör karakteristik özellikleri bir önceki örnek modelde kullanılan izolatörler ile aynıdır.



Şekil 5.54: “A” blok yapısal analiz modeli.

Tasarım ivme spektrumuna ilişkin karakteristik spektral ivmeler ve tasarım depremi yer kayıtları çoklu blok modelinde kullanılan ile aynı olmakla birlikte zaman tanım alanında analizlerde iki bileşenli yer kayıtlarına ilave olarak deprem kayıtlarının düşey bileşenleri de ilave edilmiştir. Yürütülecek analizler kapsamında depremin düşey bileşeninin dahil edildiği ve dahil edilmediği iki farklı model oluşturulmuştur.

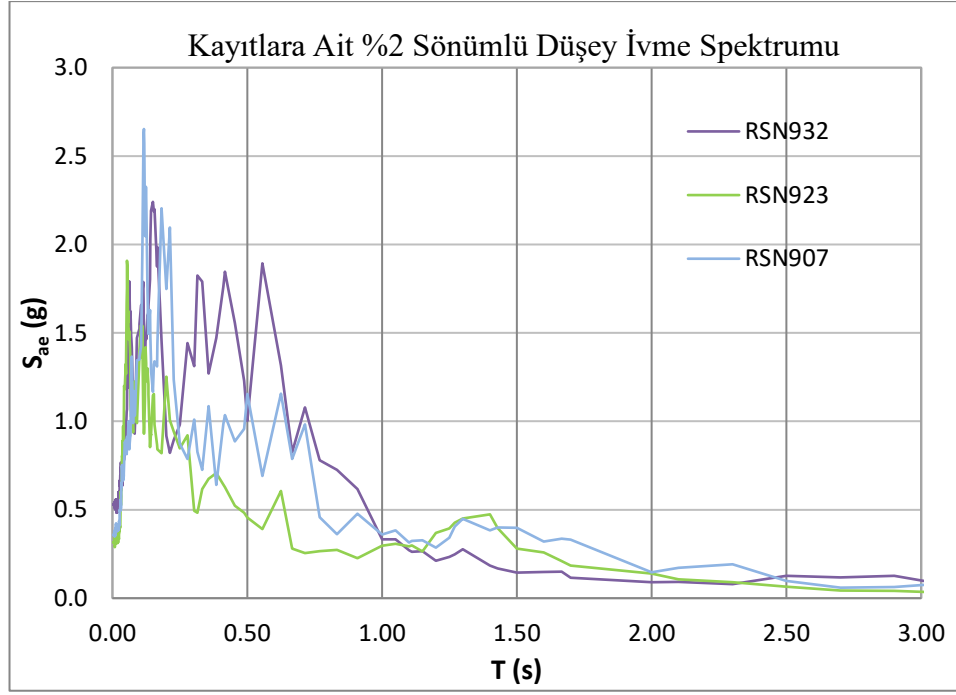
Depremiñ dūşey bileşeniñin bina taban kesme oranlarına etkisi bu iki model için yürütölen analiz sonuçları kıyaslanarak belirlenecektir.

“A” blok yapısal modeli için yürütölen modal analiz sonuçlarına göre dūşey doğrułtudağı titreşim modlarının kütle katılım oranları toplamının %99 oranına yakın elde edilebilmesi için ilk 100 modun dinamik analizlerde dikkate alınması yeterli bulunmuştur. Dūşey titreşim modlarının kütle katılım oranlarının %97’sini kapsayan (ilk 36 mod) modlara ilişkin katılım oranları aşığıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 5.14: “A” blok modal analiz sonuçları.

“A” Blok Modal Analiz Sonuçları					
Etkin Modlar	Periyot (s.)	Modal Kütle Katılım Oranı			
		U_x	U_y	U_z	R_z (Burulma)
1	3.26	0.14%	99.16%	0.00%	40.25%
2	3.23	97.50%	0.23%	0.00%	46.56%
3	3.12	2.34%	0.51%	0.00%	13.14%
4	0.49	0.00%	0.10%	0.00%	0.04%
7	0.17	0.00%	0.00%	52.94%	0.00%
8	0.16	0.00%	0.00%	2.16%	0.00%
10	0.14	0.00%	0.00%	8.96%	0.00%
11	0.14	0.00%	0.00%	1.76%	0.00%
13	0.13	0.00%	0.00%	6.81%	0.00%
17	0.13	0.00%	0.00%	8.02%	0.00%
18	0.12	0.00%	0.00%	2.87%	0.00%
19	0.12	0.00%	0.00%	1.80%	0.00%
22	0.12	0.00%	0.00%	3.45%	0.00%
27	0.11	0.00%	0.00%	2.45%	0.00%
36	0.06	0.00%	0.00%	2.11%	0.00%
	Σ	100.00%	100.00%	97.53%	100.00%

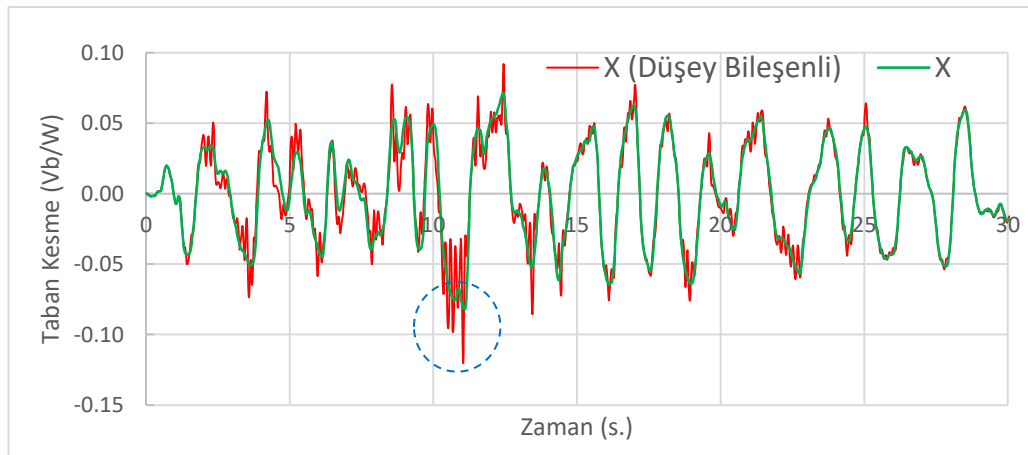
Zaman tanım alanında doğruşal olmayan analizlerde bir önceki çalışmada kullanılan üç kayıt çiftinin (RSN-907, RSN-923 ve RSN 932 İvme Kayıtları) dūşey bileşenlerine ilişkin %2 sönümlü ivme spektrumları aşığıdaki grafikte verilmiştir. Dūşey yer ivme kayıtlarına uygulanan ölçek katsayıları, yatay yer bileşenleri için uygulanan katsayılara eşit alınmıştır.



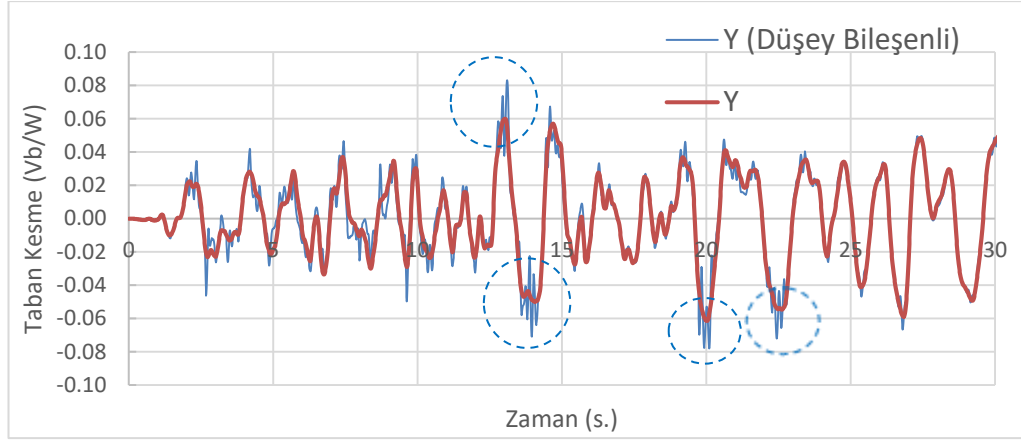
Şekil 5.55: İvme kayıtlarının düşey bileşenine ait %2 sönümlü ivme spektrumu.

Deprem hareketinin bileşenleri ilk modele üç doğrultuda, ikinci modele ise iki yatay doğrultuda eş zamanlı olarak etkilmiştir. İlk üç izolasyon titreşim modu sönümsüz olarak dikkate alınmıştır. Üst yapılarla ilişkili diğer titreşim modlarında %2 modal sönüm oranı kullanılmıştır.

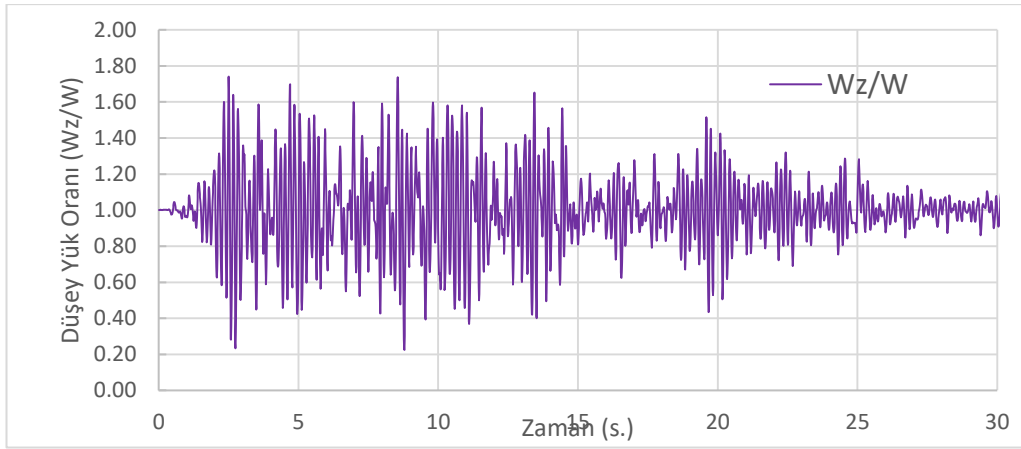
Analizler sonucu depremin düşey bileşeninin dahil edildiği ve dahil edilmediği modeller için elde edilen “X” ve “Y” yönü taban kesme kuvveti oranı değişimi ve düşey yükün düşey yer ivmesi bileşeni etkisiyle değişimi (W_z/W) karşılaştırmalı olarak aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



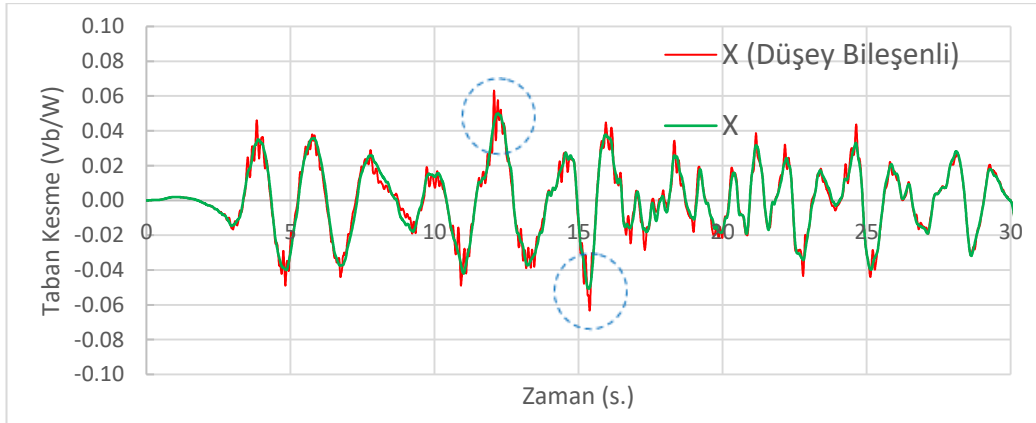
Şekil 5.56: RSN-932, düşey bileşenli/bileşensiz “X” yönü taban kesme oranı.



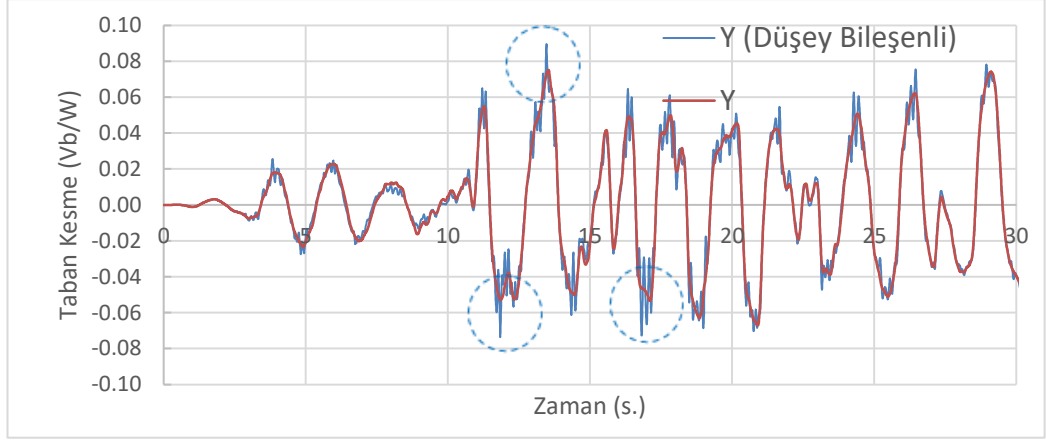
Şekil 5.57: RSN-932, düşey bileşenli/bileşensiz “Y” yönü taban kesme oranı.



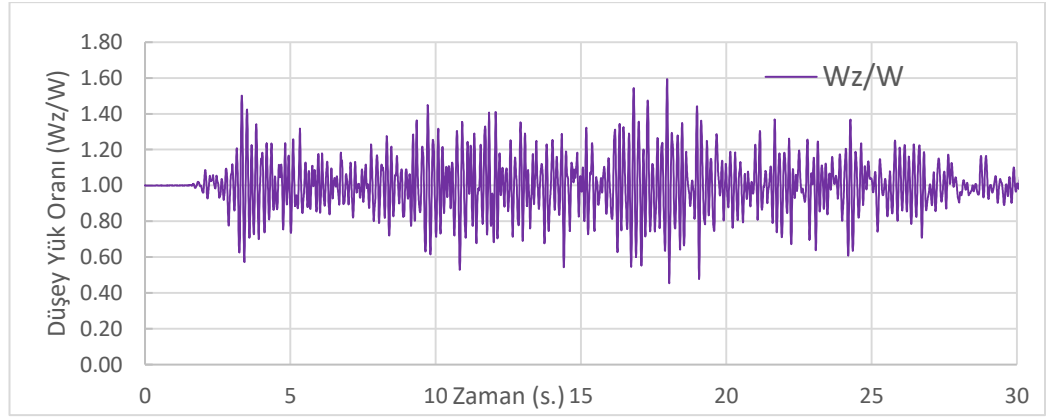
Şekil 5.58: RSN-932, düşey bileşenli model düşey yük değişim oranı.



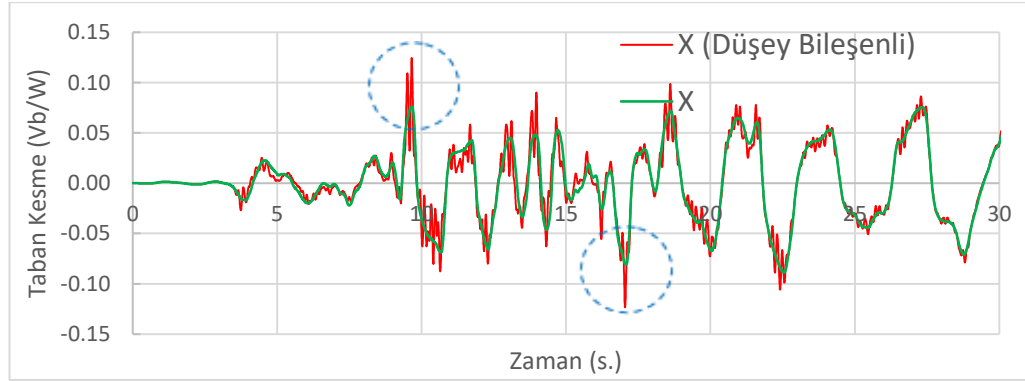
Şekil 5.59: RSN-923, düşey bileşenli/bileşensiz “X” yönü taban kesme oranı.



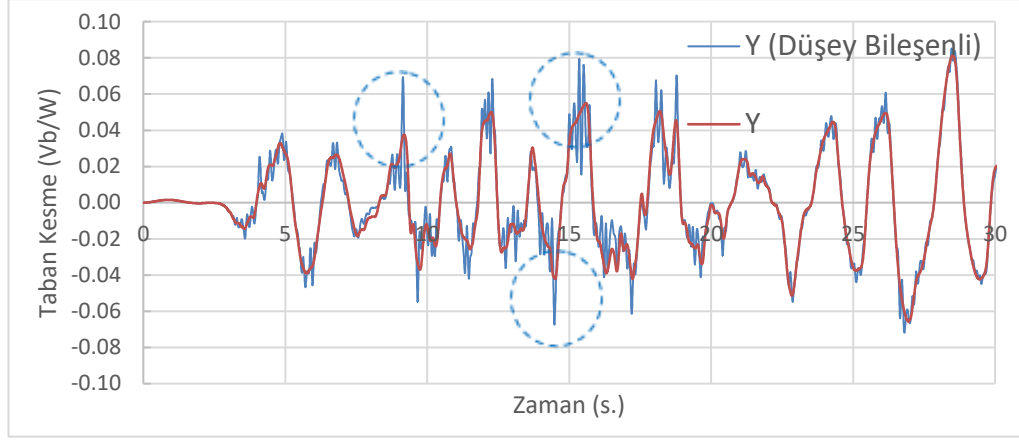
Şekil 5.60: RSN-923, düşey bileşenli/bileşensiz “Y” yönü taban kesme oranı.



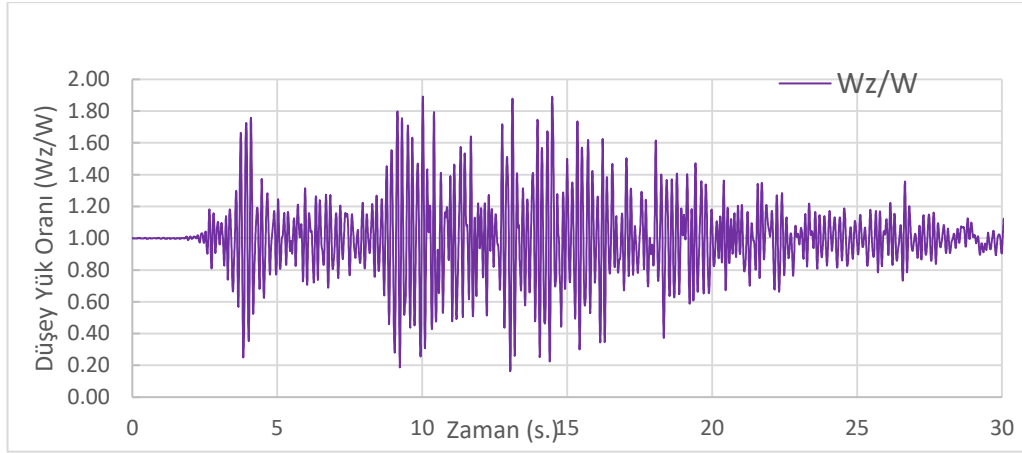
Şekil 5.61: RSN-923, düşey bileşenli model, düşey yük değişim oranı.



Şekil 5.62: RSN-907, düşey bileşenli/bileşensiz “X” yönü taban kesme oranı.



Şekil 5.63: RSN-907, düşey bileşenli/bileşensiz “Y” yönü taban kesme oranı.



Şekil 5.64: RSN-907, düşey bileşenli model düşey yük değişim oranı.

Düşey ivme bileşeninin taban kesme oranlarında sıçrama yarattığı bölgeler grafiklerde daire içinde gösterilmiştir. Bu sıçramaların frekansı, yapının düşey hâkim periyodunu da ($T_v = 0.17\text{sn}$) yansıtmaktadır. Bu grafiklerinden, tüm yer kayıtlarında depremin düşey ivme bileşeninin bina taban kesme oranlarını belli mertebelerde değişikliğe uğrattığı görülmektedir. Bu etki RSN 932 ve RSN 907 kayıtları için daha belirgin olarak elde edilmiş olup, düşey bileşenin dahil edildiği modelde taban kesme oranının 1.5 kat artış gösterdiği (RSN 932 kaydı) görülmektedir.

Faya yakın bölgelerde düşey yer ivmesi genliklerinin yatay bileşenlerden daha yüksek olabildiği bilinmektedir (22/02/2011 Mw6.9 Christchurch Depremi [22]). Bu sonuçlara göre, yakın saha fay etkisine maruz sürtünmeli sarkaç izolatörlerden oluşan taban yalıtımlı yapı sistemlerinde, depremin düşey yer ivmesi bileşeninin (yapı sisteminin düşey salınım özelliklerinden bağımsız olarak) analizlerde dikkate alınmasının gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

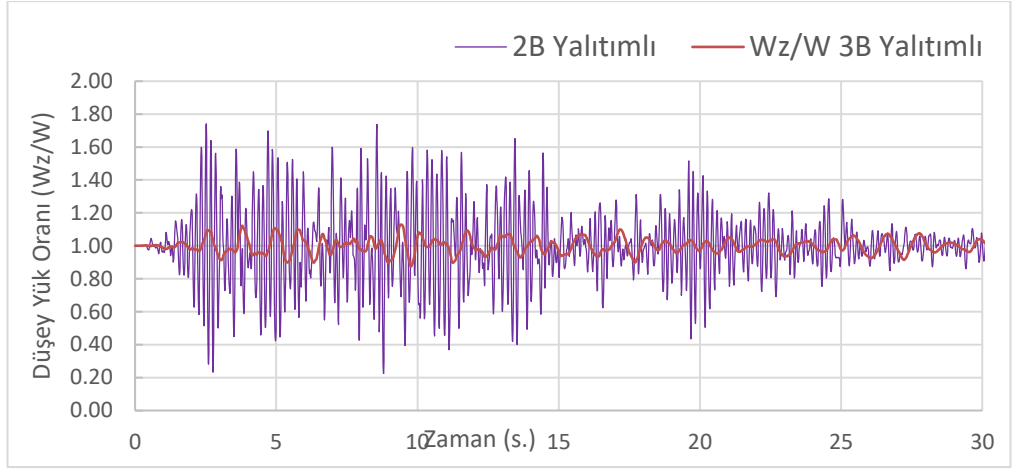
Tablo 5.15: Düşey bileşenin olduğu ve olmadığı durumda taban kesme oranları.

Deprem Kaydı	Düşey Bileşen Var Analiz Modeli			Düşey Bileşen Yok Analiz Modeli	
	Maksimum Taban Kesme Oranı "X" Yönü	Maksimum Taban Kesme Oranı "Y" Yönü	Maks. ve Min. Düşey Yük Oranı	Maksimum Taban Kesme Oranı "X" Yönü	Maksimum Taban Kesme Oranı "Y" Yönü
RSN932	12.00%	8.00%	22% - 174%	8.00%	6.00%
RSN923	9.00%	9.00%	45% - 159%	9.00%	8.00%
RSN907	12.00%	9.00%	16%- 189%	9.00%	8.00%

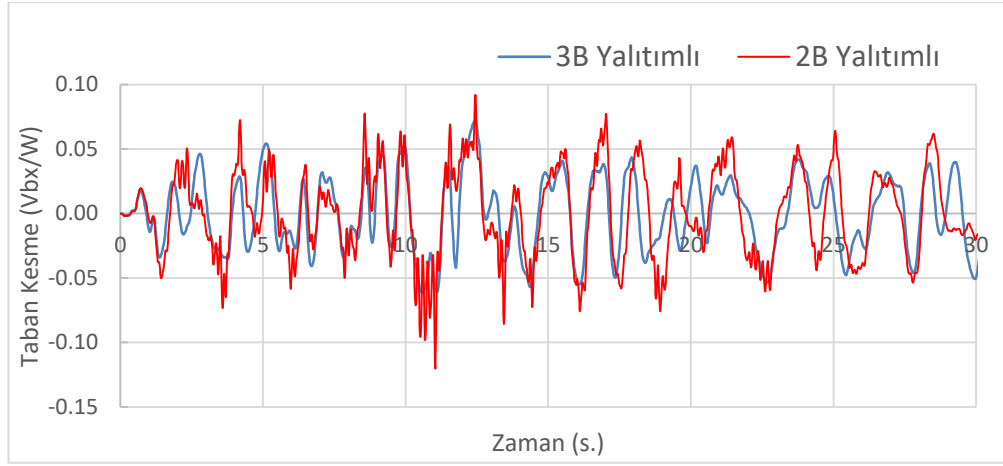
5.3.2 Üç Boyutlu Sismik Taban Yalıtımı

Yukarıdaki örnek çalışma kapsamında düşey yer hareketinin binadaki düşey yükleri 0.2~1.8 kat mertebesinde değişikliğe uğrattığı görülmektedir. Düşey yüklerde oluşan artışlar izolatördeki sürtünme nedeniyle taban kesme oranlarını da önemli ölçülerde etkilemektedir. Düşey yük değişimleri izolatörlerdeki sürtünme ile sağlanan sönümü de önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı yapıda düşey yönde de sismik yalıtım yapılmasına ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu doğrultuda yapısal modelde her bir sürtünmeli sarkaç izolatör kaidesine bağlı düşey doğrultuda çalışan helisel yaylar kullanılarak düşey yönde de yalıtım uygulamasına gidilmiştir. Düşey yalıtım sisteminde helisel yaylara paralel olarak düşey yönde çalışan viskoz damperler de kullanılmıştır.

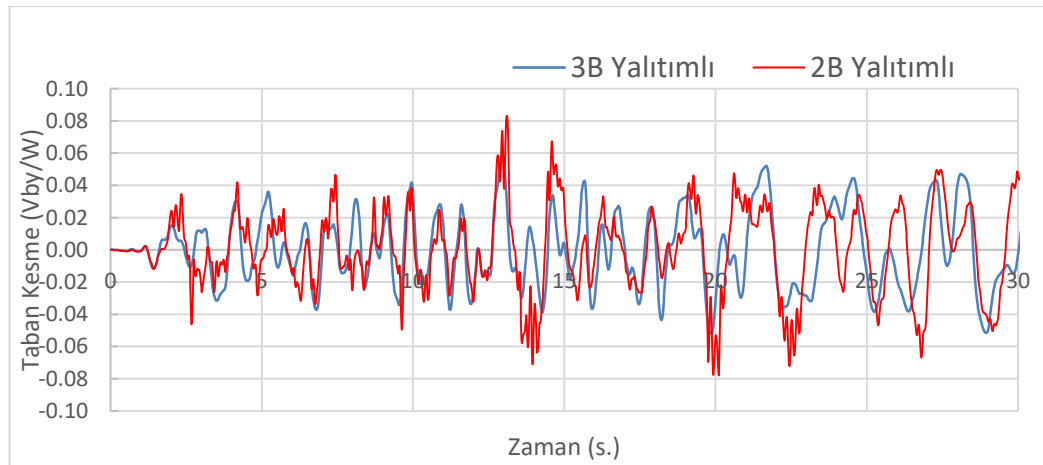
Kullanılan ivme kayıtlarının düşey bileşenine ait %2 sönümlü ivme spektrumu (bkz. Şekil 5.52) incelendiğinde $T_v:1\text{sn}$ periyodu sonrasındaki spektral ivmelerin büyük oranda azalım gösterdiği görülmektedir. Bu doğrultuda her bir sürtünmeli sarkaç izolatör kaidesine bağlı helisel yay sisteminin düşey rijitliği 20.000kN/m olarak seçilmiştir. Düşey yalıtım sisteminin hakim titreşim periyodu $T_v:1.15\text{ sn}$ olarak hesaplanmıştır. Düşey yalıtım sisteminde helisel yaylara paralel olarak çalışan ilave viskoz damperlerin sönüm katsayısı $C:1000\text{ kN.s/m}$ olarak seçilmiş olup bu damperlerin yalıtım sistemine sağladığı kritik sönüm oranı $\xi:\%14$ olarak hesaplanmıştır. Sistem düşey yük değişiminin ve taban kesme oranı artışının nispeten daha yüksek olduğu RSN-932 yer kaydı kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 5.65: RSN-932, 3B ve 2B yalıtımlı modellerde düşey yük değişim oranı.



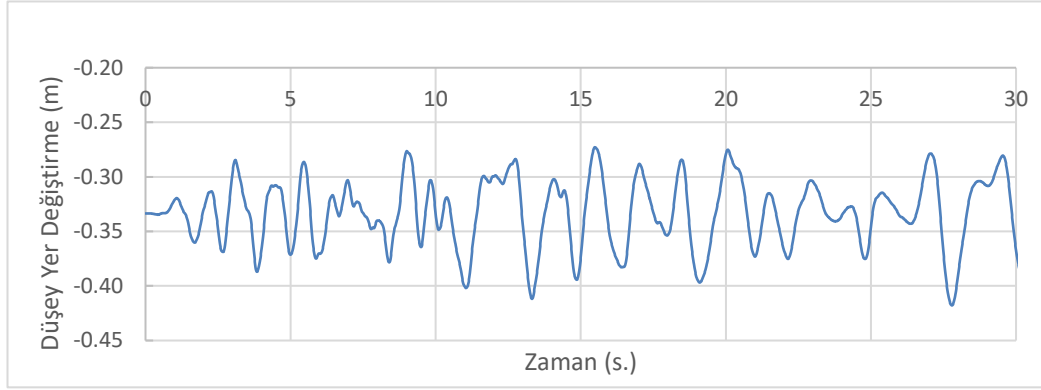
Şekil 5.66: RSN-932, 3B ve 2B yalıtımlı modellerde “X” yönü taban kesme oranı.



Şekil 5.67: RSN-932, 3B ve 2B yalıtımlı modellerde “Y” yönü taban kesme oranı.

3B yalıtımlı modelin analiz sonuçlarına göre düşey yer hareketinin bina üzerindeki etkinliğinin önemli ölçülerde azaltılabildiği görülmektedir. 2B yalıtımlı

modelde düşey yer hareketinin binadaki düşey yükleri 0.2~1.8 kat mertebesinde değişikliğe uğrattırken bu oran 3B yalıtımlı modelde 0.87~1.13 kat mertebesinde elde edilmiştir. 3B yalıtımlı modelde maksimum taban kesme oranı ise %7 olarak elde edilmiş olup düşey yer bileşeninin taban kesme kuvvetine etkisi tamamen ortadan kalkmıştır. Düşey yalıtım sisteminde oluşan maksimum düşey yer değiştirme değişimleri ise ± 8 cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.68: RSN-932 , 3B yalıtımlı yapıda oluşan düşey yer değişime.

Sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kullanıldığı taban yalıtımlı yapılarda depremin düşey yer ivmesi bileşeninin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde dikkate alınması yer ivmesi kayıtlarına bağlı olarak tasarım taban kesme oranlarını 1.1~1.5 kat mertebesinde artırdığı, düşey yüklerde ise 0.2~1.8 kat mertebesinde değişiklik meydana getirdiği görülmüştür. Düşey yer bileşeninin üst yapıda yarattığı bu olumsuz etkinin düşey yönde de sismik yalıtım (3B sismik taban yalıtımı) yapılarak elimine edilmesinin mümkün olabileceği görülmüştür.

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada taban yalıtımlı sistemlerin tasarımında karşılaşılan sorunlar örnek yapısal modeller üzerinden irdelenmiş, bu sorunlara ilişkin çözüm önerileri ve alternatif tasarım yaklaşımları geliştirilmiştir.

Yakın fay etkisine maruz sismik taban yalıtımlı bina için yürütülen analizlerde maksimum deprem etkisi altında sürtünmeli sarkaç tip izolatörlerdeki deplasman talepleri yaklaşık 2.00m olarak bulunmuştur. Bu mertebede deplasman kapasitelerine sahip sarkaç tipi izolatörlerin üretilmesi teorik olarak mümkün olabilse de izolatör maliyetleri aşırı yüksek mertebelere ulaşabilmektedir. Bu nedenle izolasyon deplasman ve kesme taleplerinin azaltılması kapsamında sisteme viskoz damperler eklenmiştir. Bu kapsamda iki farklı damper özelliği belirlenmiş ve her bir tip damper için birer model oluşturularak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yürütülmüştür. Analizlerin ortalama sonuçlarına göre tasarım taban kesme oranı her iki modelde de 0.24g~0.25g olarak elde edilmiştir. Maksimum deplasmanlar ise birinci damper modelinde ($C:1220^{\alpha=1.0}$) 1.05m, ikinci modelde ($C:1600^{\alpha=0.5}$) ise 0.94m olarak elde edilmiştir. Kat ivmeleri her iki modelde de 0.3g-0.5g aralığında hesaplanmış, katlardaki ötelenme oranları ise %0.5 oranının altında bulunmuştur. Kat ivmeleriyle ilgili Sağlık Bakanlığı Genelgesi [1] tasarım sınırları ~%50 mertebesinde aşılmış, taban kesme oranında ise izin verilen maksimum üst sınır %25 oranında aşılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre yakın saha fay etkilerine maruz bir binada genelge [1] tarafından özellikle kat ivmeleri için şart koşulan ivme sınırlarının sağlanabilmesinin kolaylıkla mümkün olamayacağı sonucuna varılmıştır. Yatay kat ivmelerinin ve taban kesme oranlarının Sağlık Bakanlığı Genelge'sinde verilen sınır değerlere indirgenebilmesi için izolatör periyotlarının daha fazla uzatılmasına (4.5s~5s) gereksinim oluşacaktır. Bu duruma bağlı olarak izolatörlerdeki maksimum deplasman taleplerinde %20~%30 artış meydana getirmesi ve bu durumun sismik izolasyon sistemi maliyetlerini 1.5~2.0 kat mertebesinde artıracak tahmin edilmektedir.

Maksimum senaryo depremi veya olası maksimum deprem büyüklüğüne ($T_f=2475$ Yıl) göre izolatörler için hesaplanan deplasman taleplerinin aşılma ihtimali her zaman söz konusu olabilir. Özellikle yakın saha fay etkilerine maruz bölgelerde deplasman taleplerinin izolatörlerin maksimum deplasman kapasitesinden daha yüksek olması her zaman olası görülmelidir. Bu nedenle taban izolasyonlu binaların izolatörler üzerinden kayıp düşmemesi (kayıcı tip izolatörler) veya izolatörlerin düşey

stabilitesinin yitirilmemesi (kauçuk esaslı izolatörler) için deplasman durdurucu tamponlarla (buffer stopper) veya bünyesinde deplasman sınırlayıcı bir mekanizmaya sahip izolatörler (Örneğin Triple Pendulum, EPS) kullanılarak gerekli önlemlerin alınması sağlanmalıdır. Çevre duvarı ile yalıtımlı bina arasındaki boşluk mesafesinin izolatörlerin deplasman kapasitesine eşit veya bir miktar daha düşük bırakılması (~5cm) söz konusu riske karşı alınabilecek en ekonomik önlemdir. Ancak, böyle bir durumda üst yapının hasar alması söz konusu olsa da kapasite tasarım yaklaşımıyla binada can güvenliği performans seviyesi halen sağlanabilir. Buna göre maksimum depremde deplasman taleplerinin sismik boşluktan fazla olduğu bir durumda bina çevre duvarlarına çarparak üst yapı taşıyıcı sisteminde elastik ötesi deplasman talepleri oluşturacaktır. Benzer plastikleşme talepleri, deplasman sınırlayıcı mekanizması bulunan izolatörler veya durdurucu tampon sisteminin kullanıldığı sistemler için de geçerli olup, bu durum üst yapının her koşulda (maksimum depremde can güvenliği performans seviyesinin sağlanabilmesi) kapasite tasarım ilkelerine göre tasarlanmasını gerekli kılmaktadır.

Sağlık Bakanlığı'nın taban yalıtımlı sistemlerin tasarımıyla ilgili genelgesi 3.2.4 maddesi, bırakılacak sismik boşluklarla ilgili burada değinilenin tam tersi bir yaklaşımı içermektedir. Bu maddenin değiştirilmesi veya kesinlikle uygulanmaması önerilmektedir.

Bir diğer problem olarak ortak izolasyon döşemesi üzerinde genişleme derzleriyle birbirinden ayrılmış bina blokları incelenmiş, oluşturulan örnek modelde yatay rijitliği diğer bloklara nispeten az olan B blokta tasarım taban kesme kuvvetleri önemli mertebelerde (~3 kat) artış göstermiştir.

Üç ayrı ivme kaydı için yapılan analiz sonuçları "B" blok "X" yönü zemin kat taban kesme oranları, eşdeğer yöntemle göre hesaplanan orandan 1.5~3.0 kat daha büyük bulunmuştur. Tepki spektrumu yönteminde mod mutlak toplama ("ABS Sum") yöntemi kullanıldığında zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Mod birleştirme yönteminde "B" blokla ilişkili yüksek modun taban kesme kuvvetine katkısı izolatör modundan daha yüksek bulunmuştur. Sistemde izolatör sistemi titreşimleri dışındaki yüksek modların etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir. İzolatörlerin rijit davranış gösterdiği yük boşalımı ("Unloading") ve yeniden yükleme ("Reloading") fazlarında yüksek titreşim modlarının da belli bir ölçüde (%10-%40) taban kesme kuvvetlerini artırdığı anlaşılmaktadır.

B blok “X” yönü taban kesme oranındaki yüksek titreşim modlarının etkinliğinin azaltılabilmesi için üst yapının sönüm oranı ($\%10C_{cr}$) ilave damperler kullanılarak artırılmıştır. “B” blok yapısının ilk dört katındaki çerçeve sistemine “X” yönünde çapraz konfigürasyonda 16 adet 2000 kN kapasiteli damperler ilave edilerek “B” bloktaki taban kesme oranı önemli ölçüde ($\%28$ ’den $\%10$ ’a) azaltılabilmektedir. Damperli çözüme alternatif olarak “B” blok yapısı diğer komşu bloklara belli kotlarda “Lock-Up” cihazlarıyla bağlanmıştır. Düzen olarak ikinci katta altı, beşinci katta altı ve son katta iki adet olmak üzere toplamda “16 adet” “Lock-Up” cihazı kullanılmıştır. Söz konusu cihazların sisteme ilavesiyle 4.Mod etkinliği tamamen ortadan kalkmıştır. “B” blok taban kesme oranları ise damperli modelin yarısı kadar ($V_{B,Lock\&Up}$: $\%5.4$) elde edilmiştir. “Lock&Up” cihazları, montajda damperler gibi ilave çelik çaprazlara ihtiyaç duymamakta olup maksimum eksenel yük kapasite ihtiyacı damperlerden ~400 kN daha az bulunmuştur. Son bu cihazların kullanımı ile “B” blok taban kesme oranlarını önemli ölçüde düşürülerek üst yapı tasarımında ekonomi sağlayabilmektedir. Bu tür bir yapıda damperli çözüm yerine “Lock&Up” kullanılmasının daha ekonomik olacağı görülmektedir. Damper ve “Lock&Up” cihazlarında deplasman taleplerinin nispeten düşük olması nedeniyle “Stroke” kontrolü yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Blokların izolasyon döşemesinde de dilatasyon derzleri ile ayrılarak “Lock&Up” cihazlarıyla bağlanması, cihazlarda oluşacak eksenel yük taleplerinin azaltılması, izolasyon döşemesinde rötre ve genleşme nedeniyle oluşacak ilave taleplerin azaltılması ve yapıların statik durumda tamamen birbirinden bağımsız davranış gösterebilmesi bakımından daha uygun bir çözüm olarak görülmektedir.

“B” blok “X” yönü taban kesme oranındaki yüksek titreşim modlarının etkinliğinin azaltılabilmesi için “B” blok yapı sistemine “X” yönünde ilave betonarme perdeler (bina kullanımını önemli ölçülerde etkilemiyor ise) yerleştirilmesi de düşünülebilir. Ancak, bu yöntemle kesme büyütme oranının azaltılabilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Örneğin ilgili blok yapısına komşu ve yatayda rijitliği düşük bir blok yapısına da perde ilave edilmesine ihtiyaç duyulabilmektedir. Taban yalıtımlı binalarda perde altlarında oldukça yüksek basınç ve çekme talepleri oluşabilmektedir. Özellikle yüksekliğinin genişliğine oranı büyük ($h/l_w > 3$) olan perdelerde (asansör perdeleri vb.) basınç ve çekme talepleri aşırı yüksek mertebelere ulaşabilmektedir.

İzolatörlerin sınırlı (LRB vb.) veya sıfır çekme (FPS vb.) kapasitesine sahip olması nedeniyle perde elemanının taşıyıcı sisteme olan yatay rijitlik katkısı büyük oranda izolasyon döşemesinin eğilme rijitliğine bağlı kalmaktadır. İzolasyon döşemesi

eğilme rijitliğinin nispeten zayıf olduğu perdeli sistemlerde moment çerçevelerinde yüksek iç kuvvet talepleri oluşabilmektedir. Bu etkiler ise izolatörlerin çekme ve basınçtaki düşey rijitliklerinin farklı olması nedeniyle lineer analiz yapılarak belirlenememektedir. Bu nedenle tüm tasarım yük kombinasyonlarının yatay yükler altında doğrusal olmayan statik analizlerle (Pushover) belirlenmesine ihtiyaç doğmaktadır. Uygulamada çoğu tasarımcı lineer yöntemlerle analiz ve tasarım gerçekleştirmekte, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerle de genel mühendislik parametrelerini (taban kesme oranı, ötelenmeler vb.) kontrol etmektedir. Zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçlarına göre yapısal eleman bazında bir tasarım kontrolü genellikle gerçekleştirilmemektedir. Söz konusu bu durum çoğu moment çerçevelerinin yetersiz tasarımına neden olabilmektedir.

Çoklu bloklardan oluşan sistemlerin üst yapıda da birleştirilerek taşıyıcı sistemin perdelerin olmadığı rijit moment çerçevelerinden oluşturulması uygun bir çözüm olarak görülmektedir. Taşıyıcı sistemde üst yapı deformasyonlarının sınırlandırılması amacıyla perde kullanımı bir gereksinim oluşturuyor ise perdelerin mümkün mertebelerde bina iç konumlarında yer almasına, perde toplam yüksekliğinin plandaki uzunluğuna oranının ikiden ($h/l_w < 2$) küçük olmasına veya perdelerin alt katlara doğru planda uzunluklarının artırılarak büyütülmesine dikkat edilmelidir. Sıcaklığa bağlı genleşme etkileri tasarım aşamasında dikkate alınarak gerekli önlemler (döşeme veya kiriş ilave genleşme donatıları) alınabilir. Isıl genleşme veya büzülme neticesinde hesaplanan ilave donatı maliyetleri bu tür bir yapıda çok beklenmese de nispeten daha büyük ölçekli yapılarda ciddi maliyetler doğurabilmektedir. Büyük ölçekli yapılarda (planda uzunlukları 80m'den büyük yapılar), rötre, ısı genleşme veya büzülme nedeniyle izolatörlerde kalıcı deplasmanlar oluşabilmektedir. Söz konusu kalıcı deplasmanlar nedeniyle oluşan "P-Delta" etkilerinin düşey yük kombinasyonları dahilinde kaide ve izolasyon döşemesi tasarımında dikkate alınması gerekebilir.

Zemin yapısının homojen olmadığı (zemin tabakalarının eğimli olması, yumuşak zemin ve sert zemin gibi farklı zemin yapılanmaları) bölgelerde üst yapı bloklarının birleştirilmesi üst yapıda tasarım problemlerine neden olabilir. Böyle bir durumda farklı zemine oturan yapı gruplarının birbirinden temel düzeyinden itibaren ayrılarak bu binaların "Lock-Up" cihazlarıyla birbirine bağlanması düşünülebilir. Alternatif olarak zeminde farklı oturmaları engelleyebilecek zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulabilir.

Bu nedenle bu tür büyük oturma alanlarına sahip yapılar için taban yalıtımlı yapıların tasarımı konusunda tecrübeli yapısal tasarım mühendisleri tarafından mimari tasarım aşamasında fizibilite çalışmaları yapılarak bina tasarımına ilişkin uygun ve ekonomik çözüm yollarının aranması en uygun yöntem olarak görülmektedir.

Üçüncü ve son olarak ele alınan örnek modelde ise sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kullanıldığı taban yalıtımlı yapılarda depremin düşey yer ivmesi bileşeninin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde dikkate alınması tasarım taban kesme oranlarını düşey yer ivmesi kayıtlarına bağlı olarak 1.0~1.5 kat arasında artırdığı görülmüştür. Düşey yer bileşeninin üst yapıda yarattığı bu olumsuz etkinin düşey yönde de sismik yalıtım (3B sismik taban yalıtımı) yapılarak elimine edilmesinin mümkün olabileceği görülmüştür. Faya yakın bölgelerde maksimum düşey yer ivmesi genliklerinin yata bileşenlerden yüksek olabildiği bilinmektedir (22/02/2011 Mw6.9 Christchurch Depremi [22]). Yakın saha fay etkisine maruz sürtünmeli sarkaç izolatörlerinden oluşan taban yalıtımlı yapı sistemlerinde düşey bileşeninin (yapı sisteminin düşey salınım özelliklerinden bağımsız olarak) analizlerde dikkate alınmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

7. İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında taban yalıtımlı binaların tasarım problemleri sınırlı bir kapsam dahilinde irdelenmiştir. Bu tip yapılarda birçok sayıda projeye özgü tasarım problemleri bulunmakta ve bu problemlere dair farklı tasarım yaklaşımları gelişmektedir. Bunlara ilişkin ilave çalışma yapılmasına ihtiyaç olduğu düşünülen konular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Prototip ve üretim test sonuçlarının değerlendirilmesi
- Kat kuvvetlerinin izolasyon döşemesinin kütlesine göre farklı dağılım göstermesi
- Kauçuk izolatörlerde çekme-basınç rijitlik oranı ve çekme gerilmesi sınırı
- İzolatör kaide tasarımı problemleri (Ankraj kenar mesafeleri, ilave ankraj donatısı gereksinimleri, kaide betonu ezilme dayanımı gereksinimleri vb.)
- Daha büyük depremlerde üst yapıdaki elastik ötesi deformasyon taleplerinin değerlendirilmesi ve üst yapı tasarımında kapasite tasarımı
- Yalıtımlı sistemlerde maksimum olası kayıp analizleri ve iş kesintilerinin tespiti (yapısal olmayan elemanlar)
- Düşey yer hareketi bileşeni ve üç boyutlu sismik taban yalıtımı
- Deprem sonrası taban yalıtımlı sistemlerde hasar değerlendirme ve sismik taban yalıtımlı binalarda hasar değerlendirmesi yapabilecek uzman ekip ihtiyacı (Yalıtım birimi hasarları, izolasyon döşemesi hasarları, çerçeve eleman hasarları, yapısal olmayan eleman hasarları)
- Taban yalıtımlı binaların orta ölçekli deprem etkilerine göre değerlendirilmesi (kat ivmeleri, kat deplasmanları)
- Yüksek binalarda sismik taban yalıtımı (Yüksek mod etkileri, devrilmeye ve kalkmaya karşı stabilite, fırtına etkisi)
- Zayıf zemin üzerinde yer alan sismik taban yalıtımlı sistemlerin zemin-yapı etkileşimli olarak modellenmesi ve analizleri
- İzolatörlerde deprem sonrası oluşabilecek kalıcı deplasmanlar, kalıcı deplasman kabul kriterleri, geri merkezleme yapılması mümkün mü?

Yukarıda belirtilen konular hakkında yapılacak çalışma sonuçlarının taban yalıtımlı binaların tasarımıyla ilgilenen mühendislere önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] SBSYGM, (2013), B.10.0.SYG.0.07.00.00 Sayılı Genelge, Deprem Yalıtımlı Olarak İnşa Edilecek Yapılara Ait Proje ve Yapım İşlerinde Uyulması Gereken Asgari Standartlar.
- [2] Web 1, (2019), <https://www.youtube.com/watch?v=FF9bA-7oTk8&list=PLF> (Erişim Tarihi: 05/05/2019).
- [3] Web 2, (2019), <http://www.ulusyapi.com>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).
- [4] Web 3, (2019), <https://www.freysas.com.tr>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).
- [5] ASCE-7-16, (2016), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.
- [6] ASCE/SEI 41/17, (2017), Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.
- [7] EC-8, (2005), Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1:2005. Comitee Europeen de Normalisation, Brussels.
- [8] ResGaz 1, (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 18 Mart 2018 tarih ve 30364 sayılı Resmi Gazete.
- [9] Skinner R. I., Robinson W. H., McVery G. H., (1993), “An Introduction to Seismic Isolation”, 1st Edition, Wiley Chichester.
- [10] Web 4, (2019), <http://japanpropertycentral.com>, (Erişim Tarihi: 11/06/2019).
- [11] AIJ, (2016), Design Recommendation for Seismically Isolated Buildings, 5-26-20, Shiba, Minato-ku, Architectural Institute of Japan.
- [12] Tezcan S., Cimilli S., (2002), “Seismic Base Isolation”, Yüksek Öğrenim ve Araştırma Vakfı, İstanbul.
- [13] Chopra A. K., (2012), “Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering”, 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [14] Kelly J. M., Naeim F., (1999), “Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice”, 1st Edition, John A. Martin and Associates, Inc., University of California.
- [15] Web 5, (2019), <http://www.dis-inc.com>, (Erişim Tarihi: 13/06/2019).
- [16] Bridgestone, (2017), Seismic Isolation Product Line-up Catalog.
- [17] Web 6, (2019), <https://www.fipindustriale.it>, (Erişim Tarihi: 14/06/2019).

- [18] Zayas V.A., (1990), “A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation”, Earthquake Spectra, 317-333.
- [19] Web 7, (2019), <http://www.tis.com.tr>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).
- [20] Web 8, (2019), <http://www.abatehran.com>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).
- [21] Web 9, (2019), <http://domoinvest.ba>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).
- [22] Bradley B. A., M. Cubrinovski, (2011), “Near-source Strong Ground Motions Observed in the 22 February 2011 Christchurch Earthquake”, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 44, 181-194.
- [23] Web 10, (2019), <https://www.terracon.com/2018/04/29/building-earthquake-protection-for-todays-hospital>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).
- [24] REDI, (2013), Almufti I., M. Willford, Resilience-based earthquake design Rating System.
- [25] FEMA P-58, (2013), Seismic Performance Assessment of Buildings, Methodology, Federal Emergency Management Agency, Washington.
- [26] FEMA-751, (2012), NEHRP Recommended Seismic Provisions, Design Examples, Federal Emergency Management Agency, Washington.
- [27] Erdik M., M. Demircioğlu, K. şeşetyan, E. Durukal ve B. Siyahi, (2004), “Assessment of Probabilistic Earthquake Hazard in the Marmara Region”, Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 605-631.
- [28] Somerville P. G., Smith N. F., Graves R. W., Abrahamson N. A., (1997), "Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity." Seismological Research Letters, 199-222.
- [29] Web 11, (2019), <https://tdth.afad.gov.tr>, (Erişim Tarihi: 05/05/2019).
- [30] Web 12, (2019), <https://www.taylordevices.com>, (Erişim Tarihi: 15/06/2019).
- [31] Ryan K. L., Dao N. D., (2015), “Influence of vertical ground shaking on horizontal response of seismically isolated buildings with friction bearings.”, Journal of Structural Engineering, 142.
- [32] Fahjan Y. M., (2008), “Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi”, İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, 292, 4423-4444.
- [33] Zhoua Z, Wong J, Mahin S, (2016), “Potentiality of Using Vertical and Three Dimensional Isolation Systems Nuclear Structures, Nuclear Engineering and Technology”, Journal of Structural Engineering, 532.

- [34] Koval V., Christopoulos C., (2016), “Improvements to the simplified analysis method for the design of seismically isolated bridges in CSA-S6-14.”
- [35] Mayes R. L., Naeim F., (2001), “Seismic Design Handbook, “Design of Structures with Seismic Isolation”, 1st Edition, 723-755.

ÖZGEÇMİŞ

Murat Çelik 1980 yılında Bafra’da doğdu. 1998 yılında başladığı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2003 yılında tamamladı. 2012 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında başlamıştır. 2005 yılından bu yana ise çeşitli özel şirketlerde deprem ve yapı mühendisliği alanında çalışmalarına devam etmektedir.