

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK SİSMİK TALEPLERE MARUZ YAPILARDA SİSMİK YALITIM VE
VİSKOZ SÖNÜMLEME SİSTEMLERİNİN PERFORMANS İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat Alperen TAZKIR

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK SİSMİK TALEPLERE MARUZ YAPILARDA SİSMİK YALITIM VE
VİSKOZ SÖNÜMLEME SİSTEMLERİNİN PERFORMANS İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Murat Alperen TAZKIR
(802201230)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin FAHJAN

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**PERFORMANCE EVALUATION OF SEISMIC ISOLATION AND VISCOUS
DAMPING SYSTEMS IN STRUCTURES SUBJECTED TO HIGH SEISMIC
DEMANDS**



M.Sc. THESIS

**Murat Alperen TAZKIR
(802201230)**

Department of Earthquake Engineering

Earthquake Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Yasin FAHJAN

JUNE 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 802201230 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Murat Alperen TAZKIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK SİSMİK TALEPLERE MARUZ YAPILARDA SİSMİK YALITIM VE VİSKOZ SÖNÜMLEME SİSTEMLERİNİN PERFORMANS İNCELEMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

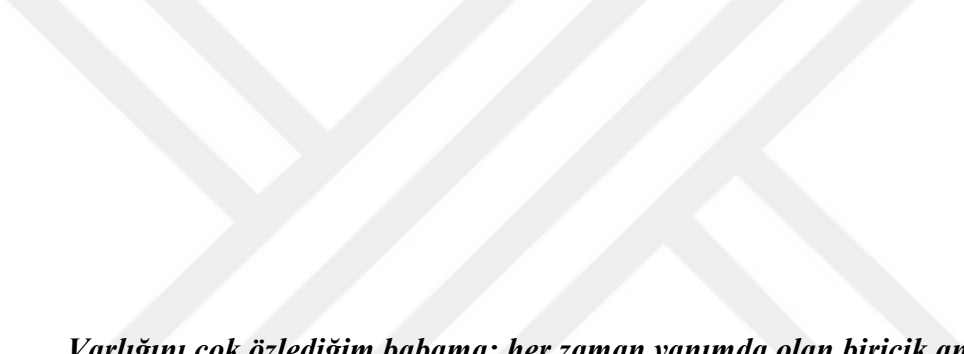
Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yasin FAHJAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Pınar Özdemir ÇAĞLAYAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Bahadır ŞADAN
MEF Üniversitesi

Teslim Tarihi : 26 Mayıs 2025
Savunma Tarihi : 13 Haziran 2025





*Varlığını çok özlediğim babama; her zaman yanımda olan biricik anneme ve can
kardeşime,*



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana destek olan; süreç boyunca sabırla rehberlik eden ve bilmediğim konularda bilgisini benimle paylaşmaktan çekinmeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Yasin FAHJAN'a; kıymetli yorumları ve yerinde tespitleri için jüri üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Pınar Özdemir ÇAĞLAYAN ile Dr. Öğr. Üyesi Bahadır ŞADAN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sabırları, sevgileri ve sonsuz destekleriyle beni motive eden canım aileme gönülden teşekkür ederim.

Mayıs 2025

Murat Alperen TAZKIR
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Katkısı	2
1.3 Tezin İçeriği	2
2. SİSMİK ENERJİNİN SÖNÜMLENMESİ	5
2.1 Doğal (İçsel) Sönüm Kavramı	5
2.2 Enerji Sönümleme Sistemleri	6
2.2.1 Aktif enerji sönümleme sistemleri	7
2.2.2 Yarı-aktif enerji sönümleme sistemleri	7
2.2.3 Pasif enerji sönümleme sistemleri	8
2.3 Deplasmana Bağlı Enerji Sönümleme Sistemleri	9
2.3.1 Metalik sönümleyiciler (ADAS)	9
2.3.2 Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ)	10
2.3.3 Sürtünme esaslı sönümleyiciler	11
2.4 Hıza Bağlı Enerji Sönümleme Sistemleri	11
2.4.1 Visko-elastik sönümleyiciler	12
2.4.2 Viskoz sıvı sönümleyiciler (VSS)	13
2.4.2.1 Viskoz sıvı sönümleyicilerin bağlantı konfigürasyonları	15
2.5 Deprem Yalıtım Sistemleri	17
2.5.1 Kurşun çekirdekli elastomer (KÇE)	19
3. YAPININ TANITILMASI VE SINIFLANDIRILMASI	23
3.1 Yapının Konumu	23
3.2 Elastik Tasarım İvme Spektrumları	23
3.3 Yapının Mimarisi ve Taşıyıcı Sistem Özellikleri	24
3.4 Yapı Malzemeleri	28
3.4.1 Beton	28
3.4.2 Donatı çeliği	28
3.5 Yük Hesaplamaları	28
3.5.1 Ölü yükler	28
3.5.2 Hareketli yükler	29
3.6 Yapının Sınıflandırılması	30
3.6.1 Bina kullanım sınıfı ve önem katsayısı	30

3.6.2 Deprem tasarım sınıfı	30
3.6.3 Bina yükseklik sınıfı.....	30
3.6.4 Bina performans hedefi	31
4. DEPREM YALITIM BİRİMLERİ İLE ANALİZ VE TASARIM	33
4.1 Kurşun Çekirdekli Elastomer (KÇE) Deprem Yalıtım Birimlerinin Tasarımı	33
4.2 KÇE Yalıtım Birimlerinin Şekildeğiştirme ve Düşey Kararlılık Kontrolleri...	37
4.3 Etkin (Eşdeğer) Deprem Yüğü Analizi	41
4.3.1 Yalıtım arayüzü ve altyapının analizi.....	41
4.3.2 Üstyapının analizi.....	42
4.4 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz	42
4.4.1 Deprem kayıtlarının seçilmesi.....	43
4.4.2 Deprem kayıtlarının ölçeklenmesi	45
4.4.3 Analiz programı tanımlamaları	46
4.4.4 Analiz sonuçları.....	51
4.5 Mod Birleştirme Yöntemi ile Analiz (Üstyapı).....	54
5. DEPREM YALITIM BİRİMLERİ VE ENERJİ SÖNÜMLEYİCİLER İLE ANALİZ VE TASARIM.....	61
5.1 Kurşun Çekirdekli Elastomer (KÇE) Deprem Yalıtım Birimlerinin Tasarımı	61
5.1.1 Tip-1 KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımı.....	62
5.1.2 KÇE yalıtım birimlerinin şekildeğiştirme ve düşey kararlılık kontrolleri	64
5.1.3 Tip-2 KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımı.....	68
5.1.4 KÇE yalıtım birimlerinin şekildeğiştirme ve düşey kararlılık kontrolleri	70
5.2 Viskoz Sıvı Sönümleyicilerin (VSS) Tasarımı.....	73
5.3 Etkin (Eşdeğer) Deprem Yüğü Analizi	77
5.3.1 Yalıtım arayüzü ve altyapının analizi.....	77
5.3.2 Üstyapının analizi.....	78
5.4 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz	79
5.5 Mod Birleştirme Yöntemi ile Analiz (Üstyapı).....	83
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	91
EKLER	95
ÖZGEÇMİŞ	119

KISALTMALAR

A1	: Burulma Düzensizliği
ADAS	: Metalik Pasif Enerji Sönümleyici
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
B2	: Yumuşak Kat Düzensizliği
B3	: Taşıyıcı Sistem Düşey Elaman Süreksizliği
B420C	: Çelik Donatı Sınıfı
BKS	: Bina Kullanım Sınıfı
BÖÇ	: Burkulması Önlenmiş Çapraz Sönümleyici
BYS	: Bina Yükseklik Sınıfı
C35/45	: Beton Sınıfı
DAF	: Doğu Anadolu Fay Hattı
DD-1	: 50 Yılda Aşılma Olasılığı %2 Olan Deprem Yer Hareketi Düzeyi
DD-2	: 50 Yılda Aşılma Olasılığı %10 Olan Deprem Yer Hareketi Düzeyi
DGT	: Dayanıma Göre Tasarım
DTS	: Deprem Tasarım Sınıfı
FNA	: Doğrusal Olmayan Modal Zaman Tanım Alanında Analiz
I	: Bina Önem Katsayısı
İMO	: İnşaat Mühendisleri Odası
KAF	: Kuzey Anadolu Fay Hattı
KÇE	: Kurşun Çekirdekli Elastomer
KK	: Kesintisiz Kullanım
NZSEE	: Yeni Zelanda Deprem Mühendisliği Topluluğu
PEER	: Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi
RSA	: Tepki Spektrumu Analizi
RS	: Tepki Spektrumu
S420	: Çelik Donatı Sınıfı
SH	: Sınırlı Hasar
SRSS	: Karelerinin Toplamının Karekökü
ŞGDT	: Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım
TADAS	: Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi

TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018
TDTH	: Türkiye Deprem Tehlike Haritası
TMMOB	: Türkiye Mühendisler Mimarlar Odası Birliği
TS-498	: Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standardı
TS-500	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standardı
VSS	: Viskoz Sıvı Sönümleyici
YSE	: Yüksek Sönümlü Elastomer
ZC	: Yerel Zemin Sınıfı



SEMBOLLER

A	: Elastomer yalıtım birimin brüt kesit alanı
A_p	: Kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimlerinde kurşun çekirdeğin alanı
A_r	: Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış, yüke maruz yüzey alanı
A_{re}	: Şekil değiştirmiş elastomer yalıtım biriminin merkezde yüke maruz yüzey alanı
B	: Çelik plaka ile yapışmış elastomerin çapı
B_L	: Kurşun çekirdek çapı
B_{total}	: Toplam elastomer izolatör genişliği
C	: Sönüm katsayısı
C_{top,YY}	: Y-Y doğrultusundaki toplam sönüm katsayısı
C_{top,XX}	: X-X doğrultusundaki toplam sönüm katsayısı
C_{YY}	: Y-Y doğrultusundaki tekil sönüm katsayısı
C_{XX}	: X-X doğrultusundaki tekil sönüm katsayısı
D	: Yalıtım birimi için yerdeğiştirme değeri
D_M	: En büyük 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 toplam yerdeğiştirme
D_{TM,Tasarım}	: Tasarımda kabul edilen D _{TM} değeri
D_y	: Yalıtım biriminin etkin akma yerdeğiştirmesi
E₀	: Esneklik modülü
E_c	: Basınç modülü
E_d	: Deprem yükü
E_H	: Histeretik enerji
E_k	: Kinetik enerji
E_i	: Giriş enerjisi
E_s	: Statik enerji
E_s	: Donatı çeliğinin elastisite modülü
E_v	: Düşey rijitlik modülü

E_{ζ}	: Sönüm enerjisi
F	: Yalıtım biriminde D yerdeğiştirmesine karşı gelen dayanım
f	: Büyütme faktörü/katsayısı
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{ctk}	: Betonun karakteristik eksenel çekme dayanımı
$f_{ort,YY}$	: Y-Y doğrultusunda ortalama büyütme faktörü/katsayısı
$f_{ort,XX}$	: X-X doğrultusundaki ortalama büyütme faktörü/katsayısı
f_{su}	: Donatı çeliği minimum kopma dayanımı
F_y	: Etkin akma dayanımı
f_{yk}	: Donatı çeliği minimum akma dayanımı
f_Q	: Yalıtım biriminin karakteristik dayanımı (kuvvet-yerdeğiştirme çevriminde sıfır yerdeğiştirmeye karşılık gelen kuvvet)
g	: Yerçekimi ivmesi
G	: Sabit yük
G_e	: Etkin kayma modülü
G_v	: Elastomer malzemenin kayma modülü
H	: Yalıtım birimi toplam yüksekliği
H_N	: Bina toplam yüksekliği (m)
k_1	: Elastomer yalıtım biriminin başlangıç rijitliği (elastik rijitlik)
k_2	: Elastomer yalıtım biriminin ikincil (elastik ötesi) rijitliği
k_1/k_2	: Elastomer yalıtım biriminin elastik rijitliğinin elastik ötesi rijitliğine oranı
k	: Kauçuk malzemenin sertlik değeri
K	: Kauçuk malzemenin hacim modülü
k_e	: Elastomer yalıtım biriminde D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik
k_M	: En büyük deprem yer hareketi yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin etkin rijitliği
k_v	: Elastomer yalıtım biriminin düşey rijitliği
K_{YY}	: Y-Y doğrultusundaki toplam kat rijitliği
K_{XX}	: X-X doğrultusundaki toplam kat rijitliği
n	: Hareketli yük katılım katsayısı
P_{cr}	: Yatay yerdeğiştirme olmadığı durumda elastomer yalıtım birimlerinin burkulma yükü
P'_{cr}	: Yatay yerdeğiştirme olduğu durumda elastomer yalıtım birimlerinin burkulma yükü
P_{k1}	: Depremsiz yük birleşiminde elde edilen düşey kuvvet

P_{k2}	: Depremli yük birleşiminde elde edilen düşey kuvvet
P_{str}	: Elastomer yalıtım birimlerinin, birim şekilde değiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_{rup}	: Fay düzlemine en yakın mesafe
R_{JB}	: Joyner-Boore mesafesi
S₁	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
S	: Elastomer yalıtım birimi şekil katsayısı
S_{ae}	: Yatay elastik tasarım spektral ivmesi
S_{ae}^{DD-1}	: En büyük deprem yer hareketi seviyesinde %5 sönüm için yatay spektral ivme
S_{ae}^{DD-2}	: Tasarım deprem yer hareketi seviyesinde %5 sönüm için yatay spektral ivme
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
S_{DS}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
S_s	: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
SRSS_{Ort(Maks)}	: Elastomer yalıtım birimlerinde meydana gelen SRSS yerdeğiştirme değerlerinin maksimumlarının ortalaması
SRSS_{Maks}	: Elastomer yalıtım birimlerinde meydana gelen SRSS yerdeğiştirme değerlerinin maksimumu
t	: Tek bir elastomer katmanın kalınlığı
T_D	: Deprem yalıtımlı binanın tasarım yerdeğiştirmesi seviyesinde etkin titreşim periyodu
T_M	: En büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodu
T_r	: Elastomer yalıtım biriminin toplam elastomer kalınlığı
T_{iso}	: İzolatörlü sistem periyodu
T_{YY}	: Üstyapının Y-Y doğrultusundaki hakim titreşim periyodu
T_{XX}	: Üstyapının X-X doğrultusundaki hakim titreşim periyodu
U₁	: Link elemanın birincil eksen
U₂	: Link elemanın ikincil eksen
U₃	: Link elemanın üçüncül eksen
U_{2,Maks}	: Link elemanı ikincil eksen doğrultusunda oluşan maksimum yerdeğiştirme
U_{3,Maks}	: Link elemanı ikincil eksen doğrultusunda oluşan maksimum yerdeğiştirme
u	: Sönümleyicinin bağlı olduğu katlar arasındaki görelî yerdeğiştirme
u_D	: Sönümleyicide oluşan maksimum yerdeğiştirme

V	: Sönümleyicinin bağlı olduğu katlar arasındaki göreceli hız
$V_{D,Üst}$	: Tasarım deprem yer hareketi düzeyi DD-2 için hesaplanan üstyapıya etkiyen kuvvet
$V_{M,Alt}$	: En büyük deprem yer hareketi düzeyi DD-1 için hesaplanan üstyapıya etkiyen kuvvet
$V_{s,30}$	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı
Q	: Hareketli yük
W	: Toplam ağırlık
W_d	: Yalıtım birimi tarafından tüketilen enerji (kuvvet yerdeğiştirme eğrisinin içinde kalan alan)
α	: Viskoz sıvı sönümleyici hız üsteli
β_e	: Yalıtım birimi etkin sönüm oranı
λ_{ae}	: Yaşlanma ve çevresel etkiler çarpanı
λ_{deney}	: Yükleme hızı ve ısınma gibi etkiler çarpanı
λ_{spek}	: Üretimdeki değişkenlikler nedeni ile kullanılacak olan çarpan
η	: Sönüm ölçeklendirme katsayısı
η_{bi}	: İ'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
$\gamma_{c,E}$	: DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi etkisi altında oluşan basınçtan meydana gelen birim şekildeğiştirme
$\gamma_{c,st}$	: Basınçtan meydana gelen açısal şekildeğiştirme
$\gamma_{r,st}$	: Yalıtım birimi üst ve alt plakaları arasındaki göreceli dönmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme
$\gamma_{s,E}$	: DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi etkisi altında oluşan yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme
$\gamma_{s,st}$	: Deprem dışındaki diğer etkilerden dolayı (genleşme, rüzgar vb.) oluşacak yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen açısal şekildeğiştirme
Δs	: Yatay yüklemekten meydana gelen yatay yerdeğiştirme miktarı
ζ_e	: DD-1 veya DD-2 deprem yer hareketi düzeyindeki yalıtım birimi için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi
ζ_{izo}	: DD-1 veya DD-2 deprem yer hareketi düzeyindeki yalıtım sistemi için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi
ζ_{vss}	: Viskoz sıvı sönümleyiciler ile oluşturulan enerji sönümleme sistemi için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi
τ_{yp}	: Kurşun malzemenin kayma akma gerilmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Pasif enerji sönümleme sistemlerinin sınıflandırılması.	9
Çizelge 3.1 : Harita spektral ivme katsayıları.....	24
Çizelge 4.1 : KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımında kullanılan alt ve üst limit değerleri.	34
Çizelge 4.2 : KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ve P_{K1} yükü.....	37
Çizelge 4.3 : KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ve P_{K2} yükü.....	39
Çizelge 4.4 : Analizler için seçilen deprem kayıt bilgileri.	45
Çizelge 4.5 : Deprem ivme kayıtlarının analizi ve KÇE deprem yalıtım birimi yerdeğiştirmeleri.	51
Çizelge 4.6 : X-X ve Y-Y doğrultuları kat ivmeleri.....	52
Çizelge 4.7 : Taban kesme kuvveti, kat kesme kuvvetleri ve V/W oranı.....	57
Çizelge 4.8 : Üstyapı kat yerdeğiştirmeleri ve görelı kat ötelemeleri.	57
Çizelge 4.9 : Üstyapı burulma düzensizliği (A1) kontrolü.....	58
Çizelge 5.1 : Tip-1 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ($1.4G+1.6Q$) ve P_{K1} yükü.	65
Çizelge 5.2 : Tip-1 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ($1.2G+Q\pm E$) ve P_{K2} yükü.	66
Çizelge 5.3 : Tip-2 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ($1.4G+1.6Q$) ve P_{K1} yükü.	70
Çizelge 5.4 : Tip-2 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ($1.2G+Q\pm E$) ve P_{K2} yükü.	71
Çizelge 5.5 : TBDY-2018 üstyapı performans hedefine göre R ve D katsayıları.	79
Çizelge 5.6 : Deprem ivme kayıtlarının analizi ve KÇE deprem yalıtım birimi yerdeğiştirmeleri.	80
Çizelge 5.7 : X-X ve Y-Y doğrultuları kat ivmeleri.....	80
Çizelge 5.8 : Taban kesme kuvveti, kat kesme kuvvetleri ve V/W oranı.....	83
Çizelge 5.9 : Üstyapı kat yerdeğiştirmeleri ve görelı kat ötelemeleri.	83
Çizelge 5.10 : Üstyapı burulma düzensizliği (A1) kontrolü.....	84



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Serbest salınım genliklerinin doğal sönüm etkisi ile azalışı.	6
Şekil 2.2 : Aktif enerji sönümleme sistemlerinin çalışma prensibi.	7
Şekil 2.3 : Yarı-aktif enerji sönümleme sistemlerinin çalışma prensibi.	8
Şekil 2.4 : Pasif enerji sönümleme sistemlerinin çalışma prensibi.	8
Şekil 2.5 : Metalik XADAS sönümleyici ve deneysel davranışı [7].	10
Şekil 2.6 : Burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) çalışma mekanizması [8].	10
Şekil 2.7 : Sürtünme esaslı sönümleyici ve deneysel davranışı [9,10].	11
Şekil 2.8 : Visko-elastik sönümleyici ve histeretik davranışı [11].	12
Şekil 2.9 : Viskoz sıvı sönümleyicilerin yapısı [14].	13
Şekil 2.10 : Lineer, non-lineer VSS kuvvet-deplasman ilişkisi [17].	14
Şekil 2.11 : Diyagonal bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.	15
Şekil 2.12 : Chevron bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.	16
Şekil 2.13 : Toggle-Brace bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.	16
Şekil 2.14 : Scissor-Jack bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.	17
Şekil 2.15 : Periyot artışı ile ivmenin & sönüm artışı ile deplasmanın azalması [20].	18
Şekil 2.16 : Temel ankastre yapı ve deprem yalıtımlı yapı davranışları [21].	18
Şekil 2.17 : Deprem yalıtım birimlerinin sınıflandırılması.	19
Şekil 2.18 : Elastomer deprem yalıtım birimlerinin karşılaştırılması [23].	20
Şekil 2.19 : KÇE yapısı ve tipik kuvvet-yerdeğiştirme davranışı [24].	20
Şekil 3.1 : Tez kapsamında çalışılacak yapı için belirlenen konum.	23
Şekil 3.1 : Elastik tasarım ivme spektrumları.	24
Şekil 3.2 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının zemin kat mimari planı.	25
Şekil 3.3 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının normal kat mimari planı.	25
Şekil 3.4 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının çatı katı mimari planı.	26
Şekil 3.5 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının zemin + normal katlar taşıyıcı sistem planı.	27
Şekil 3.6 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının çatı katı taşıyıcı sistem planı. .	27
Şekil 3.7 : TS-498 (Eylül, 2021) karakteristik kar yükü değerleri.	29
Şekil 3.8 : Bina kullanım sınıfının ve bina önem katsayısının belirlenmesi.	30
Şekil 3.9 : Bina yükseklik sınıfının belirlenmesi.	31
Şekil 3.10 : Üstyapı performans hedefinin belirlenmesi.	31
Şekil 3.11 : Deprem yalıtım sistemi ve altyapı performans hedefinin belirlenmesi..	31
Şekil 4.1 : KÇE deprem yalıtım birimleri için önerilen alt ve üst limit çarpan değerleri.	33
Şekil 4.2 : Hedef spektrumun siteye tanıtılması.	43
Şekil 4.3 : Deprem kaydı aramasında kullanılan parametreler.	44
Şekil 4.4 : Ölçeklendirilmiş kayıtlar ile elde edilen ortalama ivme spektrumu.	46
Şekil 4.5 : Ölçeklendirilmiş kayıtlar ile elde edilen ortalama yerdeğiştirme spektrumu.	46
Şekil 4.6 : Tanımlanmış bir deprem kaydı örneği.	47

Şekil 4.7 : Tanımlanan diğer deprem kayıtları.	47
Şekil 4.8 : Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için oluşturulan “Load Case” örneği.	48
Şekil 4.9 : FNA için oluşturulan sismik kütle yüklemesi ve rampa fonksiyonu.	48
Şekil 4.10 : FNA analizleri yapılan modal damping tanımlamaları.	49
Şekil 4.11 : Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için oluşturulan yük birleşimleri.	50
Şekil 4.12 : KÇE deprem yalıtım birimleri için yapılan U_1 , U_2 ve U_3 tanımlanmaları.	50
Şekil 4.13 : X-X ve Y-Y doğrultusu için hesaplanan kat ivmeleri.	52
Şekil 4.14 : X-X doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.	53
Şekil 4.15 : Y-Y doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.	53
Şekil 4.16 : DD-2 kompozit ivme spektrumunun oluşturulması.	54
Şekil 4.17 : DD-2 kompozit ivme spektrumunun analiz programına tanımlanması.	55
Şekil 4.18 : X-X doğrultusu için yapılan response spectrum analizi load case tanımlaması.	55
Şekil 4.19 : Y-Y doğrultusu için yapılan response spectrum analizi load case tanımlaması.	56
Şekil 4.20 : Mod birleştirme analizleri için oluşturulmuş yük birleşimleri.	56
Şekil 4.21 : Üstyapı kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.	59
Şekil 4.22 : X-X doğrultusu görel kat ötelemelerinin karşılaştırılması.	59
Şekil 4.23 : Y-Y doğrultusu görel kat ötelemelerinin karşılaştırılması.	60
Şekil 5.1 : KÇE Deprem yalıtım birimlerinin tipleştirilmesi.	61
Şekil 5.2 : Deprem yalıtım birimleri ve VSS sistemi tarafından sağlanacak toplam etkin sönüm yüzdesi hedefinin belirlenmesi.	73
Şekil 5.3 : Viskoz sıvı sönümleyicilerin yerleştirileceği alanlar.	74
Şekil 5.4 : X-X ve Y-Y doğrultusu için hesaplanan kat ivmeleri.	81
Şekil 5.5 : X-X doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.	82
Şekil 5.6 : Y-Y doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.	82
Şekil 5.7 : Üstyapı kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.	85
Şekil 5.8 : X-X doğrultusu görel kat ötelemelerinin karşılaştırılması.	86
Şekil 5.9 : Y-Y doğrultusu görel kat ötelemelerinin karşılaştırılması.	86
Şekil A.1 : 3126-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.	96
Şekil A.2 : 3126- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.	96
Şekil A.3 : 4616- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.	97
Şekil A.4 : 4616- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.	97
Şekil A.5 : 4625- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.	98
Şekil A.6 : 4625- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.	98
Şekil A.7 : RSN1198-CHICHI yerdeğiştirme orbiti-1.	99
Şekil A.8 : RSN1198-CHICHI yerdeğiştirme orbiti-2.	99
Şekil A.9 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-1.	100
Şekil A.10 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-2.	100
Şekil A.11 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-1.	101
Şekil A.12 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-2.	101
Şekil A.13 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-1.	102
Şekil A.14 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-2.	102
Şekil A.15 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.	103
Şekil A.16 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.	103
Şekil A.17 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.	104
Şekil A.18 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.	104

Şekil A.19 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-1.....	105
Şekil A.20 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-2.....	105
Şekil A.21 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğiştirme orbiti-1.....	106
Şekil A.22 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğiştirme orbiti-2.....	106
Şekil A.23 : 3126-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.....	107
Şekil A.24 : 3126-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.....	107
Şekil A.25 : 4616-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.....	108
Şekil A.26 : 4616-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.....	108
Şekil A.27 : 4625-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.....	109
Şekil A.28 : 4625-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.....	109
Şekil A.29 : RSN1198-CHICHI yerdeğiştirme orbiti-1.....	110
Şekil A.30 : RSN1198-CHICHI yerdeğiştirme orbiti-2.....	110
Şekil A.31 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-1.....	111
Şekil A.32 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-2.....	111
Şekil A.33 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-1.....	112
Şekil A.34 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-2.....	112
Şekil A.35 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-1.....	113
Şekil A.36 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-2.....	113
Şekil A.37 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.....	114
Şekil A.38 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.....	114
Şekil A.39 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.....	115
Şekil A.40 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.....	115
Şekil A.41 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-1.....	116
Şekil A.42 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-2.....	116
Şekil A.43 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğiştirme orbiti-1.....	117
Şekil A.44 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğiştirme orbiti-2.....	117



YÜKSEK SİSMİK TALEPLERE MARUZ YAPILARDA SİSMİK YALITIM VE VİSKOS SÖNÜMLEME SİSTEMLERİNİN PERFORMANS İNCELEMESİ

ÖZET

Bu tez, yüksek sismik taleplere maruz kalan yapılarda, özellikle de yakın-fay kaynaklı yer hareketlerinden etkilenen bölgelerde, deprem yalıtım sistemleri ile pasif enerji sönmüleyici sistemlerin birlikte kullanımının etkinliğini ve faydalarını incelemektedir. Yakın-fay depremleri; ani hız atımları, yüksek ivme genlikleri ve belirgin yönelim etkileriyle karakterize olup, yapılarda yeterli deprem performansın sağlanmasında önemli zorluklar yaratmaktadır. Çalışma, deprem yalıtım birimleri ile viskoz sıvı sönmüleyicilerin eşzamanlı kullanımının, yalıtım birimi boyutlandırmasını nasıl etkilediğini ve faya yakın, yüksek sismik taleplerin olduğu bölgelerde bulunan yapıların deprem performansı üzerine etkilerini araştırmaktadır.

Çalışma, Türkiye'nin sismik açıdan aktif şehirlerinden biri olan Erzincan'da yer alan ve Kuzey Anadolu Fay Hattı'na (KAF) yaklaşık 3 kilometre mesafede konumlanan betonarme bir ofis binası etrafında şekillenmektedir. Üstyapının tasarımında DD-2 yer hareketi düzeyinde "Sınırlı Hasar" (SH) performans hedefini dikkate alınmıştır. Bina; deprem yalıtım birimi ve enerji sönmüleyicilerin uygulandığı bir bodrum kat, zemin kat, dokuz normal kat ve bir çatı katından oluşmaktadır. Yapı konumundaki deprem etkileri, Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH) üzerinden sahaya özgü parametreler (yerel zemin sınıfı, yaklaşık koordinatlar vb.) dikkate alınarak değerlendirilmiş ve DD-1, DD-2 deprem yer hareketi seviyelerine ait elastik tasarım ivme spektrumları elde edilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, örnek yapı detaylı olarak tanıtılmıştır. Bu kapsamda, TBDY-2018'e göre yapının deprem önem katsayısı, deprem tasarım sınıfı, bina yükseklik sınıfı gibi sınıflandırmaları yapılmış ve hem üstyapı hem de altyapı için sağlanması gereken performans seviyeleri belirlenmiştir. Yapıda kullanılan beton (C35/45) ve donatı çeliği (S420) özellikleri, ulusal standartlara uygun olarak tanımlanmıştır. Ölü ve hareketli yük hesapları, Türk standartları ve TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası'nın kaynakları referans alınarak titizlikle yapılmıştır. Sabit yükler, kar yükü, buz yükü, cephe yükleri ve iç bölme duvar yükleri detaylı şekilde hesaplanmış ve yapı modeline girilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez çalışması kapsamında ele alınan ilk tasarım senaryosu gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda yapı, viskoz sıvı sönmüleyicilerden oluşturulan sönmüleme sistemi olmadan, yalnızca KÇE deprem yalıtım birimleri ile tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Tüm hesaplamalar (şekil değiştirme sınırları ve düşey kararlılık kontrolleri dâhil) yalıtım birimlerin alt, nominal ve üst sınır mekanik özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Hedeflenen yalıtım birimi yer değiştirmesi, DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde eşdeğer deprem yükü analizlerinden elde edilen yerdeğiştirme talebiyle uyumlu olacak şekilde iteratif olarak belirlenmiştir.

Yakın-fay karakteristik etkilerini içeren on bir adet deprem kaydı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinde kullanılmak üzere dikkatlice seçilmiştir. Bu kayıtlar, yapı konumu için elde edilen elastik tasarım ivme spektrumu ve yönetmelik kuralları dikkate alınarak basit ölçekleme yöntemi ile ölçeklendirilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları, yalıtım birimi tasarımları ve performanslarının (yerdeğiştirme kapasitelerinin) değerlendirilmesinde için kullanılmıştır. Üstyapı deprem performansının değerlendirilmesinde ise, DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde kompozit yatay ivme spektrumları oluşturulmuş ve mod birleştirme analizleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak üstyapı için etkin deprem yükü analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve deprem performansının belirlenmesinde tüm sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, tez çalışması kapsamında belirlenen ikinci tasarım senaryosu analiz edilmiştir. Bu senaryoda yapı, Kurşun Çekirdekli Elastomer (KÇE) deprem yalıtım birimleri ile oluşturulan bir deprem yalıtım sistemi ve Viskoz Sıvı Sönümleyiciler (VSS) ile oluşturulan enerji sönümleme sistemi ile donatılmıştır. Eksenel yük gereksinimlerine göre iki farklı yalıtım birimi tipi tanımlanmış ve bodrum katta uygun şekilde yerleştirilmiştir. Viskoz sıvı sönümleyicilerin tasarımı, yapı için hedeflenen toplam sönüm oranı sağlanacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, spektral deplasmanların azaltılması için gerekli efektif sönüm oranı hesaplanmış ve bu orana karşılık gelen sönüm katsayıları belirlenmiştir. Diyagonal, chevron, toggle-brace ve scissor-jack gibi çeşitli sönümleyici bağlantı konfigürasyonları arasından, modellenmesi kolay olan diyagonal bağlantı tipi tercih edilmiştir. Dördüncü bölümde kullanılan analiz yöntemleri bu senaryo için de uygulanmıştır. Deprem yalıtım birimi tasarım ve kontrolleri gerçekleştirilmiş, ardından aynı deprem kayıtlarıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Son olarak DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde modal analizler, etkin deprem yükü analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmış ve kat kesme kuvvetleri, taban kesme kuvveti gibi deprem talepleri elde edilmiştir.

Altıncı bölümde, iki tasarım senaryosunun karşılaştırması ve yorumlanması yapılmıştır. Sonuçlar, KÇE yalıtım birimleri ile VSS sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemde belirgin bir performans artışı olduğunu göstermektedir. Bu hibrit sistem; yalıtım birimi deplasman taleplerini azaltmış, kat kesme kuvvetlerini ve göreceli kat ötelemelerini düşürmüştür. VSS'ler, özellikle ani hız atımlarının olduğu yakın-fay yer hareketleri altında yapının enerji sönümlemesine ciddi katkı sağlamıştır. Artan efektif sönüm oranı ve doğal periyottaki uzama sayesinde, üstyapı deprem kuvvetleri azalmıştır. Ayrıca, VSS kullanımı yalıtım birimi boyutlarının küçülmesini ve tasarım optimizasyonu sağlamıştır. Bu sayede deprem yalıtım birimi adet maliyetlerinde azalma sağlanabilmiştir.

Bu tezde elde edilen bulgular, yüksek sismik taleplerin olduğu bölgelerde yer alan yapılarda deprem yalıtımı ile pasif enerji sönümleme sistemlerinin beraber kullanımının önemini vurgulamaktadır. Tezde yüksek sismik taleplerin olduğu bölgelerde üstyapı deprem performans hedefinin yalnızca deprem yalıtım birimleri ile sağlanmasının oldukça zor olabileceğinden, enerji sönümleme sistemleri ile birlikte kullanıldığında ise yapısal davranışın ciddi şekilde iyileştirildiği ve deprem performansının sağlanabildiği vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, deprem yalıtımı ve pasif enerji sönümleme sistemlerinin birlikte kullanılmasının, üstyapı deprem taleplerini ciddi ölçüde azaltarak yalıtım birimi tasarımını mümkün kıldığını ve tasarımı daha verimli hale getirdiğini

göstermektedir. Bu çalışmada benimsenen hibrit tasarım yaklaşımı, deprem talebi yüksek bölgelerde çalışan mühendisler için pratik, etkili bir çözüm sunmakta ve modern depreme dayanıklı yapı tasarımı konularına katkı sağlamaktadır.





PERFORMANCE EVALUATION OF SEISMIC ISOLATION AND VISCOUS DAMPING SYSTEMS IN STRUCTURES SUBJECTED TO HIGH SEISMIC DEMANDS

SUMMARY

This thesis investigates the effectiveness and benefits of combining seismic isolation systems with passive energy dissipation mechanisms in structures subjected to high seismic demands, particularly those arising from near-fault ground motions. Such ground motions are characterized by sudden velocity pulses, high acceleration amplitudes, and strong directional effects that pose significant challenges to achieving adequate seismic performance. The study focuses on how the simultaneous use of seismic isolators and damping devices influences the sizing of isolators and improves the overall seismic performance of buildings located in active earthquake zones, with a particular emphasis on near-fault regions.

The study revolves around a mid-rise reinforced concrete office building located in Erzincan, a seismically active city in Turkey situated approximately 3 kilometers from the North Anatolian Fault (NAF). The building is designed to meet the Limited Damage (LD) performance objective under the DD-2 (Design Basis Earthquake) level of ground motion. The building consists of a basement level allocated for isolation and damping devices, a ground floor, nine regular floors, and a roof level. The seismic hazard at the site was assessed based on the Turkish Earthquake Hazard Map using site-specific parameters (local soil class, approximate coordinates of the location etc.), and elastic design acceleration spectras for both DD-1 and DD-2 levels were gathered from there.

The third chapter of the thesis presents a comprehensive overview of the case study structure. It includes a detailed classification of the structure under TBEC-2018, covering aspects such as the building's seismic importance category, seismic design class, building height class, and expected performance levels for both the superstructure and substructure. Material properties of concrete (C35/45) and reinforcement steel (S420) were defined according to national standards. Accurate dead and live load calculations were performed by referencing Turkish standards and official source documents of TMMOB Chamber of Civil Engineers. Gravity loads, snow loads, ice loads, facade loads, and interior wall loads were calculated in detail and applied to the structural model carefully.

In the fourth chapter, the first design scenario is analyzed. The building is designed and analyzed with only LRBs as the seismic protective system. All calculations, including deformation limits and vertical stability checks, were performed under both gravity and seismic combinations using upper, nominal and lower bound isolator properties. Target isolator displacement was determined through iteration to ensure compatibility with the displacement demand from DD-1 level equivalent lateral force analyses.

Eleven near-fault earthquake records that reflect typical pulse-like behavior were carefully selected for nonlinear time history analysis (NLTHA). After the selections, these records were scaled based on the elastic design spectrum of the site using a simple scaling method. The results of the NLTHA were used to verify isolator performances (deformation capacities) and estimate the dynamic response of the structure. For evaluating the superstructure's performance, composite lateral acceleration spectra were generated for DD-2 level, and modal response spectrum analyses were conducted using the spectra. In addition, equivalent seismic load analysis and nonlinear time history analyses were performed for the superstructure, and all results were evaluated collectively to assess the seismic performance.

In the fifth chapter, the second design scenario is introduced, in which the building is equipped with Lead Rubber Bearings (LRBs) for seismic isolation and Fluid Viscous Dampers (FVDs) for additional energy dissipation. Two isolator types were defined based on axial load requirements, and their locations were distributed throughout the basement floor plan. Additionally, the design of the FVDs was carried out to ensure adequate supplemental damping. The effective damping ratio required to reduce spectral displacements was calculated, and damping coefficients were determined. Among various damper connection configurations discussed (diagonal, chevron, toggle-brace, and scissor-jack) the diagonal connection type was selected for the study due to its ease of modelling. The same methodology was applied: isolator sizing, deformation checks and vertical stability checks and NLTHA using the same set of ground motions. Modal analyses for DD-2 level of earthquake were also repeated to determine and compare the seismic demands on the superstructure in the presence of FVDs. In addition, equivalent seismic load analysis and nonlinear time history analyses were performed for the superstructure, and all results were evaluated collectively to assess the seismic performance.

The sixth chapter presents a detailed comparison of the two design scenarios. The results show a clear performance improvement in the hybrid system using both LRBs and FVDs. The combined system reduced isolator displacement demands, improved force distribution across structural elements, and lowered story shear forces and inter-story drifts but more importantly, it made possible to design the structure for required performance level. The FVDs significantly contributed to energy dissipation, especially under near-fault ground motions, where sudden acceleration pulses are prominent. The increase in effective damping and period shift helped reduce the seismic forces acting on the superstructure. Moreover, the presence of FVDs led to a decrease in the required isolator sizes, resulting in potential cost savings and optimization in the design process. Vertical stability requirements were better satisfied due to reduced lateral displacements in the hybrid system. From a structural and earthquake engineering perspective, the findings of this thesis emphasize the importance of integrating seismic isolation and passive energy dissipation in the seismic design of buildings located near-fault zones. By demonstrating the advantages of a hybrid protective approach, this research contributes to performance-based seismic design practices. It provides guidance on selecting, designing, and integrating both isolators and dampers into structural systems.

The thesis further advocates for the careful selection of ground motion records when evaluating near-fault effects and highlights the sensitivity of superstructure response to damping ratios, isolator properties, and system configuration. It underlines that while seismic isolation alone provides substantial benefits, its synergy with damping systems significantly enhances structural behavior under severe seismic demands.

In conclusion, the study validates that the combined use of LRBs and FVDs leads to enhanced seismic performance, more efficient isolator design, and reduced structural demands. The hybrid design approach adopted in this study offers a practical and efficient solution for engineers working in seismically active regions. It serves as a reference for integrating advanced protective systems in modern seismic design, ultimately contributing to safer and more resilient buildings in earthquake-active areas.





1. GİRİŞ

Türkiye nüfusunun büyük bir kısmı Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF), Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) ve Batı Anadolu'daki geniş açılma rejimleri üzerinde veya bu fay alanlarına oldukça yakın konumlarda bulunmaktadır [1]. Dolayısıyla, depremler ülkemiz için sürekli ve ciddi bir afet riski teşkil etmektedir.

Tarihsel veriler, Türkiye'de hemen her yüzyılda büyük yıkıcı depremlerin meydana geldiğini ve bu depremler sonucunda ciddi can ve mal kayıplarının yaşandığını açıkça göstermektedir. 1939 Erzincan Depremi, 1999 Gölcük Depremi ve son olarak 6 Şubat 2023'te ardışık olarak gerçekleşen Kahramanmaraş depremleri, ülkemizin deprem gerçeğiyle ne denli iç içe olduğunu bir kez daha gözler önüne sermektedir. Özellikle 2023 Kahramanmaraş depremleri, büyüklükleri ve yıkıcı etkileri bakımından Türkiye tarihinin en ağır sonuçlar doğuran sarsıntılarının biri olmuş, on binlerce insanın hayatını kaybetmesine ve yüzbinlerce yapının ağır hasar almasına sebep olmuştur.

Deprem bölgelerindeki incelemeler, faya yakın alanlarda çok daha yoğun can ve mal kayıplarının yaşandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, literatürde "yakın-fay etkisi" olarak bilinen ve yapılar üzerinde hem yatay hem de düşey yönde büyük genlikli ivmeler oluşturan depremlerin önemini artırmaktadır. Bu tür etkiler, özellikle büyük yıkıcı depremler sırasında ani ivme değişimleri ve hız atımları, yapılarda ciddi deprem taleplerinin oluşmasına sebep olmakta ve hedeflenen deprem performans seviyelerine ulaşmayı zorlaştırmaktadır [2]. Bu bağlamda, aktif fay hatlarına yakın bölgelerde yapı güvenliğinin sağlanması, deprem mühendisliği açısından büyük bir meydan okuma oluşturmaktadır. Bu etkileri minimize etmek ve yapıların deprem performansını artırmak için geliştirilen modern mühendislik çözümleri arasında deprem yalıtım sistemleri ve enerji sönümleyici sistemler ön plana çıkmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, yüksek sismik taleplere sahip bölgelerde yer alan betonarme yapıların deprem yalıtım sistemleri ile pasif enerji sönümleme sistemlerinin birlikte kullanımının etkinliğini araştırmaktır. Çalışmada, kurşun çekirdekli elastomer (KÇE)

yalıtım birimleri ile viskoz sıvı sönümleyicilerin (VSS) birlikte kullanılması durumunda, hem üstyapı üzerindeki sismik taleplerin azaltılması hem de deprem yalıtım birimi tasarımının daha optimize hale getirilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, farklı senaryolar altında oluşturulan analizlerle yapı davranışı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

1.2 Tezin Katkısı

Bu tez, yüksek sismik taleplerin olduğu yapılarda deprem yalıtım sistemleri ile viskoz sıvı sönümleyicilerin entegre kullanımına yönelik uygulamalı literatür örneklerinden biridir. Yapılan analizler sonucunda, bu sistemlerin birlikte kullanımının yalıtım birimi yerdeğiştirme taleplerini azalttığı, kat kesme kuvvetlerini düşürdüğü ve üstyapının görelî kat ötelemelerini sınırladığı ortaya konmuştur. Ayrıca, ilave sönüm sayesinde yalıtım birimi boyutlandırmasında daha ekonomik ve verimli çözümler elde edilebildiği gösterilmiştir.

1.3 Tezin İçeriği

Tezin ikinci bölümünde, deprem enerjisinin yapılar üzerindeki etkileri, yapıların enerji sönümleme mekanizmaları ve bu enerjiyi kontrol altına almak amacıyla geliştirilen aktif, yarı-aktif ve pasif enerji sönümleme sistemleri detaylı biçimde incelenmiştir. Ardından pasif sönümleme sistemleri, çalışma prensiplerine göre (deplasman ve hız esaslı) sınıflandırılmış; her sınıfa ait yaygın kullanılan sönümleyici örneklerine kısaca yer verilmiştir. Devamında, bu tez kapsamında kullanılan ve hıza bağılı sönüm etkileri gösteren viskoz sıvı sönümleyicilerin (VSS) tarihsel gelişimi, fiziksel yapısı, çalışma prensibi, çeşitleri ve bağlantı konfigürasyonları açıklanmıştır. Son olarak, deprem yalıtım sistemlerinin temel çalışma prensipleri, yapılar üzerindeki etkileri ve farklı yalıtım birimi türleri özetlenmiş; tezde kullanılan kurşun çekirdekli elastomer (KÇE) yalıtım birimlerine dair bilgiler sunulmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde, analizlerde kullanılan betonarme ofis binasının mimari ve taşıyıcı sistem özellikleri, yapı malzemeleri, yük hesaplamaları ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında yapılan sınıflandırması detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca yapı konumu, elde edilen elastik tasarım ivme spektrumları ve taşıyıcı sistem düzeni ile ilgili bilgiler paylaşılmıştır.

Dördüncü bölümde, örnek yapı için oluşturulan birinci tasarım senaryosu kapsamında, yalnızca Kurşun Çekirdekli Elastomer (KÇE) yalıtım birimleri kullanılarak yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda viskoz sıvı sönümleyiciler sistem dışı bırakılmıştır. İzolatörlerin boyutlandırılması, şekil değiştirme sınırları ve düşey kararlılık kontrolleri yalıtım birimlerinin alt, nominal ve üst limit mekanik özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Deprem yalıtım sistemi, DD-1 düzeyindeki yakın-fay etkilerini içeren deprem kayıtları ile doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleriyle değerlendirilmiştir. Üstyapı performans hedefi ise, DD-2 düzeyinde oluşturulan kompozit yatay ivme spektrumlarıyla yapılan mod birleştirme analizleri, etkin deprem yükü analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile kontrol edilmiştir.

Beşinci bölümde, aynı yapı için oluşturulan ikinci tasarım senaryosu kapsamında, yapı KÇE yalıtım birimleri ile birlikte Viskoz Sıvı Sönümleyiciler (VSS) içeren hibrit bir sistemle tasarlanmıştır. Bu senaryoda, hedeflenen toplam sönüm oranı sağlanacak şekilde VSS tasarımı gerçekleştirilmiş, sönüm katsayıları belirlenmiş ve diyagonal bağlantı tipi tercih edilerek yapıya yerleştirilmiştir. Aynı yalıtım birimi tasarım süreci bu senaryoya da uygulanmış ve dördüncü bölümde kullanılan ölçeklendirilmiş yakın-fay deprem ivme kayıtları ile doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri tekrar edilmiştir.

Altıncı ve son bölümde, dördüncü ve beşinci bölümlerde elde edilen analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Son olarak yüksek sismik taleplerinin karşılanmasında, deprem yalıtım sistemleri ile pasif enerji sönümleme cihazlarının birlikte kullanılmasının yapısal performansa katkısı üzerine genel bir değerlendirme sunulmuştur.



2. SİSMİK ENERJİNİN SÖNÜMLENMESİ

Deprem enerjisi, yapıda farklı enerji türlerine dönüşür. Bu enerjiler, kinetik enerji, sönüm enerjisi, şekil değiştirme enerjisi ve histerik enerji şeklinde ifade edilebilir [3].

$$E_i = E_k + E_z + E_s + E_H \quad (2.1)$$

Denklemin 2.1'in sol kısmı depremin enerji talebini, sağ kısmı ise yapının enerji kapasitesi ifade etmektedir. Burada E_i input yani deprem enerjisini, E_k kinetik enerjiyi, E_z sönümlenen enerjiyi, E_s şekil değiştirme enerjisini ve E_H histerik enerjiyi ifade etmektedir. Deprem enerji talebinin karşılanabilmesi için yapının enerji kapasitesinin yüksek olması gerekir.

Konvansiyonel depreme dayanıklı tasarım felsefesinde, yapının enerji kapasitesinin büyük çoğunluğu yapısal taşıyıcı sistem elemanlarının deprem anında gerçekleştirdiği elastik ve elastik ötesi (plastik) deformasyonlardan doğan histerik enerjiden karşılanmaktadır. Bu da basitçe yapının deprem enerjisini hasar alarak harcayacağı/karşılayacağı anlamına gelir.

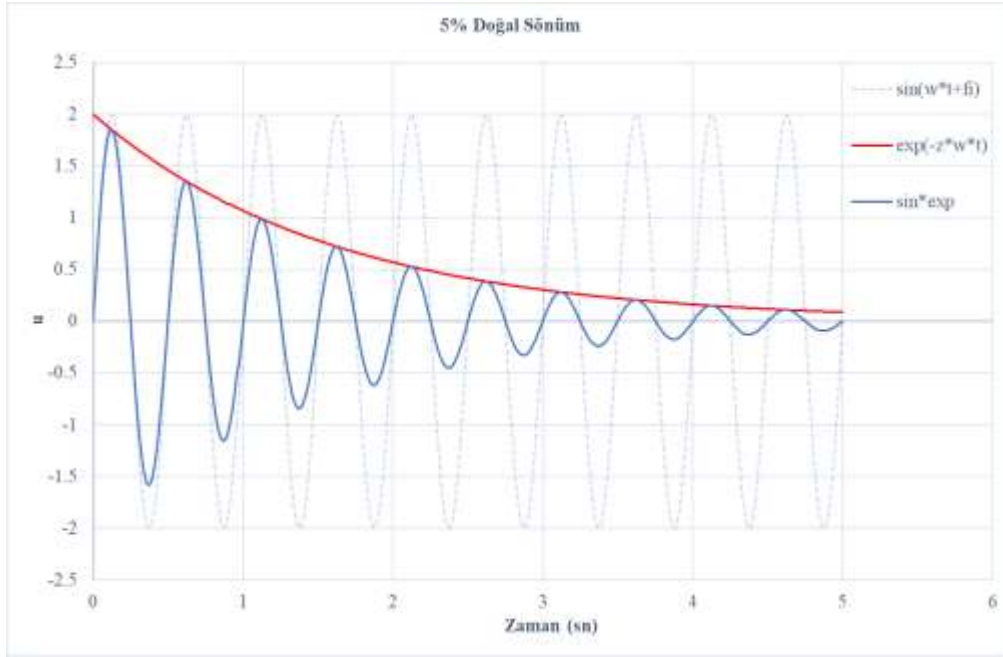
Ancak deprem yalıtım birimleri tasarlanan yapılarda E_H histerik enerjisi, taşıyıcı sistem elemanlarının büyük deplasmanlar yaparak hasar almasıyla değil; yalıtım birimlerinde meydana gelen ciddi kuvvet deplasman çevrimleri ile karşılanır. İzolatör kuvvet deplasman çevrimleri ne kadar geniş olursa, hareket sırasında sönümlenen histerik enerji miktarı da o kadar büyük olur.

Benzer şekilde, yapılar ek sönümleme sistemleri ile tasarlandığında ise yapının toplam enerji sönüm kapasitesi (E_z) artar. Bu sayede yapısal eleman hasarları minimize edilmiş olur.

2.1 Doğal (İçsel) Sönüm Kavramı

Depremin meydana gelmesi ile yayılan enerji yapılara ulaştığında, yapılar tarafından çeşitli etkiler ile tüketilmeye çalışılır. Bu tüketim mekanizmalarından birisi olan doğal veya diğer adıyla içsel sönüm, yapıda oluşan salınım ve deplasmanlar sırasında donatı ile beton arasındaki sürtünme kuvveti ve ısınmalar, yapısal olmayan elemanların

histerik hareketler yapması, deforme olması veya kırılması gibi çeşitli olaylar ile meydana gelmektedir [4]. Doğal sönümün etkisi Şekil 2.1 ile tarif edilmiştir.



Şekil 2.1 : Serbest salınım genliklerinin doğal sönüm etkisi ile azalışı.

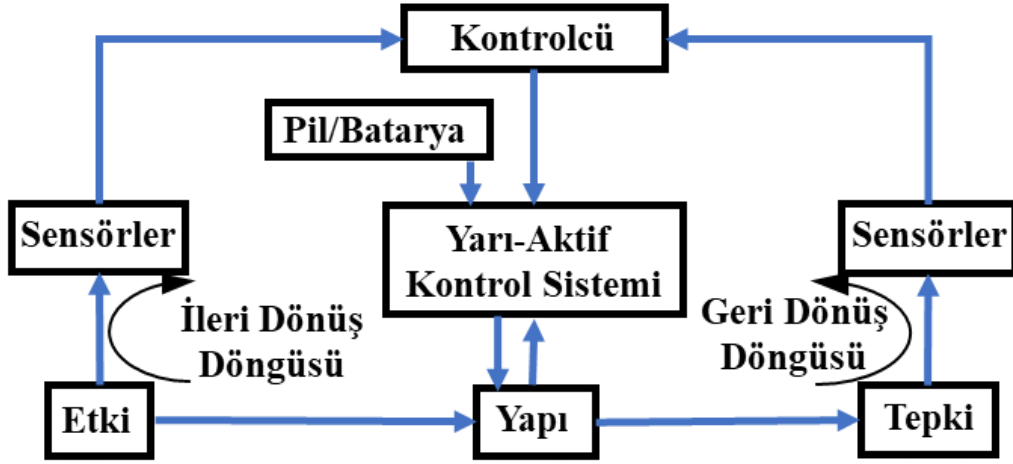
Doğal sönüm oranı, sabit yani belirli bir orandan ibaret değildir. Yapının taşıyıcı sistemine göre de değişiklik göstermektedir. Yapısal sistemin prefabrik, yerinde dökme betonarme, çelik, hafif çelik, ahşap vb. olmasına göre yapının doğal sönüm oranı değişmektedir. Ayrıca, yüksek enerjili depremler esnasında oluşan doğal sönüm oranı, daha düşük enerjili depremlerde aynı yapıda oluşan doğal sönüm oranından daha büyük olmaktadır. Özetle doğal sönüm oranı sabit değil, dinamik bir değerdir ve etkilere göre farklılık gösterir.

2.2 Enerji Sönümleme Sistemleri

“Enerji sönümleme sistemi” terimi, enerji sönümleme birimleri ile oluşturulan sistemleri ifade etmek için kullanılır. Bu sistemlerin temel amacı yapılara deprem etkisi ile gelen enerjiyi sönümlemek ve bu sayede yapılarda oluşabilecek potansiyel hasarları azaltmaktır.

Yeni inşa edilecek veya güçlendirme kapsamında deprem performansı iyileştirilecek yapılarda enerji sönümleme sistemlerine olan talep giderek artmaktadır. Yazılım ve bilişim teknolojisindeki ilerlemeler enerji sönümleme sistemlerinin yıllar içerisindeki tanınması sağladı. Enerji sönümleme sistemleri üzerinde yapılan akademik

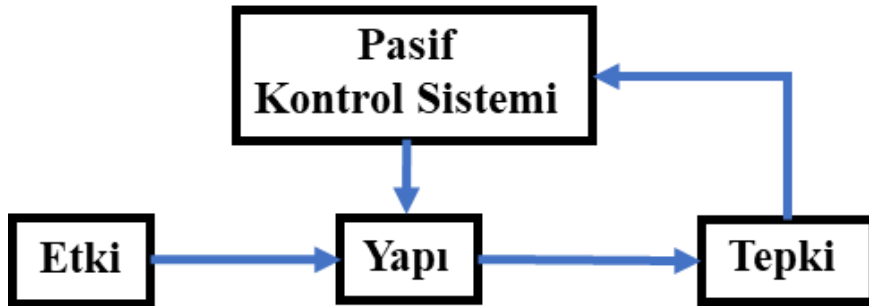
cihazların sönüm oranlarının aktif olarak kontrol edilebilmesine olanak sağlarlar [5]. Yarı-aktif enerji sönümleme sistemleri ile ilgili örnek şema Şekil 2.3 ile paylaşılmıştır.



Şekil 2.3 : Yarı-aktif enerji sönümleme sistemlerinin çalışma prensibi.

2.2.3 Pasif enerji sönümleme sistemleri

Pasif enerji sönümleme sistemleri çalışmak için herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar. Sistem tamamen mekanik olarak çalışır. Sistemde kullanılan sönümleme cihazının çalışma prensibine göre deprem anında yapıda oluşan görece deplasman veya hız değerlerine göre kuvvetler oluştururlar ve bağlı oldukları sistemin sönümünü artırırlar [5]. Pasif enerji sönümleme sistemleri ile ilgili örnek şema Şekil 2.4 ile paylaşılmıştır.



Şekil 2.4 : Pasif enerji sönümleme sistemlerinin çalışma prensibi.

Pasif enerji sönümleme sistemleri çalışma prensipleri göz önüne alınarak deplasmanlara bağlı sistemler, hıza bağlı sistemler ve diğer sistemler olarak sınıflandırılabilir. Tezin ana konusunun bir parçası olan viskoz sıvı sönümleyiciler (VSS), hıza bağlı sistemler altında kategorize edilmektedir.

Pasif enerji sönümleme sistemlerinin sınıflandırılmasının daha net anlaşılabilmesi için Çizelge 2.1 oluşturulmuştur.

Çizelge 2.1 : Pasif enerji sönümleme sistemlerinin sınıflandırılması.

Deplasmana Bağlı Sistemler	Hıza Bağlı Sistemler	Diğer Sistemler
Visko-Elastik Sönümleyiciler		Merkezlleme Sistemleri
Metalik Sönümleyiciler (ADAS)	Viskoz Sıvı Sönümleyiciler (VSS)	Ayarlı Kütle Sönümleyiciler
Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (BÖÇ) Sürtünme Esaslı Sönümleyiciler		

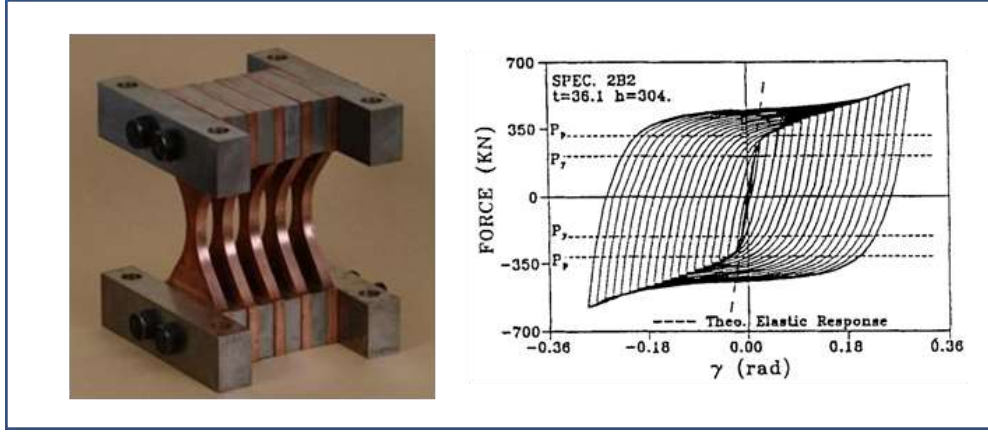
2.3 Deplasmana Bağlı Enerji Sönümleme Sistemleri

Deplasmana bağlı enerji sönümleme sistemlerinde kullanılan sönümleyici cihazlar, bağlantı noktaları arasındaki görelî yer değiştirmelere bağlı olarak enerjiyi sönümler. Söz konusu sönümleyiciler genellikle hareketin frekansından bağımsız olarak çalışır. Dolayısıyla çalıştıkları esnada, bağlı oldukları yapısal elemanlara ek kuvvetler aktarırlar. Bu ek kuvvetler çoğunlukla sismik aktiviteden kaynaklı oluşan iç kuvvetlerle aynı faz içerisinde olur. Bu sebeple sönümleyici cihazların bağlı olduğu yapısal sistem elemanlarında iç kuvvet kontrollerinin yapılması ve elemanların bu ek kuvvetler de dikkate alınarak tasarlanması/güçlendirilmesi oldukça kritik önem taşır.

2.3.1 Metalik sönümleyiciler (ADAS)

Deprem etkisiyle yapıya aktarılan enerjinin sönümlenmesinde kullanılan etkili mekanizmalardan biri, metal malzemelerin elastik olmayan (plastik) deformasyon kabiliyetidir. Bunun tipik bir örneği, XADAS (Added Damping and Stiffness) sistemi olarak bilinen X şeklindeki metalik sönümleyicilerdir [6].

Bu cihazlar, bağlı oldukları katlar arasındaki görelî yatay yer değiştirmeler esnasında devreye girer ve enerji sönümler. Metalik sönümleyiciler, düşük çevrimli yorulma dayanımları, çevresel sıcaklık değişimlerine karşı görece duyarsızlıkları ve kararlı histeretik davranışları sayesinde uzun ömürlü ve güvenilir sönümleme elemanları olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu sistemlerin patentli olduğundan bahsetmekte fayda vardır. XADAS sönümleyici görsel örneği ve harmonik etkiler altındaki tipik davranışı Şekil 2.5 ile paylaşılmıştır.



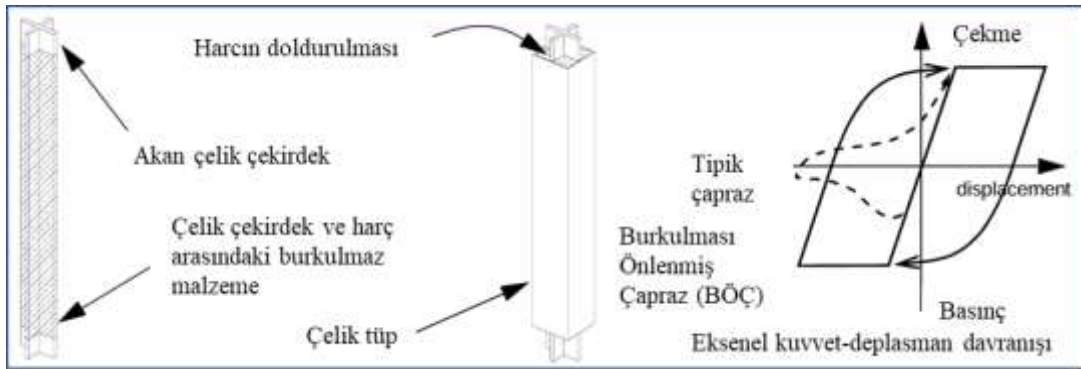
Şekil 2.5 : Metalik XADAS sönümleyici ve deneysel davranışı [7].

2.3.2 Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ)

Konvansiyonel çapraz elemanlar yapısal birer sigorta işlevi görmekte; basınç ve çekme etkileri altında akma noktasına ulaşarak enerji sönümlenmektedir. Ancak, basınç altında meydana gelen burkulma, ani rijitlik kaybına ve yapısal davranışın bozulmasına neden olur ve çaprazın enerji sönümleme kapasitesini önemli ölçüde sınırlandırır.

Burkulma probleminin üstesinden gelmek amacıyla geliştirilen Burkulması Önlenmiş Çaprazlar, genellikle düşük akma dayanımına sahip haç kesitli bir çelik çapraz elemanının, oldukça rijit bir çelik boru ile çevrelenmesiyle oluşturulur.

Örnek sönümleyici görseli ve tipik davranış eğrisi Şekil 2.6 ile paylaşılmıştır.



Şekil 2.6 : Burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) çalışma mekanizması [8].

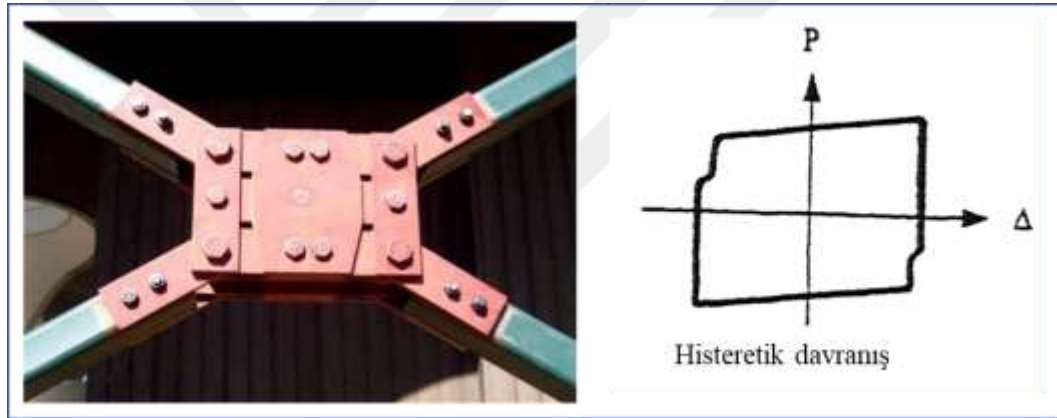
Çelik çapraz yüzeyine aderans önleyici özel bir malzeme uygulanır ve ardından çelik çapraz ile çelik boru arasındaki boşluk, çimento bazlı malzeme ile doldurulur. Eksenel yüklerin tamamı yalnızca çelik çapraz tarafından karşılanırken, dış tüp ve dolgu sistemi, burkulmayı önleyici bir kılıf görevi görerek cihazın çift yönlü enerji

sönümleme yeteneğini mümkün kılar. Bu tasarım yaklaşımı sayesinde daha kararlı ve yüksek sönümleme kapasiteli bir davranış sergilenir.

2.3.3 Sürtünme esaslı sönümleyiciler

Sürtünme esaslı sönümleyiciler, görelî hareket eden iki kısım arasında oluşan katı cisim sürtünmesi mekanizmasını kullanarak sismik enerji sönümleme gerçekleştirirler. Bu amaçla geliştirilen çeşitli sürtünme sönümleyici türleri, yapıların deprem etkilerine karşı performansını artırmak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar, genellikle çekme ve basınç yönlerindeki çevrimsel yüklemeler sırasında kayma davranışını zorlayarak enerji sönümleme sağlar. Oluşan histeretik döngüler çoğunlukla Coulomb sürtünmesi karakteristiğine benzer dikdörtgen şekillidir [6].

Örnek sönümleyici görseli ve tipik davranış eğrisi Şekil 2.7 ile paylaşılmıştır.



Şekil 2.7 : Sürtünme esaslı sönümleyici ve deneysel davranışı [9,10].

2.4 Hıza Bağlı Enerji Sönümleme Sistemleri

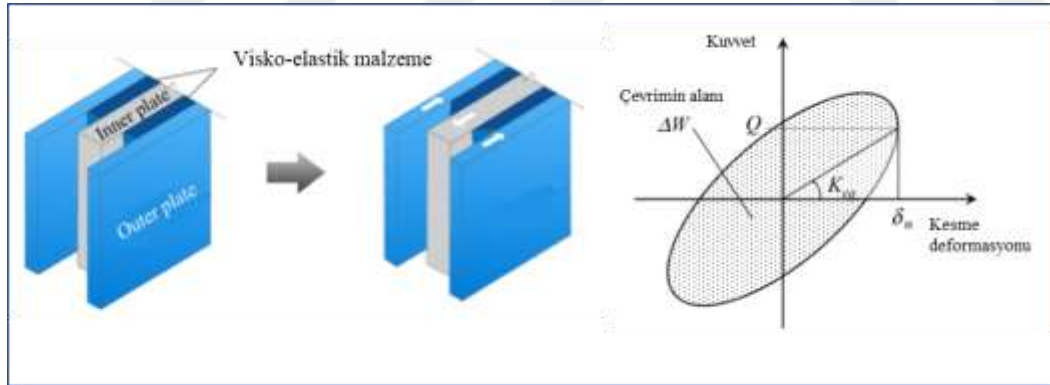
Hıza bağlı enerji sönümleme sistemlerinde kullanılan sönümleyici cihazlar, yapıdaki bağlantı noktaları arasında sismik aktivite esnasında oluşan görelî hız farkları ile orantılı olarak sönümleme gerçekleştirir. Hıza bağlı enerji sönümleyicilerin kuvvet-deplasman ilişkisi, hareketin frekansına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bağlı oldukları yapısal taşıyıcı sistem elemanlarına aktardıkları kuvvetler, genellikle sismik salınımdan kaynaklanan iç kuvvetlerle farklı fazlarda gerçekleşir. Dolayısıyla deplasmana bağımlı sönümleyicilerin aksine hıza bağlı sönümleyiciler, bağlı oldukları sistem çerçevesine ek rijitlik katmaz ve iç kuvvet oluşturmazlar [6].

Bu tür sönümleyiciler, özellikle rijitlik ve salınım periyotlarının kontrolünün önemli olduğu mühendislik tasarımlarında (örneğin deprem yalıtımlı yapıların tasarımında) tercih edilmektedir.

2.4.1 Visko-elastik sönümleyiciler

İlk olarak 1960'lı yıllarda yüksek yapıların rüzgar etkileri altındaki davranışının kontrol edilmesi amacıyla geliştirilen visko-elastik sönümleyiciler, ilerleyen yıllarda yapıların deprem performansının iyileştirilmesi amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır.

Visko-Elastik Sönümleyiciler, elastik ve viskoz davranış özelliklerini birlikte sergileyebilen enerji sönümleyici sistemlerdir. Çelik plakalar ve visko-elastik malzeme katmanlarının birleştirilmesi ile üretilirler. Üretimlerinde kullanılan visko-elastik malzemeler genellikle kopolimerler veya camsı yapıda olur. Bu malzemeler, kesme deformasyonu yoluyla enerji sönümleme kapasitesine sahiptir ve hem yer değiştirme hem de hıza bağımlı davranış gösterirler. Salınımlar esnasında sönümleyicide oluşan mekanik enerji ısıya dönüştürülür ve çevreye yayılır. Böylece sismik ya da rüzgar kaynaklı enerjinin bir kısmı sönümlenmiş olur.



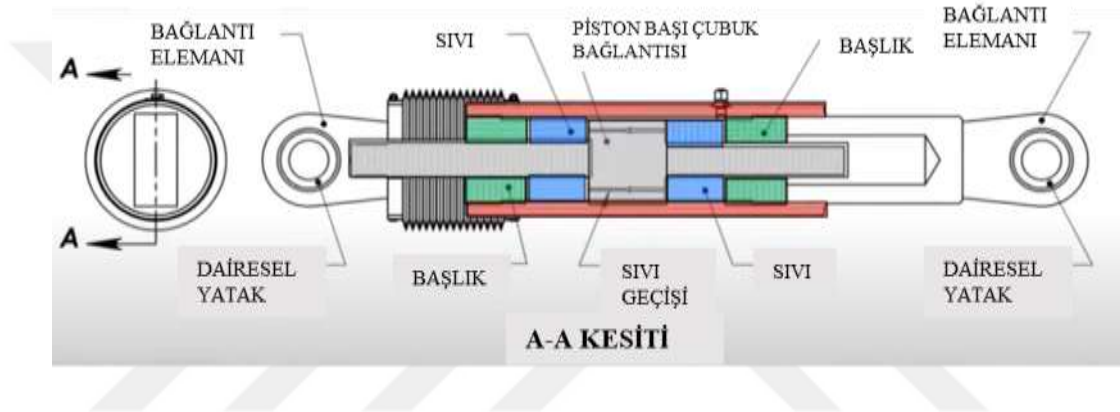
Şekil 2.8 : Visko-elastik sönümleyici ve histeretik davranışı [11].

Ancak visko-elastik sönümleyicilerin, rüzgar ve deprem etkilerine karşı kullanımı, viskoz sıvı sönümleyicilere kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Yine de bu sönümleyiciler, özellikle düşük ve orta şiddetteki dinamik etkiler altında yapı performansını artırma konusunda önemli bir alternatiftir.

2.4.2 Viskoz sıvı sönümleyiciler (VSS)

Viskoz sıvı sönümleyiciler (VSS) ilk olarak vinçlerde enerji sönümleme elemanları olarak geliştirilmiş, ardından askeri donanımlarda şok izolasyonu için yaygın olarak kullanılmışlardır [12,13]. Yirminci yüzyılın sonlarında bu cihazların yapılar için kullanılması düşünülmüş ve bu amaçla çeşitli bilimsel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Cihazlar ile gerçekleştirilen çalışmalar viskoz sıvı sönümleyicilerin yapılarda kullanımının önünü açmış ve geçmişten günümüze birçok yapı için tasarlanıp uygulanmıştır.

Viskoz sıvı sönümleyicilerin tipik yapısı Şekil 2.9 ile paylaşılmıştır.



Şekil 2.9 : Viskoz sıvı sönümleyicilerin yapısı [14].

Tipik bir viskoz sıvı sönümleyici içi boş bir silindir, bu silindirin içerisine doldurulan silikon -genelde- bazlı bir sıvı, hareket etkilerini cihaza taşıyan bir piston yapısı ve akümülatörden oluşur. Pistonun başı delikli yapıdadır. Piston harekete geçtiğinde silindirin içindeki sıvı, piston başındaki deliklerden geçmeye zorlanır. Sıvı bu deliklerden geçerken direnç kuvveti ve ısı oluşur. Hareket yönüne ters bu kuvvetler sayesinde enerjinin bir kısmı cihaz tarafından sönümlenmiş olur. Akümülatörün varlığı sayesinde, cihazın içerisindeki silikon bazlı sıvının sıkışmasından meydana gelecek olan yay benzeri tepki kuvveti engellenmiş olur [12]. Yapılan deneysel çalışmalar sırasında test edilen viskoz sıvı sönümleyici cihazda, 4Hz değerinden daha küçük doğal titreşim frekansına sahip kuvvetlerde herhangi bir rijitlik değerinin oluşumu görülmemiştir [12,13]. Üretim aşamasında yapılabilecek farklı akümülatör tasarımları ile bu doğal titreşim frekans eşiğini değiştirmek de mümkün olmaktadır.

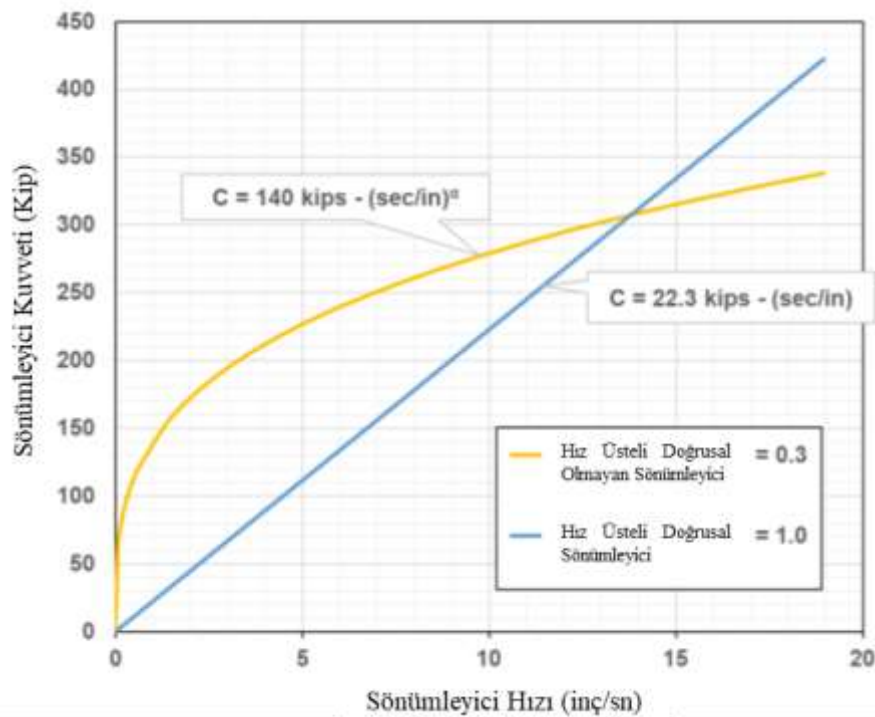
Yapılan çalışmalarda viskoz sıvı sönümleyicilerin oluşturduğu tepki kuvvetlerinin, yapının taşıyıcı elemanlarında deprem sırasında oluşan kesit tesirleri ile farklı

zamanlarda meydana geldiği belirlenmiştir. Kuvvetlerin yapıdaki deprem talepleri ile faz dışı olması sayesinde yapı elemanlarında cihaz sebepli ek bir zorlanma meydana gelmez. Bu durum viskoz sıvı sönümleyicilerin sadece hıza bağlı kuvvetler oluşturmalarının sağladığı benzersiz bir davranış avantajıdır [13].

Viskoz sıvı sönümleyicilerde oluşan tepki kuvveti denklemi, denklem 2.2 ile paylaşılmıştır.

$$F = C.V^a \quad (2.2)$$

Denklemdaki C sembolü sönüm katsayısını, V sembolü cihazın iki ucunda meydana gelen hız değerlerinin farkını, a ise hız üstel değerini ifade etmektedir. Denklemden de görülebileceği üzere cihazda oluşan tepki kuvveti sadece hız değişkenine bağlıdır. Sönüm katsayısı ve hız üsteli, cihazın tercih edilen tasarım şekline göre değişiklik göstermektedir [15]. Hız üstel değeri a, 1'e eşit olduğunda viskoz sıvı sönümleyici lineer olarak davranır. Ancak bu üstel 1'den farklı herhangi bir değer aldığında, cihazın davranışı non-linear olmaktadır [16]. Farklı hız üstellerinin cihazın kuvvet-deplasman davranışına olan etkisi şekil 2.7'de görülebilir.



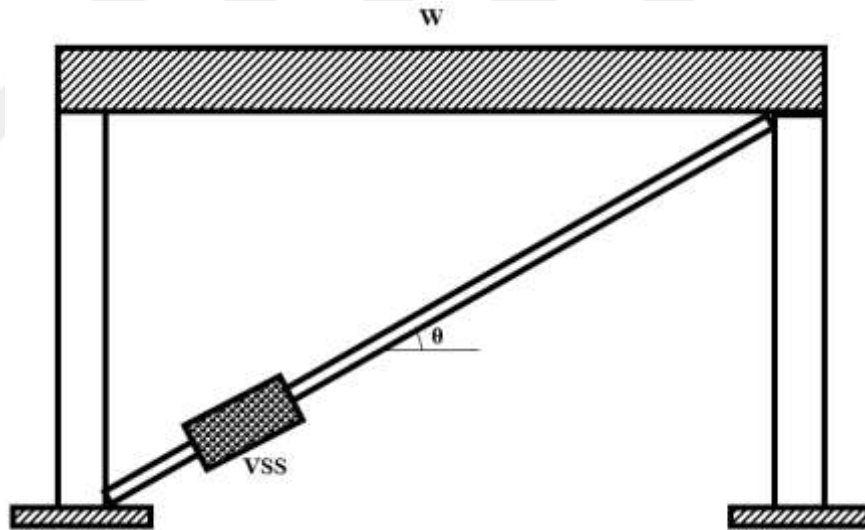
Şekil 2.10 : Lineer, non-linear VSS kuvvet-deplasman ilişkisi [17].

Yapıların deprem performansını arttırmak amaçlı tasarımlarda kullanılan viskoz sıvı sönümleyicilerin hız üstel değeri genellikle 0.25 ile 1 arasında tercih edilmektedir [15].

2.4.2.1 Viskoz sıvı sönümleyicilerin bağlantı konfigürasyonları

Viskoz sıvı sönümleyicilerde (VSS) kullanılan tasarım konfigürasyonları oldukça çeşitlidir. Bu kısımda, bağlantı tiplerinden en çok kullanılan 4 tanesi ele alınmıştır. Uygulanan her bağlantı tipinde, sönümleme cihazı eksenel rijitliği yüksek çelik elemanlar ile çerçeveye montaj edilir (Şekil 2.11). Çelik elemanların eksenel rijitliğinin yüksek olması çok kritiktir. Şayet bu elemanlarda eksenel yük altında plastik şekil değiştirmelerin meydana gelmesi durumunda, sönümleyici verimliliği olumsuz etkilenecektir.

Diyagonal bağlantı konfigürasyonda sönümleyici, montaj yapılacağı yapı çerçevesinin arasına eksenel rijitliği yüksek çelik elemanlar ile beraber çapraz biçimde yerleştirilir. Çelik elemanlar dışında herhangi bir ek bağlantı elemanı olmadığından, uygulaması en ekonomik sönümleyici konfigürasyonudur. Burada sönümleyici cihazın bakım ve kontrol gibi çalışmalarının kolaylığı açısından sönümleme cihazının, yere yakın kısmında konumlandırılması daha uygun olacaktır.



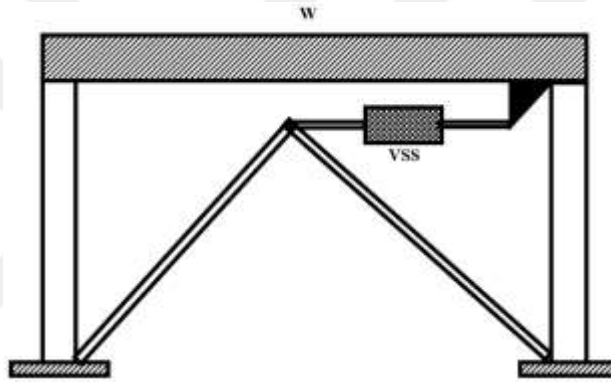
Şekil 2.11 : Diyagonal bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.

Ancak, sönümleyici pistonunun hareket kabiliyeti, bağlantı yapıldığı doğrultunun kosinüsü ile orantılı olur ve bu durum özellikle düşük relatif deplasmanların olduğu rijitliği yüksek yapılarda sönümleyici veriminin ciddi anlamda olumsuz yönde etkilenmesine sebep olur.

$$u_D = f \cdot u \quad (2.3)$$

Denklem 2.3’de yer alan u ifadesi sönümleyicinin bağlı olduğu katlar arasındaki görelî yer değiştirmeyi ifade ederken, u_D sönümleyicide oluşacak deplasmanı, f ise büyütme faktörünü ifade etmektedir. Diyagonal konfigürasyonda büyütme faktörü $\cos(\theta)$ olarak hesaplanır [18].

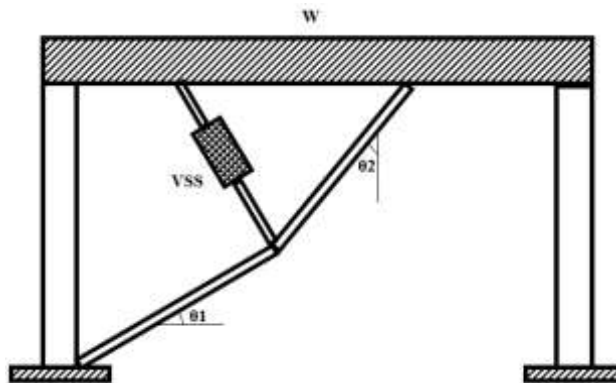
Chevron veya ters chevron bağlantı konfigürasyonda sönümleyici, döşemeye tamamen paralel olacak şekilde montajlanır (Şekil 2.12). Bu sayede sönümleyicinin bağlandığı katta oluşan relatîf deplasmanın tamamından faydalanılmış olur. Eksenel rijitliği yüksek çelik elemanlar ile oluşturulan chevron veya ters chevron konfigürasyonunda ek bağlantı elemanı da gerekeceğinden diyagonal tipe göre daha maliyetli olacaktır. Bakım kolaylığı düşünöldüğünde chevron yerine ters chevron tipi bağlantının kullanması daha uygun olacaktır.



Şekil 2.12 : Chevron bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.

Bu bağlantı tipinde f büyütme faktörü 1’e eşit olacağından sönümleyiciden elde edilen verim diyagonal bağlantı tipine göre daha fazla olur [18].

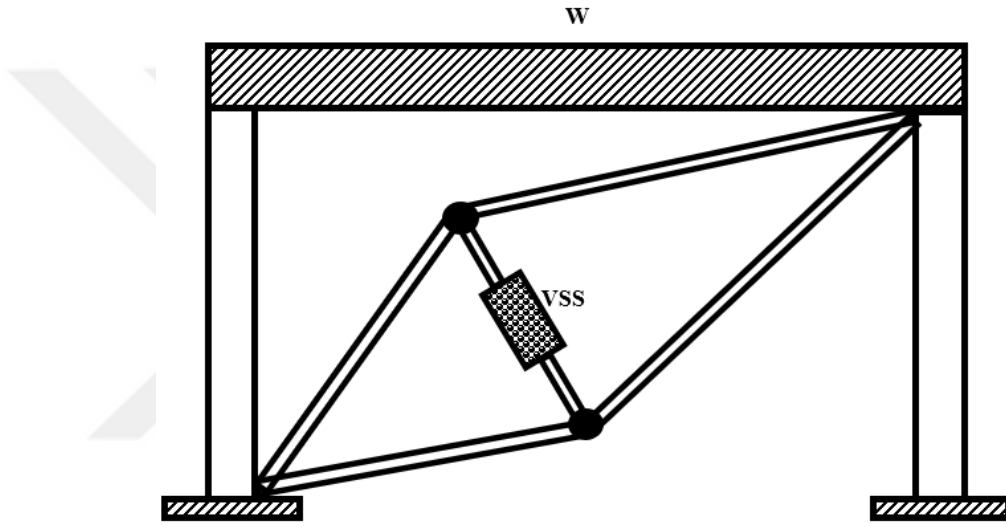
Bir diğerk bağlantı tipi olan Toggle-Brace konfigürasyonunda sönümleyici, tasarımcı tarafından belirlenen birçok farklı açı ile yapı çerçevesine montajlanabilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 : Toggle-Brace bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.

Bu bağlantı tipinin en büyük avantajı, kullanılan geometri sayesinde f büyütme faktörünün 2 ile 5 arasında bir değer alabilmesidir. Bu sayede sönümleyiciden alınan verim ciddi şekilde arttırılabilir [18]. Bu durum Toggle-Brace tipinin özellikle rijitliği yüksek, katlar arası relatif deplasman değerleri az olan yapılarda diğer konfigürasyonlara göre daha sık tercih edilmesini sağlar.

Tez kapsamında ele alınan son bağlantı tipi olan Scissor-Jack konfigürasyonunda ise sönümleyici, toggle-brace konfigürasyonunda olduğu gibi tasarımcının talebine göre farklı açılar ile montajlanabilir (Şekil 2.14). Bu bağlantı tipinin en büyük avantajı sağladığı büyük açıklık ile mimariyi ve yapının fonksiyonunu daha az kısıtlamasıdır.



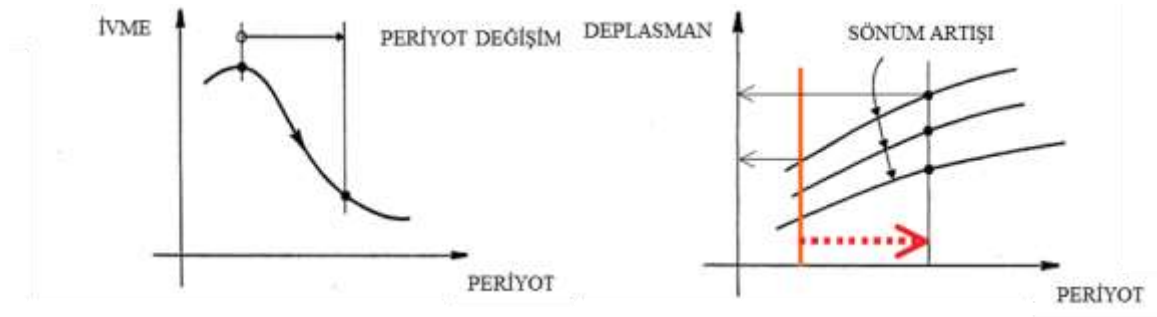
Şekil 2.14 : Scissor-Jack bağlantı tipi ile montajlanmış sönümleyici.

Bu bağlantı tipinde f büyütme faktörü, geometri sayesinde 1'den büyük değerler alabilir. Bu da yine toggle-brace tipi gibi rijitliği yüksek, görece kat deplasman değerleri az olan yapılarda sönümleyici cihazdan daha iyi verim alınmasını sağlar [19].

2.5 Deprem Yalıtım Sistemleri

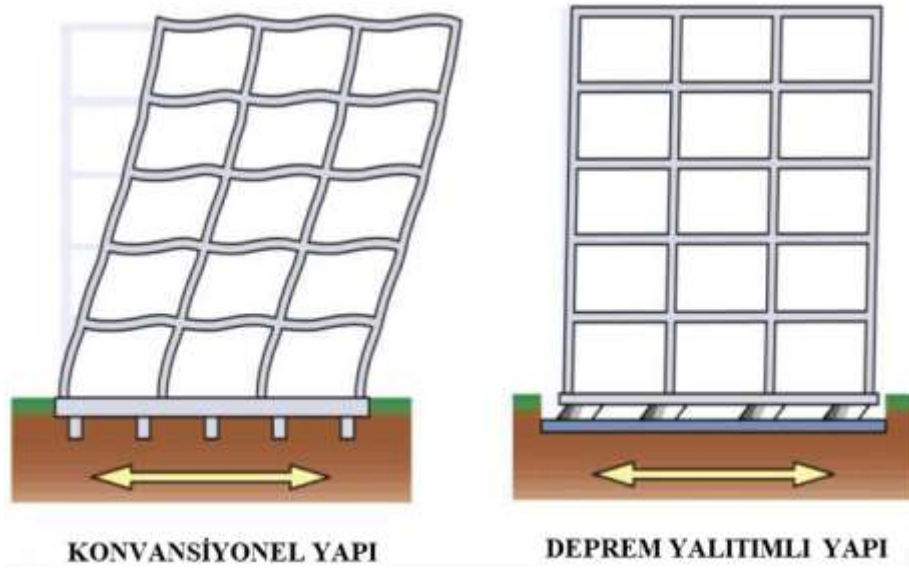
Deprem yalıtım sistemleri yapının hâkim titreşim periyodunun uzamasını ve bu sayede yapıya etkiyen deprem ivmelerinin, dolayısıyla etkin deprem yüklerinin azalmasını sağlayan yenilikçi tasarım sistemleridir. Hâkim titreşim periyodunun büyümesi ile artan deplasman talebi ise, yatay rijitliği oldukça düşük; düşey rijitliği oldukça yüksek yalıtım birimlerinden oluşan deprem yalıtım sistemi tarafından karşılanır. Bu sırada yalıtım birimlerinde meydana gelen kuvvet deplasman çevrimleri sayesinde sisteme gelen deprem enerjisi sönümlenmiş olur.

Deprem yalıtım sistemlerinin periyot ve sönüm oranı üzerine etkileri Şekil 2.15 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : Periyot artışı ile ivmenin & sönüm artışı ile deplasmanın azalması [20].

Deprem yalıtımlı tasarlanan binalarda yalıtım birimlerinin altında kalan bölüm “altyapı” üzerinde kalan bölüm ise “üstyapı” olarak isimlendirilir. Hâkim titreşim periyodunun büyümesi ile azalan ivme sonucunda, üst yapıda konvansiyonel yapılara göre çok daha az kesme kuvvetleri oluşur. Bu da üstyapıda oluşan görel kat ötelenmelerinin konvansiyonel yapılara göre bir hayli düşük olmasını, üstyapının adeta rijit bir blok gibi hareket edebilmesini sağlar. Bu sayede deprem yalıtım birimleri ile tasarlanan yapıların deprem performansı, tipik konvansiyonel yapılara göre daha yüksek olur. Konvansiyonel yapılar ile deprem yalıtımlı yapıların görsel olarak karşılaştırılması Şekil 2.16 ile sunulmuştur.

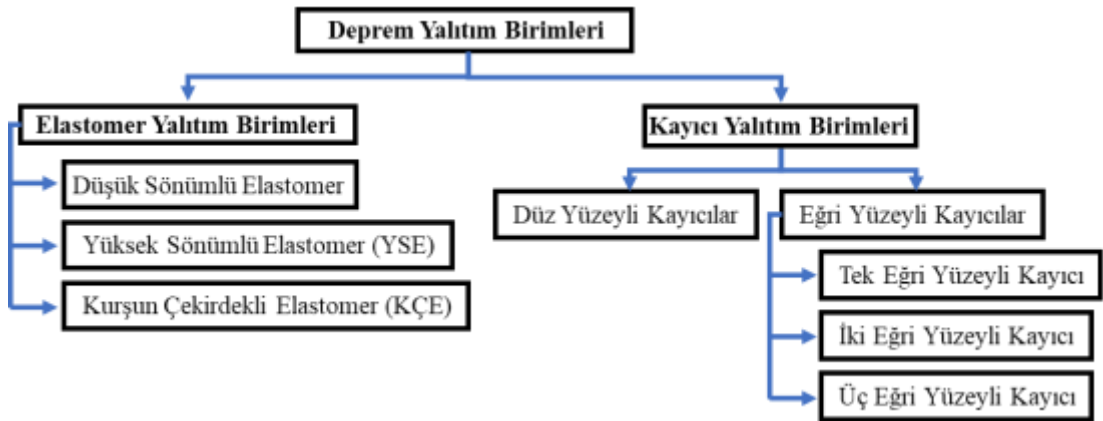


Şekil 2.16 : Temel ankastre yapı ve deprem yalıtımlı yapı davranışları [21].

Ayrıca deprem yalıtımlı yapılarda depremler sırasında oluşan kat ivmelerinin düşük olması, yapı içerisinde bulunan hassas ve/veya pahalı cihazların hasar almadan korunması açısından da çok önemlidir. Özellikle hastane ve veri merkezi binaları gibi kritik ekipmanlar bulunduran yapıların tasarımında, deprem yalıtım sistemlerin tercih edilmesi oldukça yaygındır.

Özetle; deprem yalıtım sistemlerinin temel amacı yalıtım birimleri vasıtasıyla bilinçli bir yumuşak kat (yatayda rijitliği az olan) oluşturmak ve plastik davranışı bu katta - yalıtım birimlerinde- yoğunlaştırarak üst yapıya aktarılan deprem etkilerini minimize etmektir [22].

Deprem yalıtım sistemini oluşturan yalıtım birimleri çalışma prensiplerine, şekillerine ve malzemelerine göre sınıflandırılır. Elastomer (kauçuk) bazlı yalıtım birimleri; doğal/düşük sönümlü elastomer, yüksek sönümlü elastomer (YSE) ve kurşun çekirdekli elastomer (KÇE) olmak üzere üç farklı türde üretilir ve kullanılır. Sürtünmeli yüzey prensibi ile çalışan kayıcı yalıtım birimleri ise düz yüzeyli kayıcılar ve eğri yüzeyli kayıcılar olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Ek olarak eğri yüzeyli kayıcılar, kayıcı birimini oluşturan eğrilik yarıçapı farklı yüzeylerin sayısına göre tek eğri yüzeyli kayıcı, iki eğri yüzeyli kayıcı ve üç eğri yüzeyli kayıcı olarak isimlendirilirler. Deprem yalıtım birimlerinin sınıflandırılmasını içeren şema, Şekil 2.17 ile sunulmuştur.

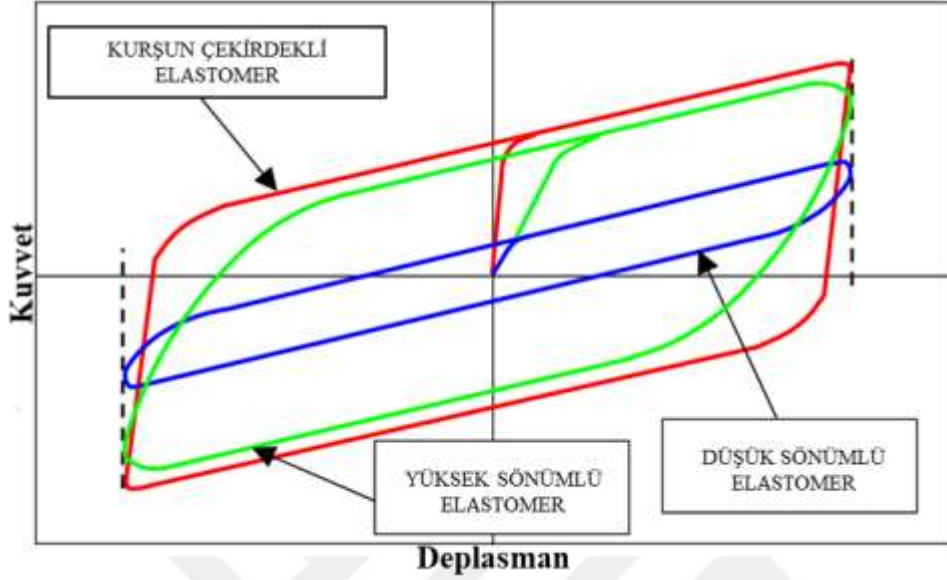


Şekil 2.17 : Deprem yalıtım birimlerinin sınıflandırılması.

2.5.1 Kurşun çekirdekli elastomer (KÇE)

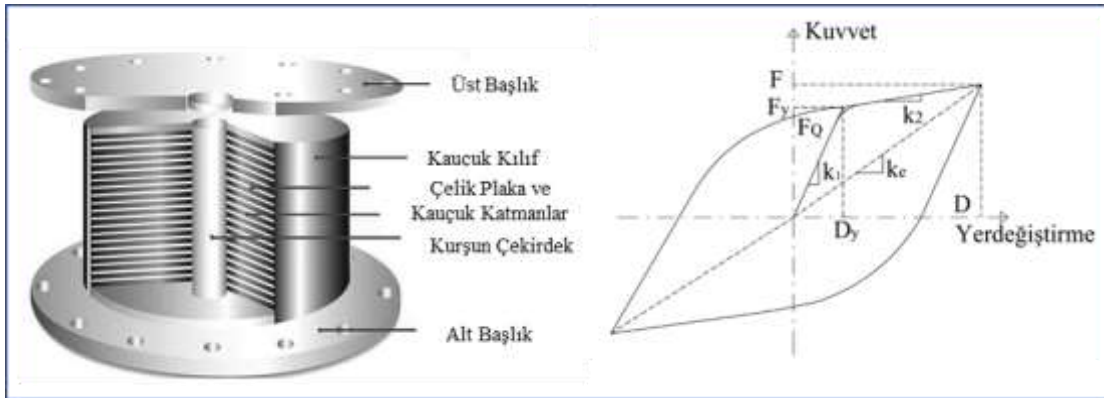
Kurşun çekirdekli elastomer (KÇE) yalıtım birimleri, ilk olarak 1970’li yıllarda geliştirilmiş ve günümüzde yapıların deprem yalıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan etkili sistemlerden biri haline gelmiştir. Diğer elastomer deprem yalıtım

birimlerine kıyasla, merkezlerinde bulunan kurşun çekirdeğin elastoplastik kuvvet-deplasman ilişkisi sayesinde enerji sönmleme kapasiteleri daha fazladır. Elastomer deprem yalıtım birimlerinin kuvvet deplasman ilişkileri Şekil 2.18 ile sunulmuştur.



Şekil 2.18 : Elastomer deprem yalıtım birimlerinin karşılaştırılması [23].

Tasarım aşamasında kurşun çekirdek çapının arttırılması ve/veya akma gerilmesi farklı kurşun sınıflarının (8~12 MPa) kullanılması ile KÇE davranışı düzenlenebilir ve tasarım için gerekli/hedeflenen sönm oranlarının elde edilmesi sağlanabilir. Bu tür sistemlerin eşdeğer sönm oranı genellikle 10% ile 30% arasında değişmektedir. Yerel ve yabancı üreticilerin katalogları incelendiğinde, KÇE'lerin yatay yer değiştirme kapasitelerinin 30~90 cm arasında olduğu söylenebilir. KÇE yalıtım birimlerinin tipik yapısı ve kuvvet deplasman eğrisi Şekil 2.19 ile sunulmuştur.



Şekil 2.19 : KÇE yapısı ve tipik kuvvet-yerdeğiştirme davranışı [24].

Ancak büyük depremlerden sonra kurşun çekirdeklerde meydana gelen hasarın dışarıdan gözle tespit edilememesi ve kalıcı deformasyon oluşan yalıtım birimlerinin yerinde tamir edilememesi, bu sistemlerin bakım ve sürdürülebilirlik açısından sınırlayıcı unsurlarındandır. Bu sebeple tasarım aşamasında yapının yer alacağı bölgenin deprem riskinin titizlikle belirlenmesi, yalıtım birimi tasarımı sonrası üretilen yalıtım birimlerinin yönetmeliklerce belirlenen testler ile kontrol edilmesi ve yalıtım birimleri montajları sırasında teknik kaliteden ödün verilmemesi gibi hususlar son derece önemlidir.





3. YAPININ TANITILMASI VE SINIFLANDIRILMASI

Bu bölümde, tez kapsamında çalışılan yapı için belirlenen konum, yapının mimari planları, kurgulanan taşıyıcı sistem planları, seçilen taşıyıcı sistem malzeme detayları, yapıya etkitilen yüklemelerin hesapları, yapının analiz modelinin oluşturulma aşamaları gibi detaylardan bahsedilmiştir.

3.1 Yapının Konumu

Çalışmanın konusu yakın-fay etkileri ile ilgili olduğundan konum, kuzey anadolu fay hattına (KAF) oldukça yakın bir lokasyon (Şekil 3.1) olan Erzincan İli Kazım Karabekir Mahallesi olarak belirlenmiştir.

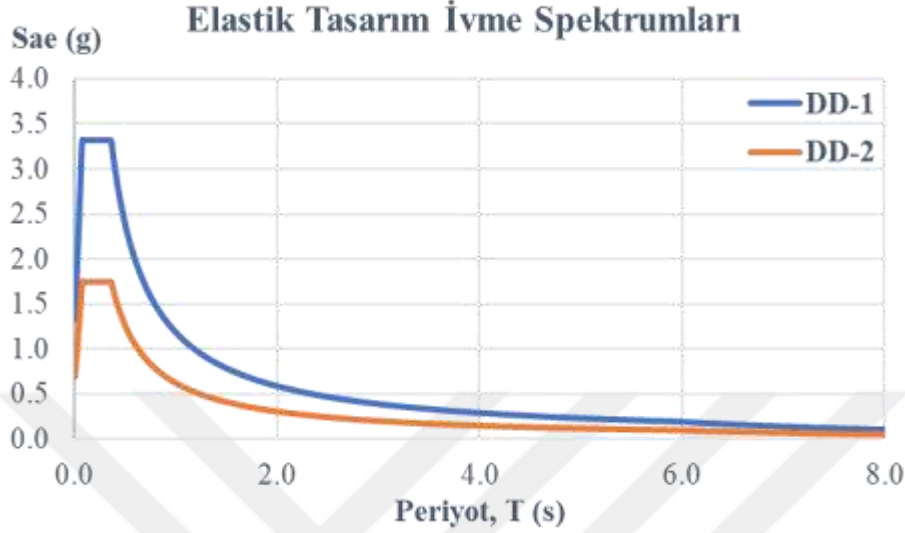


Şekil 3.1 : Tez kapsamında çalışılacak yapı için belirlenen konum.

3.2 Elastik Tasarım İvme Spektrumları

Elastik tasarım spektrumlarının elde edilmesinde Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (TDTH) interaktif web uygulaması kullanılmıştır. Yapının konumu olarak kabul

edilen Erzincan Merkez Kazım Karabekir Mahallesi üzerinden bir nokta seçilmiş ve seçilen noktanın farklı deprem yer hareketi düzeylerinde raporlanması sağlanmıştır. Seçilen noktanın yerel zemin sınıfı ZC olarak kabul edilmiştir.



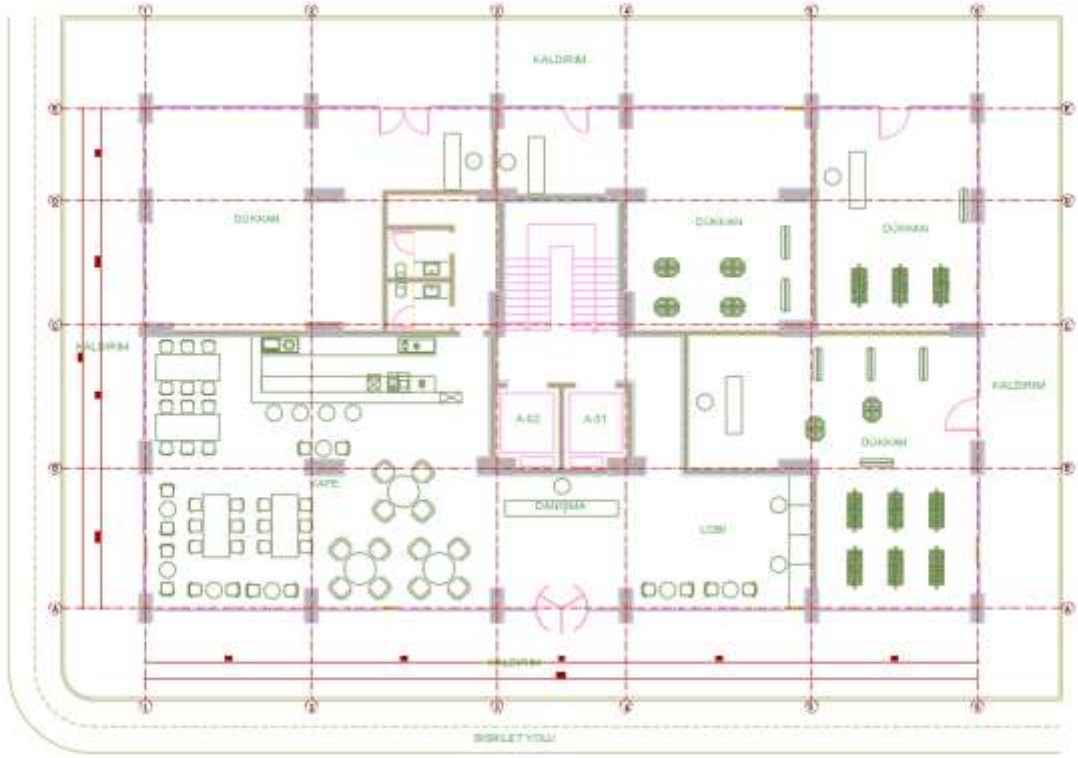
Şekil 3.1 : Elastik tasarım ivme spektrumları.

Çizelge 3.1 : Harita spektral ivme katsayıları.

	DD-1	DD-2
S_s :	2.761	1.456
S_1 :	0.844	0.417
S_{Ds} :	3.313	1.747
S_{D1} :	1.182	0.625

3.3 Yapının Mimarisi ve Taşıyıcı Sistem Özellikleri

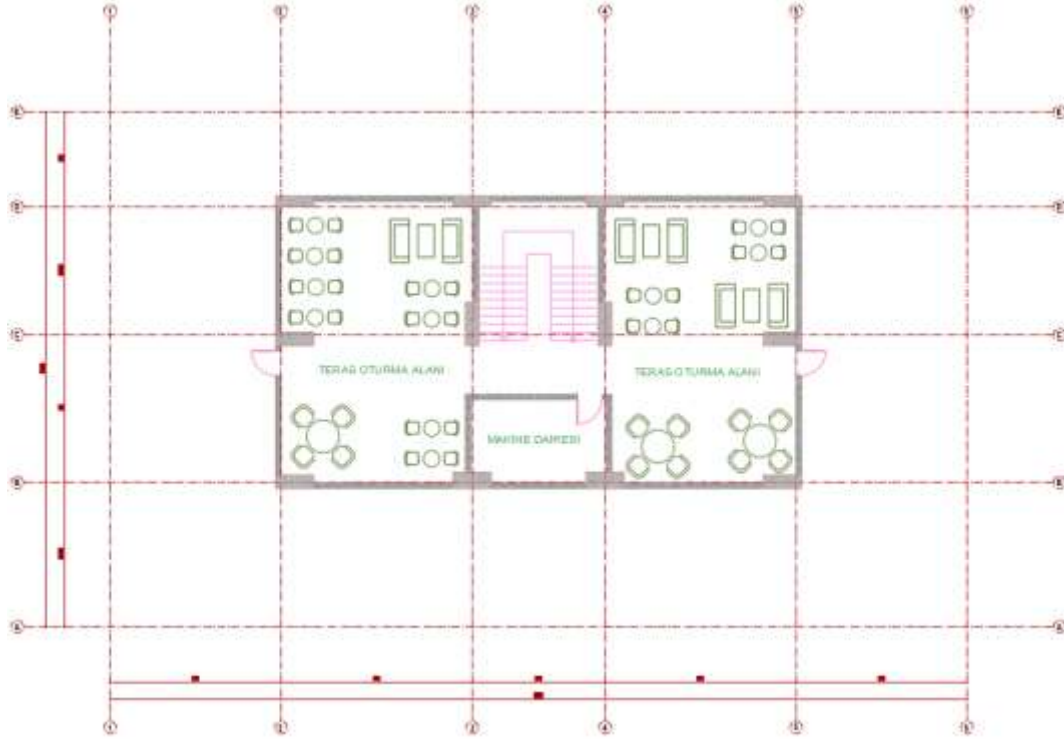
Bina 1 bodrum kat, zemin kat, 9 normal kat ve çatı katından oluşmaktadır. Bodrum katı deprem yalıtımı ve sönümleyici birimler için ayrılmış, kullanılmayan bir kat olarak düşünülmüştür. Zemin katında lobi, danışma ve çeşitli dükkanların olduğu varsayılmıştır. Mimari detaylar incelendiğinde binanın ofis binası olarak planlandığı görülebilir. Normal katlar ve çatı katı ofis kullanımına uygun olacak şekilde detaylandırılmıştır. Bina kat yükseklikleri uniform 3m, toplam yüksekliği ise 36m olarak belirlenmiştir. Binanın zemin kat mimari planı Şekil 3.2 ile, normal kat mimari planı Şekil 3.3 ile ve çatı katı mimari planları Şekil 3.4’de görülebilir. Binaya etkitilecek yüklerin hesabı, mimari detaylara paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının zemin kat mimari planı.



Şekil 3.3 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının normal kat mimari planı.

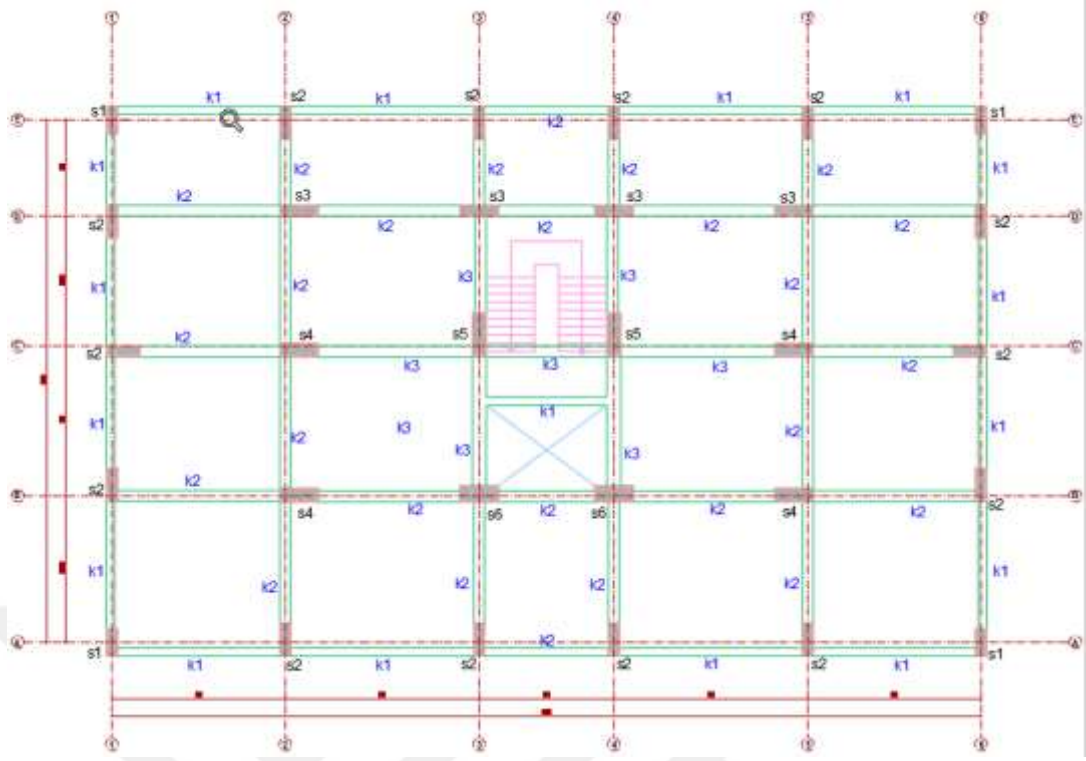


Şekil 3.4 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının çatı katı mimari planı.

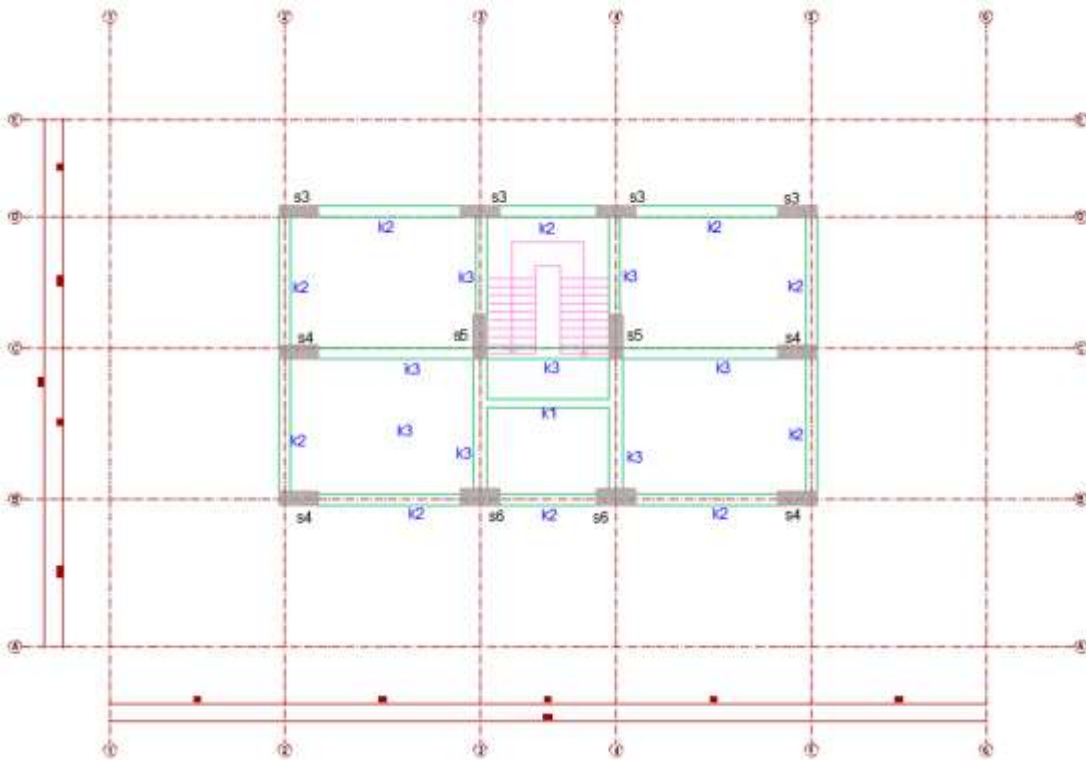
Binanın X-X doğrultusundaki toplam uzunluğu 31.60m, Y-Y doğrultusundaki toplam uzunluğu ise 19.00m'dir. Aks açıklıkları X-X ve Y-Y doğrultusunda kolon merkezinden kolon merkezine minimum 3.70m; maksimum ise 7.05m'dir.

Bina deprem yalıtım sistemi ile tasarlanacağından, taşıyıcı sistem türü olarak kolon-kiriş betonarme çerçeve sistem tercih edilmiştir. Yine aynı sebepten ötürü binanın taşıyıcı sisteminde merdiven alanları ve asansör kovanları dahil herhangi bir betonarme perde kurgulanmamıştır. Taşıyıcı sistem kolonları 40/100cm, 40/120 cm, 40/140cm, 50/140cm, 50/160cm, 60/160cm olacak şekilde 6 tip olarak seçilmiş; kirişler ise cephelerde 30/60cm, çerçevede ise 40/60cm ve 40/80cm olacak şekilde 3 tip olarak yerleştirilmiştir. Betonarme döşemenin kalınlığı her katta eşit olacak şekilde 20cm olarak seçilmiştir.

Deprem yalıtımının uygulanacağı bodrum katında ise yalıtım birimlerinin oturacağı pedestallar 125/125cm ve 140/140cm olmak üzere iki ayrı tip olarak seçilmiştir. Pedestalların boyutlandırılması, tasarımı yapılan KÇE yalıtım birimlerinin genişlikleri dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 3.5 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının zemin + normal katlar taşıyıcı sistem planı.



Şekil 3.6 : Tez kapsamında ele alınan ofis binasının çatı katı taşıyıcı sistem planı.

3.4 Yapı Malzemeleri

3.4.1 Beton

C35/45 sınıfı beton kullanılmıştır [25].

f_{ck} (Karakteristik basınç dayanımı) = 35 MPa (TS-500, Çizelge: 3.2)

f_{ctk} (Karakteristik eksenel çekme dayanımı) = 2.07 MPa (TS-500, Denklem: 3.1)

E_c (Elastisite modülü) = 33227.26 MPa (TS-500, Denklem: 3.2)

G_c (Kayma modülü) = 13290.90 MPa (TS-500, Denklem: 3.3)

3.4.2 Donatı çeliği

Tüm donatılarda S420/B420C sınıfı donatı çeliği kullanılmıştır [25].

f_{yk} (Minimum akma dayanımı) = 420 MPa (TS-500, Çizelge: 3.1)

f_{su} (Minimum Kopma Dayanımı) = 500 MPa (TS-500, Çizelge: 3.1)

E_s (Elastisite modülü) = 200000 MPa (TS-500, Bölüm 3.2)

3.5 Yük Hesaplamaları

Döşeme kaplama yükleri, giydirme cephe yükleri ve bölme duvar yükleri gibi binaya etkiyen ölü yüklerin hesaplanmasında mimari planlar dikkate alınmış ve hesaplamalarda TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası (İMO) tarafından yayınlanan “Yapı malzemelerinin birim hacim ağırlıkları” isimli doküman kullanılmıştır [26]. Yapıya etkitilecek kar yükü, buz yükü ve diğer harekettli yüklerin hesaplanması ve kabulünde ise TS-498 (Eylül, 2021) “Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri” dikkate alınmıştır [27].

3.5.1 Ölü yükler

Bodrum katı döşeme kaplaması: 5 cm grobeton + 2 cm mermer kaplama = $2 \text{ t/m}^3 * 9.81 * 0.05 + 2.7 \text{ t/m}^3 * 9.81 * 0.03 = 1.8 \text{ kN/m}^2$ olarak girilmiştir.

Normal katların döşeme kaplaması: 5 cm grobeton + 0.25 cm linolyum kaplama = $2 \text{ t/m}^3 * 9.81 * 0.05 + 1 \text{ t/m}^3 * 9.81 * 0.0025 = 1 \text{ kN/m}^2$ olarak girilmiştir.

Çatı katı döşeme kaplaması → 5 cm grobeton + 1 cm seramik kaplama = $2 \text{ t/m}^3 * 9.81 * 0.05 + 2.2 \text{ t/m}^3 * 9.81 * 0.01 = 1.2 \text{ kN/m}^2$ olarak girilmiştir.

Giydirme cephe kaplama yükü: Dış cephe kirişlerine 0.75 kN/m çizgisel yük olarak girilmiştir.

Duvar yükleri: Duvar yerinin belirsiz olduğu kat döşemelerine düzgün yayılı 1 kN/m² duvar yükü, kirişlere oturan yeri belli bölme duvarların yükü ise çizgisel 6kN/m (15 cm tuğla, 5 cm sıvalı 3 m yüksekliğindeki duvar) olarak girilmiştir. girilmiştir. Çatı katı kirişlerine çizgisel 5.5kN/m parapet yükü (150cm yüksekliğinde, 15cm kalınlığında betonarme parapet) girilmiştir.

3.5.2 Hareketli yükler

Kar yükü: Yapının yer aldığı Erzincan ili, TS-498 (Eylül, 2021)’de yer alan EK 2 kar yağış yüksekliği haritası’na göre 6.bölgede bulunmaktadır. 6.bölgede yer alan 1000 m rakımlı yapılar için dikkate alınacak karakteristik kar yükü 1.35 kN/m² olarak belirtilmiştir. Ancak Erzincan’ın rakımı 1000 m’den daha yüksek olduğundan (1185 m), hesaplarda kullanılacak karakteristik kar yükü değeri yönetmeliğin belirttiği gibi 10% arttırılmıştır ve 1.5 kN/m² olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.7). Kabul edilen bu kar yükü değeri, ETABS modelinde çatı katı ve yapının diğer açık bölgelerine uygulanmıştır.

Yapı yerinin denizden yüksekliği m	BÖLGELER								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0-200	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,80	0,85
300	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,85	0,90
400	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,80	0,90	0,95
500	0,75	0,75	0,75	0,80	0,80	0,80	0,85	0,95	1,00
600	0,75	0,75	0,80	0,85	0,85	0,85	0,90	1,00	1,10
700	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90	0,95	1,10	1,20
800	0,80	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	1,10	1,20	1,30
900	0,80	0,95	1,05	1,10	1,10	1,10	1,25	1,30	1,40
1000	0,80	1,05	1,10	1,20	1,30	1,35	1,40	1,50	1,60
>1000	1000 m'ye tekabül eden değerler, 1500 m'ye kadar %10, 1500 m'den yukarı yüksekliklerde %15 arttırılır.								

Şekil 3.7 : TS-498 (Eylül, 2021) karakteristik kar yükü değerleri.

Buz yükü: Hesaplamalarda TS-498 (Eylül, 2021) 13.madde “Buzlanma tehlikesine maruz kalacak bölgelerde deniz seviyesinden 400 m ve daha yüksekteki yerler için buzlanmaya maruz kalacak yapı elemanlarının bütün yüzeylerinin 3 cm kalınlıkta buz

ile kaplanmış olduğu kabul edilir. Buzun birim hacim ağırlığı 7 kN/m^3 alınır.” dikkate alınmıştır. Cam cephe alanları hariç yapının açık bölgelerine buz yüklemesi (0.25 kN/m^2) yapılmıştır [27].

Düzgün yayılı hareketli yükler: Yüklemelerde TS-498 (Eylül, 2021)’de yer alan çizelge (Çizelge 6- düzgün yayılı düşey hareketli yük hesap değerleri) dikkate alınmıştır. Dolayısıyla çatıya 2 kN/m^2 , toplantı salonları, koridorlar ve merdivenlere 5 kN/m^2 , ofis odalarına 2 kN/m^2 , kütüphane/arşiv bölümüne 5 kN/m^2 şeklinde yüklemeler uygulanmıştır.

3.6 Yapının Sınıflandırılması

Bu bölümde tez kapsamında ele alınan binanın TBDY-2018’e göre sınıflandırılması yapılmıştır.

3.6.1 Bina kullanım sınıfı ve önem katsayısı

TBDY-2018’in 14.3.2 maddesine göre deprem yalıtımlı binalarda bina önem katsayısı 1 olarak alınmalıdır [28].

3.6.2 Deprem tasarım sınıfı

Üstyapının DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde S_{DS} değeri 1.747’dir. Bu değer 0.75’den büyük olduğundan, deprem tasarım sınıfı 1 olarak belirlenir (Şekil 3.8).

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 \leq S_{DS} < 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 \leq S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

Şekil 3.8 : Bina kullanım sınıfının ve bina önem katsayısının belirlenmesi.

3.6.3 Bina yükseklik sınıfı

Binanın toplam yüksekliği 36m, deprem tasarım sınıfı 1 olduğundan, bina yükseklik sınıfı (BYS) 4 olarak belirlenir (Şekil 3.9) [28].

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları [m]		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS = 2	$56 < H_N \leq 70$	$70 < H_N \leq 91$	$91 < H_N \leq 105$
BYS = 3	$42 < H_N \leq 56$	$56 < H_N \leq 70$	$56 < H_N \leq 91$
BYS = 4	$28 < H_N \leq 42$	$42 < H_N \leq 56$	
BYS = 5	$17.5 < H_N \leq 28$	$28 < H_N \leq 42$	
BYS = 6	$10.5 < H_N \leq 17.5$	$17.5 < H_N \leq 28$	
BYS = 7	$7 < H_N \leq 10.5$	$10.5 < H_N \leq 17.5$	
BYS = 8	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10.5$	

Şekil 3.9 : Bina yükseklik sınıfının belirlenmesi.

3.6.4 Bina performans hedefi

Tez kapsamında ele alınan yapı, deprem yalıtım sistemi ile yeni inşa edileceği kurgulanan bir binadır. Binanın deprem tasarım sınıfı (DTS) 1 olduğundan; üstyapının DD-2 deprem yer hareketi düzeyindeki normal performans hedefi sınırlı hasar (SH), tasarım yaklaşımı ise dayanıma göre tasarım (DGT) olarak belirlenir (Şekil 3.10).

(a) Yeni Yapılacak Deprem Yalıtımlı Binalar – Üstyapı

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-2	SH	DGT	KK	DGT
DD-1	—	—	—	—

Şekil 3.10 : Üstyapı performans hedefinin belirlenmesi.

Altyapının DD-1 deprem yer hareketi düzeyindeki normal performans hedefi kesintisiz kullanım (KK), tasarım yaklaşımları ise deprem yalıtım sistemi için şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım (ŞGDT); altyapı için dayanıma göre tasarım (DGT) olarak belirlenir (Şekil 3.11).

(c) Yeni Yapılacak ve Güçlendirilecek Deprem Yalıtımlı Binalar – Yalıtım Sistemi ve Altyapı

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-2	—	—	—	—
DD-1	KK	ŞGDT ⁽¹⁾ -DGT ⁽²⁾	KK	ŞGDT ⁽¹⁾ -DGT ⁽²⁾

⁽¹⁾ Yalıtım sistemi için uygulanacaktır.

⁽²⁾ Altyapı için uygulanacaktır.

Şekil 3.11 : Deprem yalıtım sistemi ve altyapı performans hedefinin belirlenmesi.

Yönetmelik sınıflandırmaları gerçekleştirilen örnek yapı için kurgulanan tasarım senaryoları, tezin 4. ve 5. bölümlerinde detayları ile birlikte paylaşılmıştır.



4. DEPREM YALITIM BİRİMLERİ İLE ANALİZ VE TASARIM

Bu bölümde kurşun çekirdekli elastomer (KÇE) yalıtım birimlerinin viskoz sıvı sönümleyiciler olmadan kurgulanması ile ilgili tasarım aşamaları sunulmuş ve tasarım sonrası üstyapı performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

4.1 Kurşun Çekirdekli Elastomer (KÇE) Deprem Yalıtım Birimlerinin Tasarımı

İzolatörlerin tasarımında nominal değerler ile beraber alt limit ve üst limit değerleri de göz önünde bulundurulur. Bu limit değerlerinin hesaplanmasında kullanılan çarpanlar; yaşlanma ve çevresel etkiler, yükleme hızı ve ısınma gibi etkileri ve üretimdeki değişiklikler gibi belirsiz unsurların tasarım aşamasında göz önüne alınmasını hedefler. İlgili çarpanların sayısal değerleri, yalıtım birimi üretici firma tarafından sağlanır. Ancak çalışmada böyle bir durum olmadığından; alt limit ve üst limit değerlerinin hesabında kullanılan çarpanlar yönetmelikten temin edilmiştir (Şekil 4.1).

	Tip	F_Q		k_2	
		<i>alt</i>	<i>üst</i>	<i>alt</i>	<i>üst</i>
λ_{ae}	KÇE	1.00	1.10	1.00	1.30
	YSE	1.00	1.30	1.00	1.40
λ_{deney}	KÇE	0.70	1.30	0.90	1.30
	YSE	0.70	1.30	0.90	1.30
λ_{spek}	KÇE	0.85	1.15	0.85	1.15
	YSE	0.85	1.15	0.85	1.15

Şekil 4.1 : KÇE deprem yalıtım birimleri için önerilen alt ve üst limit çarpan değerleri.

Burada yer alan λ_{ae} çarpanı yaşlanma ve çevresel etkileri, λ_{deney} çarpanı yükleme hızı ve ısınma etkilerini, λ_{spek} çarpanı ise üretimdeki değişkenlikleri tasarıma aktarmayı hedefler. Çizelge 4.1’de yer alan çarpan değerleri ile KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımında kullanılan alt limit ve üst limit değerleri hesaplanmıştır.

$$\lambda_{üst} = [1 + 0.75(\lambda_{ae,üst} - 1)]\lambda_{deney,üst}\lambda_{spek,üst} \quad (4.1)$$

$$\lambda_{alt} = [1 - 0.75(1 - \lambda_{ae,alt})]\lambda_{deney,alt}\lambda_{spek,alt} \quad (4.2)$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda KÇE deprem yalıtım birimlerinin karakteristik dayanım (F_Q) ve ikincil rijitlik (k_2) parametrelerinde kullanılacak alt limit ve üst limit değerleri Çizelge 4.1 ile sunulmuştur.

Çizelge 4.1 : KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımında kullanılan alt ve üst limit değerleri.

	F_Q	k_2
$\lambda_{üst}$:	1.607	1.831
λ_{alt} :	0.595	0.765

Bu bölümde yapılan hesaplamalar, DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde deprem yalıtım biriminin nominal değerleri ile yapılmış ve örnek olarak sunulmuştur. DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi alt limit ve üst limit değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi üst, nominal ve alt limit değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar bu kısımda paylaşılmamıştır.

İzolatör birimi toplam dış çapı (B_{total}) = 1150 mm

Çelik plaka ile yapılmış elastomerin çapı (B) = 1100 mm

Kurşun çekirdek çapı (B_L) = 275 mm

Kurşun malzemesinin akma gerilmesi (T_{yp}) = 12 MPa

Elastomer malzemenin kayma modülü (G_v) = 0.7 MPa

Elastomer katman kalınlığı (t) = 8 mm

Toplam elastomer kalınlığı (T_r) = 296 mm

Elastomer malzemenin sertlik değeri (k) = 0.75

Elastomer malzemenin hacim modülü (K) = 2000 MPa

İzolatör birimi toplam yüksekliği (H) = 404 mm

İzolatör birimi kurşun çekirdek alanı (A_p) denklem 4.3 ile hesaplanmıştır.

$$A_p = \frac{(\pi * B_L^2)}{4} = \frac{(\pi * 275^2)}{4} = 59395.74 \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış, yüke maruz yüzey alanı (A_r) denklem 4.4 ile hesaplanmıştır.

$$A_r = \frac{(\pi * (B^2 - B_L^2))}{4} = \frac{(\pi * (1100^2 - 275^2))}{4} = 890936.04 \text{ mm}^2 \quad (4.4)$$

İzolatör birimi şekil katsayısı (S) denklem 4.5 ile hesaplanmıştır.

$$S = \frac{B^2 - B_L^2}{4 * B * t} = \frac{1100^2 - 275^2}{4 * 1100 * 8} = 32.23 \quad (4.5)$$

Elastomer malzeme esneklik modülü (E_0) denklem 4.6 ile hesaplanmıştır.

$$E_0 = 4 * G_v = 4 * 0.7 = 2.8 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

İzolatör biriminin basınç modülü (E_c) denklem 4.7 ile hesaplanmıştır.

$$E_c = E_0 * (1 + 2 * k * S^2) \quad (4.7)$$

$$E_c = 2.8 * (1 + 2 * 0.75 * 32.23^2) = 4364.72 \text{ MPa}$$

İzolatör biriminin düşey rijitlik modülü (E_v) denklem 4.8 ile hesaplanmıştır.

$$E_v = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_c}\right) + \left(\frac{1}{K}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{4364.72}\right) + \left(\frac{1}{2000}\right)} = 1371.54 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

İzolatör biriminin düşey rijitliği (k_v) denklem 4.9 ile hesaplanmıştır.

$$k_v = (E_v * A_r) / T_r = (1371.54 * 890936.04) / 296 = 4128209.80 \text{ kN/m} \quad (4.9)$$

İzolatör biriminin karakteristik dayanımı (F_Q) denklem 4.10 ile hesaplanmıştır.

$$F_Q = (A_p * T_{yp}) / 1000 = (59395.74 * 12) / 1000 = 712.75 \text{ kN} \quad (4.10)$$

İzolatör biriminin ikincil (elastik ötesi) rijitliği (k_2) denklem 4.11 ile hesaplanmıştır.

$$k_2 = G_v * \left(\frac{A_r}{T_r}\right) = 0.7 * \left(\frac{890936.04}{296}\right) = 2106.94 \text{ kN/m} \quad (4.11)$$

İzolatör biriminin birincil (elastik) rijitliği (k_1) denklem 4.12 ile hesaplanmıştır.

$$k_1 = k_2 / \left(\frac{k_2}{k_1}\right) = 2106.94 / 0.1 = 21069.40 \text{ kN/m} \quad (4.12)$$

İzolatör biriminin etkin akma yerdeğiştirmesi (D_y) denklem 4.13 ile hesaplanmıştır.

$$D_y = \frac{F_Q}{(k_1 - k_2)} = \frac{712.75}{21069.40 - 2106.94} = 0.03759 \text{ m} = 37.59 \text{ mm} \quad (4.13)$$

İzolatör biriminin etkin akma dayanımı (F_y) denklem 4.14 ile hesaplanmıştır.

$$F_y = D_y * k_1 = 0.03759 * 21069.40 = 791.94 \text{ kN} \quad (4.14)$$

Bu adımdan itibaren yalıtım birimi için hedef bir yerdeğiştirme değeri (D) tanımlanır. Tanımlanan bu yerdeğiştirme değeri kullanılarak sırasıyla; D yerdeğiştirmesi anındaki yatay kuvvet (F), D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik (k_e), bir çevrimde tüketilen enerji (W_d), etkin sönüm oranı (β_e), sönüm ölçeklendirme katsayısı (η) ve son olarak deprem yalıtımlı sistemin periyodu (T) hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu periyot değeri kullanılarak, yapının deprem yerdeğiştirme talebi (elastik tasarım spektrumu ile) belirlenir. Elde edilen bu talep ile başlangıçta kabul edilen hedef yerdeğiştirme değeri (D) örtüşene kadar iterasyon süreci tekrarlanır.

Yukarıda tarif edilen işlemler ve gerekli iterasyonlar hesaplamalar için oluşturulmuş excel dosyası ile gerçekleştirilmiştir. İterasyonlar sonucu elde edilen hedef deplasman değeri D: 0.366m olarak bulunmuştur.

İzolatör biriminde D yerdeğiştirmesine karşı gelen dayanım (F) denklem 4.15 ile hesaplanmıştır.

$$F = F_Q + (k_2 * (D - D_y)) \quad (4.15)$$

$$F = 712.75 + (2106.94 * (0.366 - 0.03759)) = 1395.93 \text{ kN}$$

İzolatör biriminde D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik (k_e) denklem 4.16 ile hesaplanmıştır.

$$k_e = \frac{F}{D} = \frac{1404.70}{0.366} = 3837.97 \text{ kN/m} \quad (4.16)$$

İzolatör birimi tarafından bir çevrimde tüketilen enerji (W_d) denklem 4.17 ile hesaplanmıştır.

$$W_d = 4 * F_Q * (D - D_y) \quad (4.17)$$

$$W_d = 4 * 712.75 * (0.366 - 0.03759) = 936.30 \text{ kNm}$$

İzolatör biriminin etkin sönüm oranı (β_e) denklem 4.18 ile hesaplanmıştır.

$$\beta_e = \frac{1}{2*\pi} * \left(\frac{W_d}{F*D} \right) = \frac{1}{2*\pi} * \left(\frac{936.30}{1404.70 * 0.366} \right) = 0.290 \quad (4.18)$$

İzolatör biriminin etkin sönüm yüzdesi (ζ_e) denklem 4.19 ile hesaplanmıştır.

$$\zeta_e = \beta_e * 100 = 0.290 * 100 = 29.0\% \quad (4.19)$$

4.2 KÇE Yalıtım Birimlerinin Şekildeğiştirme ve Düşey Kararlılık Kontrolleri

Depremsiz durumda yalıtım birimlerinde meydana gelen birim şekildeğiştirme değerlerinin kontrolü, 1.4G+1.6Q yük birleşimi altında elde edilen düşey kuvvetler ile gerçekleştirilir. Kontrollerde kullanılan P_{K1} yükü, yalıtım birimlerine ilgili yük birleşimi durumunda etkiyen en yüksek eksenel yük değeri olarak seçilmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 : KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ve P_{K1} yükü.

Kat	Yalıtım Birimi	Yükleme Durumu	P_{K1} (kN)	$P_{K1,Max}$ (kN)
BK (-+0.00)	L1	1.4G+1.6Q	-2413.52	-8406.62
	L2		-3937.00	
	L3		-3863.56	
	L4		-3091.11	
	L5		-1994.62	
	L6		-3814.81	
	L7		-3825.12	
	L8		-3844.03	
	L9		-4064.76	
	L10		-2243.29	
	L11		-3336.42	
	L12		-3863.42	
	L13		-3866.52	
	L14		-2379.51	
	L15		-4324.35	
	L16		-4243.00	
	L17		-4238.80	
	L18		-4368.09	
	L19		-8270.44	
	L20		-8406.62	
	L21		-6280.45	
	L22		-7772.34	
	L23		-8320.45	
	L24		-6165.30	
	L25		-7733.56	
	L26		-8149.17	

Çizelge 4.2 (devam) : KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ve P_{K1} yükü.

Kat	Yalıtım Birimi	Yükleme Durumu	P_{K1} (kN)	$P_{K1,Max}$ (kN)
BK (-+0.00)	L27	1.4G+1.6Q	-6212.79	-8406.62
	L28		-8129.70	
	L29		-8346.37	
	L30		-6523.12	

İzolatör biriminde basınçtan meydana gelen açısıl şekildeğiştirme denklem 4.20 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{c,st} = \frac{6 \cdot S \cdot P_{K1}}{A_r \cdot E_c} = \frac{6 \cdot 32.23 \cdot 8406.62 \cdot 1000}{890936.04 \cdot 4364.72} = 0.42 \quad (4.20)$$

İzolatör biriminde deprem dışındaki etkilere dolayı oluşacak yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen açısıl şekildeğiştirme denklem 4.21 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{s,st} = \frac{\Delta s}{T_r} = \frac{30}{296} = 0.10 \quad (4.21)$$

İzolatör birimi üst ve alt plakaları arasındaki görelî dönmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 4.22 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{r,st} = \frac{B^2 \cdot \theta_s}{2 \cdot t \cdot T_r} = \frac{1100^2 \cdot 0.005}{2 \cdot 8 \cdot 296} = 1.28 \quad (4.22)$$

Sonuç olarak; $\gamma_{c,st} = 0.42 \leq 3.5$ ve $\gamma_{c,st} + \gamma_{s,st} + \gamma_{r,st} = 1.80 \leq 5$ olduğundan, P_{K1} yükleri ile yapılan şekildeğiştirme kontrolleri yönetmelik şartlarını sağlamıştır.

Deprem etkisi ve düşey yükler altında yalıtım birimlerinde meydana gelen birim şekildeğiştirme değerlerinin kontrolü, 1.2G+Q±E yük birleşimi altında elde edilen düşey kuvvetler ile gerçekleştirilir (Çizelge 4.3). İlgili kontroller DD-1 deprem yer hareketi düzeyi ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde; yalıtım birimlerinin alt limit, nominal ve üst limit değerleri için ayrı ayrı (toplam 6 ayrı case ile) gerçekleştirilmiştir. Ancak bu kısımda sadece DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi nominal değerleri ile yapılan kontrollerin hesapları örnek olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.3 : KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler ve P_{K2} yükü.

Kat	Yalıtım Birimi	Yükleme Durumu	P_{K2} (kN)	$P_{K2,Max}$ (kN)
BK (-+0.00)	L1	ENV_1.2G+Q+E	-6606.90	-17586.70
	L2		-7915.74	
	L3		-8287.79	
	L4		-6866.19	
	L5		-8906.61	
	L6		-10732.04	
	L7		-12003.97	
	L8		-12269.53	
	L9		-10851.16	
	L10		-9260.25	
	L11		-6920.81	
	L12		-8074.81	
	L13		-7929.30	
	L14		-6378.77	
	L15		-9382.07	
	L16		-9321.01	
	L17		-9755.28	
	L18		-9155.77	
	L19		-9237.68	
	L20		-10825.04	
	L21		-7314.44	
	L22		-12876.57	
	L23		-17586.70	
	L24		-12493.46	
	L25		-12432.33	
	L26		-16477.51	
	L27		-13058.89	
	L28		-9265.65	
	L29		-10694.94	
	L30		-7501.30	

Kontrollerde kullanılan P_{K2} yükünün hesaplanmasında izlenen adımlar şu şekilde özetlenebilir: ilk olarak fay türü, faya olan uzaklık, zemin kayma hızı gibi parametreler göz önünde bulundurularak hesaplarda kullanılacak 11 adet deprem kaydı seçilmiştir. Ardından bu deprem kayıtları elastik tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiştir. Ölçeklenen deprem kayıtları kullanılarak çift yönde (2x11) zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir deprem kaydının analizinde elde edilen maksimum E yükleri, kombinasyona dahil edilmiş ve toplamda 11 adet

kombinasyonlu yük sonucu elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen 11 kombinasyonlu yük sonucunun ortalaması alınmış ve her bir yalıtım birimi için ayrı hesaplanmıştır. Son olarak 18 ayrı tip 1 yalıtım birimi için ayrı ayrı belirlenen bu yüklerden en büyüğü, nihai P_{K2} yükü olarak belirlenmiştir.

İzolatör biriminde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında oluşan basınçtan meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 4.23 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{c,E} = \frac{6*S*P_{K2}}{A_{re}*E_c} = \frac{6*32.23*17586.70*1000}{520583.21*4364.72} = 1.50 \quad (4.23)$$

İzolatör biriminde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 4.24 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{s,E} = \frac{D}{T_r} = \frac{0.366*1000}{296} = 1.24 \quad (4.24)$$

Sonuç olarak; $\gamma_{s,E} = 1.24 \leq 2.0$ ve $\gamma_{c,E} + \gamma_{s,E} + 0.5 * \gamma_{r,st} = 3.37 \leq 6$ olduğundan, P_{K2} yükleri ile yapılan şekildeğiştirme kontrolleri yönetmelik şartlarını sağlamıştır.

Elastomer yalıtım birimlerinin düşey kararlılık kontrollerinde kullanılan yatay yerdeğiştirmesiz burkulma yükü (P_{cr}) denklem 4.25 ile hesaplanmıştır.

$$P_{cr} = 0.218 * \frac{G_v*B^4*(1-\frac{B_L}{B})*(1-\frac{B_L^2}{B^2})}{t*T_r*(1+\frac{B_L^2}{B^2})} / 1000 \quad (4.25)$$

$$P_{cr} = 0.218 * \frac{0.7*1100^4*(1-\frac{275}{1100})*(1-\frac{275^2}{1100^2})}{8*296*(1+\frac{275^2}{1100^2})} / 1000 = 62437.74 \text{ kN}$$

Elastomer yalıtım birimlerinin düşey kararlılık kontrollerinde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında yatay yerdeğiştirmeli burkulma yükü (P'_{cr}) denklem 4.26 ile hesaplanmıştır.

$$P'_{cr} = P_{cr} * \frac{A_{re}}{A} = 46928.20 * \frac{520583.21}{950331.78} = 34202.83 \text{ kN} \quad (4.26)$$

Elastomer yalıtım birimlerinin, birim şekildeğiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi denklem 4.27 ile hesaplanmıştır.

$$P_{str} = \frac{3.5*A_{re}*E_c}{6*S} = \frac{3.5*520583.21*3793.87}{6*32.23} = 41129.07 \text{ kN} \quad (4.27)$$

Sonuç olarak; $\frac{\min(P_{cr}, P_{str})}{P_{K1}} = 4.89 \geq 2.0$ ve $\frac{\min(P'_{cr}, P_{str})}{P_{K2}} = 1.94 \geq 1.1$ olduğundan, düşey kararlılık kontrolleri yönetmelik şartları sağlanmıştır.

4.3 Etkin (Eşdeğer) Deprem Yüğü Analizi

Deprem yalıtım birimlerinin tasarım yerdeğiştirme taleplerinin belirlenmesinde eşdeğer deprem yükü analizi yapılmalıdır. Yalıtım birimi tasarımlarının yapıldığı aşamada bu süreç, iterasyonlar halinde birden çok kez gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde yapılan hesaplamalar burada özetlenmiştir.

4.3.1 Yalıtım arayüzü ve altyapının analizi

DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi alt limit değerleri (yerdeğiştirme hesabı yapılacağından) ile hesaplanan hakim titreşim periyodu denklem 4.28 ile gösterilmiştir.

$$T_M = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{g * K_M}} = 2\pi * \sqrt{\frac{2982.71 * 30}{9.81 * (2273.88 * 30)}} = 2.23 \text{ s} \quad (4.28)$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçekleme katsayısı η_M , denklem 4.29 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_M = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta_{izo}}} = \sqrt{\frac{10}{5 + 20.6}} = 0.624 \quad (4.29)$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için yalıtım birimi yerdeğiştirmesi D_M , denklem 4.30 ile hesaplanmıştır.

$$D_M = 1.3 * \left(\frac{g}{4 * \pi^2}\right) * T_M^2 * \eta_M * S_{ae}^{DD-1} \quad (4.30)$$

$$D_M = 1.3 * \left(\frac{9.81}{4 * \pi^2}\right) * 2.23^2 * 0.624 * 0.526 = 0.548 \text{ m}$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için yalıtım birimi toplam yerdeğiştirmesi D_{TM} , denklem 4.31 ile hesaplanmıştır.

$$D_{TM} = D_M * \left[1 + y * \frac{12 * e}{b^2 + d^2}\right] = 0.548 * \left[1 + 16 * \frac{12 * 0.05}{32^2 + 20^2}\right] = 0.552 \text{ m} \quad (4.31)$$

Hesaplanan değer $1.1 * D_M$ 'den küçük olduğundan yalıtım birimi toplam yerdeğiştirmesi hesabı denklem 4.32 ile revize edilmiştir.

$$D_{TM,Tasarım} = 1.1 * D_M = 1.1 * 0.548 = 0.603 \quad (4.32)$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde altyapıya etkiyen kuvvet ($R=1$) $V_{M,alt}$, yalıtım birimi üst limit değerleri kullanılarak denklem 4.33 ile hesaplanmıştır.

$$V_{M,alt} = \frac{S_{ae}^{DD-1} * W * \eta_M}{R} = \frac{0.961 * 89481.42 * 0.535}{1} = 46005.53 \text{ kN} \quad (4.33)$$

4.3.2 Üstyapının analizi

DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde, yalıtım birimi üst limit değerleri ile hesaplanan hakim titreşim periyodu denklem 4.34 ile gösterilmiştir.

$$T_D = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{g * K_D}} = 2\pi * \sqrt{\frac{2982.71 * 30}{9.81 * (14034.72)}} = 0.925 \text{ s} \quad (4.34)$$

DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçekleme katsayısı η_D , denklem 4.35 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_D = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta_{izo}}} = \sqrt{\frac{10}{5 + 30}} = 0.535 \quad (4.35)$$

DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde üstyapıya etkiyen kuvvet $V_{D,üst}$ yalıtım birimi üst limit değerleri kullanılarak denklem 4.36 ile hesaplanmıştır.

$$V_{D,üst} = \frac{S_{ae}^{DD-2} * W * \eta_D}{R} = \frac{0.677 * 89481.42 * 0.535}{1.5} = 21575.88 \text{ kN} \quad (4.36)$$

Hesapta kullanılan taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R), deprem yalıtımlı binaların sınırlı hasar performans hedefine göre belirlenmiştir.

Üstyapı tasarım kuvvetlerinin, görelî kat ötelemelerinin ve dolayısıyla deprem performansının belirlenmesinde eşdeğer deprem yükü yönteminin tek başına yeterli olması bazı yönetmelik şartlarına bağlıdır. Bu şartlardan bazıları sağlanmadığından; eşdeğer deprem yükü analiz sonuçları ile doğrudan üstyapı deprem performans seviyesinin belirlenmesi mümkün değildir. Bu sebeple; üstyapı için DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde mod birleştirme analizi gerçekleştirilecektir.

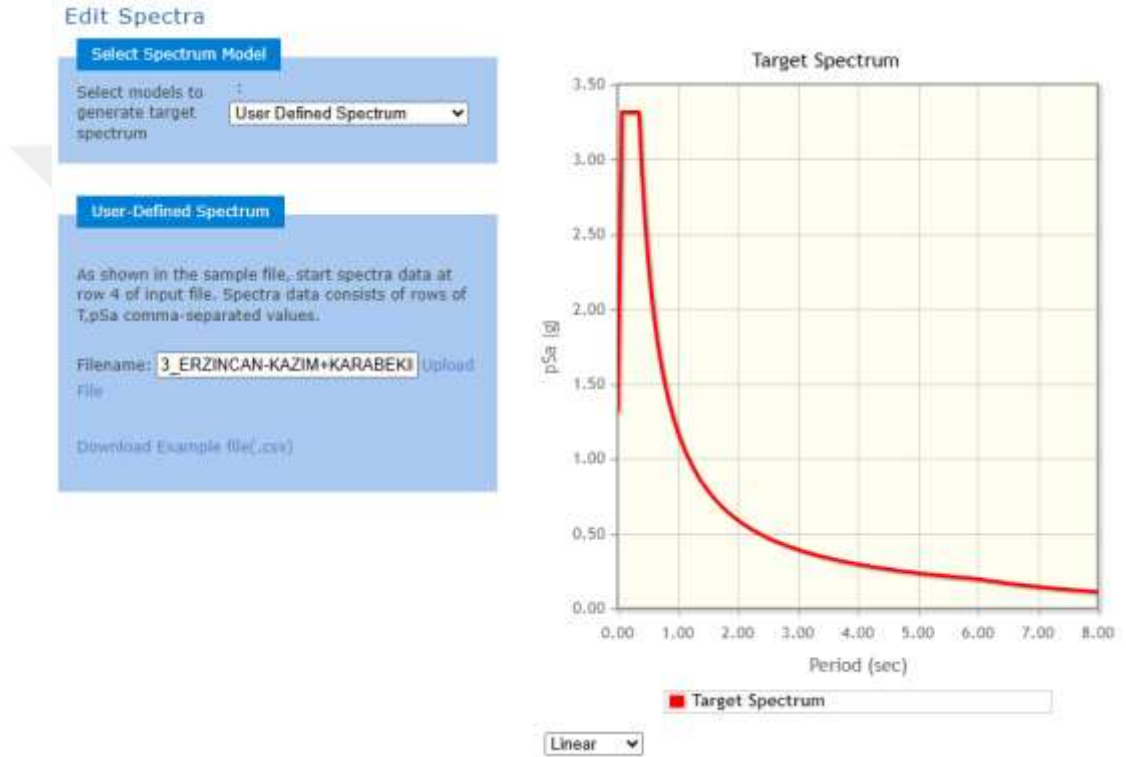
4.4 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz

Yakın fay etkisini gözlemlemek ve deprem yalıtım birimlerinin tasarımında dikkate almak amacıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

İzolatör yerdeğiştirme talepleri inceleneceğinden analizler, yalıtım birimlerinin alt limit değerleri dikkate alınarak yapılmıştır.

4.4.1 Deprem kayıtlarının seçilmesi

Analizlerde kullanılacak deprem kayıtları, “PEER Strong Motion Database” üzerinden elde edilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak DD-1 deprem yer hareketi düzeyi elastik tasarım ivme spektrumu “target spectrum” yani hedef spektrum olarak Şekil 4.2 ile gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



Şekil 4.2 : Hedef spektrumun siteye tanıtılması.

Ardından “search records” kısmından deprem kaydı arama arayüzüne girilmiştir. Burada arama parametreleri bölümüne moment büyüklüğü 6-8 arasında, 30m ortalama kayma dalgası hızı (V_{s30}) değeri ise yapının zemin sınıfına uygun olacak şekilde 360-760 m/s olarak girilmiştir. Yakın-fay etkisini içeren deprem kayıtlarının elde edilebilmesi amacıyla “ONLY Pulse-like Records” seçeneği seçilmiştir. Ek olarak deprem kaynağına uzak istasyon kayıtlarını elimine etmek amaçlı R_{JB} (Joyner-Boore mesafesi) 25km ile sınırlandırılmış ve R_{rup} (fay düzlemine en yakın mesafe) parametreleri de eklenmiştir.

Ölçeklemede kullanılacak spektral ordinatların hesaplanmasında, TBDY-2018’e uygun olan SRSS yöntemi tercih edilmiştir. Sönüm oranı 5%, spektrumların ortalama

hesap yöntemi ise aritmatik olarak seçilmiştir. Ölçekleme (scaling) kısmına elastik tasarım ivme spektrumu köşe noktaları, $0.5T_M$ (DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi üst limit özellikleri ile hesaplanmış hakim titreşim periyodu) ve $1.25T_M$ (DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi alt limit özellikleri ile hesaplanmış hakim titreşim periyodu) değerleri girilmiş; ağırlık çarpanları ise eşit olacak şekilde 1,1,1,1 olarak belirlenmiştir.

Analizlerde kullanılacak deprem kayıtları için yapılan tüm seçimler Şekil 4.3 ile gösterilmiştir.

New Search

Load Sample Input Values Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the *NSA-World* database. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : RSN(s), RSN(s)

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type : All Types

Magnitude : 6.8

RJB(km) : 0.25

Rrup(km) : 0.100

Vs30(m/s) : 350.750

D5-95(sec) :

Pulse : ONLY Pulse-like Records

Additional Characteristics:

Max No. Records : (<=100)

Initial Scalefactor :

Suite

Spectral Ordinate : SRSS

Damping Ratio : 5%

Suite Average : Arithmetic

Scaling

Scaling Method : Minimize MSE

MSE = Computed Weighted Mean Squared Error of record, and suite average, wrt target spectrum.

Weight Function

Used in both search and scaling when computing MSE. Values can be updated for rescaling. Intermediate points are interpolated with $W = f_w(\log(T))$.

Period Points : 0.07, 0.4, 1.3, 6 (T1, T2, ..., Tn)

Weights : 1, 1, 1 (W1, W2, ..., Wn)

Şekil 4.3 : Deprem kaydı aramasında kullanılan parametreler.

Aramalar sonucu listelenen deprem kayıtları; ölçekleme katsayıları, pulse periyotları, R_{JB} mesafeleri ve kullanılabilecek en düşük frekans özelliklerine göre seçilmiştir ve indirilmiştir. PEER üzerinden elde edilen kayıtların yanında, AFAD-TADAS sistemi (<https://tadas.afad.gov.tr/>) kullanılarak elde ettiğimiz, ülkemizde ciddi yıkımlara sebep olan “6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri” uygun ivme kayıtları da indirilmiş ve analizlere dahil edilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler kapsamında kullanılmak üzere seçilmiş deprem kayıtları Çizelge 4.4 ile listelenmiştir.

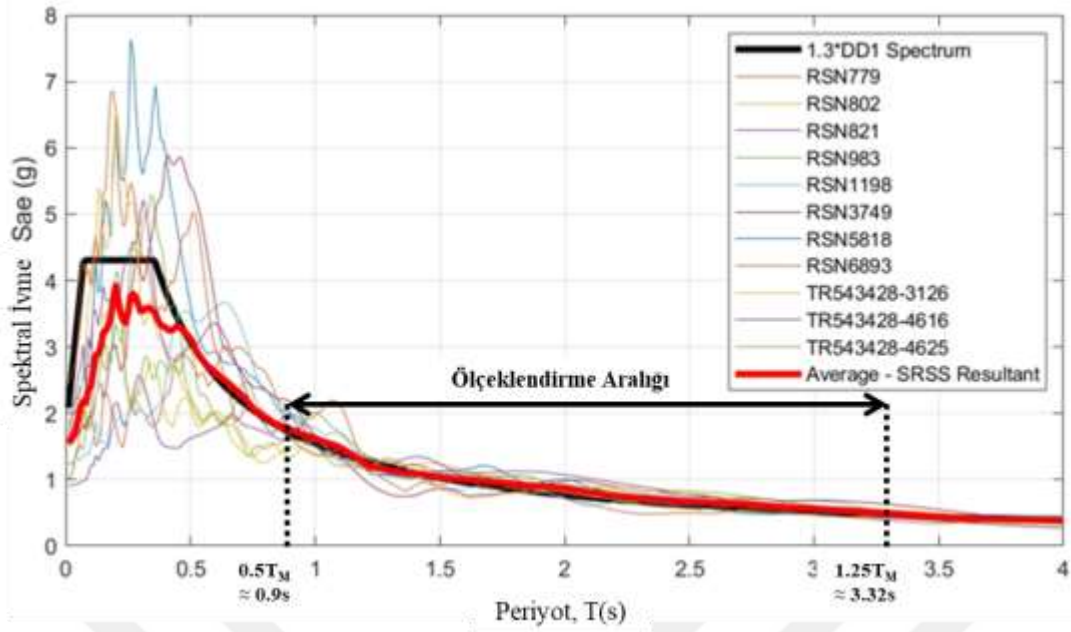
Çizelge 4.4 : Analizler için seçilen deprem kayıt bilgileri.

Deprem Adı	Yıl	Kayıt Numarası	R_{JB} (km)	V_{S30} (m/s)	Deprem Büyüklüğü
Lome Prieta, ABD	1989	RSN779	0	594	6.93
Lome Prieta, ABD	1989	RSN802	7.58	380	6.93
Erzincan, Turkey	1992	RSN821	0	352	6.69
Northridge-01, ABD	1994	RSN983	0	525	6.69
Chi-Chi, Taiwan	1999	RSN1198	10.96	544	7.62
Kahramanmaraş, Turkey	2023	TR543428_3126	15.40	350	7.8
Cape Mendocino, ABD	1992	RSN3749	16.54	355	7.01
Kahramanmaraş, Turkey	2023	TR543428_4616	2.30	390	7.8
Kahramanmaraş, Turkey	2023	TR543428_4625	11.10	346	7.8
Iwate, Japan	2008	RSN5818	12.83	512	6.9
Darfield, New Zealand	2010	RSN6893	11.86	344	7

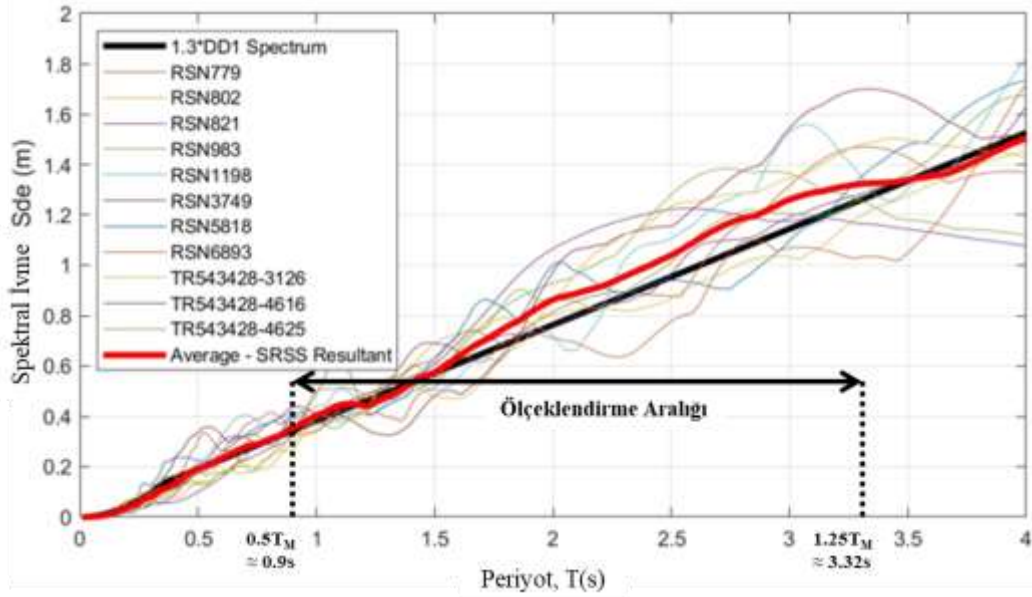
4.4.2 Deprem kayıtlarının ölçeklenmesi

Ulusal yönetmeliğimiz TBDY-2018’de bu konu, “Deprem Kayıtlarının Spektral Uyuşum Sağlanacak Şekilde Dönüştürülmesi” ve “Deprem Kayıtlarının Basit Ölçeklendirme Yöntemi ile Ölçeklendirilmesi” şeklinde iki ana başlık altında işlenmiştir. Ölçeklendirme sırasında yakın-fay deprem kayıtlarının “pulse” (ani atım) etkilerini korumak için spektral uyum yöntemi yerine basit ölçeklendirme yöntemi tercih edilmiştir.

İlk olarak her bir deprem kaydının iki yatay bileşeni ile birbirinden ayrı yatay ivme spektrumları oluşturulmuştur. Ardından yönetmelikte tarif edildiği şekilde, aynı depreme ait iki yatay bileşen ivme spektrumları SRSS yöntemi ile birleştirilmiş ve her bir deprem için bileşke yatay ivme spektrumları (toplam 11 adet) elde edilmiştir. Daha sonra, oluşturulan 11 bileşke yatay ivme spektrumun aritmetik ortalaması alınmış ve ortalama bileşke yatay ivme spektrumu elde edilmiştir. Elde edilen ortalama bileşke yatay ivme spektrumu ve elastik tasarım ivme spektrumu üst üste getirilmiş ve yönetmelik tarafından belirtilen periyot aralığı için ($0.5T_M-1.25T_M$) ölçeklendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirme çalışmaları kapsamında deprem kayıtları bazı katsayılar ile çarpılmış ve ortalama bileşke yatay ivme spektrumunun $0.5T_M-1.25T_M$ aralığında yatay elastik tasarım ivme spektrumunun altına düşmemesi amaçlanmıştır. Yapılan basit ölçeklendirme çalışmasının sonuçları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ile sunulmuştur.



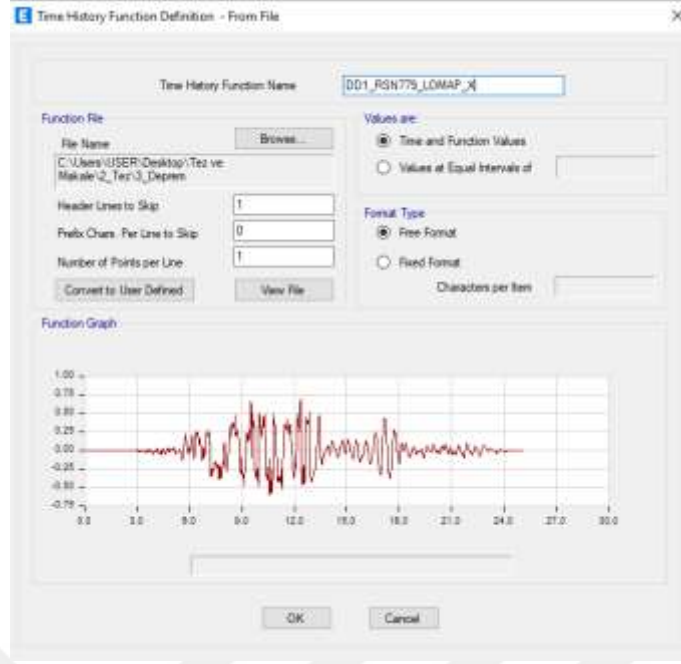
Şekil 4.4 : Ölçeklendirilmiş kayıtlar ile elde edilen ortalama ivme spektrumu.



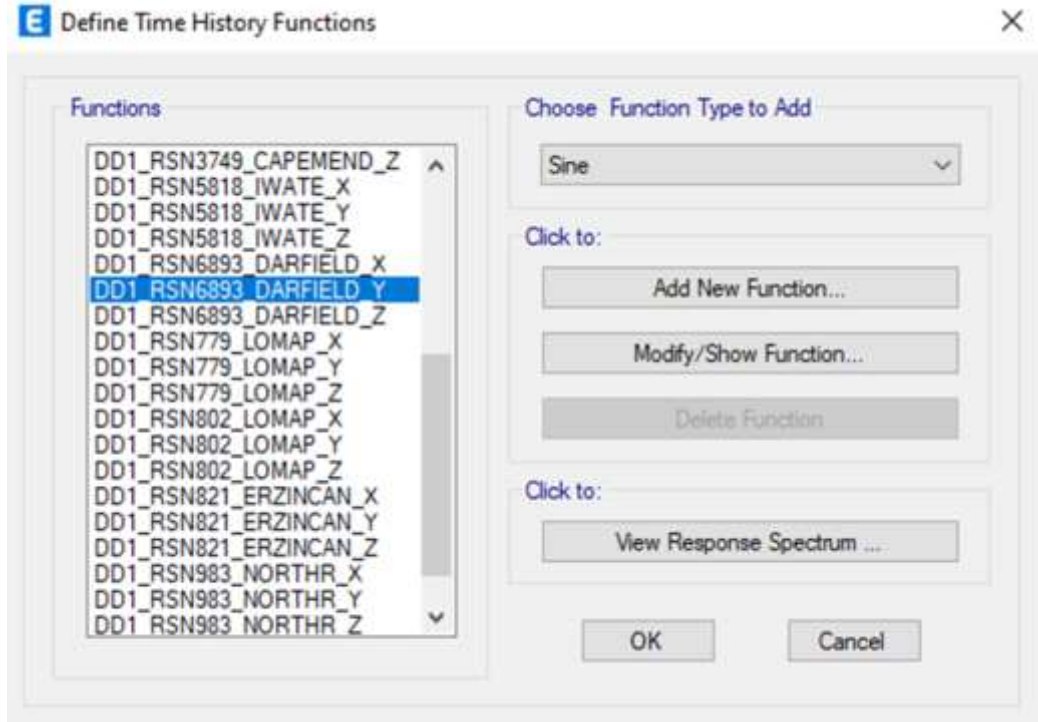
Şekil 4.5 : Ölçeklendirilmiş kayıtlar ile elde edilen ortalama yerdeğiştirme spektrumu.

4.4.3 Analiz programı tanımlamaları

Binanın düşey yönde hakim titreşim periyodu 0.1sn'den büyük olduğu için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz TBDY-2018'e uygun olacak şekilde depremin üç bileşeni kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda, analizler için seçilen ve ölçeklendirilen 11 deprem kaydının her bileşeni (2 yatay, 1 düşey) ayrı fonksiyonlar olarak programa tanımlanmıştır. Tanımlaması yapılan bir deprem kaydı örneği Şekil 4.6 ile; tanımlanmış diğer deprem kayıtları ise Şekil 4.7 ile sunulmuştur.

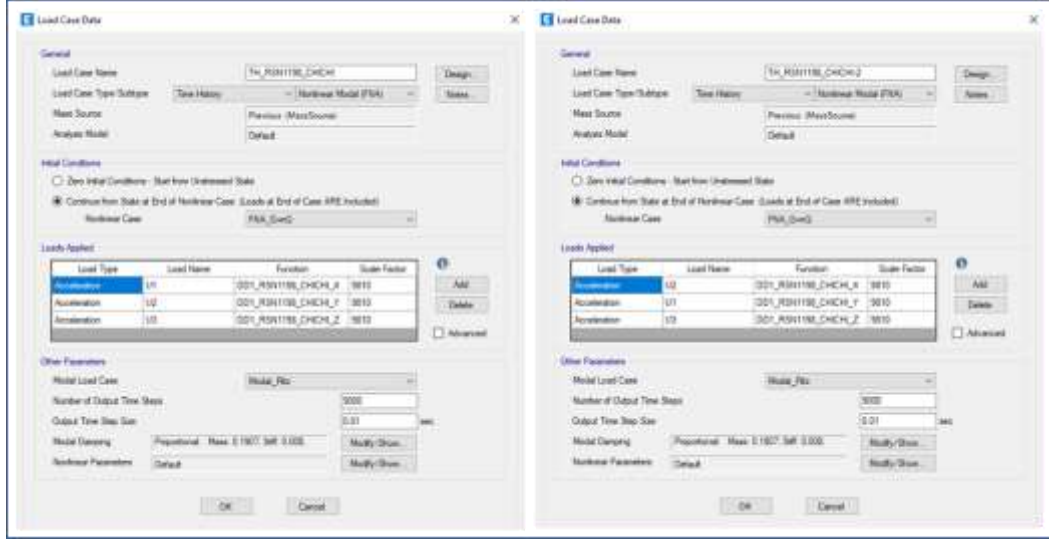


Şekil 4.6 : Tanımlanmış bir deprem kaydı örneği.



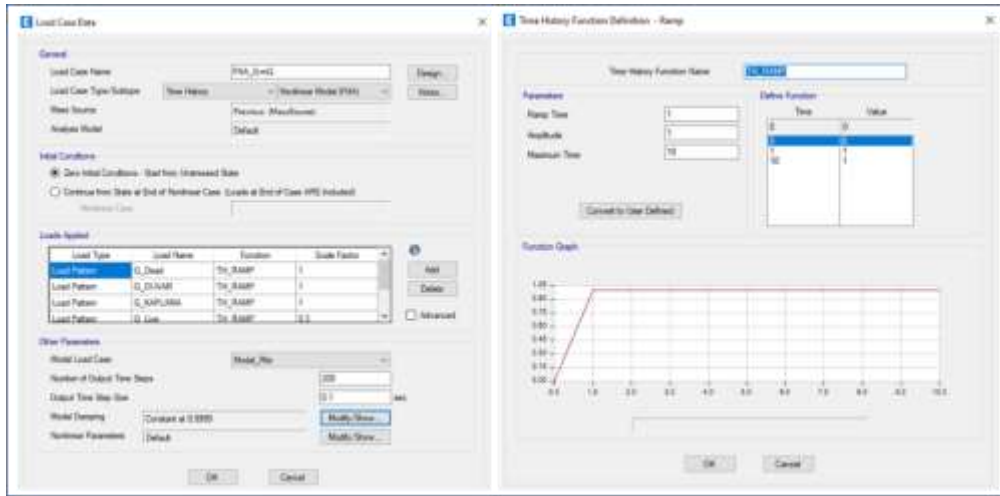
Şekil 4.7 : Tanımlanan diğer deprem kayıtları.

Ardından deprem kayıtları için yükleme senaryoları (load case) oluşturulmuştur. Her depremin iki yatay bileşeni, binanın iki yatay doğrultusuna etkitilecek şekilde toplam 22 adet yükleme senaryosu oluşturulmuştur. Oluşturulan bir yükleme senaryosu örneği Şekil 4.8 ile sunulmuştur.



Şekil 4.8 : Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için oluşturulan “Load Case” örneği.

Yükleme senaryosu tipi zaman tanım alanında doğrusal olmayan modal (fast nonlinear analysis, FNA) seçilmiştir. Programın ivme birimi mm/s^2 ve deprem kaydı ivme birimleri g ($\sim 9.81\text{m/s}^2$) olduğundan, ivme ölçeklendirme katsayısı 9810 ile çarpılarak hesaplanmış ve programa girilmiştir. Sonuçların görüntüleneceği çıktı sayısı ivme kayıtlarında yer alan toplam veri sayısı, zaman aralığı ise verilerin arasındaki süre olarak girilmiştir. Başlangıç senaryosu olarak analiz türüne özel ayrı bir G+nQ (sismik kütle) yükleme senaryosu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu senaryo ile ilgili detaylar Şekil 4.9 ile sunulmuştur. Şekilde görüleceği üzere ölü yüklerin tamamı, hareketli yüklerin ise 30% kadarı (ofis binası) yükleme olarak etkililmiş, yükleme fonksiyonu olarak ise rampa fonksiyonu tercih edilmiştir. Modal case olarak Ritz metodu, sönüm oranı olarak ise 99.99% seçilmiştir.



Şekil 4.9 : FNA için oluşturulan sismik kütle yüklemesi ve rampa fonksiyonu.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için deprem kayıtları ile oluşturduğumuz yükleme senaryolarında “Modal Damping” kısmına yapılan tanımlamalar Şekil 4.10 ile sunulmuştur. Yapının modal analiz sonuçları incelendiğinde ilk 3 modun yalıtım birimi modlarından oluştuğu görülmüştür. İzolatör etkisi olan modlarda yapının doğal sönüm oranı 0’a çok yakın olduğundan Overwrites seçeneği ile bu modlarda dikkate alınacak doğal sönüm oranı 0 olarak girilmiştir.

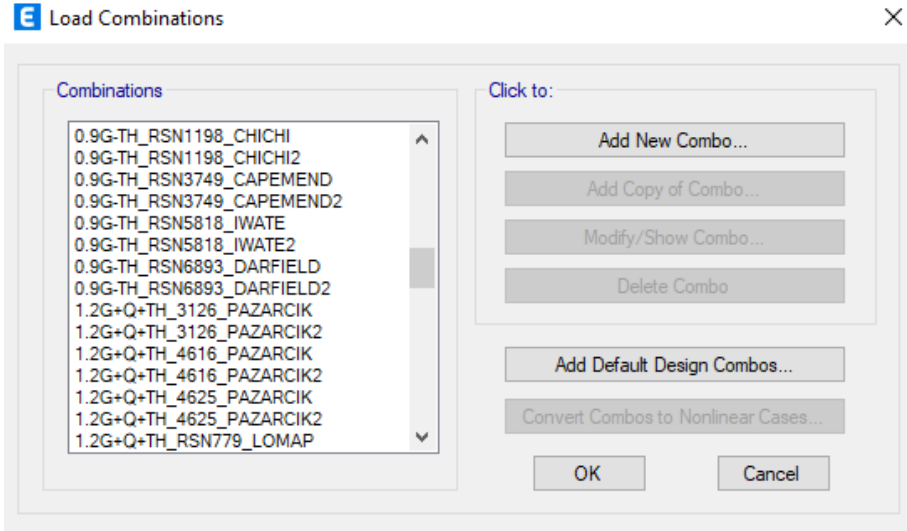
Şekil 4.10 : FNA analizleri yapılan modal damping tanımlamaları.

Deprem yalıtım birimleri için gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için kullanılan yük birleşimleri denklem 4.37 ve denklem 4.38 ile gösterilmiştir.

$$1.2G + Q \pm E_d \quad (4.37)$$

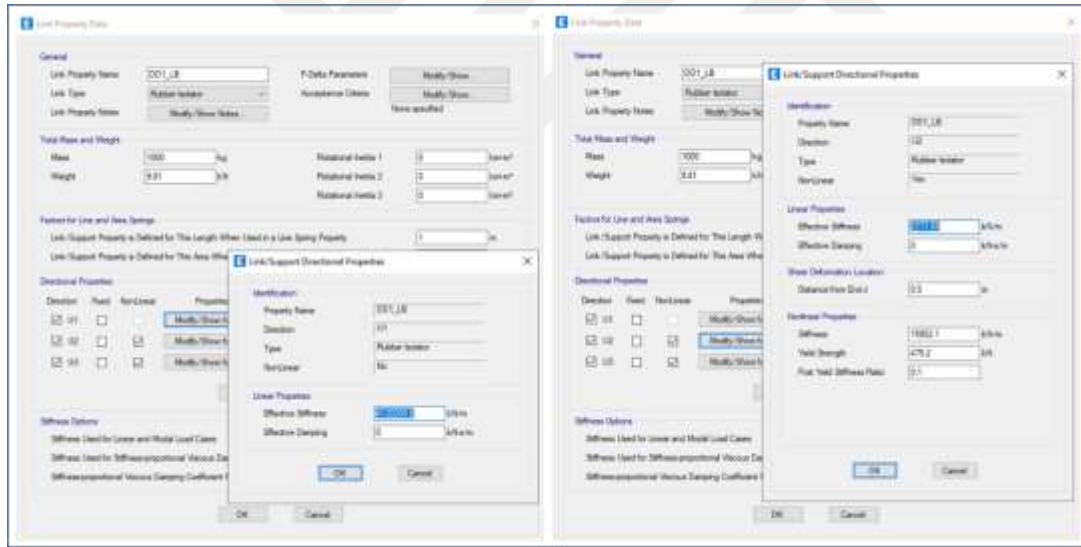
$$0.9G \pm E_d \quad (4.38)$$

Oluşturulan yük birleşimleri ve zarf kombinasyonları Şekil 4.11 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için oluşturulan yük birleşimleri.

KÇE deprem yalıtım birimlerinin analiz programına tanımlanma detayları Şekil 4.12 ile sunulmuştur.



Şekil 4.12 : KÇE deprem yalıtım birimleri için yapılan U_1 , U_2 ve U_3 tanımlanmaları.

KÇE deprem yalıtım birimleri tanımlanırken link türü olarak “Rubber İzolatör” seçeneği seçilmiştir. İzolatör kütlesi 1000kg olarak girilmiştir. U_1 yönünde efektif rijitlik alanına yalıtım biriminin düşey rijitlik değeri (k_v); U_2 ve U_3 yönünde efektif rijitlik bölümüne yalıtım biriminin D yerdeğiştirmesine denk gelen yatay rijitlik değeri (k_e), rijitlik (stiffness) bölümüne yalıtım biriminin birincil rijitlik değeri (k_1), akma gerilmesi (yield strength) kısmına yalıtım biriminin etkin akma dayanımı (F_y), post

yield stiffness ratio alanına ise yalıtım biriminin birincil rijitlik değerinin ikincil rijitlik değerine olan oranı (k_1/k_2) girilmiştir.

4.4.4 Analiz sonuçları

11 farklı deprem ivme kaydı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda, KÇE deprem yalıtım birimlerinde X-X doğrultusunda ve Y-Y doğrultusunda oluşan maksimum yerdeğiştirme değerleri ($U_{2,Maks}$ ve $U_{3,Maks}$), herhangi bir zaman adımında oluşan maksimum vektörel yerdeğiştirme ($SRSS_{Maks}$) ve son olarak elde edilen 11 maksimum vektörel yerdeğiştirme değerinin ortalaması ($SRSS_{Ort(Maks)}$) Çizelge 4.5 ile sunulmuştur.

Çizelge 4.5 : Deprem ivme kayıtlarının analizi ve KÇE deprem yalıtım birimi yerdeğiştirmeleri.

Deprem İvme Kaydı	$U_{2,Maks}$ (mm)	$U_{3,Maks}$ (mm)	$SRSS_{Maks}$	$SRSS_{Ort(Maks)}$
3126-PAZARCIK	486.37	463.64	634.92	
4616-PAZARCIK	508.26	546.08	583.95	
4625-PAZARCIK	622.37	623.18	627.09	
RSN779-LOMAP	266.99	253.25	387.94	
RSN802-LOMAP	308.53	326.47	539.70	
RSN821-ERZINCAN	285.95	288.46	359.30	511.23
RSN983-NORTHR	261.63	248.29	407.65	
RSN1198-CHICHI	385.63	347.97	426.29	
RSN3749-CAPEMEND	370.43	333.95	469.29	
RSN5818-IWATE	534.42	564.16	618.11	
RSN6893-DARFIELD	460.82	445.96	569.29	

TBDY-2018'e göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme değeri, etkin deprem yükü yöntemi ile hesaplanan yalıtım birimi toplam yerdeğiştirme (D_{TM}) değerinin 80%'i ile karşılaştırılmalıdır. İlgili karşılaştırma denklem 4.39 ile gerçekleştirilmiştir.

$$0.8 * D_{TM} = 0.8 * 603 = 482 \text{ mm} < 517.69 \text{ mm} \quad (4.39)$$

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile elde edilen yalıtım birimi yerdeğiştirme değerleri, etkin (eşdeğer) deprem yükü analizi ile elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin 80%'inden büyük elde edilmiştir. Dolayısıyla 517.69mm yerdeğiştirme değeri, tasarıma esas değer olarak belirlenmiştir. Belirlenen tasarım

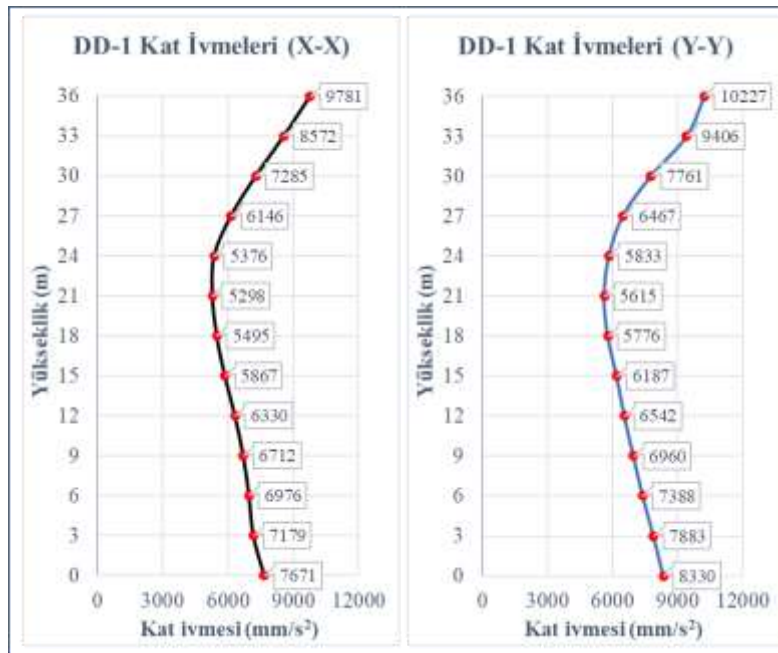
yerdeğiştirme değeri, KÇE yalıtım birimlerinin maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin (592 mm) altındadır.

Üstyapı kat ivmelerinin incelenmesi için DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi nominal özellikleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen X-X ve Y-Y doğrultusu kat ivmeleri Çizelge 4.6 ile paylaşılmıştır.

Çizelge 4.6 : X-X ve Y-Y doğrultuları kat ivmeleri.

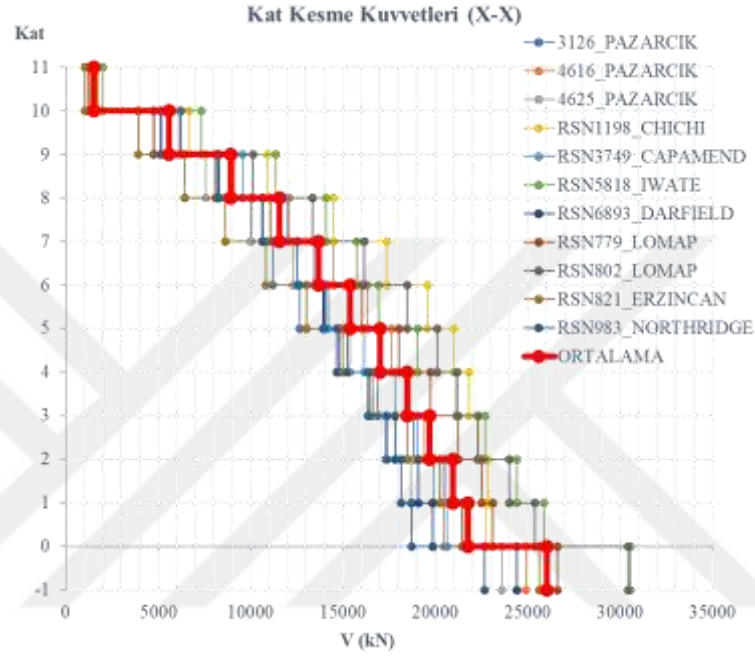
Kat	X-X (mm/s ²)	Y-Y (mm/s ²)
ÇK (+36.00)	9780.96	10227.02
10.NK (+33.00)	8571.70	9405.67
9.NK (+30.00)	7285.10	7760.79
8.NK (+27.00)	6145.85	6467.39
7.NK (+24.00)	5375.89	5833.31
6.NK (+21.00)	5298.10	5614.93
5.NK (+18.00)	5495.41	5775.89
4.NK (+15.00)	5866.58	6186.53
3.NK (+12.00)	6330.30	6542.41
2.NK (+9.00)	6712.15	6959.51
1.NK (+6.00)	6976.05	7388.19
ZK (+3.00)	7178.77	7883.30
BK (-+0.00)	7671.25	8330.41

Verilerin daha kolay incelenebilmesi ve yorumlanabilmesini sağlamak için Çizelge 4.6’da paylaşılan kat ivme değerleri görselleştirilmiştir. X-X ve Y-Y doğrultuları için oluşturulan ivme grafikleri Şekil 4.13 ile paylaşılmıştır.

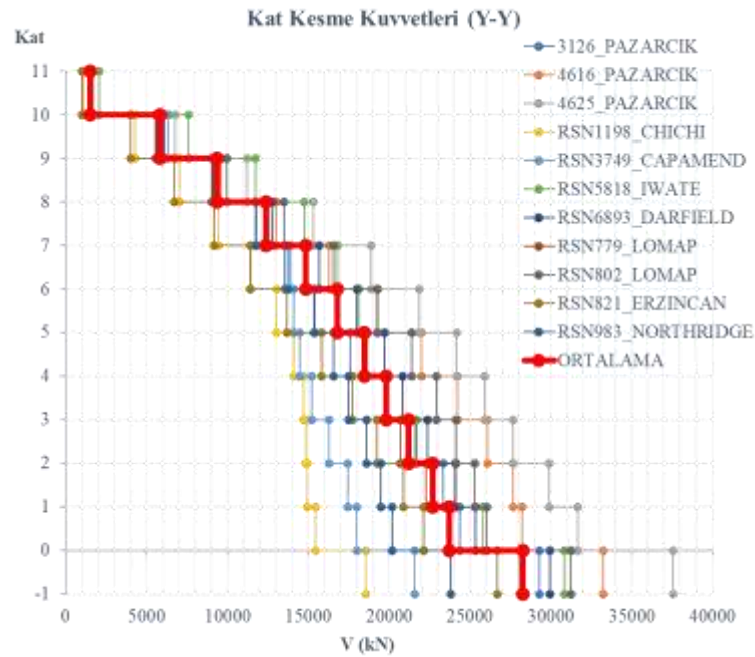


Şekil 4.13 : X-X ve Y-Y doğrultusu için hesaplanan kat ivmeleri.

Ek olarak, önceki bölümde DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları, DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre tekrar ölçeklendirilmiş ve deprem yalıtım birimi üst limit değerleri ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak üstyapı kat kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Elde edilen üstyapı kat kesme kuvvetleri, X-X ve Y-Y doğrultusu için sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 ile paylaşılmıştır.



Şekil 4.14 : X-X doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.



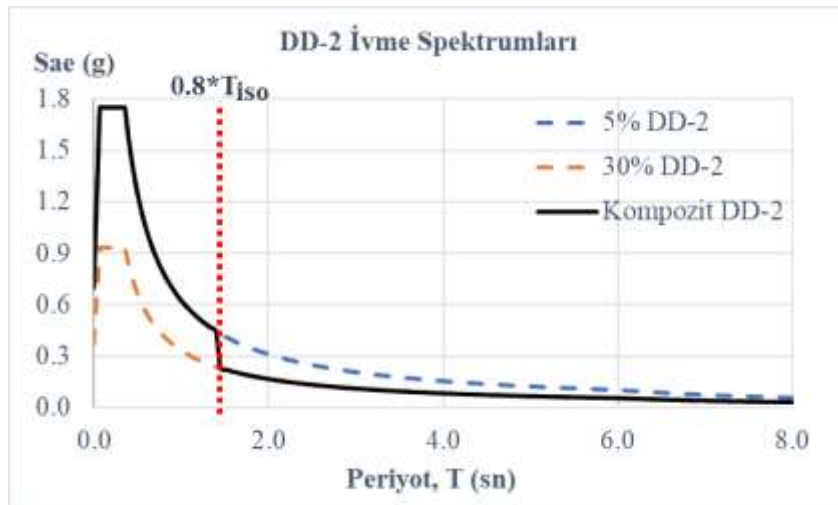
Şekil 4.15 : Y-Y doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.

4.5 Mod Birleştirme Yöntemi ile Analiz (Üstyapı)

Üstyapı deprem performansının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen mod birleştirme analizi ile ilgili detaylar ve hesaplamalar bu bölümde sunulmuştur.

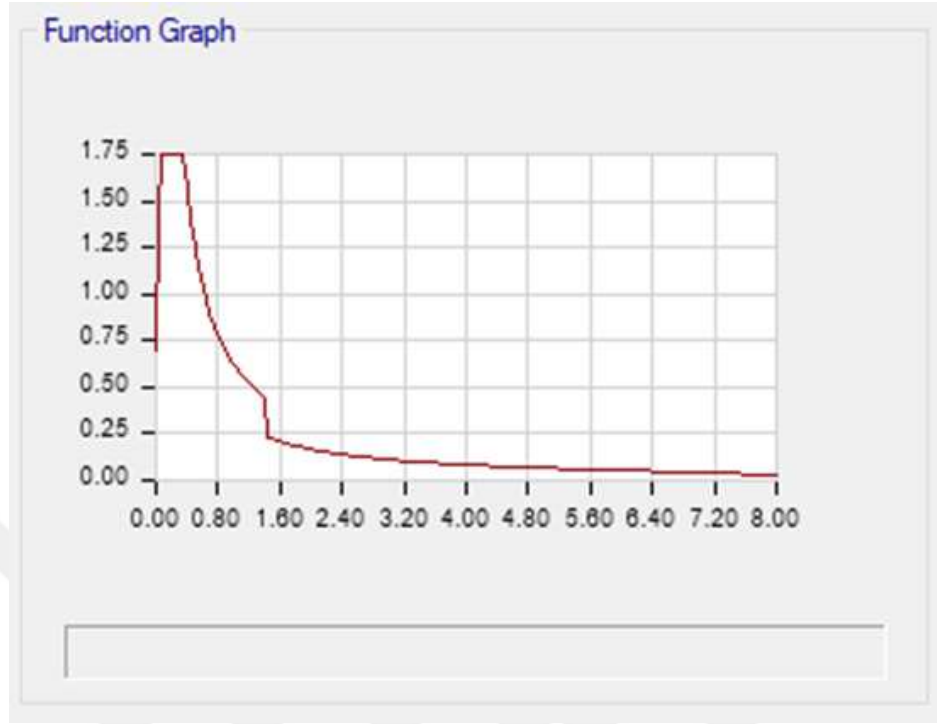
İzolatörlü yapılar için gerçekleştirilen mod birleştirme analizlerinde, elastik tasarım ivme spektrumları yerine kompozit ivme spektrumları kullanılmalıdır. Kompozit ivme spektrumları, yalıtım birimi etkisindeki modların (ilk 3 mod) ve diğer modların birbirinden bağımsız ivme değerleri ile analiz edilebilmesini sağlar. Bu sayede, deprem yalıtımlı davranışın sağladığı sönüm etkisi ve deprem yalıtımsız yapı davranışı tek bir spektrum ile temsil edilebilir. Bu da yapının tüm mod davranışlarının daha doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar.

DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde üstyapının analizi için oluşturulan kompozit ivme spektrumu Şekil 4.14 ile sunulmuştur. TBDY-2018’de deprem yalıtımlı yapıların mod birleştirme analizlerinde kullanılacak maksimum etkin sönüm oranı 30% olarak belirtilmiştir. Bu sebepten ötürü sönüm ölçeklendirme katsayısının hesabında etkin sönüm yüzdesi 30% olarak dikkate alınmıştır. Sönüm ölçeklendirme katsayısının ivme spektrumuna etkitileceği yer, NZSEE (New Zealand Society for Earthquake Engineering) tarafından yayınlanan “Guideline for the Design of Seismic Isolation Systems for Buildings” dokümanında tavsiye edildiği şekilde $0.8 \cdot T_{iso}$ formülü ile belirlenmiştir [29]. Formülde yer alan T_{iso} ifadesi, DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde deprem yalıtım birimi üst limit değerleri kullanılarak kurulan analiz modelinde, gerçekleştirilen modal analizler sonucu elde edilen hakim titreşim periyodunu ifade etmektedir.



Şekil 4.16 : DD-2 kompozit ivme spektrumunun oluşturulması.

Oluşturulan DD-2 deprem yer hareketi düzeyi kompozit ivme spektrumunun analiz programında tanımlanması Şekil 4.15 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.17 : DD-2 kompozit ivme spektrumunun analiz programına tanımlanması.

Ardından X-X ve Y-Y doğrultuları için ayrı response spectrum (RS) load case tanımlamaları yapılmıştır. Yapılan tanımlamalar Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 ile gösterilmiştir.

E Load Case Data [X]

General

Load Case Name: SPEC_Erzincan_X [Design...]

Load Case Type: Response Spectrum [Notes...]

Mass Source: Previous (MassSource)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	DD-2_ErzincanSpec	6540

[Add] [Delete] [Advanced]

Şekil 4.18 : X-X doğrultusu için yapılan response spectrum analizi load case tanımlaması.

Load Case Data

General

Load Case Name: SPEC_Erzincan_Y

Load Case Type: Response Spectrum

Mass Source: Previous (MassSource)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	DD-2_ErzincanSpec	6540

Buttons: Design..., Notes..., Add, Delete, Advanced

Şekil 4.19 : Y-Y doğrultusu için yapılan response spectrum analizi load case tanımlaması.

Üstyapıda kullanılan deprem etkisini içeren yük birleşimleri denklem 4.40, denklem 4.41, denklem 4.42 ve denklem 4.43 ile gösterilmiştir.

$$E_d^{(H)} = \pm E_d^{(X)} \pm 0.3E_d^{(Y)} \quad (4.40)$$

$$E_d^{(H)} = \pm 0.3E_d^{(X)} \pm E_d^{(Y)} \quad (4.41)$$

$$G + Q + 0.2S + E_d^{(H)} + 0.3E_d^{(Z)} \quad (4.42)$$

$$0.9G + H + E_d^{(H)} - 0.3E_d^{(Z)} \quad (4.43)$$

Oluşturulan yük birleşimleri ve zarf kombinasyonları Şekil 4.18 ile gösterilmiştir.

Combinations

Click to:

Buttons: Add New Combo..., Add Copy of Combo..., Modify/Show Combo..., Delete Combo, Add Default Design Combos..., Convert Combos to Nonlinear Cases..., OK, Cancel

Şekil 4.20 : Mod birleştirme analizleri için oluşturulmuş yük birleşimleri.

Analiz sonucu elde edilen taban kesme kuvveti, kat kesme kuvvetleri ve taban kesme kuvveti/bina ağırlığı oranları Çizelge 4.7 ile, kat yerdeğiştirmeleri ve görelî kat ötelenmeleri ise Çizelge 4.8 ile sunulmuştur.

Çizelge 4.7 : Taban kesme kuvveti, kat kesme kuvvetleri ve V/W oranı.

Kat	Yük Birleşimi	V _X (kN)	V _Y (kN)	V _{base} /W
ÇK (+36.00)		1015.82	1032.64	
10.NK (+33.00)		3643.63	3799.89	
9.NK (+30.00)		5576.99	5909.11	
8.NK (+27.00)		6925.04	7449.77	
7.NK (+24.00)		7773.60	8481.48	
6.NK (+21.00)		8251.76	9114.89	
5.NK (+18.00)	DD-2_ENV_SPEC	8494.23	9481.22	0.13 ~ 0.14
4.NK (+15.00)		8629.40	9719.19	
3.NK (+12.00)		8786.13	9972.47	
2.NK (+9.00)		9092.29	10376.23	
1.NK (+6.00)		9642.78	11018.77	
ZK (+3.00)		10455.23	11899.04	
BK (-+0.00)		11278.61	12732.63	

Çizelge 4.8 : Üstyapı kat yerdeğiştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri.

Doğrultu	Kat	Yerdeğiştirme (mm)	Görelî Öteleme (mm)	h _i
X-X	ÇK (+36.00)	125.24	3.85	0.001
	10.NK (+33.00)	143.55	5.43	0.002
	9.NK (+30.00)	139.75	6.98	0.002
	8.NK (+27.00)	134.85	8.39	0.003
	7.NK (+24.00)	128.84	9.49	0.003
	6.NK (+21.00)	121.83	10.27	0.003
	5.NK (+18.00)	113.91	10.83	0.004
	4.NK (+15.00)	105.11	11.34	0.004
	3.NK (+12.00)	95.35	12.00	0.004
	2.NK (+9.00)	84.44	13.15	0.004
	1.NK (+6.00)	71.96	15.29	0.005
	ZK (+3.00)	57.06	19.47	0.006
	ÇK (+36.00)	134.75	3.52	0.001
	10.NK (+33.00)	147.24	5.46	0.002
Y-Y	9.NK (+30.00)	143.14	6.96	0.002
	8.NK (+27.00)	137.97	8.35	0.003
	7.NK (+24.00)	131.72	9.43	0.003
	6.NK (+21.00)	124.51	10.19	0.003
	5.NK (+18.00)	116.46	10.72	0.004
	4.NK (+15.00)	107.62	11.16	0.004
	3.NK (+12.00)	97.94	11.72	0.004
	2.NK (+9.00)	87.25	12.74	0.004
	1.NK (+6.00)	75.14	14.84	0.005
	ZK (+3.00)	60.64	19.32	0.006

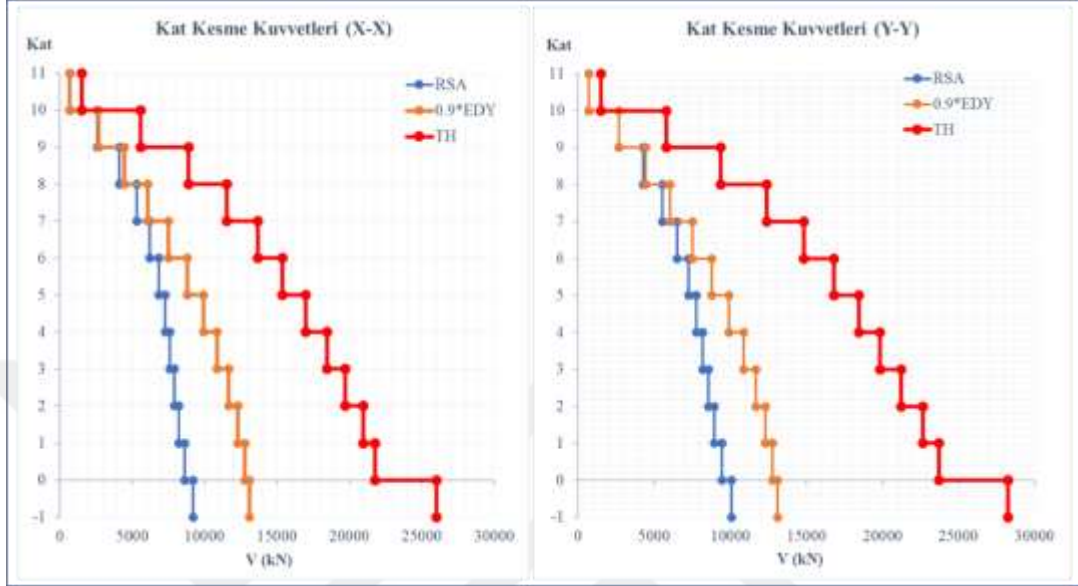
TBDY-2018'e göre üstyapıda A1 (burulma düzensizliği), B2 (yumuşak kat düzensizliği) veya B3 (düşey eleman süreksizliği) düzensizliklerinden herhangi birinin bulunması durumunda mod birleştirme analizi ile hesaplanan yerdeğiştirmeler ve üstyapı kuvvetleri, etkin (eşdeğer) deprem yükü yöntemi ile gerçekleştirilen hesapların 90%'ından az olmamalıdır. İlgili düzensizliklerin bulunmaması durumunda ise bu oran 80% olarak değişir.

Düşey taşıyıcı elemanlarda herhangi bir süreksizlik durumu ve katlar arasında kesit farklılıkları olmadığından B2 ve B3 düzensizlikleri üstyapıda mevcut değildir ancak yapılan kontroller sonucunda A1 türü düzensizlik tespit edilmiştir. İlgili kontroller Çizelge 4.9 ile paylaşılmıştır.

Çizelge 4.9 : Üstyapı burulma düzensizliği (A1) kontrolü.

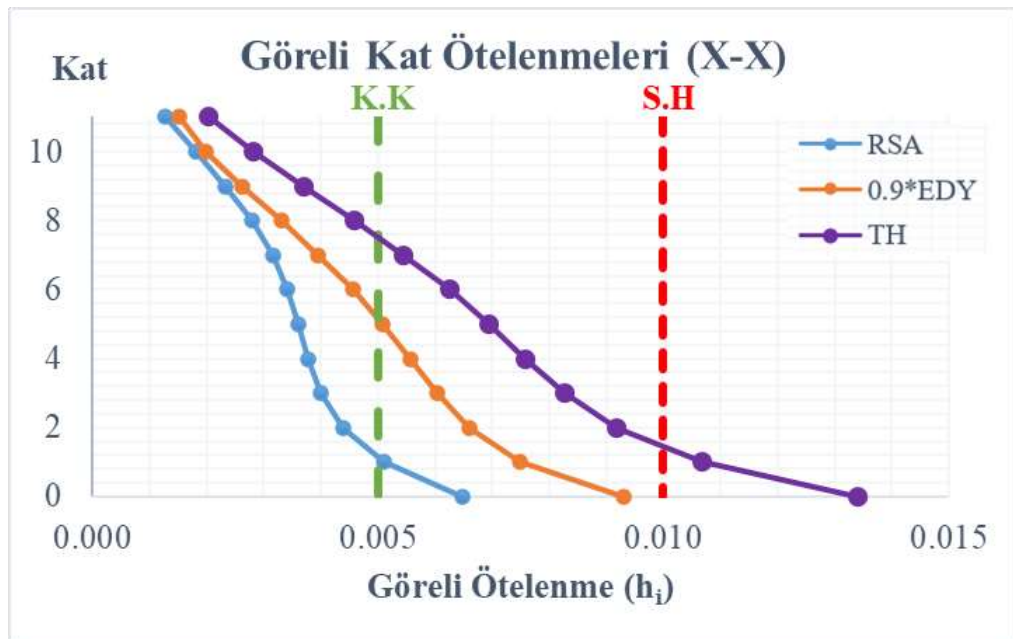
Kat	Yük Birleşimi	$\Delta_{i,max}$ (mm)	$\Delta_{i,ort}$ (mm)	η_{bi}
ÇK (+36.00)	DD-2_ENV_SPEC	3.85	3.56	1.08
10.NK (+33.00)		5.43	4.71	1.15
9.NK (+30.00)		6.98	6.03	1.16
8.NK (+27.00)		8.39	7.21	1.16
7.NK (+24.00)		9.49	8.09	1.17
6.NK (+21.00)		10.27	8.67	1.18
5.NK (+18.00)		10.83	9.04	1.20
4.NK (+15.00)		11.34	9.35	1.21
3.NK (+12.00)		12.00	9.79	1.23
2.NK (+9.00)		13.15	10.63	1.24
1.NK (+6.00)		15.29	12.32	1.24
ZK (+3.00)		19.47	15.68	1.24
BK (-+0.00)		37.98	32.56	1.17
ÇK (+36.00)		3.52	3.33	1.06
10.NK (+33.00)		5.46	4.98	1.10
9.NK (+30.00)		6.96	6.33	1.10
8.NK (+27.00)		8.35	7.57	1.10
7.NK (+24.00)		9.43	8.51	1.11
6.NK (+21.00)		10.19	9.16	1.11
5.NK (+18.00)		10.72	9.59	1.12
4.NK (+15.00)		11.16	9.93	1.12
3.NK (+12.00)		11.72	10.38	1.13
2.NK (+9.00)		12.74	11.23	1.13
1.NK (+6.00)		14.84	13.06	1.14
ZK (+3.00)		19.32	17.00	1.14
BK (-+0.00)		41.62	40.37	1.03

Mod birleştirme yöntemi ile hesaplanan üstyapı kuvvetlerinin, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ve etkin deprem yükü ve sonuçları ile hesaplanan üstyapı kuvvetlerin 90%'ı ile karşılaştırılması Şekil 4.21 ile sunulmuştur.

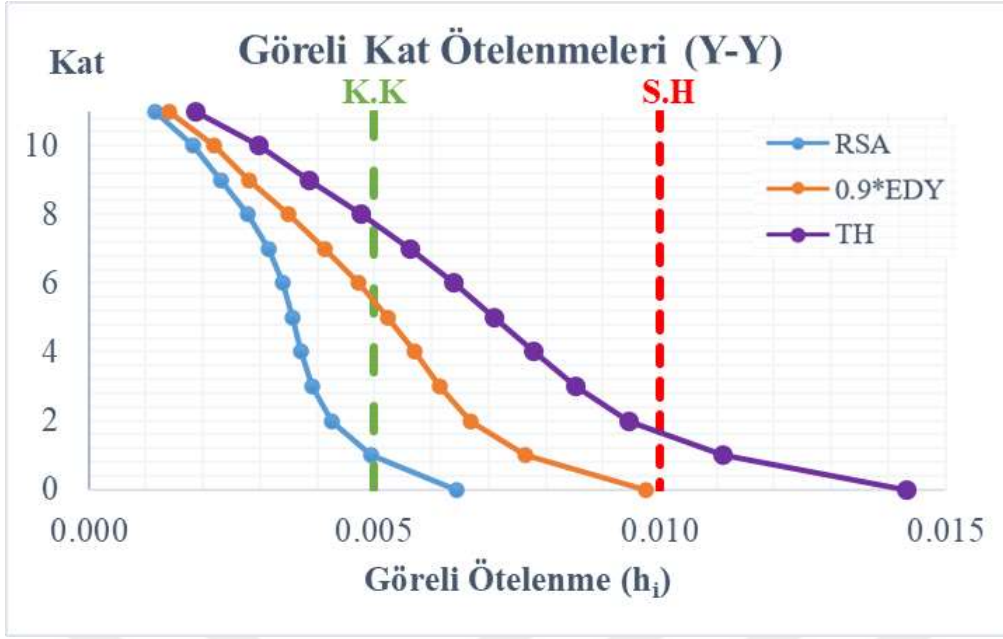


Şekil 4.21 : Üstyapı kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Mod birleştirme yöntemi ile elde edilen görelî kat ötelemelerinin, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ve etkin deprem yükü yöntemi ile hesaplanan yerdeğiştirmelerin 90%'ı ile karşılaştırılması X-X doğrultusu için Şekil 4.22 ile, Y-Y doğrultusu için ise Şekil 4.23 ile sunulmuştur.



Şekil 4.22 : X-X doğrultusu görelî kat ötelemelerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.23 : Y-Y doğrultusu görelî kat ötelemelerinin karşılaştırılması.

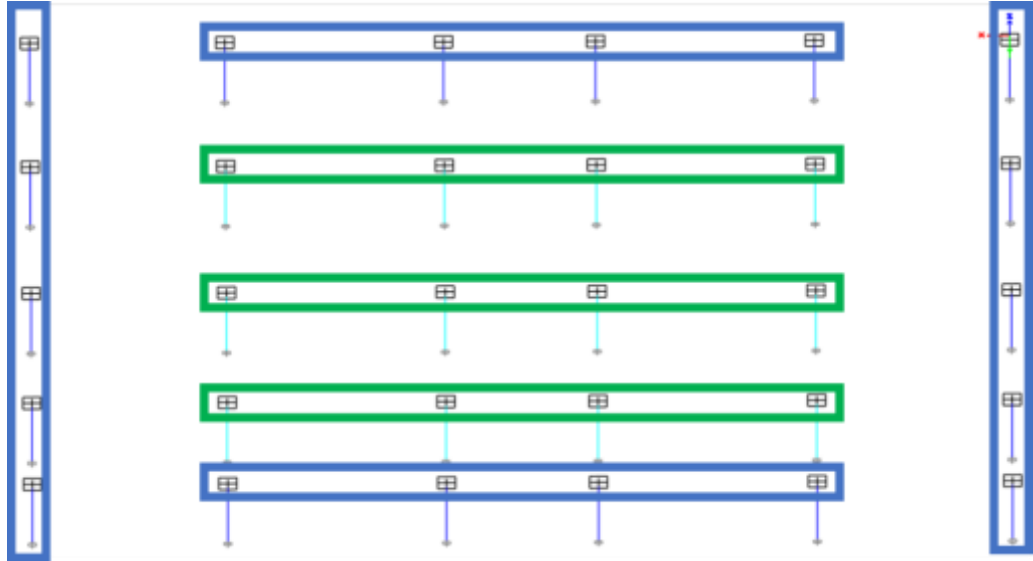
Mod birleştirme ve eşdeğer deprem yükü analizleri sonuçlarına göre üstyapı sınırlı hasar (SH) performans düzeyini sağlıyor olarak görünse de zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları sınırlı hasar (SH) performans düzeyinin sağlanmadığını göstermiştir. Bu bölümde ele alınan tasarım senaryosunun analiz sonuçları, tezin 6.bölümünde detaylı olarak yorumlanmıştır.

5. DEPREM YALITIM BİRİMLERİ VE ENERJİ SÖNÜMLEYİCİLER İLE ANALİZ VE TASARIM

Bu bölümde tez kapsamında ele alınan ofis binası için kurgulanan kurşun çekirdekli elastomer (KÇE) yalıtım birimlerinin ve viskoz sıvı sönümleyicilerin (VSS) tasarım aşamaları sunulmuş ve tasarım sonrası üstyapı performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

5.1 Kurşun Çekirdekli Elastomer (KÇE) Deprem Yalıtım Birimlerinin Tasarımı

KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımlarında, yalıtım birimine etkiyen eksenel yüklere göre tiplendirme yapılmıştır. Yapılan analiz ve hesaplamalar sonucunda, sistemin iki tip KÇE yalıtım birimi ile tasarlanmasına karar verilmiştir. Bu tiplerin yer aldığı lokasyonlar Şekil 5.1 ile paylaşılmıştır. Şekilde mavi alandaki yalıtım birimleri tip-1, yeşil alandaki yalıtım birimleri ise tip-2 izolatörler olacak şekilde planlanmıştır. Deprem yalıtım sisteminde 18 Adet tip-1, 12 adet tip-2 olacak şekilde toplam 30 adet KÇE yalıtım birimi kullanılmıştır.



Şekil 5.1 : KÇE Deprem yalıtım birimlerinin tiplendirilmesi.

Tasarımda kullanılan alt limit ve üst limit çarpanları, tezin dördüncü bölümündeki değerler ile aynı kabul edilmiştir.

5.1.1 Tip-1 KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımı

Bu bölümde yapılan hesaplamalar, DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde deprem yalıtım biriminin nominal değerleri ile yapılmış ve örnek olarak sunulmuştur. DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi alt limit ve üst limit değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi üst, nominal ve alt limit değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar bu kısımda paylaşılmamıştır.

İzolatör birimi toplam dış çapı (B_{total}) = 950 mm

Çelik plaka ile yapışmış elastomerin çapı (B) = 900 mm

Kurşun çekirdek çapı (B_L) = 170 mm

Kurşun malzemesinin akma gerilmesi (T_{yp}) = 12 MPa

Elastomer malzemenin kayma modülü (G_v) = 0.7 MPa

Elastomer katman kalınlığı (t) = 8 mm

Elastomer katman adedi (n_r) = 32

Çelik plaka katman kalınlığı (t_s) = 3 mm

Çelik katman adedi (n_s) = 31

Toplam elastomer kalınlığı (T_r) = 256 mm

Elastomer malzemenin sertlik değeri (k) = 0.75

Elastomer malzemenin hacim modülü (K) = 2000 MPa

İzolatör birimi toplam yüksekliği (H) = 349 mm

İzolatör birimi kurşun çekirdek alanı (A_p) denklem 5.1 ile hesaplanmıştır.

$$A_p = \frac{(\pi * B_L^2)}{4} = \frac{(\pi * 170^2)}{4} = 22698.01 \text{ mm}^2 \quad (5.1)$$

Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış, yüke maruz yüzey alanı (A_r) denklem 5.2 ile hesaplanmıştır.

$$A_r = \frac{(\pi * (B^2 - B_L^2))}{4} = \frac{(\pi * (900^2 - 170^2))}{4} = 613474.51 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

İzolatör birimi şekil katsayısı (S) denklem 5.3 ile hesaplanmıştır.

$$S = \frac{B^2 - B_L^2}{4 * B * t} = \frac{900^2 - 170^2}{4 * 900 * 8} = 27.12 \quad (5.3)$$

Elastomer malzeme esneklik modülü (E_0) denklem 5.4 ile hesaplanmıştır.

$$E_0 = 4 * G_v = 4 * 0.7 = 2.8 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

İzolatör biriminin basınç modülü (E_c) denklem 5.5 ile hesaplanmıştır.

$$E_c = E_0 * (1 + 2 * k * S^2) \quad (5.5)$$

$$E_c = 2.8 * (1 + 2 * 0.75 * 27.12^2) = 3092.22 \text{ MPa}$$

İzolatör biriminin düşey rijitlik modülü (E_v) denklem 5.6 ile hesaplanmıştır.

$$E_v = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_c}\right) + \left(\frac{1}{K}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{3092.22}\right) + \left(\frac{1}{2000}\right)} = 1214.49 \text{ MPa} \quad (5.6)$$

İzolatör biriminin düşey rijitliği (k_v) denklem 5.7 ile hesaplanmıştır.

$$k_v = (E_v * A_r) / T_r = (1214.49 * 613474.51) / 256 = 2910382.20 \text{ kN/m} \quad (5.7)$$

İzolatör biriminin karakteristik dayanımı (F_Q) denklem 5.8 ile hesaplanmıştır.

$$F_Q = (A_p * T_{yp}) / 1000 = (22698.01 * 12) / 1000 = 272.38 \text{ kN} \quad (5.8)$$

İzolatör biriminin ikincil (elastik ötesi) rijitliği (k_2) denklem 5.9 ile hesaplanmıştır.

$$k_2 = G_v * \left(\frac{A_r}{T_r}\right) = 0.7 * \left(\frac{613474.51}{256}\right) = 1677.47 \text{ kN/m} \quad (5.9)$$

İzolatör biriminin birincil (elastik) rijitliği (k_1) denklem 5.10 ile hesaplanmıştır.

$$k_1 = k_2 / \left(\frac{k_2}{k_1}\right) = 1677.47 / 0.1 = 16774.70 \text{ kN/m} \quad (5.10)$$

İzolatör biriminin etkin akma yerdeğiştirmesi (D_y) denklem 5.11 ile hesaplanmıştır.

$$D_y = \frac{F_Q}{(k_1 - k_2)} = \frac{738.90}{16774.70 - 1677.47} = 0.01804 \text{ m} = 18.04 \text{ mm} \quad (5.11)$$

İzolatör biriminin etkin akma dayanımı (F_y) denklem 5.12 ile hesaplanmıştır.

$$F_y = D_y * k_1 = 0.01804 * 16774.70 = 302.64 \text{ kN} \quad (5.12)$$

Bu adımdan itibaren yalıtım birimi için hedef bir yerdeğiştirme değeri (D) tanımlanır.

Tanımlanan bu yerdeğiştirme değeri kullanılarak sırasıyla; D yerdeğiştirmesi anındaki yatay kuvvet (F), D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik (k_e), bir çevrimde

tüketilen enerji (W_d), etkin sönüm oranı (β_e), sönüm ölçeklendirme katsayısı (η) ve son olarak deprem yalıtımlı sistemin periyodu (T) hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu periyot değeri kullanılarak, yapının deprem yerdeğiştirme talebi belirlenir. Elde edilen bu talep ile başlangıçta kabul edilen hedef yerdeğiştirme değeri (D) örtüşene kadar iterasyon süreci tekrarlanır.

Yukarıda tarif edilen işlemler ve gerekli iterasyonlar hesaplamalar için oluşturulmuş excel dosyası ile gerçekleştirilmiştir. İterasyonlar sonucu elde edilen hedef deplasman değeri D : 0.376m olarak bulunmuştur.

İzolatör biriminde D yerdeğiştirmesine karşı gelen dayanım (F) denklem 5.13 ile hesaplanmıştır.

$$F = F_Q + (k_2 * (D - D_y)) \quad (5.13)$$

$$F = 272.38 + (1677.47 * (0.376 - 0.01804)) = 872.84 \text{ kN}$$

İzolatör biriminde D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik (k_e) denklem 5.14 ile hesaplanmıştır.

$$k_e = \frac{F}{D} = \frac{872.84}{0.376} = 2321.38 \text{ kN/m} \quad (5.14)$$

İzolatör birimi tarafından bir çevrimde tüketilen enerji (W_d) denklem 5.15 ile hesaplanmıştır.

$$W_d = 4 * F_Q * (D - D_y) \quad (5.15)$$

$$W_d = 4 * 272.38 * (0.376 - 0.01804) = 390.00 \text{ kNm}$$

İzolatör biriminin etkin sönüm oranı (β_e) denklem 5.16 ile hesaplanmıştır.

$$\beta_e = \frac{1}{2*\pi} * \left(\frac{W_d}{F*D} \right) = \frac{1}{2*\pi} * \left(\frac{390.00}{872.84*0.376} \right) = 0.189 \quad (5.16)$$

İzolatör biriminin etkin sönüm yüzdesi (ζ_e) denklem 5.17 ile hesaplanmıştır.

$$\zeta_e = \beta_e * 100 = 0.189 * 100 = 18.9\% \quad (5.17)$$

5.1.2 KÇE yalıtım birimlerinin şekildeğiştirme ve düşey kararlılık kontrolleri

Depremsiz durumda yalıtım birimlerinde meydana gelen birim şekildeğiştirme değerlerinin kontrolü, 1.4G+1.6Q yük birleşimi altında elde edilen düşey kuvvetler ile gerçekleştirilir. Depremsiz durum kontrollerinde kullanılacak P_{K1} yükü, aynı tip yalıtım

birimlerine ilgili yük birleşimi durumunda etkiyen en yüksek eksenel yük değeri olarak seçilmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 : Tip-1 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler (1.4G+1.6Q) ve P_{K1} yükü.

Kat	İzolatör No	Yükleme Durumu	P _{K1} (kN)	P _{K1(MAKS)}
BK (-+0.00)	L1	1.4G+1.6Q	-2413.52	-4368.09
	L2		-3937.00	
	L3		-3863.56	
	L4		-3091.11	
	L5		-1994.62	
	L6		-3814.81	
	L7		-3825.12	
	L8		-3844.03	
	L9		-4064.76	
	L10		-2243.29	
	L11		-3336.42	
	L12		-3863.42	
	L13		-3866.52	
	L14		-2379.51	
	L15		-4324.35	
	L16		-4243.00	
	L17		-4238.80	
	L18		-4368.09	

İzolatör biriminde basınçtan meydana gelen açısız şekildeğiştirme denklem 5.18 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{c,st} = \frac{6 \cdot S \cdot P_{K1}}{A_r \cdot E_c} = \frac{6 \cdot 27.12 \cdot 4368.09 \cdot 1000}{613474.51 \cdot 3092.22} = 0.37 \quad (5.18)$$

İzolatör biriminde deprem dışındaki etkilerden dolayı oluşacak yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen açısız şekildeğiştirme denklem 5.19 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{s,st} = \frac{\Delta s}{T_r} = \frac{30}{256} = 0.117 \quad (5.19)$$

İzolatör birimi üst ve alt plakaları arasındaki görelî dönmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 5.20 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{r,st} = \frac{B^2 \cdot \theta_s}{2 \cdot t \cdot T_r} = \frac{900^2 \cdot 0.005}{2 \cdot 8 \cdot 256} = 0.99 \quad (5.20)$$

Sonuç olarak; $\gamma_{c,st} = 0.37 \leq 3.5$ ve $\gamma_{c,st} + \gamma_{s,st} + \gamma_{r,st} = 1.48 \leq 5$ olduğundan, P_{K1} yükleri ile yapılan şekildeğiştirme kontrolleri yönetmelik şartlarını sağlamıştır.

Deprem etkisi ve düşey yükler altında KÇE sismik yalıtım birimlerinde meydana gelen birim şekildeğiştirme değerlerinin kontrolü, 1.2G+Q±E yük birleşimi altında elde edilen düşey kuvvetler ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.2). DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi nominal değerleri ile yapılan kontroller örnek olarak sunulmuştur.

Çizelge 5.2 : Tip-1 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler (1.2G+Q±E) ve P_{K2} yükü.

Kat	Yalıtım Birimi	Yükleme Durumu	P_{K2} (kN)	$P_{K2,Maks}$ (kN)
BK (+0.00)	L1	ENV_1.2G+Q+E	-6022.88	-10583.81
	L2		-6913.37	
	L3		-7173.82	
	L4		-5917.80	
	L5		-6997.25	
	L6		-9107.79	
	L7		-10137.71	
	L8		-10583.81	
	L9		-9416.52	
	L10		-7649.11	
	L11		-6193.51	
	L12		-7235.71	
	L13		-7086.56	
	L14		-5962.94	
	L15		-8146.62	
	L16		-8312.91	
	L17		-8469.48	
	L18		-8165.85	

Kontrollerde kullanılan P_{K2} yükü 11 adet deprem kaydı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilmiştir. Her bir deprem kaydının analizi sonrasında yalıtım birimlerine etkiyen en büyük düşey kuvvetler bulunmuş, ardından bulunan 11 deprem sonucunun ortalaması alınmıştır. Son olarak 11 deprem kaydının ortalaması alınarak elde edilen deprem taleplerinden en büyüğü P_{K2} yükü olarak seçilmiştir.

İzolatör biriminde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında oluşan basınçtan meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 5.21 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{c,E} = \frac{6*S*P_{K2}}{A_{re}*E_c} = \frac{6*27.12*10583.81*1000}{296906.50*3092.22} = 1.88 \quad (5.21)$$

İzolatör biriminde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 5.22 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{s,E} = \frac{D}{T_r} = \frac{0.376*1000}{256} = 1.47 \quad (5.22)$$

Sonuç olarak; $\gamma_{s,E} = 1.47 \leq 2.0$ ve $\gamma_{c,E} + \gamma_{s,E} + 0.5 * \gamma_{r,st} = 3.84 \leq 6$ olduğundan, P_{K2} yükleri ile yapılan şekildeğiştirme kontrolleri yönetmelik şartlarını sağlamıştır.

Elastomer yalıtım birimlerinin düşey kararlılık kontrollerinde kullanılan yatay yerdeğiştirmesiz burkulma yükü (P_{cr}) denklem 5.23 ile hesaplanmıştır.

$$P_{cr} = 0.218 * \frac{G_v * B^4 * \left(1 - \frac{B L}{B}\right) * \left(1 - \frac{B^2}{B^2}\right)}{t * T_r * \left(1 + \frac{B^2}{B^2}\right)} / 1000 \quad (5.23)$$

$$P_{cr} = 0.218 * \frac{0.7 * 900^4 * \left(1 - \frac{170}{900}\right) * \left(1 - \frac{170^2}{900^2}\right)}{8 * 256 * \left(1 + \frac{170^2}{900^2}\right)} / 1000 = 36920.83 \text{ kN}$$

Elastomer yalıtım birimlerinin düşey kararlılık kontrollerinde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında yatay yerdeğişmeli burkulma yükü (P'_{cr}) denklem 5.24 ile hesaplanmıştır.

$$P'_{cr} = P_{cr} * \frac{A_{re}}{A} = 36920.83 * \frac{296906.50}{636172.51} = 17231.23 \text{ kN} \quad (5.24)$$

Elastomer yalıtım birimlerinin, birim şekildeğiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi denklem 5.25 ile hesaplanmıştır.

$$P_{str} = \frac{3.5*A_{re}*E_c}{6*S} = \frac{3.5*296906.50*3092.22}{6*27.12} = 19746.65 \text{ kN} \quad (5.25)$$

Sonuç olarak; $\frac{\min(P_{cr}, P_{str})}{P_{K1}} = 4.52 \geq 2.0$ ve $\frac{\min(P'_{cr}, P_{str})}{P_{K2}} = 1.63 \geq 1.1$ olduğundan, düşey kararlılık kontrolleri yönetmelik şartları sağlanmıştır.

5.1.3 Tip-2 KÇE deprem yalıtım birimlerinin tasarımı

Bu bölümde yapılan hesaplamalar, DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım biriminin nominal değerleri ile yapılmıştır. Alt limit ve üst limit değerleri ile ilgili hesaplamalar bu kısımda paylaşılmamıştır.

İzolatör birimi toplam dış çapı (B_{total}) = 1000 mm

Çelik plaka ile yapışmış elastomerin çapı (B) = 950 mm

Kurşun çekirdek çapı (B_L) = 180 mm

Kurşun malzemesinin akma gerilmesi (T_{yp}) = 12 MPa

Elastomer malzemenin kayma modülü (G_v) = 0.7 MPa

Elastomer katman kalınlığı (t) = 8 mm

Elastomer katman adedi (n_r) = 32

Çelik plaka katman kalınlığı (t_s) = 3 mm

Çelik katman adedi (n_s) = 31

Toplam elastomer kalınlığı (T_r) = 256 mm

Elastomer malzemenin sertlik değeri (k) = 0.75

Elastomer malzemenin hacim modülü (K) = 2000 MPa

İzolatör birimi toplam yüksekliği (H) = 349 mm

İzolatör birimi kurşun çekirdek alanı (A_p) Denklem 5.26 ile hesaplanmıştır.

$$A_p = \frac{(\pi * B_L^2)}{4} = \frac{(\pi * 180^2)}{4} = 25446.90 \text{ mm}^2 \quad (5.26)$$

Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış, yüke maruz yüzey alanı (A_r) denklem 5.27 ile hesaplanmıştır.

$$A_r = \frac{(\pi * (B^2 - B_L^2))}{4} = \frac{(\pi * (950^2 - 180^2))}{4} = 683374.94 \text{ mm}^2 \quad (5.27)$$

İzolatör birimi şekil katsayısı (S) denklem 5.28 ile hesaplanmıştır.

$$S = \frac{B^2 - B_L^2}{4 * B * t} = \frac{950^2 - 180^2}{4 * 950 * 8} = 28.62 \quad (5.28)$$

Elastomer malzeme esneklik modülü (E_0) denklem 5.29 ile hesaplanmıştır.

$$E_0 = 4 * G_v = 4 * 0.7 = 2.8 \text{ MPa} \quad (5.29)$$

İzolatör biriminin basınç modülü (E_c) denklem 5.30 ile hesaplanmıştır.

$$E_c = E_0 * (1 + 2 * k * S^2) \quad (5.30)$$

$$E_c = 2.8 * (1 + 2 * 0.75 * 28.62^2) = 3443.45 \text{ MPa}$$

İzolatör biriminin düşey rijitlik modülü (E_v) denklem 5.31 ile hesaplanmıştır.

$$E_v = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_c}\right) + \left(\frac{1}{K}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{3443.45}\right) + \left(\frac{1}{2000}\right)} = 1265.17 \text{ MPa} \quad (5.31)$$

İzolatör biriminin düşey rijitliği (k_v) denklem 5.32 ile hesaplanmıştır.

$$k_v = (E_v * A_r) / T_r = (1265.17 * 683374.94) / 256 = 3377291.99 \text{ kN/m} \quad (5.32)$$

İzolatör biriminin karakteristik dayanımı (F_Q) denklem 5.33 ile hesaplanmıştır.

$$F_Q = (A_p * T_{yp}) / 1000 = (25446.90 * 12) / 1000 = 305.36 \text{ kN} \quad (5.33)$$

İzolatör biriminin ikincil (elastik ötesi) rijitliği (k_2) denklem 5.34 ile hesaplanmıştır.

$$k_2 = G_v * \left(\frac{A_r}{T_r}\right) = 0.7 * \left(\frac{683374.94}{256}\right) = 1868.60 \text{ kN/m} \quad (5.34)$$

İzolatör biriminin birincil (elastik) rijitliği (k_1) denklem 5.35 ile hesaplanmıştır.

$$k_1 = k_2 / \left(\frac{k_2}{k_1}\right) = 1868.60 / 0.1 = 18686.00 \text{ kN/m} \quad (5.35)$$

İzolatör biriminin etkin akma yerdeğiştirmesi (D_y) denklem 5.36 ile hesaplanmıştır.

$$D_y = \frac{F_Q}{(k_1 - k_2)} = \frac{305.36}{18686.00 - 1868.60} = 0.01816 \text{ m} = 18.16 \text{ mm} \quad (5.36)$$

İzolatör biriminin etkin akma dayanımı (F_y) denklem 5.37 ile hesaplanmıştır.

$$F_y = D_y * k_1 = 0.01816 * 18686.00 = 339.29 \text{ kN} \quad (5.37)$$

Tip 1 ve tip 2 KÇE yalıtım birimleri aynı deprem yalıtım sistemindedir. Dolayısıyla, tip 1 yalıtım birimlerinde geçerli olan hedef yerdeğiştirme değeri (D): 0.376m tip 2 için de aynen geçerli olur.

İzolatör biriminde D yerdeğiştirmesine karşı gelen dayanım (F) denklem 5.38 ile hesaplanmıştır.

$$F = F_Q + (k_2 * (D - D_y)) \quad (5.38)$$

$$F = 305.36 + (1868.60 * (0.376 - 0.01816)) = 974.03 \text{ kN}$$

İzolator biriminde D yerdeğiştirilmesine karşılık gelen etkin rijitlik (k_e) denklem 5.39 ile hesaplanmıştır.

$$k_e = \frac{F}{D} = \frac{974.03}{0.376} = 2590.50 \text{ kN/m} \quad (5.39)$$

İzolator birimi tarafından bir çevrimde tüketilen enerji (W_d) denklem 5.40 ile hesaplanmıştır.

$$W_d = 4 * F_Q * (D - D_y) \quad (5.40)$$

$$W_d = 4 * 305.36 * (0.376 - 0.01816) = 437.09 \text{ kNm}$$

İzolator biriminin etkin sönüm oranı (β_e) denklem 5.41 ile hesaplanmıştır.

$$\beta_e = \frac{1}{2*\pi} * \left(\frac{W_d}{F*D} \right) = \frac{1}{2*\pi} * \left(\frac{437.09}{974.03*0.376} \right) = 0.190 \quad (5.41)$$

İzolator biriminin etkin sönüm yüzdesi (ζ_e) denklem 5.42 ile hesaplanmıştır.

$$\zeta_e = \beta_e * 100 = 0.190 * 100 = 19.0\% \quad (5.42)$$

5.1.4 KÇE yalıtım birimlerinin şekildeğiştirme ve düşey kararlılık kontrolleri

Kontrollerde kullanılan maksimum PK1 yükünün hesabı Çizelge 5.3 ile özetlenmiştir.

Çizelge 5.3 : Tip-2 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler (1.4G+1.6Q) ve P_{K1} yükü.

Kat	İzolator No	Yükleme Durumu	P_{K1} (kN)	$P_{K1(MAKS)}$
BK (+0.00)	L19	1.4G+1.6Q	-8270.44	-8406.62
	L20		-8406.62	
	L21		-6280.45	
	L22		-7772.34	
	L23		-8320.45	
	L24		-6165.30	
	L25		-7733.56	
	L26		-8149.17	
	L27		-6212.79	
	L28		-8129.70	
	L29		-8346.37	
	L30		-6523.12	

İzolator biriminde basınçtan meydana gelen açısız şekildeğiştirme denklem 5.43 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{c,st} = \frac{6 \cdot S \cdot P_{K1}}{A_r \cdot E_c} = \frac{6 \cdot 28.62 \cdot 8406.62 \cdot 1000}{683374.94 \cdot 3443.45} = 0.61 \quad (5.43)$$

İzolator biriminde deprem dışındaki etkilerden dolayı oluşacak yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen açısız şekildeğiştirme denklem 5.44 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{s,st} = \frac{\Delta s}{T_r} = \frac{30}{256} = 0.12 \quad (5.44)$$

İzolator birimi üst ve alt plakaları arasındaki görelı dönmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 5.45 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{r,st} = \frac{B^2 \cdot \theta_s}{2 \cdot t \cdot T_r} = \frac{950^2 \cdot 0.005}{2 \cdot 8 \cdot 256} = 1.10 \quad (5.45)$$

Sonuç olarak; $\gamma_{c,st} = 0.61 \leq 3.5$ ve $\gamma_{c,st} + \gamma_{s,st} + \gamma_{r,st} = 1.83 \leq 5$ olduğundan, P_{K1} yükleri ile yapılan şekildeğiştirme kontrolleri yönetmelik şartlarını sağlamıştır.

Deprem etkisi ve düşey yükler altında KÇE sismik yalıtım birimlerinde meydana gelen birim şekildeğiştirme değerlerinin kontrolü, 1.2G+Q±E yük birleşimi altında elde edilen düşey kuvvetler ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4 : Tip-2 KÇE yalıtım birimlerine etkiyen eksenel yükler (1.2G+Q±E) ve P_{K2} yükü.

Kat	Yalıtım Birimi	Yükleme Durumu	P_{K2} (kN)	$P_{K2,Maks}$ (kN)
BK (-+0.00)	L19	ENV_1.2G+Q+E	-9209.19	-14911.07
	L20		-10229.64	
	L21		-7161.73	
	L22		-11557.32	
	L23		-14911.07	
	L24		-10891.02	
	L25		-11408.46	
	L26		-14284.90	
	L27		-11523.39	
	L28		-9178.19	
	L29		-10185.39	
	L30		-7306.50	

İzolatör biriminde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında oluşan basınçtan meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 5.46 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{c,E} = \frac{6*S*P_{K2}}{A_{re}*E_c} = \frac{6*28.62*14911.07*1000}{348213.65*3443.45} = 2.14 \quad (5.46)$$

İzolatör biriminde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme denklem 5.47 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma_{s,E} = \frac{D}{T_r} = \frac{0.376}{256} = 1.47 \quad (5.47)$$

Sonuç olarak; $\gamma_{s,E} = 1.47 \leq 2.0$ ve $\gamma_{c,E} + \gamma_{s,E} + 0.5 * \gamma_{r,st} = 4.16 \leq 6$ olduğundan, P_{K2} yükleri ile yapılan şekildeğiştirme kontrolleri yönetmelik şartlarını sağlamıştır.

Elastomer yalıtım birimlerinin düşey kararlılık kontrollerinde kullanılan yatay yerdeğiştirmesiz burkulma yükü (P_{cr}) denklem 5.48 ile hesaplanmıştır.

$$P_{cr} = 0.218 * \frac{G_v * B^4 * \left(1 - \frac{B_L}{B}\right) * \left(1 - \frac{B_L^2}{B^2}\right)}{t * T_r * \left(1 + \frac{B_L^2}{B^2}\right)} / 1000 \quad (5.48)$$

$$P_{cr} = 0.218 * \frac{0.7*950^4 * \left(1 - \frac{180}{950}\right) * \left(1 - \frac{180^2}{950^2}\right)}{8*256 * \left(1 + \frac{180^2}{950^2}\right)} / 1000 = 45781.51 \text{ kN}$$

Elastomer yalıtım birimlerinin düşey kararlılık kontrollerinde DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında yatay yerdeğiştirmeli burkulma yükü (P'_{cr}) denklem 5.49 ile hesaplanmıştır.

$$P'_{cr} = P_{cr} * \frac{A_{re}}{A} = 45781.51 * \frac{348213.65}{708821.84} = 22490.49 \text{ kN} \quad (5.49)$$

Elastomer yalıtım birimlerinin, birim şekildeğiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi denklem 5.50 ile hesaplanmıştır.

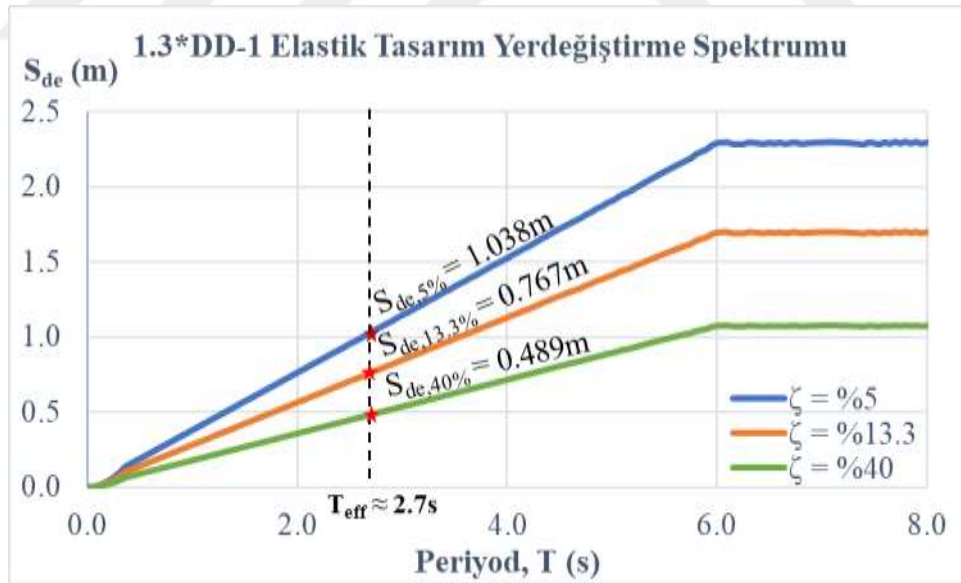
$$P_{str} = \frac{3.5*A_{re}*E_c}{6*S} = \frac{3.5*348213.65*3443.45}{6*28.62} = 24437.72 \text{ kN} \quad (5.50)$$

Sonuç olarak; $\frac{\min(P_{cr}, P_{str})}{P_{K1}} = 2.91 \geq 2.0$ ve $\frac{\min(P'_{cr}, P_{str})}{P_{K2}} = 1.51 \geq 1.1$ olduğundan, düşey kararlılık kontrolleri yönetmelik şartları sağlanmıştır.

5.2 Viskoz Sıvı Sönümleyicilerin (VSS) Tasarımı

Önceki bölümde özetlenen tip-1 ve tip-2 yalıtım birimlerinin tasarımları ve kontrolleri, viskoz sıvı sönümleyiciler ile sağlanan ilave sönüm etkisi dikkate alınarak yapılmıştır. Tasarımda sistem için hedeflenen toplam etkin sönüm yüzdesi (yalıtım birimleri + sönümleyiciler) yalıtım birimi yatay yerdeğiştirme değerinin (D_M) $< 50\text{cm}$ olması hedeflenerek belirlenmiştir.

Bu kapsamda farklı toplam etkin sönüm yüzdeleri için sönüm ölçeklendirme katsayıları hesaplanmış ve hesaplanan katsayılar DD-1 deprem yer hareketi düzeyindeki geometrik ortalama elastik tasarım yerdeğiştirme spektrumuna etkilmiştir. Yalıtım birimi alt limit özellikleri ile hesaplanan efektif periyod değerinde ($T_{\text{eff}} \approx 2.7\text{s}$) okunan D_M yerdeğiştirmesinin 50cm 'den küçük olması, sistem efektif sönümünün $\%40$ 'a çıkarılması ile sağlanabilmiştir. Dolayısıyla viskoz sıvı sönümleyiciler ve deprem yalıtım birimleri tarafından sisteme sağlanması gereken sönüm oranı yüzdesi $\%40$ olarak belirlenmiştir. DD-1 deprem yer hareketi düzeyi geometrik ortalama elastik tasarım yerdeğiştirme spektrumu ile belirlenen toplam etkin sönüm yüzdesi hedefi Şekil 5.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Deprem yalıtım birimleri ve VSS sistemi tarafından sağlanacak toplam etkin sönüm yüzdesi hedefinin belirlenmesi.

DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi alt limit değerleri dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, deprem yalıtım sistemi tarafından sağlanan etkin sönüm yüzdesi denklem 5.51 ile hesaplanmıştır.

$$\zeta_{izo} = \frac{(\zeta_{tip1} * n_{tip1} + \zeta_{tip2} * n_{tip2})}{n_{tip1} + n_{tip2}} = \frac{(13.3 * 18 + 13.3 * 12)}{18 + 12} = 13.3\% \quad (5.51)$$

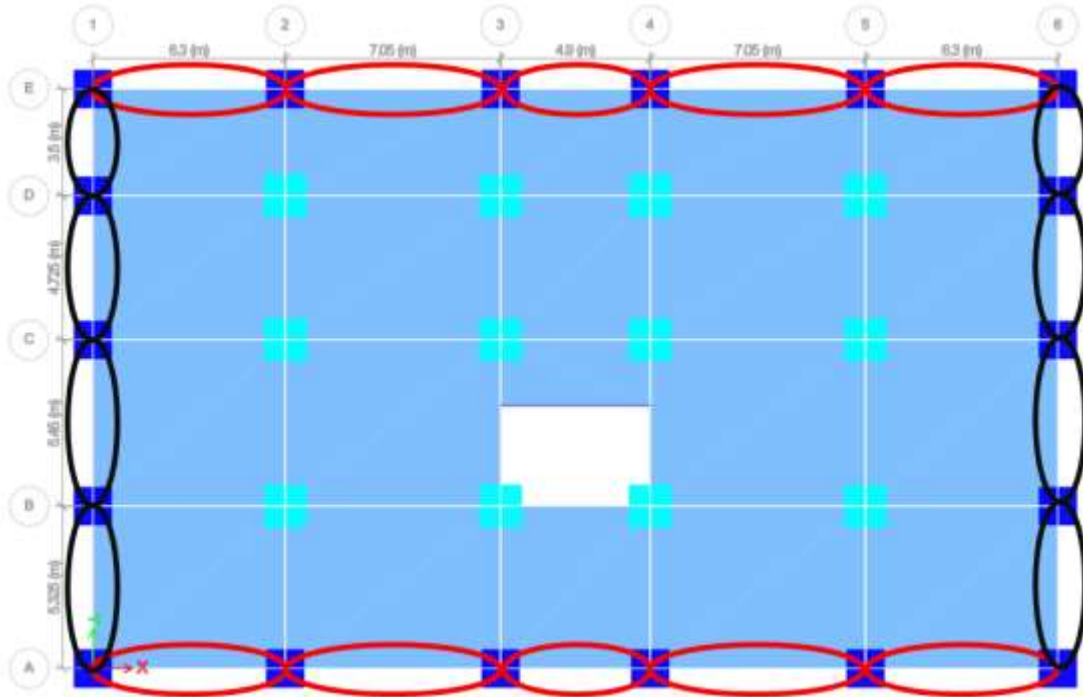
Burada ζ_{izo} deprem yalıtım sistemi tarafından sağlanan etkin sönüm yüzdesini, ζ_{tip1} ve ζ_{tip2} tip-1 ve tip-2 deprem yalıtım birimi alt limit değerleri ile hesaplanan etkin sönüm yüzdesini, n_{tip1} ve n_{tip2} ise ilgili deprem yalıtım birimi tipinin sistemdeki toplam sayısını ifade etmektedir.

Hedeflenen toplam etkin sönüm yüzdesinden (ζ_{Hedef}), deprem yalıtım sistemi tarafından sağlanan etkin sönüm yüzdesini (ζ_{izo}) çıkartarak viskoz sıvı sönümleyiciler tarafından sağlanması gereken etkin sönüm yüzdesi (ζ_{vss}) elde edilmiştir. İlgili hesaplama denklem 5.52 ile gerçekleştirilmiştir.

$$\zeta_{vss} = \zeta_{Hedef} - \zeta_{izo} = 40 - 13.3 = 26.7\% \quad (5.52)$$

Burada elde edilen 26.7% etkin sönüm yüzdesi değeri, viskoz sıvı sönümleyiciler tarafından hem X-X, hem de Y-Y doğrultusunda sağlanmalıdır.

Viskoz sıvı sönümleyiciler binanın sadece bodrum katına (deprem yalıtımının uygulandığı kata) yerleştirilecektir. Sönümleyicilerin X-X ve Y-Y doğrultusunda tüm dış akslara (Şekil 5.3) yerleştirilmesi planlanmıştır.



Şekil 5.3 : Viskoz sıvı sönümleyicilerin yerleştirileceği alanlar.

X-X doğrultusunda hedeflenen etkin sönüm yüzdesi (26.7%) için gereken toplam sönüm katsayısının hesabı denklem 5.53 ile gerçekleştirilmiştir.

$$C_{top,XX} = \frac{(\zeta_{VSS} * T_{XX})}{\pi} * K_{XX} = \frac{26.7 * 3.024}{3.14} * 53551.44 = 13770.02 \text{ kN} * s/m \quad (5.53)$$

Burada $C_{top,XX}$ gereken toplam sönüm katsayısını, T_{XX} yapının X-X doğrultusundaki hakim titreşim modu periyodunu, K_{XX} ise yapının X-X doğrultusundaki toplam rijitliğini ifade etmektedir.

X-X doğrultusunda lineer olarak ($\alpha=1$) tasarlanan viskoz sıvı sönümleyicilerin, tasarım kolaylığı adına tek tip olarak planlanmasına ve diagonal biçimde yerleştirilmesine karar verilmiştir. Bu bağlamda her bir aks açıklığı için f (büyütme katsayısı) hesabı yapılmış, ardından bu katsayıların ağırlıklı ortalaması alınmıştır. Bu sayede her aks aralığına farklı tip viskoz sıvı sönümleyici tasarlamak yerine; tüm akslara ortak, tek tip VSS tasarlamak mümkün olmuştur.

6.30m aks açıklığı olan kısımlar (1-2 ve 5-6 aksları arası) için f (büyütme katsayısı) denklem 5.54 ile hesaplanmıştır.

$$f_{6.30} = \cos(\alpha) = \frac{6.30m - 1.25m}{\sqrt{(6.30m - 1.25m)^2 + (3m - 0.20m)^2}} = 0.87 \quad (5.54)$$

Burada pay kısmı kolonlar arası temiz açıklığı, payda kısmı ise düşey temiz açıklığı ifade etmektedir.

7.05m aks açıklığı olan kısımlar (2-3 ve 4-5 aksları arası) için f (büyütme katsayısı) denklem 5.55 ile hesaplanmıştır.

$$f_{7.05} = \cos(\alpha) = \frac{7.05m - 1.25m}{\sqrt{(7.05m - 1.25m)^2 + (3m - 0.20m)^2}} = 0.90 \quad (5.55)$$

4.90m aks açıklığı olan kısım (3-4 aksları arası) için f (büyütme katsayısı) denklem 5.56 ile hesaplanmıştır.

$$f_{4.90} = \cos(\alpha) = \frac{4.90m - 1.25m}{\sqrt{(4.90m - 1.25m)^2 + (3m - 0.20m)^2}} = 0.79 \quad (5.56)$$

Ortak f (büyütme katsayısı) denklem 5.57 ile hesaplanmıştır.

$$f_{ort,XX} = \frac{f_{6.30} * n_{6.30} + f_{7.05} * n_{7.05} + f_{4.90} * n_{4.90}}{n_{6.30} + n_{7.05} + n_{4.90}} = \frac{0.87 * 4 + 0.90 * 4 + 0.79 * 2}{4 + 4 + 2} = 0.87 \quad (5.57)$$

Denklemden kullanılan $n_{6,30}$, $n_{7,05}$ ve $n_{4,90}$ değerleri sırasıyla 6.3m, 7.05m ve 4.90m aks aralıkları olan çerçevelerde uygulanacak viskoz sıvı sönümleyicilerin sayısını ifade etmektedir.

X-X doğrultusunda yerleştirilecek 10 adet viskoz sıvı sönümleyici için analiz modeline girilecek sönüm katsayısı C_{XX} denklem 5.58 ile hesaplanmıştır.

$$C_{XX} = \frac{C_{top,XX}}{f_{ort,XX}^2 * n_{XX}} = \frac{13770.02}{0.87^2 * 10} = 1826.82 \text{ kN} * \text{s/m} \quad (5.58)$$

Y-Y doğrultusunda hedeflenen etkin sönüm yüzdesi (26.7%) için gereken toplam sönüm katsayısının hesabı denklem 5.59 ile gerçekleştirilmiştir.

$$C_{top,YY} = \frac{(\zeta_{vss} * T_{YY})}{\pi} * K_{YY} = \frac{26.7 * 2.982}{3.14} * 54294.31 = 13767.13 \text{ kN} * \text{s/m} \quad (5.59)$$

Burada $C_{top,YY}$ gereken toplam sönüm katsayısını, T_{YY} yapının Y-Y doğrultusundaki hakim titreşim modu periyodunu, K_{YY} ise yapının Y-Y doğrultusundaki toplam rijitliğini ifade etmektedir.

Y-Y doğrultusunda lineer olarak ($\alpha=1$) tasarlanan viskoz sıvı sönümleyicilerin, tasarım kolaylığı adına tek tip olarak planlanmasına ve diagonal biçimde yerleştirilmesine karar verilmiştir.

3.50m aks açıklığı olan kısımlar (D-E aksları arası) için f (büyütme katsayısı) denklem 5.60 ile hesaplanmıştır.

$$f_{3.50} = \cos(\alpha) = \frac{3.50m - 1.25m}{\sqrt{(3.50m - 1.25m)^2 + (3m - 0.20m)^2}} = 0.63 \quad (5.60)$$

4.725m aks açıklığı olan kısımlar (C-D aksları arası) için f (büyütme katsayısı) denklem 5.61 ile hesaplanmıştır.

$$f_{4.725} = \cos(\alpha) = \frac{4.725m - 1.25m}{\sqrt{(4.725m - 1.25m)^2 + (3m - 0.20m)^2}} = 0.78 \quad (5.61)$$

5.45m aks açıklığı olan kısımlar (B-C aksları arası) için f (büyütme katsayısı) denklem 5.62 ile hesaplanmıştır.

$$f_{5.45} = \cos(\alpha) = \frac{5.45m - 1.25m}{\sqrt{(5.45m - 1.25m)^2 + (3m - 0.20m)^2}} = 0.83 \quad (5.62)$$

5.325m aks açıklığı olan kısımlar (A-B aksları arası) için f (büyütme katsayısı) denklem 5.63 ile hesaplanmıştır.

$$f_{5.325} = \cos(\alpha) = \frac{5.325m - 1.25m}{\sqrt{(5.325m - 1.25m)^2 + (3m - 0.20m)^2}} = 0.82 \quad (5.63)$$

Ortak f (büyütme katsayısı) denklem 5.64 ile hesaplanmıştır.

$$f_{ort,YY} = \frac{f_{3.50} * n_{3.50} + f_{4.725} * n_{4.725} + f_{5.45} * n_{5.45} + f_{5.325} * n_{5.325}}{n_{3.50} + n_{4.725} + n_{5.45} + n_{5.325}} \quad (5.64)$$

$$f_{ort,YY} = \frac{0.63*2 + 0.78*2 + 0.83*2 + 0.82*2}{2+2+2+2} = 0.77$$

Y-Y doğrultusunda yerleştirilecek 8 adet viskoz sıvı sönümleyici için analiz modeline girilecek sönüm katsayısı C_{YY} denklem 5.65 ile hesaplanmıştır.

$$C_{YY} = \frac{C_{top,YY}}{f_{ort,YY}^2 * n_{YY}} = \frac{13767.13}{0.77^2 * 8} = 2938.64 \text{ kN} * s/m \quad (5.65)$$

5.3 Etkin (Eşdeğer) Deprem Yüğü Analizi

TBDY-2018'e göre deprem yalıtım birimlerinin tasarım yerdeğiştirme taleplerinin belirlenmesinde eşdeğer deprem yüğü analizi yapılmalıdır.

5.3.1 Yalıtım arayüzü ve altyapının analizi

Tez kapsamında deprem yalıtım ve enerji sönümleme sistemleri ile kurgulanan binanın, DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi alt limit değerleri (yerdeğiştirme hesabı yapılacağından) ile hesaplanan hakim titreşim periyodu denklem 5.66 ile gösterilmiştir.

$$T_M = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{g * K_M}} = 2\pi * \sqrt{\frac{2116.85 * 18 + 4281.51 * 12}{9.81 * (1555.17 * 18 + 1734.50 * 12)}} = 2.716 \text{ s} \quad (5.66)$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçekleme katsayısı η_M , denklem 5.67 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_M = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta_{izo} + \zeta_{VSS}}} = \sqrt{\frac{10}{5 + 13.3 + 16.7}} = 0.471 \quad (5.67)$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için yalıtım birimi yerdeğiştirmesi D_M Denklem 5.68 ile hesaplanmıştır.

$$D_M = 1.3 * \left(\frac{g}{4 * \pi^2}\right) * T_M^2 * \eta_M * S_{ae}^{DD-1} \quad (5.68)$$

$$D_M = 1.3 * \left(\frac{9.81}{4 * \pi^2}\right) * 2.716^2 * 0.471 * 0.435 = 0.489 \text{ m}$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için yalıtım birimi toplam yerdeğiştirmesi D_{TM} denklem 5.69 ile hesaplanmıştır.

$$D_{TM} = D_M * \left[1 + y * \frac{12 * e}{b^2 + d^2} \right] = 0.489 * \left[1 + 16 * \frac{12 * 0.05}{32^2 + 20^2} \right] = 0.492 \text{ m} \quad (5.69)$$

Hesaplanan değer $1.1 * D_M$ 'den küçük olduğundan yalıtım birimi toplam yerdeğiştirmesi hesabı denklem 5.70 ile revize edilmiştir.

$$D_{TM, Tasarım} = 1.1 * D_M = 1.1 * 0.489 = 0.538 \text{ m} \quad (5.70)$$

DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde altyapıya etkiyen kuvvet ($R=1$) $V_{M,alt}$ yalıtım birimi üst limit değerleri kullanılarak denklem 5.71 ile hesaplanmıştır.

$$V_{M,alt} = \frac{S_{ae}^{DD-1} * W * \eta_M}{R} = \frac{0.747 * 89481.42 * 0.434}{1} = 28983.65 \text{ kN} \quad (5.71)$$

5.3.2 Üstyapının analizi

DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde, yalıtım birimi üst limit değerleri ile hesaplanan hakim titreşim periyodu denklem 5.72 ile gösterilmiştir.

$$T_D = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{g * K_D}} = 2\pi * \sqrt{\frac{2116.85 * 18 + 4281.51 * 12}{9.81 * (6520.42 * 18 + 6537.01 * 12)}} = 1.356 \text{ s} \quad (5.72)$$

DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçekleme katsayısı η_D , denklem 5.73 ile hesaplanmıştır. Burada etkin sönüm oranı güvenli tarafta kalınarak 30% ile sınırlandırılmıştır.

$$\eta_D = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} = \sqrt{\frac{10}{5 + 30}} = \sqrt{\frac{10}{35}} = 0.535 \quad (5.73)$$

DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde üstyapıya etkiyen kuvvet $V_{D,üst}$ yalıtım birimi üst limit değerleri kullanılarak denklem 5.74 ile hesaplanmıştır.

$$V_{D,üst} = \frac{S_{ae}^{DD-2} * W * \eta_D}{R} = \frac{0.461 * 89481.42 * 0.535}{1.5} = 14714.34 \text{ kN} \quad (5.74)$$

Hesaplarda kullanılan taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R), deprem yalıtımlı binaların sınırlı hasar (SH) performans hedefine göre belirlenmiştir (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5 : TBDY-2018 üstyapı performans hedefine göre R ve D katsayıları.

Performans Hedefi	R	D
KK	1.2	1.2
SH	1.5	1.5

Üstyapı tasarım kuvvetlerinin, görelî kat ötelemelerinin ve dolayısıyla deprem performansının belirlenmesinde eşdeğer deprem yükü yönteminin tek başına yeterli olması bazı yönetmelik şartlarına bağlıdır. Bu şartlardan bazıları sağlanmadığından; eşdeğer deprem yükü analiz sonuçları ile doğrudan üstyapı deprem performans seviyesinin belirlenmesi mümkün değildir. Bu sebeple; üstyapı için DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde mod birleştirme analizi gerçekleştirilecektir.

5.4 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz

İzolatör yerdeğiştirme talepleri inceleneceğinden analizler, yalıtım birimlerinin alt limit değerleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Tezin 4.4.1 bölümünde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde hangi deprem kayıtlarının kullanıldığı ve deprem kayıtlarının nelere dikkat edilerek seçildiği, 4.4.2 bölümünde seçilen deprem kayıtlarının ölçeklendirme çalışmalarının nasıl gerçekleştirildiği, 4.4.3 bölümünde ise analizler için gerekli program tanımlamaların neler olduğu ve nasıl yapıldığına dair detaylı açıklamalar yapılmıştır. Bu bölümde takip edilen yol ve yapılan çalışmalar, bahsedilen tez bölümleri ile oldukça benzer olduğu için doğrudan analizlerin sonuçları ile ilgili detaylara yer verilmiştir.

11 farklı deprem ivme kaydı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda, KÇE deprem yalıtım birimlerinde X-X doğrultusunda ve Y-Y doğrultusunda oluşan maksimum yerdeğiştirme değerleri ($U_{2,Maks}$ ve $U_{3,Maks}$), herhangi bir zaman adımında oluşan maksimum vektörel yerdeğiştirme ($SRSS_{Maks}$) ve son olarak elde edilen 11 maksimum vektörel yerdeğiştirme değerinin ortalaması ($SRSS_{Ort(Maks)}$) Çizelge 5.6 ile sunulmuştur.

Çizelge 5.6 : Deprem ivme kayıtlarının analizi ve KÇE deprem yalıtım birimi yerdeğiştirmeleri.

Deprem İvme Kaydı	U _{2,Maks} (mm)	U _{3,Maks} (mm)	SRSS _{Maks}	SRSS _{Ort(Maks)}
3126-PAZARCIK	376.96	361.14	435.08	
4616-PAZARCIK	478.78	451.16	510.06	
4625-PAZARCIK	500.82	481.24	500.90	
RSN779-LOMAP	277.60	247.98	322.74	
RSN802-LOMAP	362.27	338.95	422.98	
RSN821-ERZINCAN	233.51	219.04	331.96	422.38
RSN983-NORTHR	277.86	268.42	386.03	
RSN1198-CHICHI	431.61	404.90	434.06	
RSN3749-CAPEMEND	327.62	306.23	434.06	
RSN5818-IWATE	318.35	308.70	472.27	
RSN6893-DARFIELD	351.67	331.69	396.05	

TBDY-2018'e göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme değeri, etkin deprem yükü yöntemi ile hesaplanan toplam yerdeğiştirme (D_{TM}) değeri'nin 80%'i ile karşılaştırılmalıdır. İlgili karşılaştırma denklem 5.75 ile gerçekleştirilmiştir.

$$0.8 * D_{TM} = 0.8 * 538 = 430.4 \text{ mm} > 422.38 \quad (5.75)$$

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile elde edilen yalıtım birimi yerdeğiştirme değerleri, etkin (eşdeğer) deprem yükü analizi ile elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin 80%'inden küçük elde edilmiştir. Dolayısıyla 430.4mm değeri, tasarıma esas değer olarak belirlenmiştir. Belirlenen tasarım yerdeğiştirme değeri, Tip-1 ve Tip-2 KÇE yalıtım birimlerinin maksimum yerdeğiştirme kapasitesinin (512 mm) altındadır.

Üstyapı kat ivmelerinin incelenmesi için DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde yalıtım birimi nominal özellikleri ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen kat ivmeleri, Çizelge 5.7 ile paylaşılmıştır.

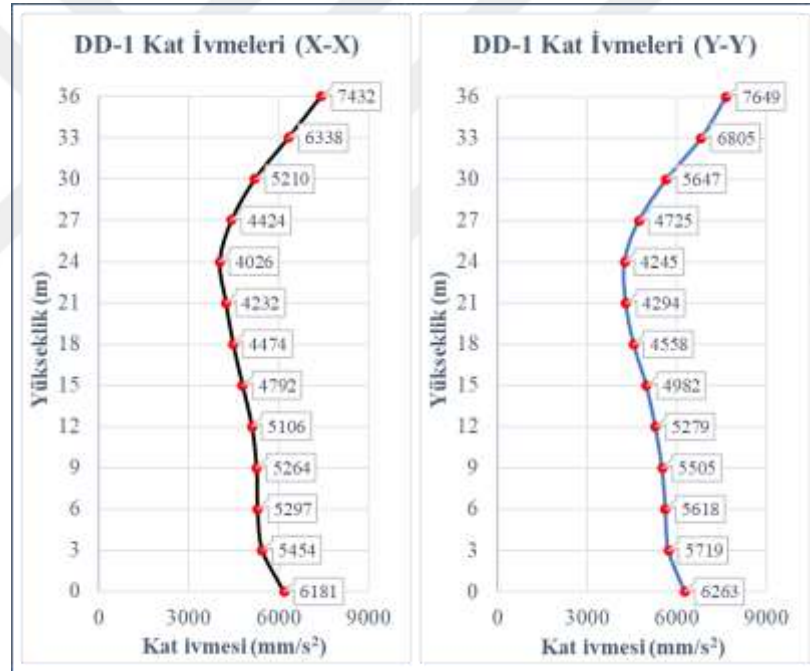
Çizelge 5.7 : X-X ve Y-Y doğrultuları kat ivmeleri.

Kat	X-X (mm/s ²)	Y-Y (mm/s ²)
ÇK (+36.00)	7432.21	7648.64
10.NK (+33.00)	6338.18	6805.48
9.NK (+30.00)	5210.20	5646.78
8.NK (+27.00)	4423.57	4724.59

Çizelge 5.7 (devam) : X-X ve Y-Y doğrultuları kat ivmeleri.

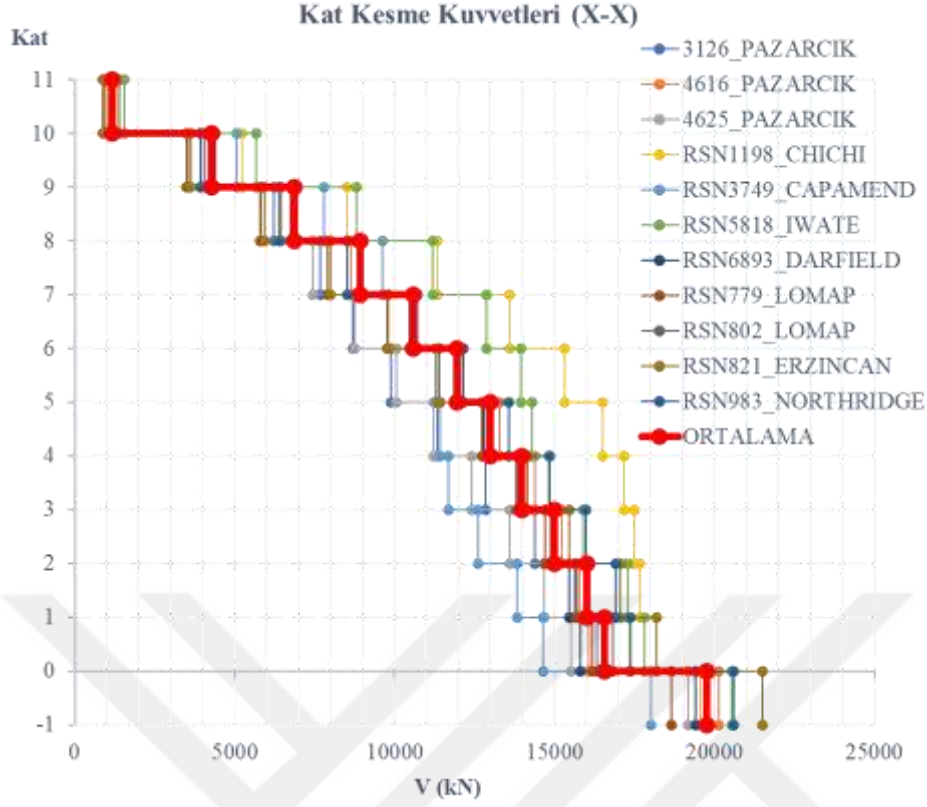
Kat	X-X (mm/s ²)	Y-Y (mm/s ²)
7.NK (+24.00)	4026.42	4244.95
6.NK (+21.00)	4231.70	4293.87
5.NK (+18.00)	4473.59	4558.26
4.NK (+15.00)	4792.33	4981.53
3.NK (+12.00)	5105.78	5279.24
2.NK (+9.00)	5263.59	5505.47
1.NK (+6.00)	5296.62	5617.88
ZK (+3.00)	5453.90	5719.24
BK (-+0.00)	6181.40	6263.30

Verilerin daha kolay incelenebilmesi ve yorumlanabilmesini sağlamak için Çizelge 5.7’de paylaşılan kat ivme değerleri görselleştirilmiştir. X-X ve Y-Y doğrultuları için oluşturulan ivme grafikleri Şekil 5.4 ile paylaşılmıştır.

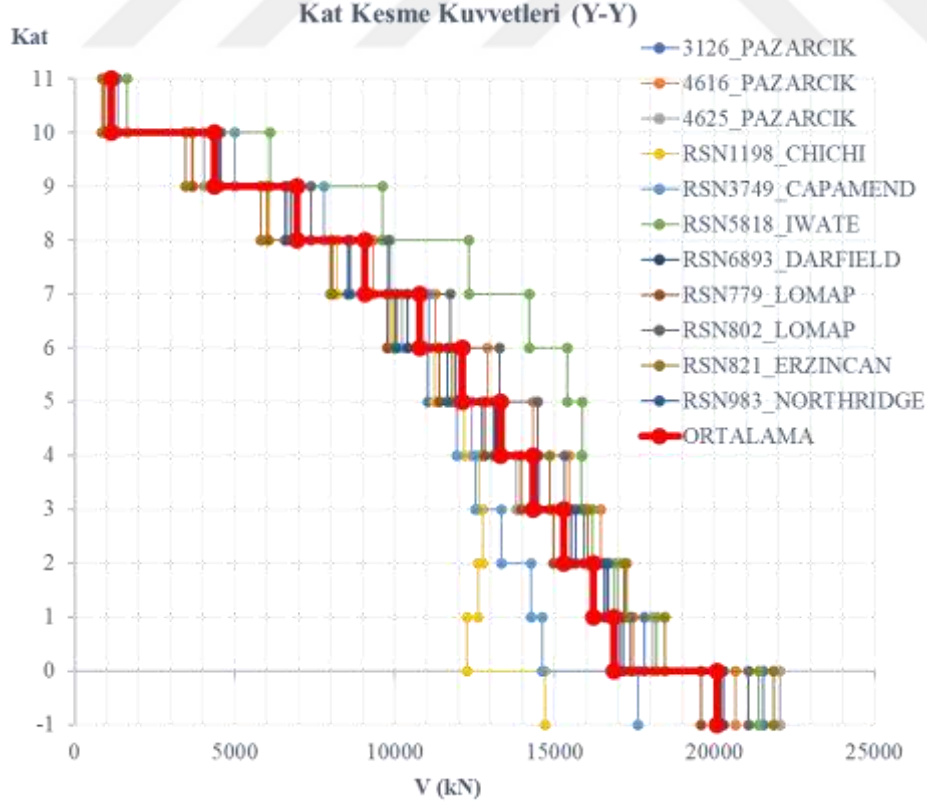


Şekil 5.4 : X-X ve Y-Y doğrultusu için hesaplanan kat ivmeleri.

Ek olarak, önceki bölümde DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları, DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre tekrar ölçeklendirilmiş ve deprem yalıtım birimi üst limit değerleri ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak üstyapı kat kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Elde edilen üstyapı kat kesme kuvvetleri, X-X ve Y-Y doğrultusu için sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 ile paylaşılmıştır.



Şekil 5.5 : X-X doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.



Şekil 5.6 : Y-Y doğrultusu üstyapı kat kesme kuvvetleri.

5.5 Mod Birleştirme Yöntemi ile Analiz (Üstyapı)

Üstyapı deprem performansının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen mod birleştirme analizi hesap sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

Analizler adımları tezin 4.5 bölümünde detaylıca anlatıldığından bu bölümde doğrudan analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Analiz sonucu elde edilen taban kesme kuvveti, kat kesme kuvvetleri ve taban kesme kuvveti/bina ağırlığı oranları Çizelge 5.8 ile sunulmuştur.

Çizelge 5.8 : Taban kesme kuvveti, kat kesme kuvvetleri ve V/W oranı.

Kat	Yük Birleşimi	V_X (kN)	V_Y (kN)	V_{base}/W
ÇK (+36.00)		699.50	705.06	
10.NK (+33.00)		2611.90	2674.12	
9.NK (+30.00)		4131.51	4271.58	
8.NK (+27.00)		5318.37	5551.56	
7.NK (+24.00)		6197.47	6529.38	
6.NK (+21.00)		6824.99	7251.75	
5.NK (+18.00)	DD-2_ENV_SPEC	7270.81	7782.99	0.11 ~ 0.12
4.NK (+15.00)		7606.23	8194.58	
3.NK (+12.00)		7901.64	8561.12	
2.NK (+9.00)		8227.61	8957.12	
1.NK (+6.00)		8649.99	9447.28	
ZK (+3.00)		9216.65	10070.50	
BK (-+0.00)		9809.51	10686.06	

Analiz sonucu elde edilen görelî kat ötelemeleri ise Çizelge 5.9 ile sunulmuştur.

Çizelge 5.9 : Üstyapı kat yerdeğıştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri.

Doğrultu	Kat	Yerdeğıştirme (mm)	Görelî Öteleme (mm)	h_i
	ÇK (+36.00)	139.30	2.94	0.001
	10.NK (+33.00)	155.87	4.16	0.001
	9.NK (+30.00)	152.81	5.41	0.002
	8.NK (+27.00)	148.81	6.64	0.002
	7.NK (+24.00)	143.81	7.68	0.003
	6.NK (+21.00)	137.86	8.52	0.003
	5.NK (+18.00)	131.02	9.19	0.003
	4.NK (+15.00)	123.32	9.80	0.003
	3.NK (+12.00)	114.73	10.48	0.003
	2.NK (+9.00)	105.15	11.49	0.004
	1.NK (+6.00)	94.24	13.28	0.004
	ZK (+3.00)	81.34	16.78	0.006

Çizelge 5.9 (devam) : Üstyapı kat yerdeğiştirmeleri ve görelı kat ötelemeleri.

Doğrultu	Kat	Yerdeğiştirme (mm)	Görelı Öteleme (mm)	h _i
Y-Y	ÇK (+36.00)	144.94	2.67	0.001
	10.NK (+33.00)	156.15	4.13	0.001
	9.NK (+30.00)	152.95	5.27	0.002
	8.NK (+27.00)	148.88	6.41	0.002
	7.NK (+24.00)	143.89	7.37	0.002
	6.NK (+21.00)	138.04	8.13	0.003
	5.NK (+18.00)	131.40	8.73	0.003
	4.NK (+15.00)	124.01	9.24	0.003
	3.NK (+12.00)	115.86	9.81	0.003
	2.NK (+9.00)	106.86	10.68	0.004
	1.NK (+6.00)	96.70	12.37	0.004
	ZK (+3.00)	84.64	16.00	0.005

TBDY-2018'e göre üstyapıda A1 (burulma düzensizliği), B2 (yumuşak kat düzensizliği) veya B3 (düşey eleman süreksizliği) düzensizliklerinden herhangi birinin bulunması durumunda mod birleştirme analizi ile hesaplanan yerdeğiştirmeler ve üstyapı kuvvetleri, etkin (eşdeğer) deprem yükü yöntemi ile gerçekleştirilen hesapların 90%'ından az olmamalıdır. İlgili düzensizliklerin bulunmaması durumunda ise bu oran 80% olarak değişir.

Düşey taşıyıcı elemanlarda herhangi bir süreksizlik durumu ve katlar arasında kesit farklılıkları olmadığından B2 ve B3 düzensizlikleri üstyapıda mevcut değildir ancak yapılan kontroller sonucunda A1 türü düzensizlik tespit edilmiştir. İlgili kontroller Çizelge 5.10 ile paylaşılmıştır.

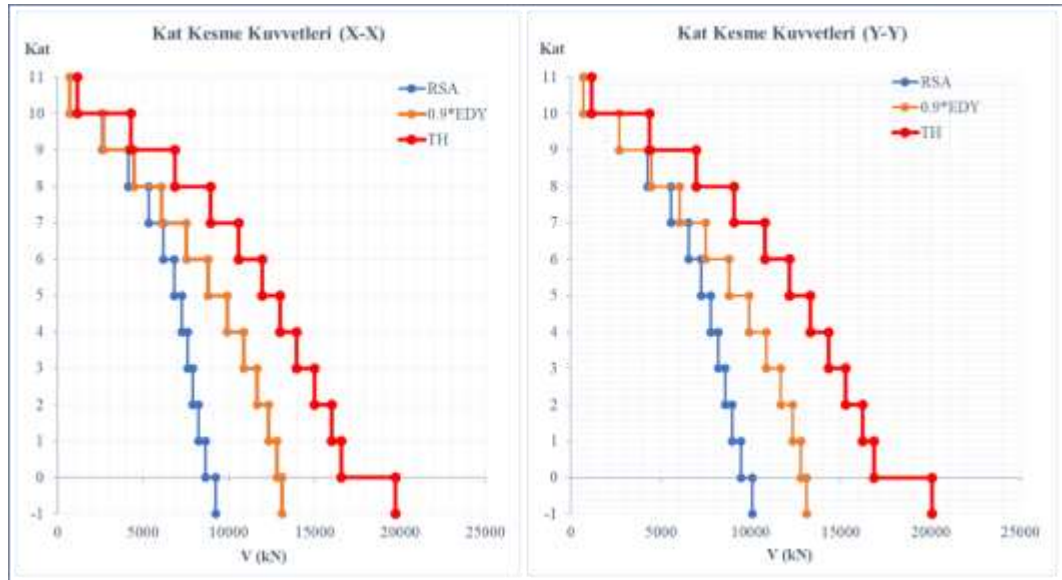
Çizelge 5.10 : Üstyapı burulma düzensizliği (A1) kontrolü.

Doğrultu	Kat	Yük Birleşimi	$\Delta_{i,max}$ (mm)	$\Delta_{i,ort}$ (mm)	η_{bi}
X-X	ÇK (+36.00)	DD-2_ENV_SPEC	2.94	2.72	1.08
	10.NK (+33.00)		4.16	3.60	1.15
	9.NK (+30.00)		5.41	4.67	1.16
	8.NK (+27.00)		6.64	5.71	1.16
	7.NK (+24.00)		7.68	6.57	1.17
	6.NK (+21.00)		8.52	7.24	1.18
	5.NK (+18.00)		9.19	7.76	1.19
	4.NK (+15.00)		9.80	8.21	1.19
	3.NK (+12.00)		10.48	8.72	1.20
	2.NK (+9.00)		11.49	9.49	1.21
	1.NK (+6.00)		13.28	10.91	1.22

Çizelge 5.10 (devam) : Üstyapı burulma düzensizliği (A1) kontrolü.

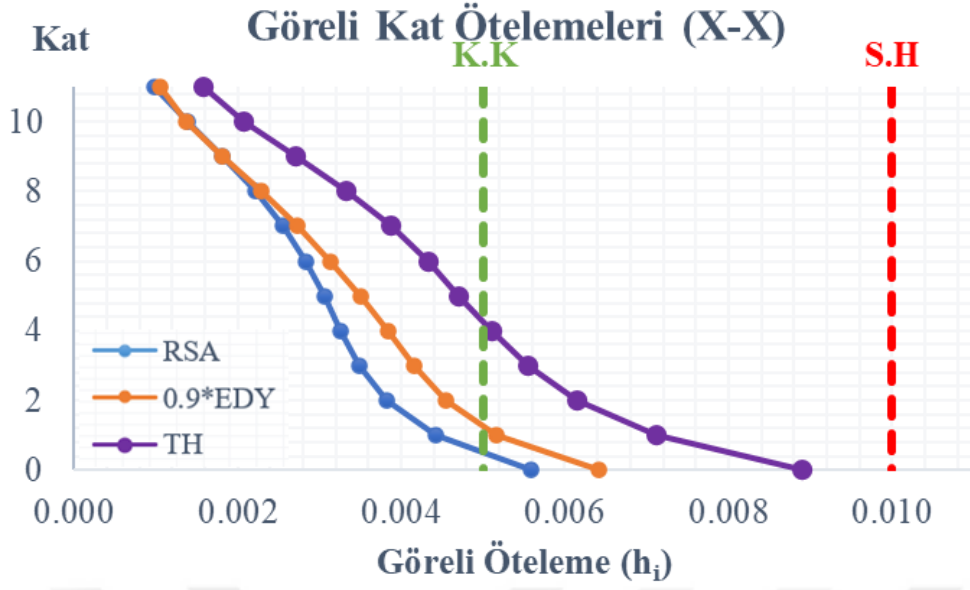
Doğrultu	Kat	Yük Birleşimi	$\Delta_{i,max}$ (mm)	$\Delta_{i,ort}$ (mm)	η_{bi}
X-X	ZK (+3.00)	DD-2_ENV_SPEC	16.78	13.76	1.22
	BK (-+0.00)		64.90	56.28	1.15
	ÇK (+36.00)		2.67	2.54	1.05
	10.NK (+33.00)		4.13	3.79	1.09
	9.NK (+30.00)		5.27	4.83	1.09
	8.NK (+27.00)		6.41	5.85	1.09
	7.NK (+24.00)		7.37	6.72	1.10
Y-Y	6.NK (+21.00)		8.13	7.39	1.10
	5.NK (+18.00)		8.73	7.91	1.10
	4.NK (+15.00)		9.24	8.35	1.11
	3.NK (+12.00)		9.81	8.84	1.11
	2.NK (+9.00)		10.68	9.59	1.11
	1.NK (+6.00)		12.37	11.09	1.12
	ZK (+3.00)		16.00	14.32	1.12
	BK (-+0.00)		68.89	67.51	1.02

Mod birleştirme yöntemi ile hesaplanan üstyapı kuvvetlerinin, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ve etkin deprem yükü ve sonuçları ile hesaplanan üstyapı kuvvetlerin 90%'ı ile karşılaştırılması Şekil 5.7 ile sunulmuştur.

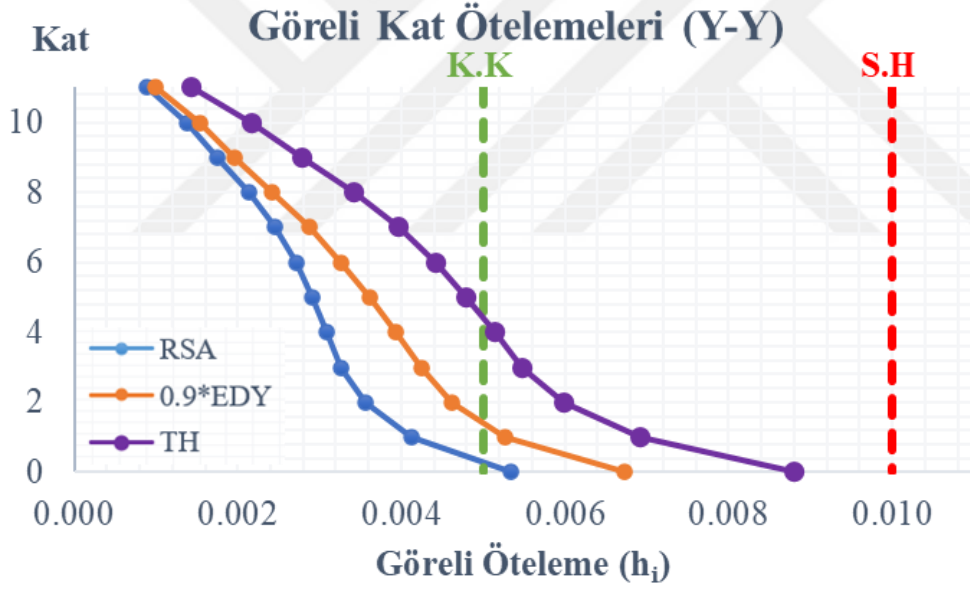


Şekil 5.7 : Üstyapı kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Mod birleştirme yöntemi ile elde edilen göreceli kat ötelemelerinin, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ve etkin deprem yükü yöntemi ile hesaplanan yerdeğiştirmelerin 90%'ı ile karşılaştırılması X-X doğrultusu için Şekil 5.8 ile, Y-Y doğrultusu için ise Şekil 5.9 ile sunulmuştur.



Şekil 5.8 : X-X doğrultusu görelî kat ötelemelerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.9 : Y-Y doğrultusu görelî kat ötelemelerinin karşılaştırılması.

Sonuç olarak üstyapı, DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde hedeflenen sınırlı hasar (SH) performans düzeyini sağlamıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezin dördüncü ve beşinci bölümünde ele alınan farklı tasarım senaryoları ile ilgili elde edilen tecrübeler ve analiz sonuçları incelenerek aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- KÇE yalıtım birimleri tarafından sisteme sağlanan sönüm oranı, yalıtım birimi merkezinde yer alan kurşun çekirdeğin çapına (B_L) ve kurşun malzemesinin akma dayanımına (T_{yp}) bağlıdır. Bu değerlerin büyümesi ile yalıtım biriminin - dolayısıyla sistemin- efektif rijitliği ve sönümleme kapasitesi artar. Periyodun azalması ve sönümün artması ile yalıtım birimi yerdeğiştirme taleplerinin azalmasını sağlar. Fakat periyodun küçülmesi (efektif rijitliğin artması sebebiyle) aynı zamanda üstyapıya aktarılan ivmelerin, kuvvetlerin ve dolayısıyla görelî kat ötelemelerinin artmasına ve sebep olur. Bu durum yapı için hedeflenen deprem performansının sağlanmasını zorlaştırabilir. Nitekim böyle de olmuştur. Gerçekleştirilen doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen kat kesme kuvvetleri ve görelî kat ötelemeleri, ilgili konumda örnek olarak seçilen yapının sadece kurşun çekirdekli elastomer deprem yalıtım birimleri ile tasarlanmasının mümkün olamayacağını göstermiştir.
- Viskoz sıvı sönümleyicilerin out of phase (faz dışı) davranışı sayesinde, sisteme önemli bir rijitlik katkısı eklenmeden sönüm artışı sağlanabilmiştir. Viskoz sıvı sönümleyicilere karakterize bu davranış özelliği sayesinde, sistem periyodu etkilenmeden yalıtım birimi yerdeğiştirme taleplerinin azaltılabilmesi mümkün olmuştur. Azalan yerdeğiştirme talepleri ile bağlantılı olarak yalıtım birimi elastomer katman sayısı, toplam elastomer kalınlığı (T_r) ve dolayısıyla toplam yalıtım birimi yüksekliği (H) de azaltılmıştır. Elastomer katman sayısı 5 (%13.5), toplam elastomer kalınlığı 4cm (%13.5), yalıtım birimi yüksekliği ise 5.5cm (%1.4) kadar azaltılabilmiştir. Ayrıca efektif rijitlik arttırılmadan sağlanan bu ek sönüm sayesinde, üstyapıya aktarılan ivmelerde ve kat kesme kuvvetlerinde azalma (yaklaşık %25-35) gözlemlenmiştir. Bu sayede üstyapının, DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde sınırlı hasar (SH) performans düzeyini sağlayacak şekilde tasarlanabilmesi mümkün olmuştur.

- Viskoz sıvı sönümleyiciler tarafından sisteme sağlanan sönüm, yalıtım birimlerinin kurşun çekirdek boyutlarının (B_L) yaklaşık 10cm kadar ($\approx\%36.4$) küçültülebilmemesini mümkün kılmıştır. Kurşun çekirdek boyutunun küçülmesi, yalıtım birimi eksenel basınç kapasitelerinin artmasını sağlamış ve bu sayede çelik plaka ile yapışmış elastomerin çapını (B) 15-20cm ($\approx\%13.6$ - $\%18.2$) ve dolayısıyla yalıtım birimi toplam dış çapı (B_{total}) da küçültülebilmektedir.
- Viskoz sıvı sönümleyicilerin sisteme dahil edilmesi ile sağlanan yalıtım birimi boyut optimizasyonları sayesinde, yalıtım birimi adedi başına yaklaşık 4000\$ ($\approx\%40$) maliyet azalması sağlanabilmektedir. Ancak yalıtım düzleminde oluşan büyük yerdeğiştirme değerlerini karşılayabilecek büyük stroke kapasiteli viskoz sıvı sönümleyiciler, daha düşük kapasiteli (standart yapılarda kullanılan) viskoz sıvı sönümleyicilere göre çok daha özel ve pahalıdır. Bu sebeple VSS + optimize edilmiş deprem yalıtım birimlerinin maliyeti (tezin 5.bölümünde kurgulanan tasarım senaryosu), sadece deprem yalıtım birimleri ile kurgulanan sisteme göre (tezin 4.bölümünde ele alınan tasarım çalışması) $\approx\%250$ -300 kadar fazla olmuştur. Yapılan maliyet çalışmaları sonucunda; 12-13 adet deprem yalıtım birimi optimizasyonu sonucu elde edilen maliyet kazancının (≈ 48000 -52000\$), kabaca 1 adet viskoz sıvı sönümleyicinin maliyetine denk geldiği söylenebilir. Viskoz sıvı sönümleyicilerin bağlantı konfigürasyonlarının değiştirilmesi (f faktörünün artması) ve sönüm katsayısının optimize edilmesi ile birim maliyetlerinin azaltılabileceğini de eklemekte fayda vardır. Ayrıca yapılan maliyet hesaplarına, üstyapı etkin deprem yüklerinin, dolayısıyla çelik donatı ve beton metraj azalmalarının sağladığı maliyet avantajları da dahil edilmemiştir.
- Doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle gerçekleştirilen analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında, üstyapı kat kesme kuvvetleri ve görelî kat ötelemelerinin (dolayısıyla deprem performansının) oldukça farklı elde edilebileceği anlaşılmıştır. Dolayısıyla deprem yalıtım birimleri ile tasarlanacak yapıların, daha güvenilir ve gerçeğe yakın olan analiz yöntemleri (doğrusal olmayan analizler) ile tasarlanmasının ne kadar önemli olduğu gözler önüne serilmiştir.

Özetle; yüksek sismik taleplerin olduğu bölgelerde deprem yalıtımı sistemi ile birlikte viskoz sıvı sönümleyicilerin kullanılması, hem yalıtım birimi boyutlarının küçülmesini hem de üstyapı kat ivmelerinin, kat kesme kuvvetlerinin ve görelî kat ötelemelerinin azalmasını ve en önemlisi üstyapının hedeflenen deprem performansına ulaşabilmesini

sağlamıştır. Özellikle yüksek sismik taleplerin oluşacağı konumlarda bulunan hastaneler, veri merkezleri, kamu binaları, müzeler ve askeri üsler gibi deprem performans hedefi yüksek (kesintisiz kullanım) olan deprem yalıtımlı yapıların tasarımında viskoz sıvı sönümleyicilerin kullanılması, üstyapı performansının sağlanmasında doğru bir alternatif olabilir.





KAYNAKLAR

- [1] **Türkiye Makina Mühendisleri Odası.** (2012). *Türkiye'de deprem gerçeği ve TMMOB Makina Mühendisleri Odası'nın önerileri oda raporu* (Rapor No. MMO/587). Ankara : TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- [2] **Alavi, B., & Krawinkler, H.** (2000, January). Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 8, p. 2000). New Zealand Society for Earthquake Engineering Wellington, New Zealand.
- [3] **Uang, C. M., & Bertero, V. V.** (1990). Evaluation of seismic energy in structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 19(1), 77-90.
- [4] **Kareem, A., & Gurley, K.** (1996). Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 59(2-3), 131-157.
- [5] **Symans, M. D.** (1995). *Development and experimental study of semi-active fluid damping devices for seismic protection of structures*. State University of New York at Buffalo.
- [6] **Clark, P., Kasai, K., Aiken, I. D., Kimura, I., Kasai, K., & Aiken, I. D.** (2000, January). Evaluation of design methodologies for structures incorporating steel unbonded braces for energy dissipation. In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (p. 2240).
- [7] **Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P., & Su, Y. F.** (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*, 9(3), 505-528.
- [8] **Clark, P., Kasai, K., Aiken, I. D., Kimura, I., Kasai, K., & Aiken, I. D.** (2000, January). Evaluation of design methodologies for structures incorporating steel unbonded braces for energy dissipation. In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (p. 2240).
- [9] **Shao, D., Pall, A., & Soli, B.** (2006, April). Friction Dampers for seismic upgrade of a 14-story patient tower with a 36-foot tall soft story. In *Proc. of 8th US National Conf. on Earthquake Engineering*.
- [10] **Vezina, S., Proulx, P., Pall, R., & Pall, A.** (1992, July). Friction-dampers for aseismic design of Canadian Space Agency. In *10th World conference on earthquake engineering* (pp. 4123-4128).
- [11] **Nakamura, Y., Hanzawa, T., Nomura, T., & Takada, T.** (2016). Performance-based placement of manufactured viscoelastic dampers for design response spectrum. *Frontiers in Built Environment*, 2, 10.

- [12] **Constantinou, M. C., & Symans, M. D.** (1993). Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *The structural design of tall buildings*, 2(2), 93-132.
- [13] **Constantinou, M. C., & Symans, M. D.** (1992). Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers. In *Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers* (pp. 160-160).
- [14] **Abdi, A. A.** (2022). *Comparative study for earthquake performance of steel buildings with seismic isolator and fixed based steel buildings with damper* (Master's thesis, Işık Üniversitesi).
- [15] **Douglas, P. T.** (2002). History, design, and applications of fluid dampers in structural engineering. In *Proceedings of structural engineers world congress, Japan*.
- [16] **Seleemah, A. A., & Constantinou, M. C.** (1997). *Investigation of seismic response of buildings with linear and nonlinear fluid viscous dampers* (No. 97-0004). Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research.
- [17] **Berquist, M., De Pasquale, R., Frye, S., Gilani, A., Klembczyk, A., Lee, D., ... & Winters, C.** (2019). Fluid viscous dampers-general guidelines for engineers including a brief history. *USA: Taylor Devices Inc.*
- [18] **Constantinou, M. C., Tsopelas, P., Hammel, W., & Sigaher, A. N.** (2001). Toggle-brace-damper seismic energy dissipation systems. *Journal of structural engineering*, 127(2), 105-112.
- [19] **Şigaher, A. N., & Constantinou, M. C.** (2003). Scissor-jack-damper energy dissipation system. *Earthquake Spectra*, 19(1), 133-158.
- [20] **Constantinou, M. C., Kalpakidis, I. V., Filiatrault, A., & Lay, R. E.** (2011). *LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators* (pp. 11-0004). MCEER.
- [21] **NEHRP, F.** (2006). Recommended Provisions: Instructional and Training Materials. *FEMA 451B, Washington, DC*.
- [22] **Safety, I. S.** (2004). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450). *Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences: Washington, DC, USA*.
- [23] **Symans, M. D.** (2009). Seismic protective systems: seismic isolation. *Instructional material complementing FEMA, 451*.
- [24] **Tafheem, Z., Arafat, T. A., Chowdhury, A., & Iqbal, A.** (2015, December). Seismic isolation systems in structures-the state of art review. In *Proceedings of 11th global engineering, science and technology conference* (pp. 18-19).
- [25] **Türk Standardları Enstitüsü.** (2000). TS 500: Betonarme Yapılar için Tasarım ve Yapım Kuralları. *T.C. Resmi Gazete, Sayı: 24058, 8 Şubat 2000*.

- [26] **İnşaat Mühendisleri Odası.** (2007). *Türkiye'de deprem gerçeği ve depremle yaşamayı öğrenmek.* TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayını. https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f7deb880ca6b4b7_ek.pdf
- [27] **Türk Standardları Enstitüsü.** (2021). TS 498: Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri. *T.C. Resmi Gazete, Sayı: 31614*, 30 Eylül 2021.
- [28] **Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.** (2018). *T.C. Resmi Gazete, Sayı: 30364*, 18 Mart 2018.
- [29] **New Zealand Society for Earthquake Engineering.** (2017). *Seismic isolation guidelines.* Wellington, New Zealand: NZSEE.
- [30] **Url-1** <<https://tdth.afad.gov.tr/>>, erişim tarihi 15.04.2025.
- [31] **Url-2** <<https://ngawest2.berkeley.edu/>>, erişim tarihi 29.04.2025.





EKLER

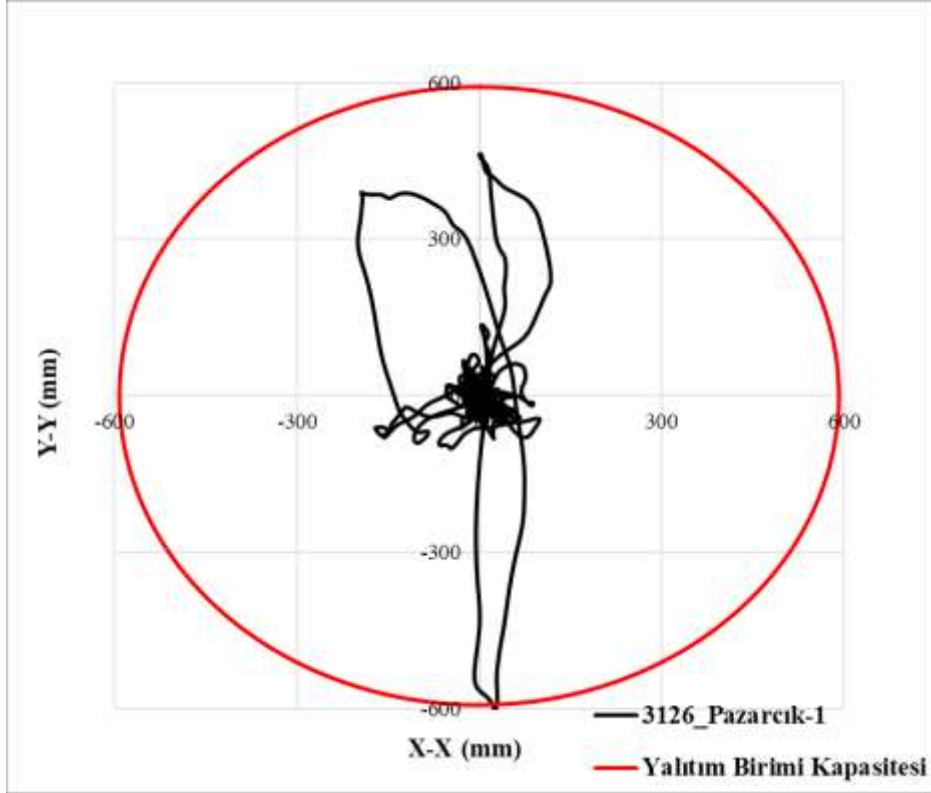
EK A: Deprem yalıtım birimi yerdeğiştirme orbitleri.

EK A1: 4.Bölüm zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen deprem yalıtım birimi yerdeğiştirme orbitleri.

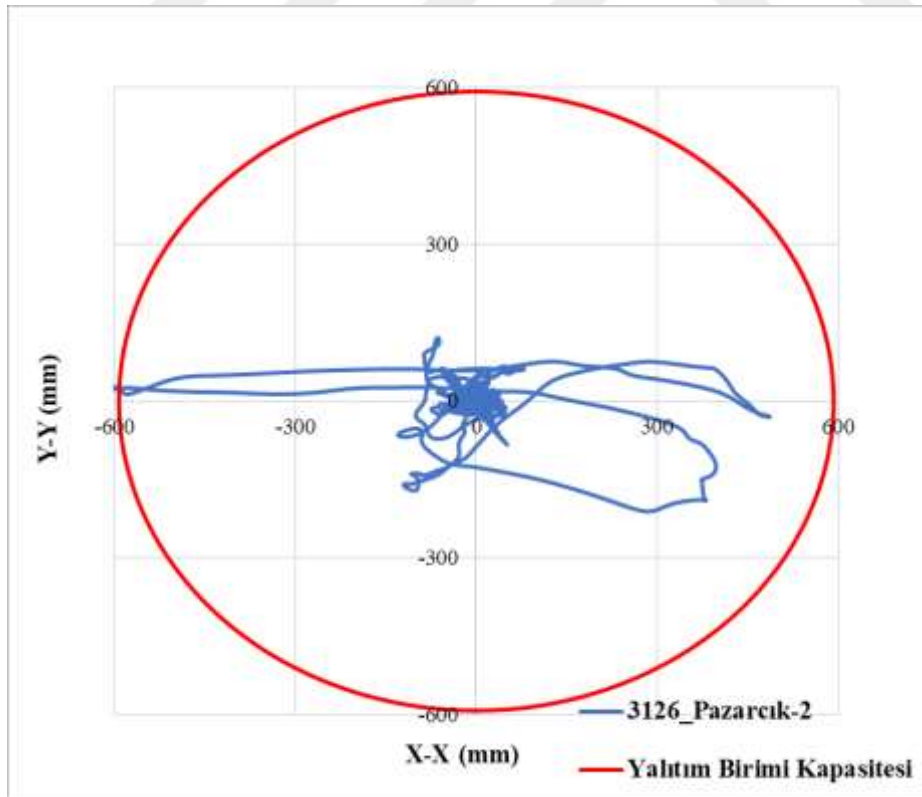
EK A2: 5.Bölüm zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen deprem yalıtım birimi yerdeğiştirme orbitleri.



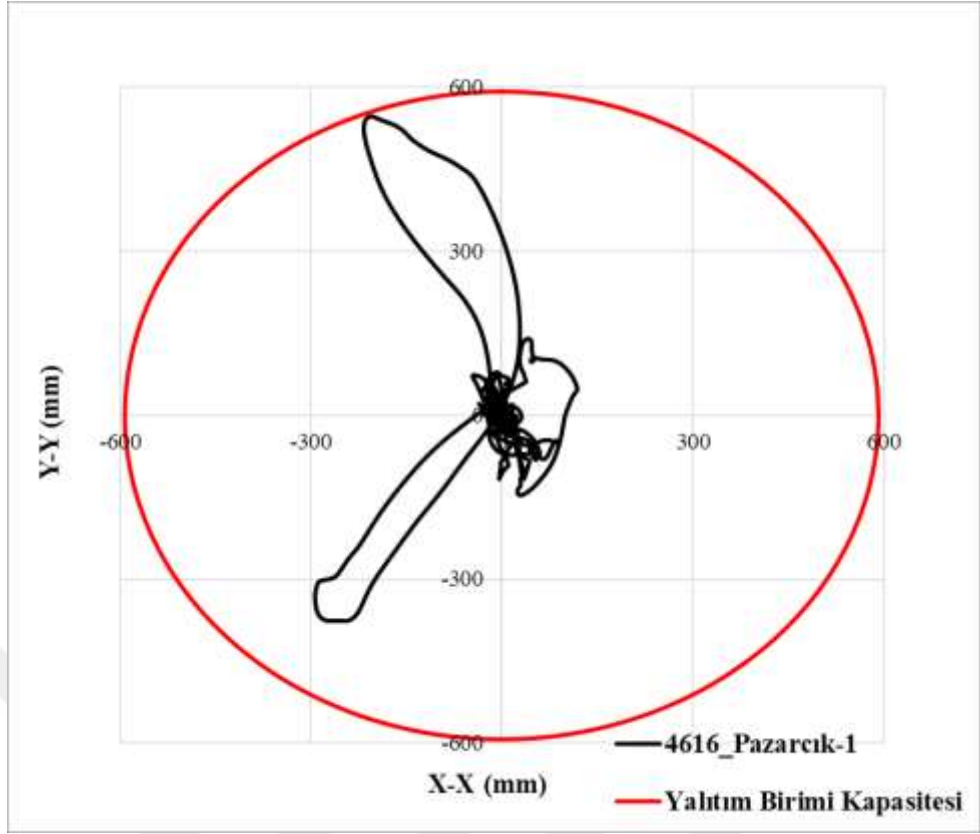
EK A1:



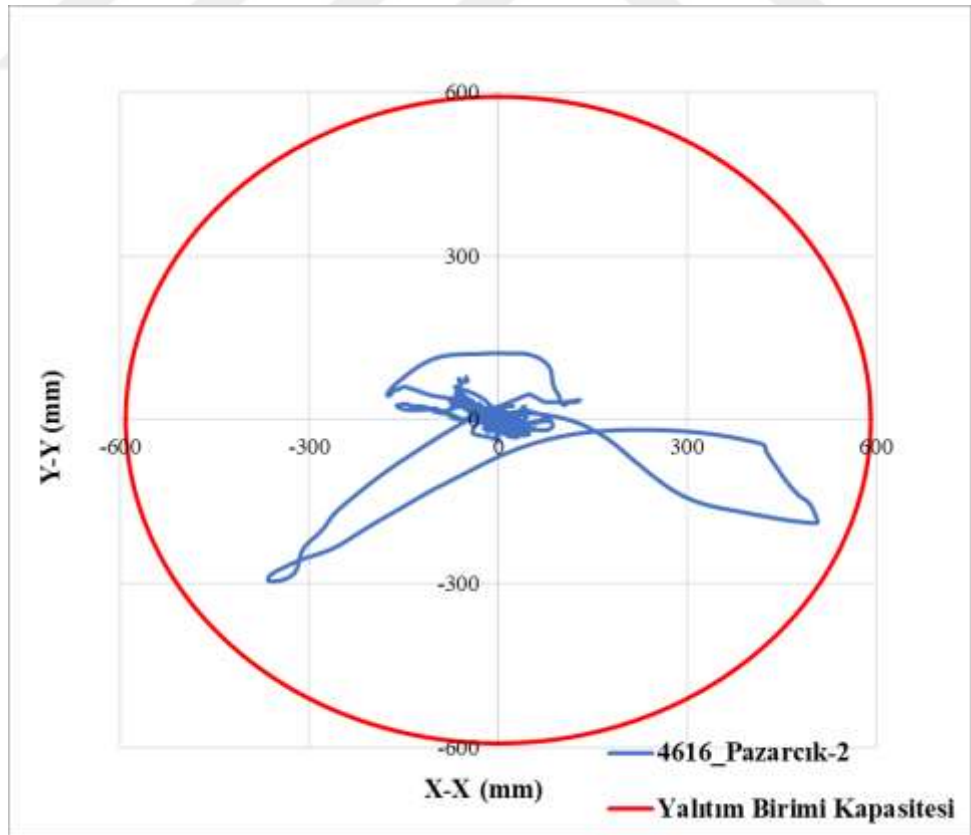
Şekil A.1 : 3126-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.



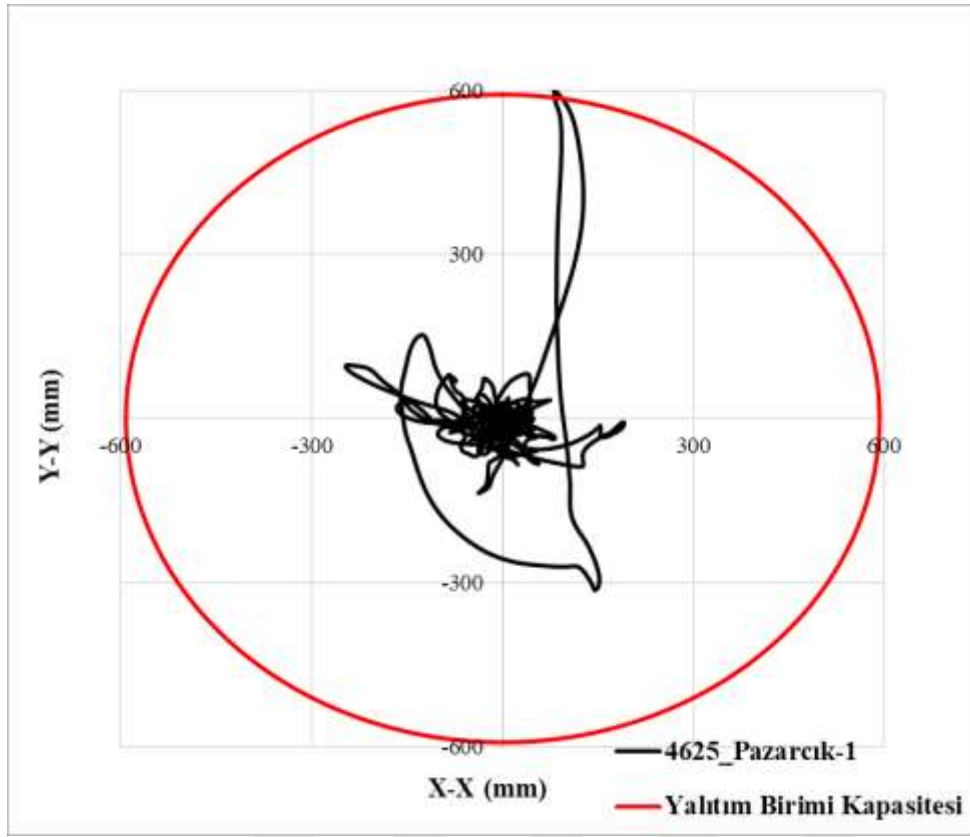
Şekil A.2 : 3126- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.



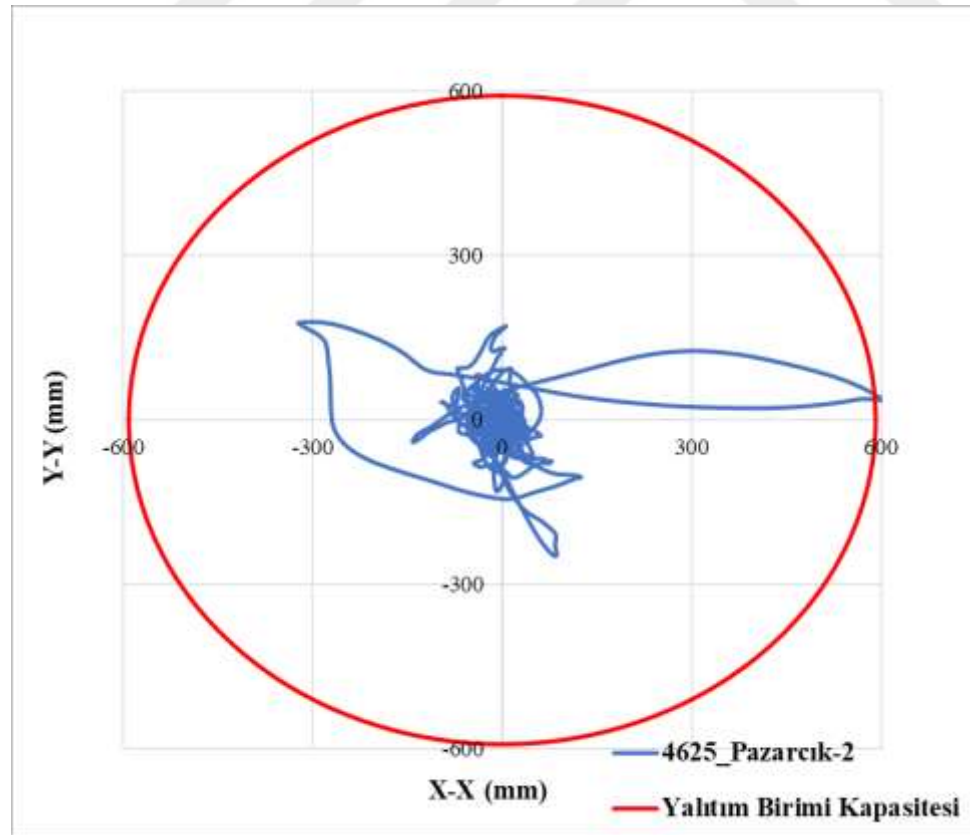
Şekil A.3 : 4616- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.



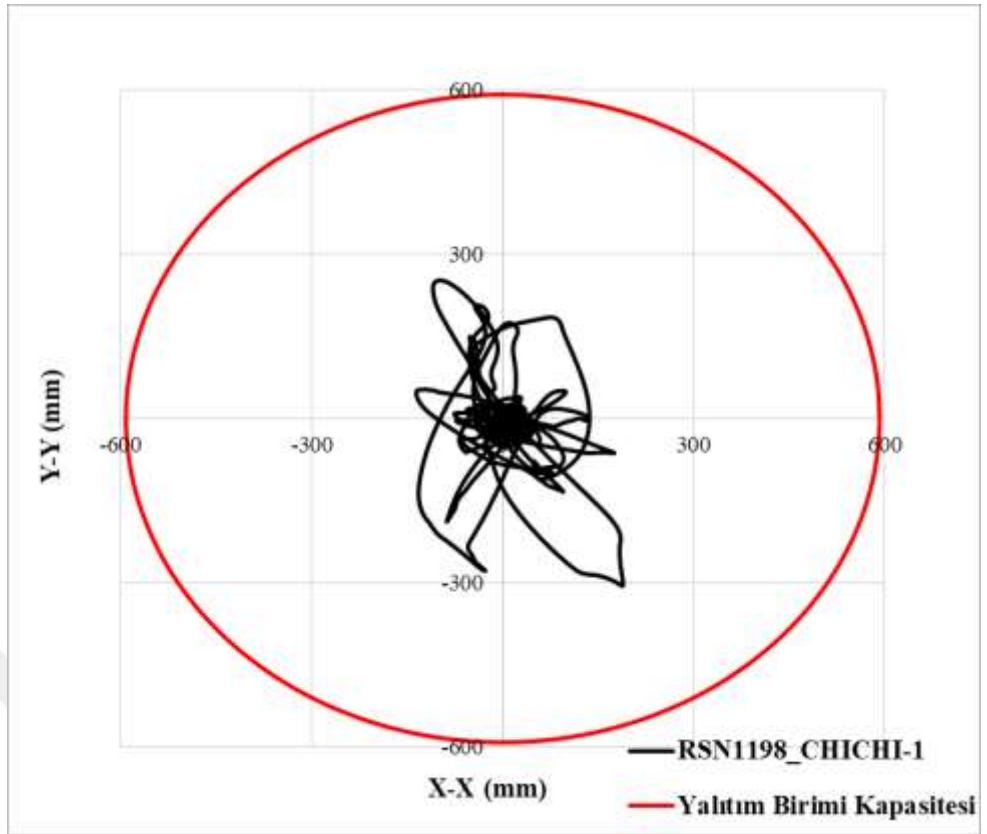
Şekil A.4 : 4616- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.



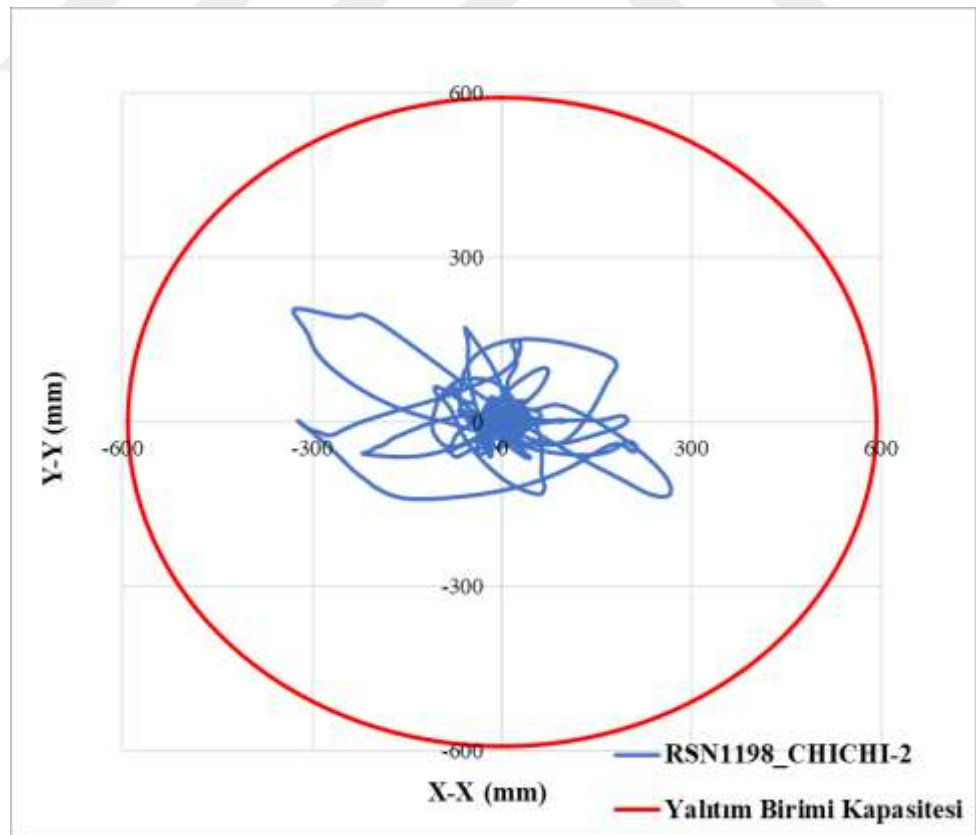
Şekil A.5 : 4625- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.



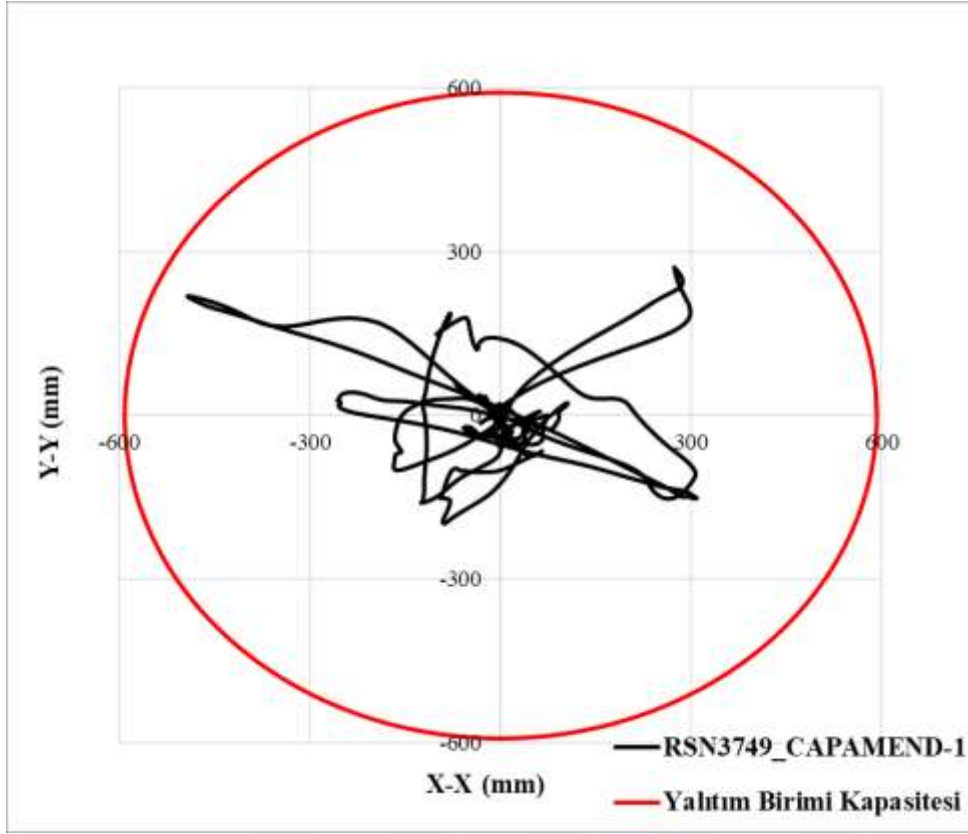
Şekil A.6 : 4625- PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.



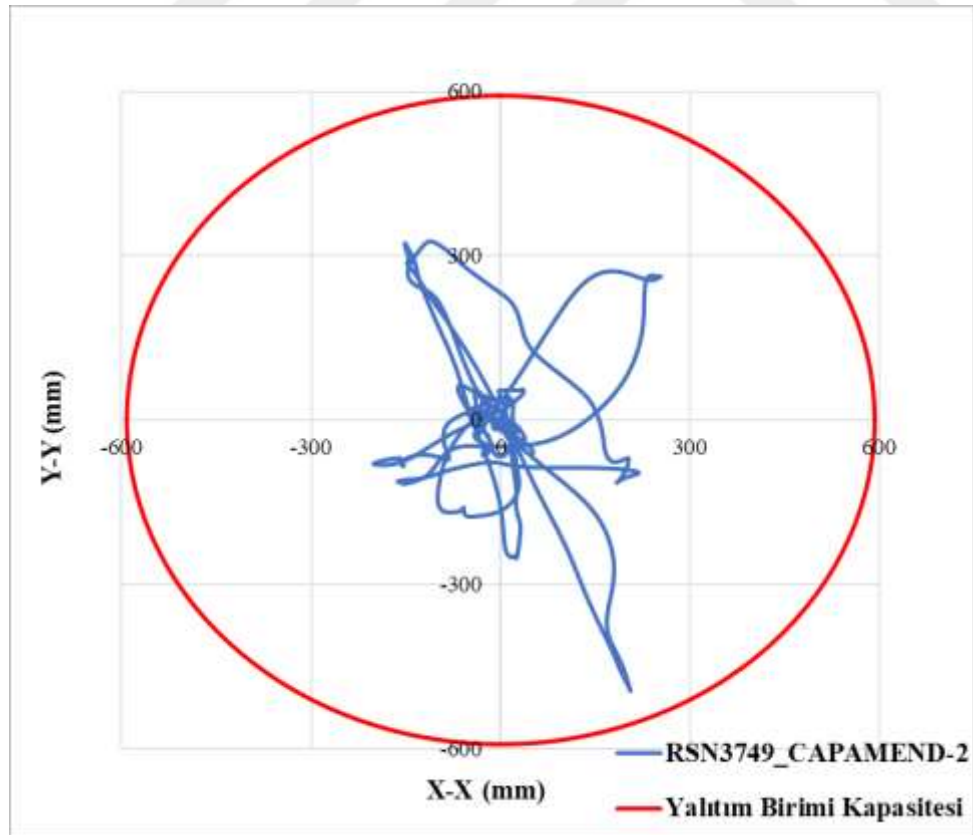
Şekil A.7 : RSN1198-CHICHI yerdeğiştirme orbiti-1.



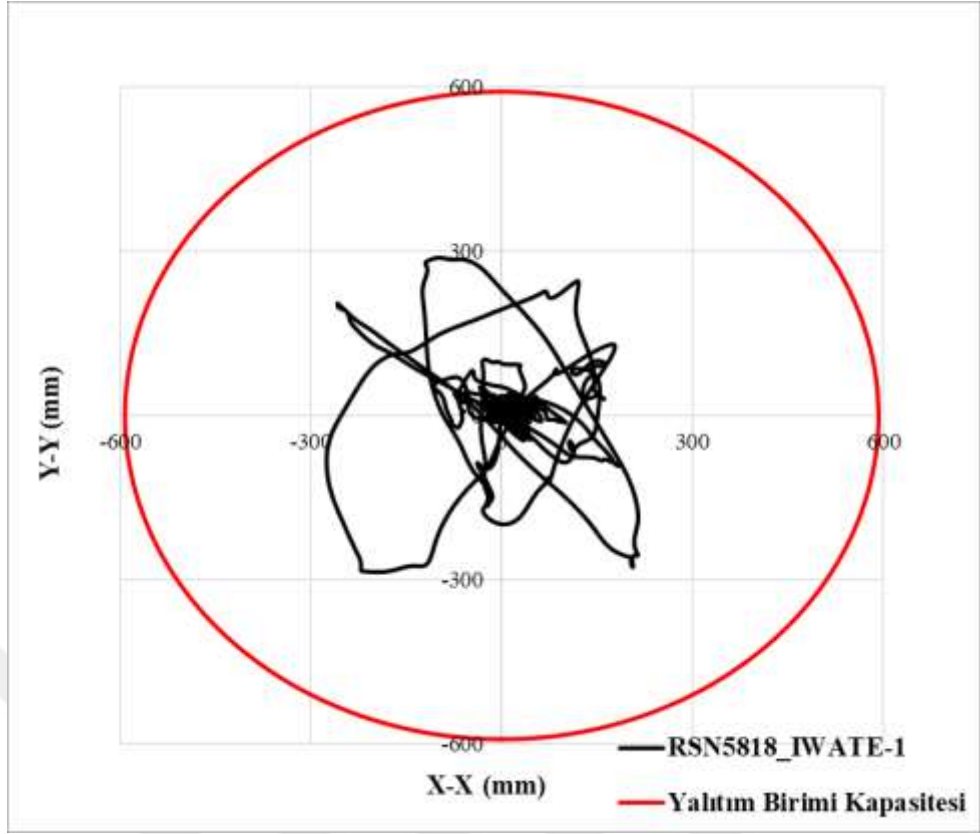
Şekil A.8 : RSN1198-CHICHI yerdeğiştirme orbiti-2.



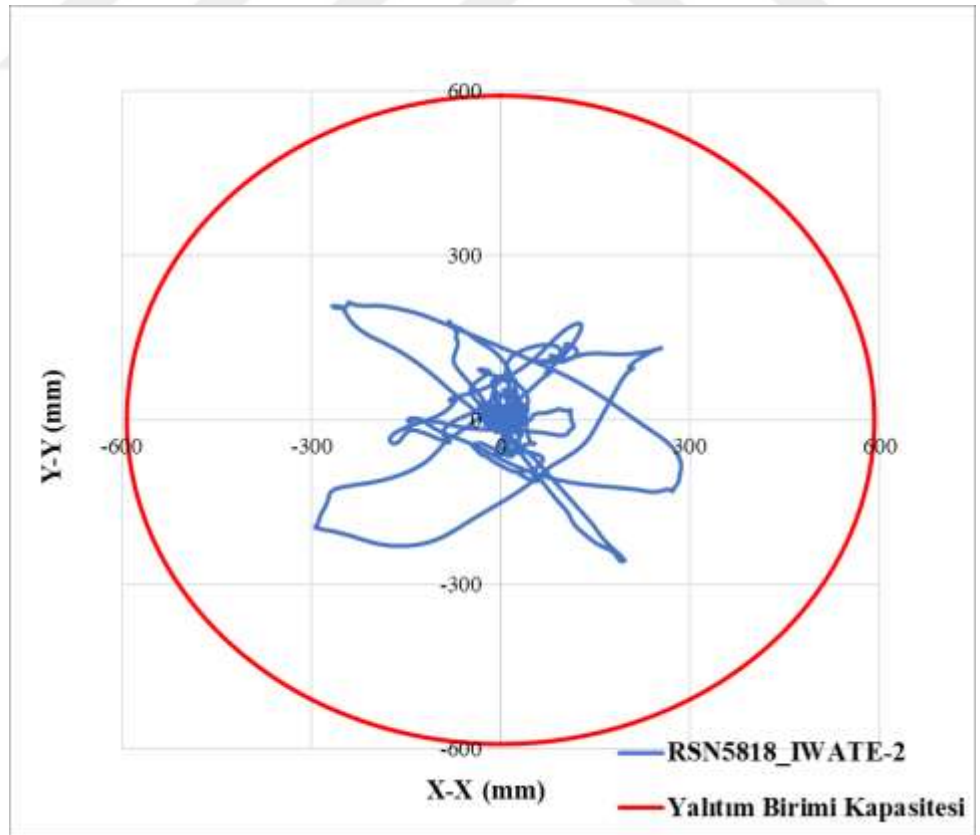
Şekil A.9 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-1.



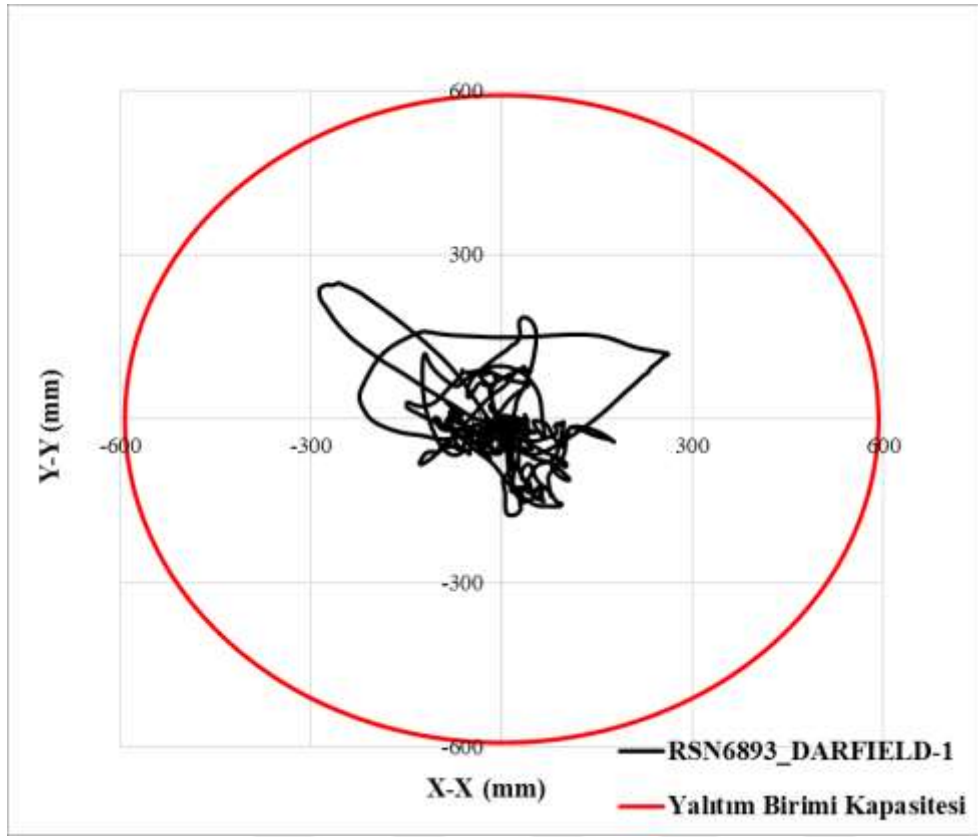
Şekil A.10 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-2.



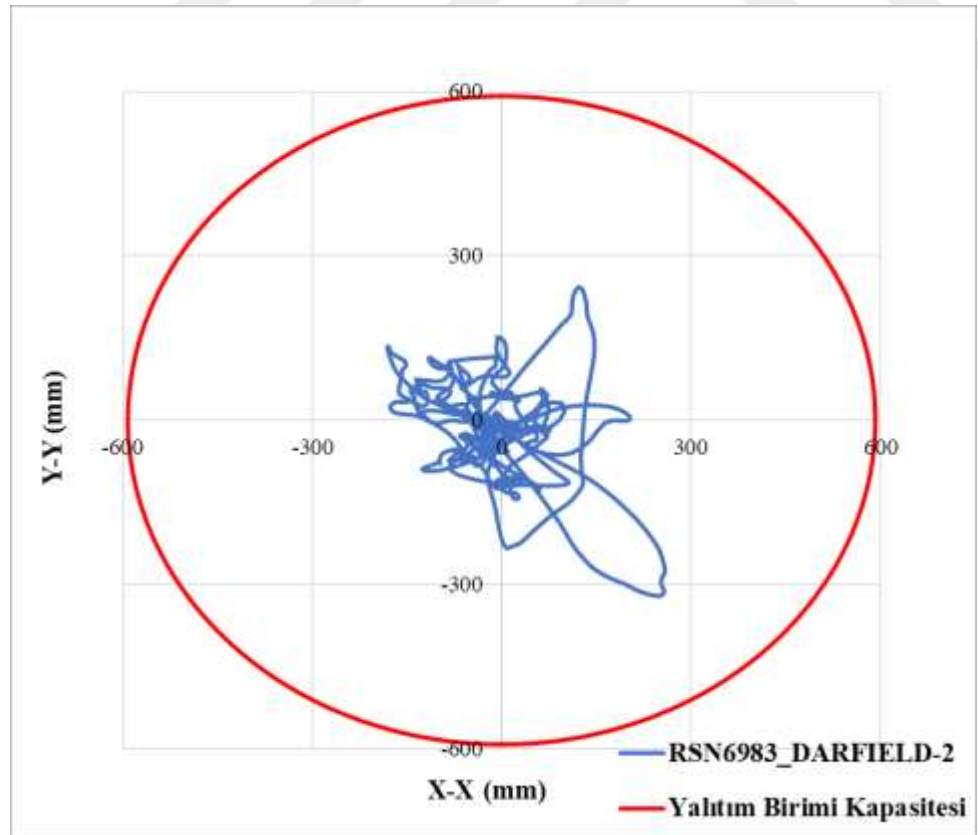
Şekil A.11 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-1.



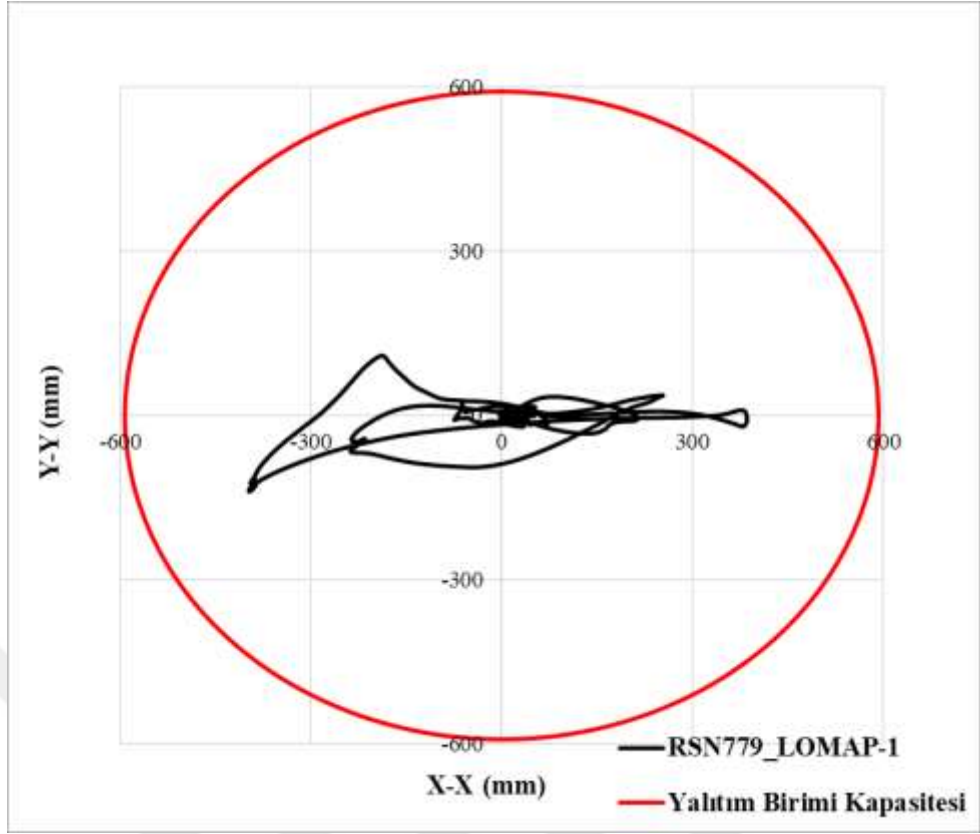
Şekil A.12 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-2.



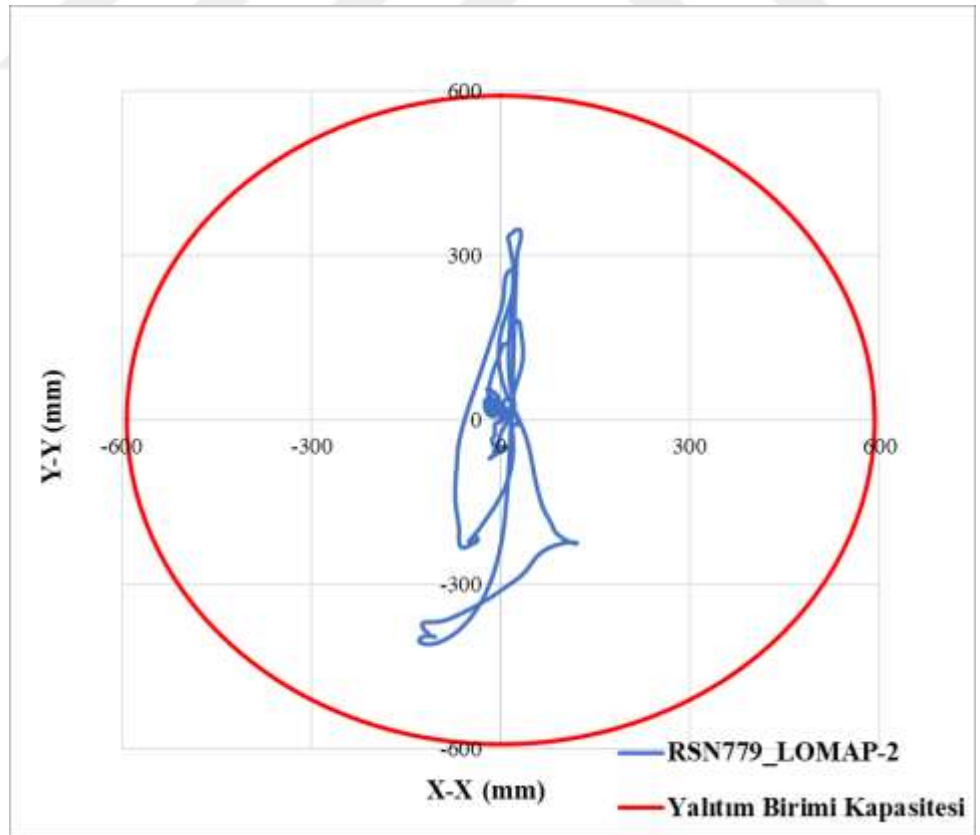
Şekil A.13 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-1.



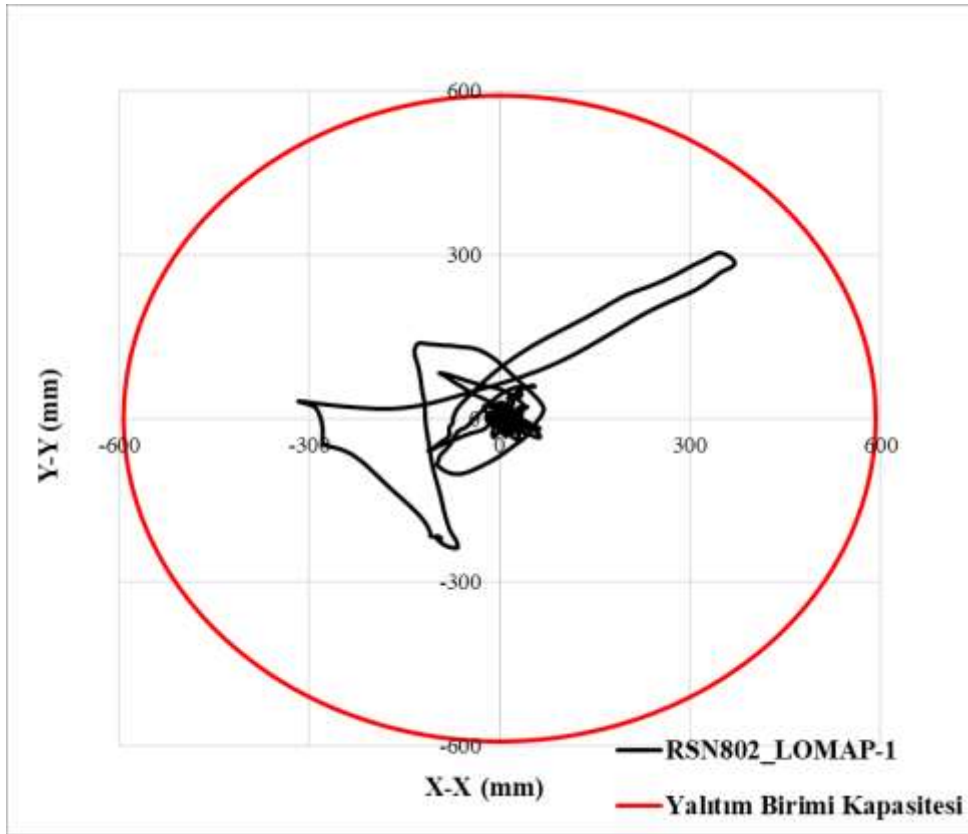
Şekil A.14 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-2.



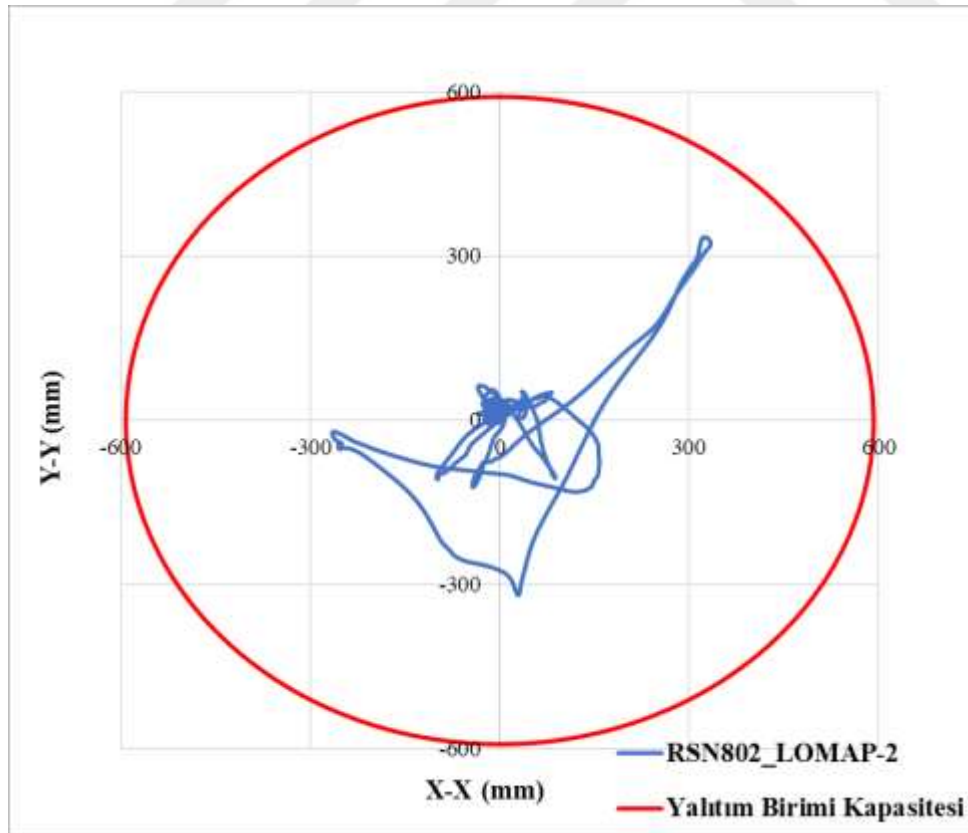
Şekil A.15 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.



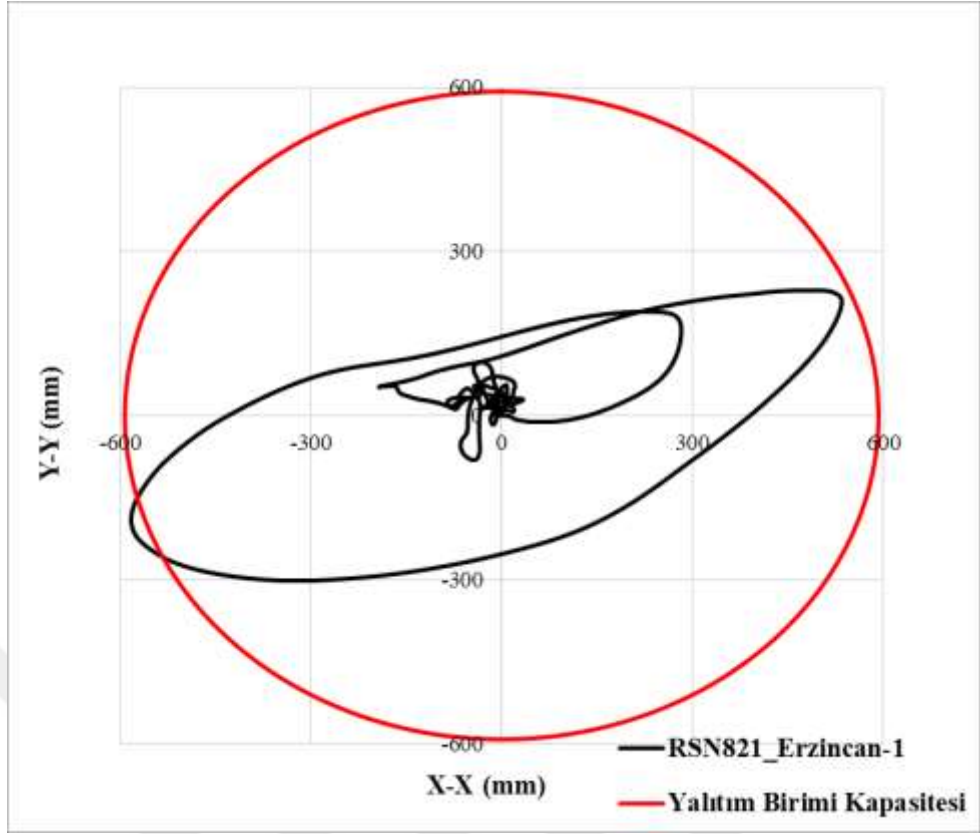
Şekil A.16 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.



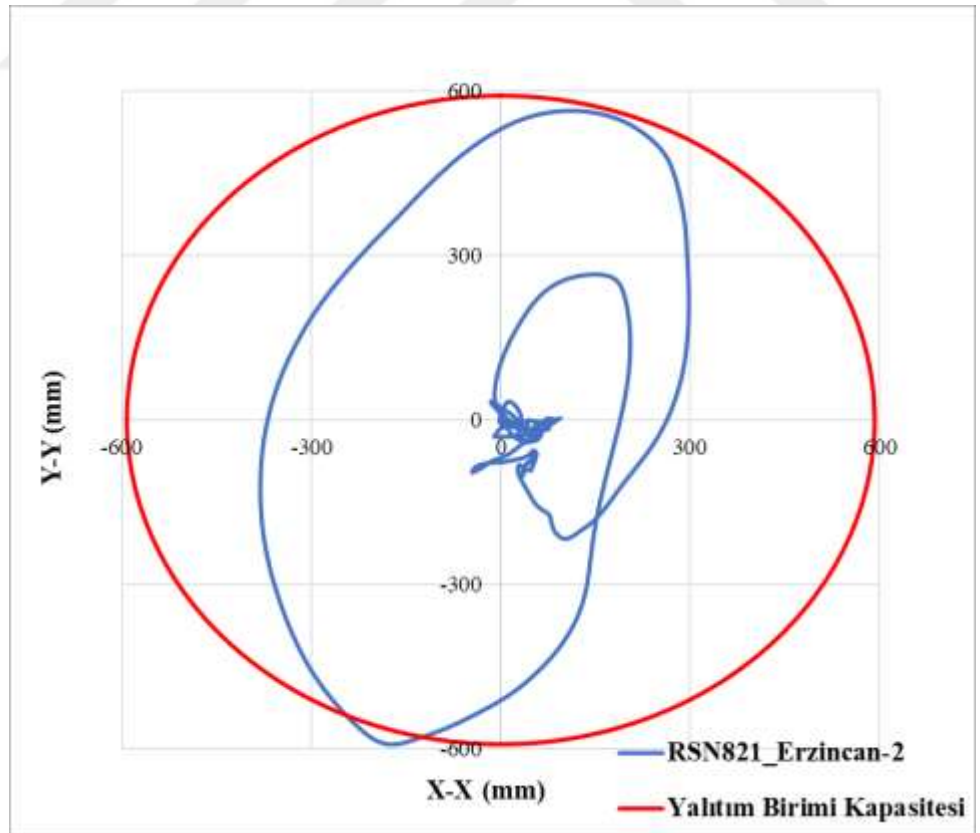
Şekil A.17 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.



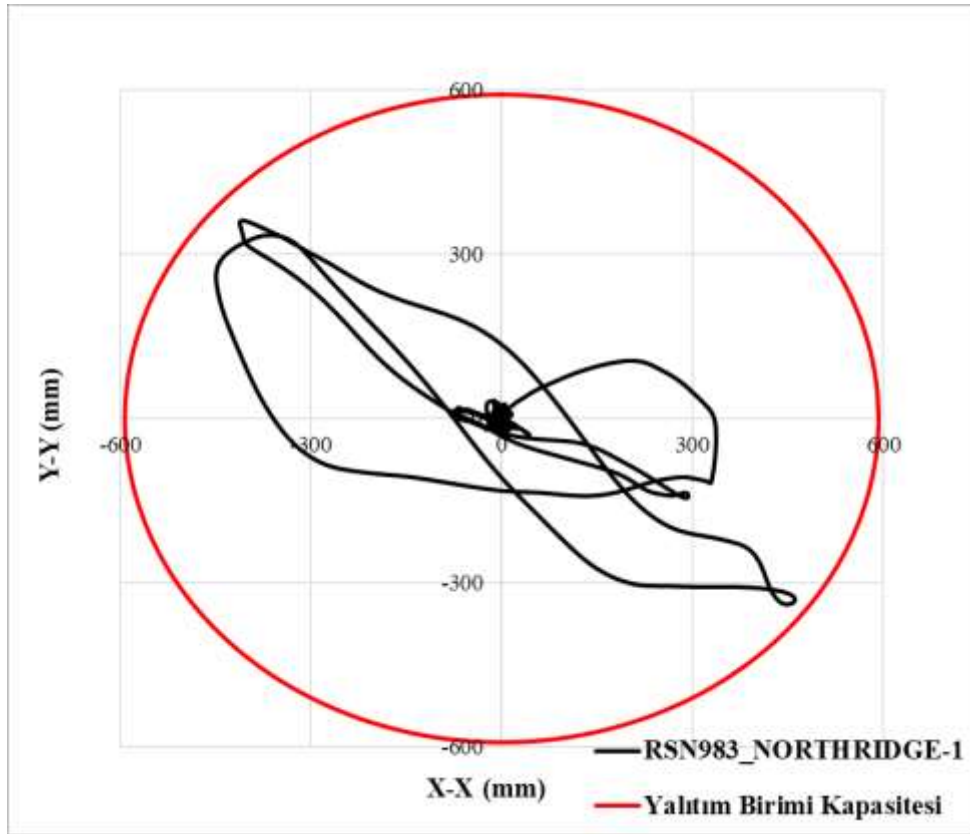
Şekil A.18 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.



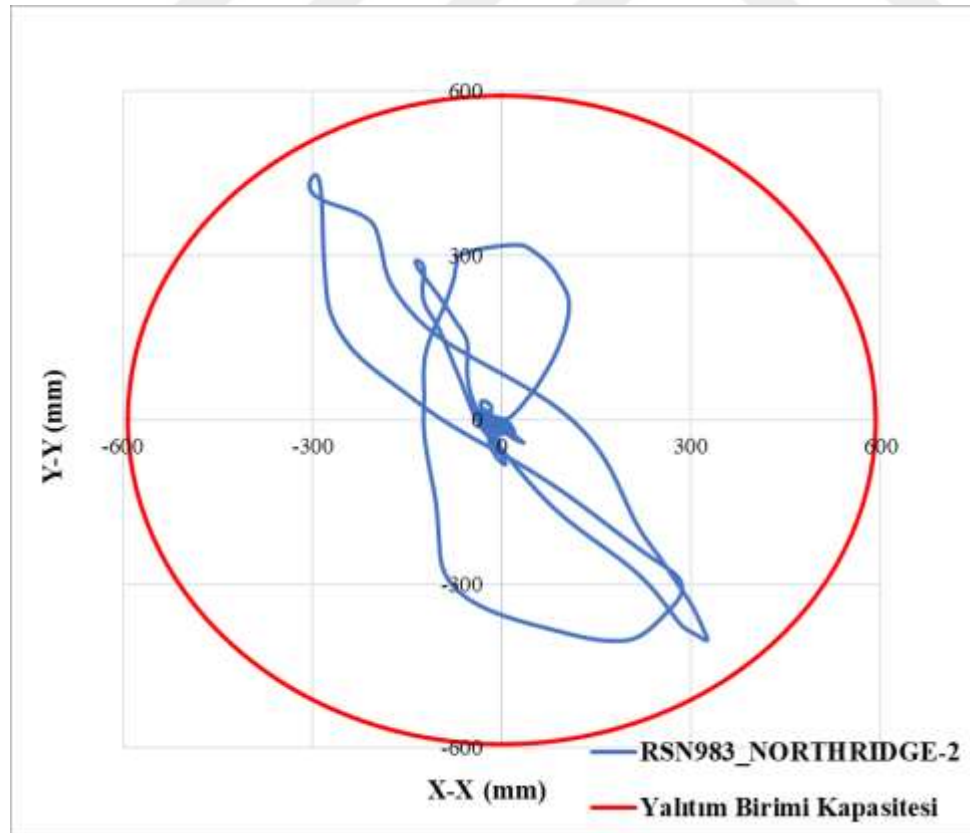
Şekil A.19 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-1.



Şekil A.20 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-2.

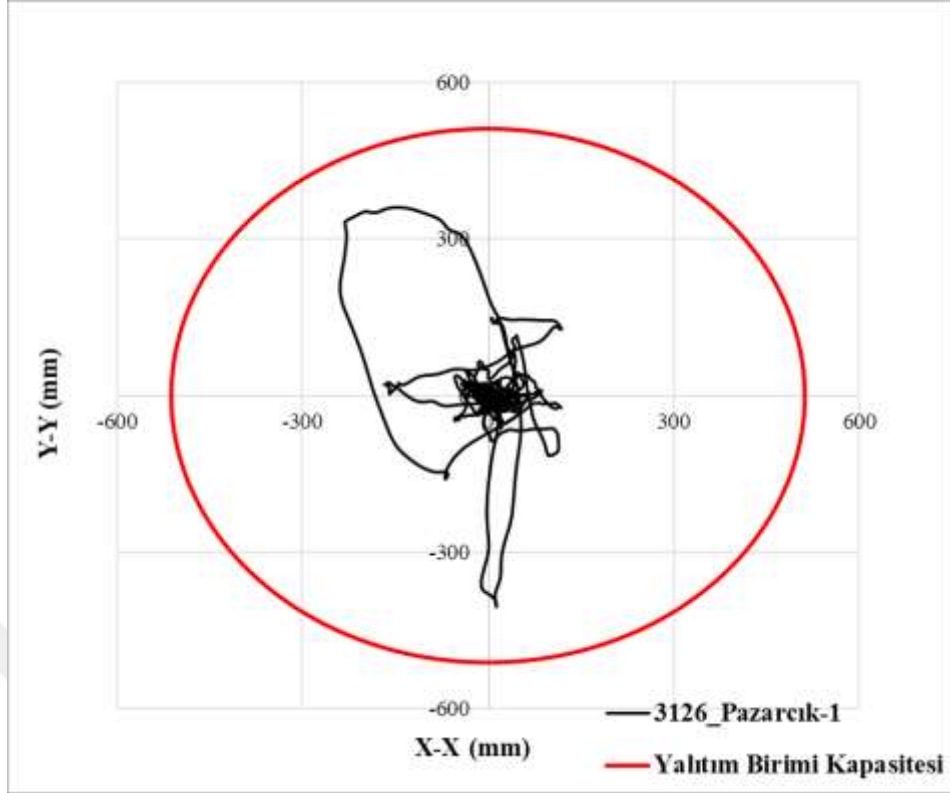


Şekil A.21 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğiştirme orbiti-1.

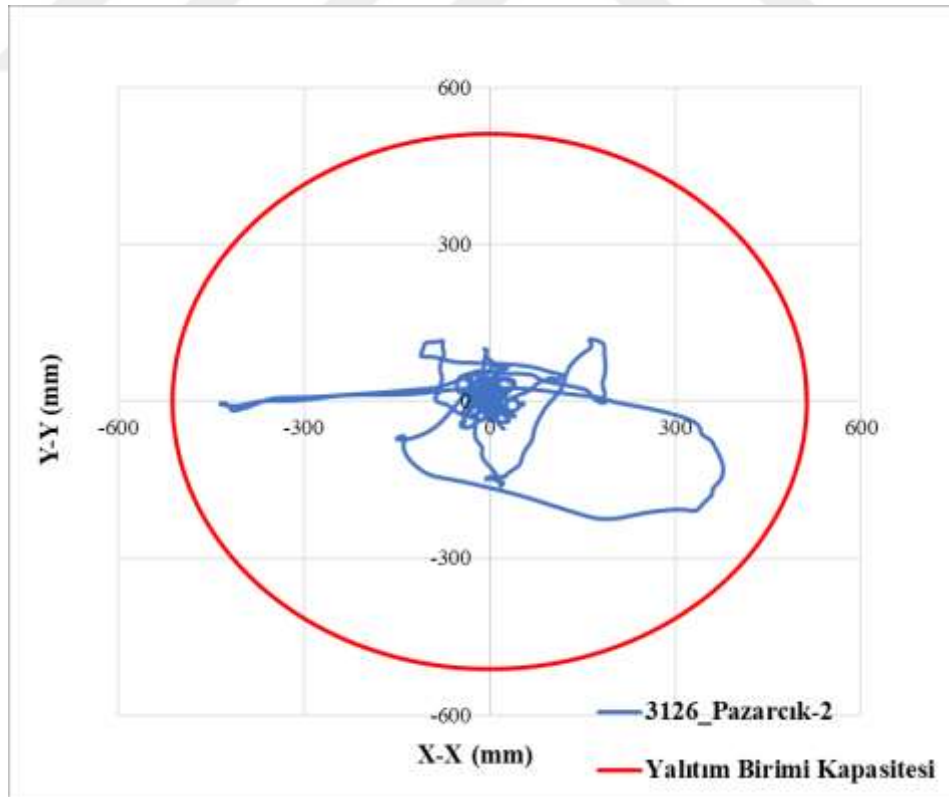


Şekil A.22 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğiştirme orbiti-2.

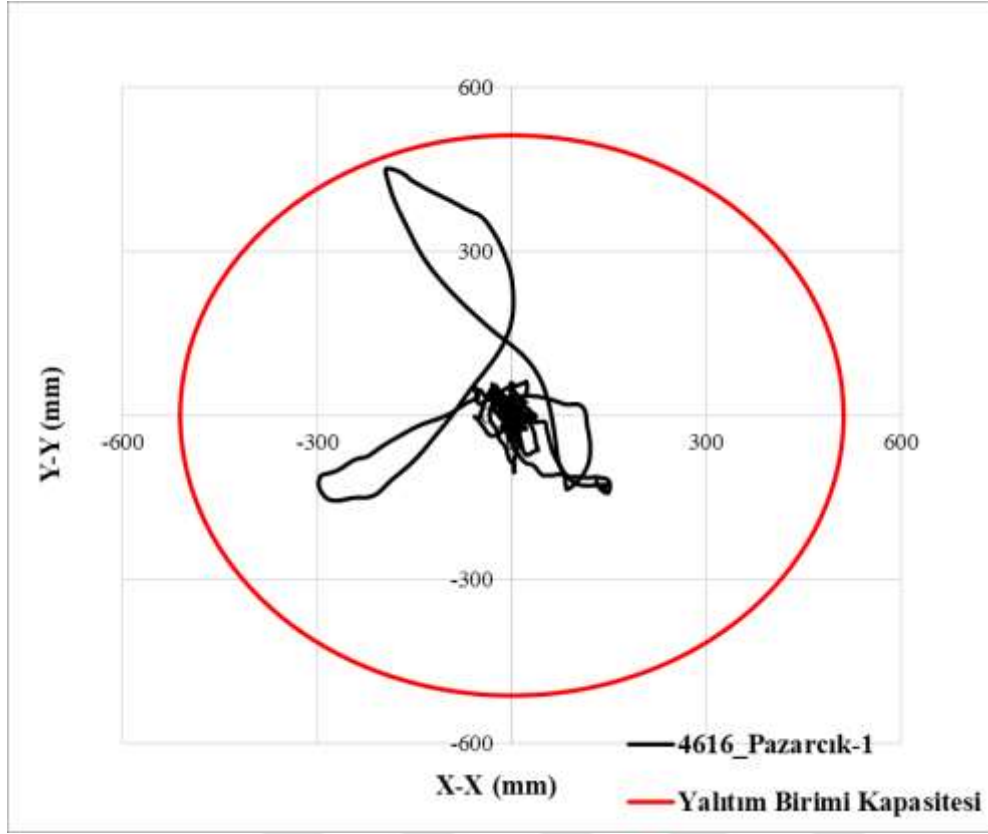
EK A2:



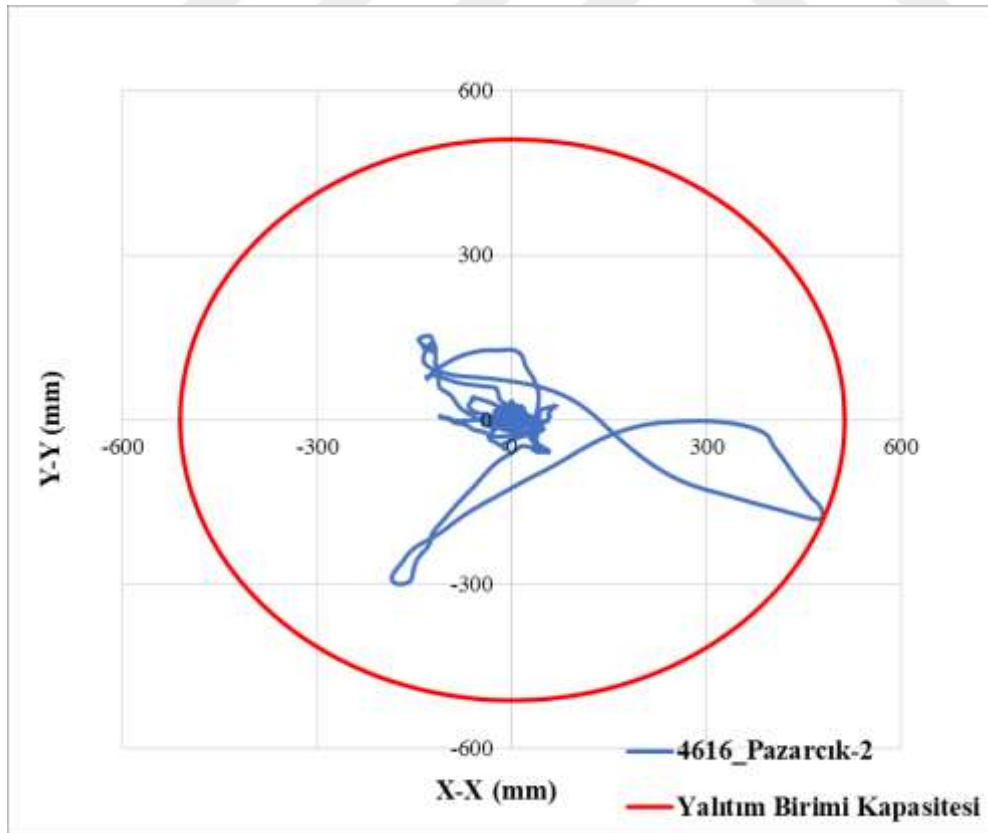
Şekil A.23 : 3126-PAZARCIK yerdeşistirme orbiti-1.



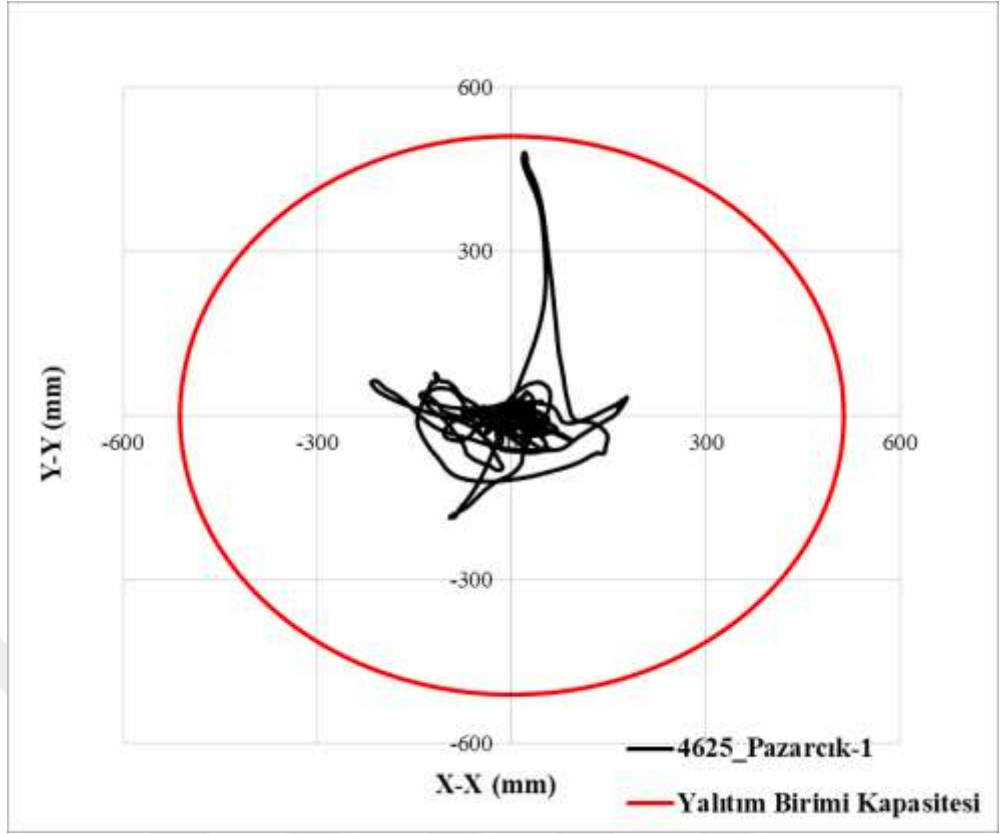
Şekil A.24 : 3126-PAZARCIK yerdeşistirme orbiti-2.



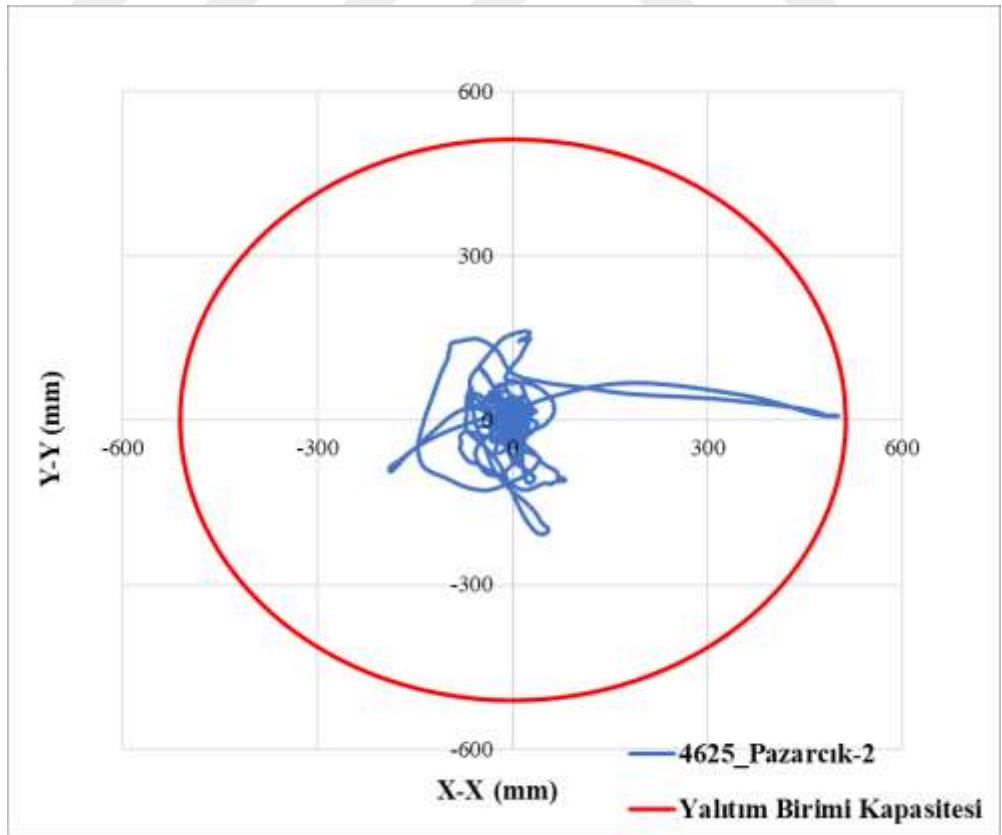
Şekil A.25 : 4616-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.



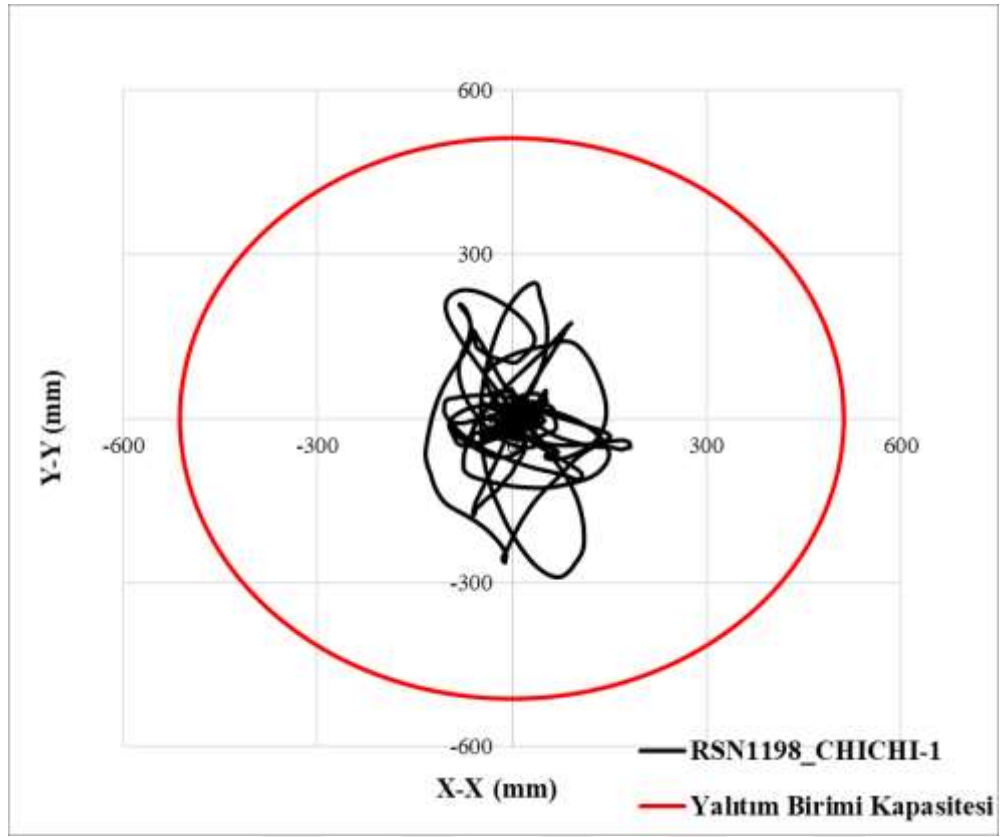
Şekil A.26 : 4616-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.



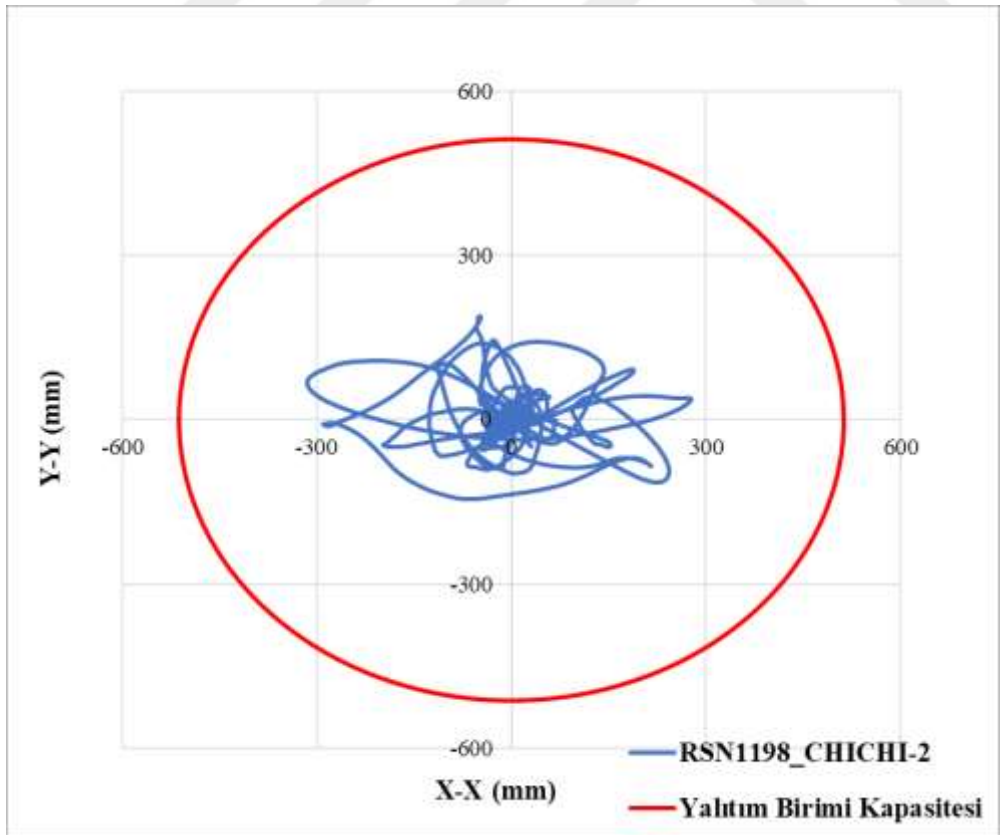
Şekil A.27 : 4625-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-1.



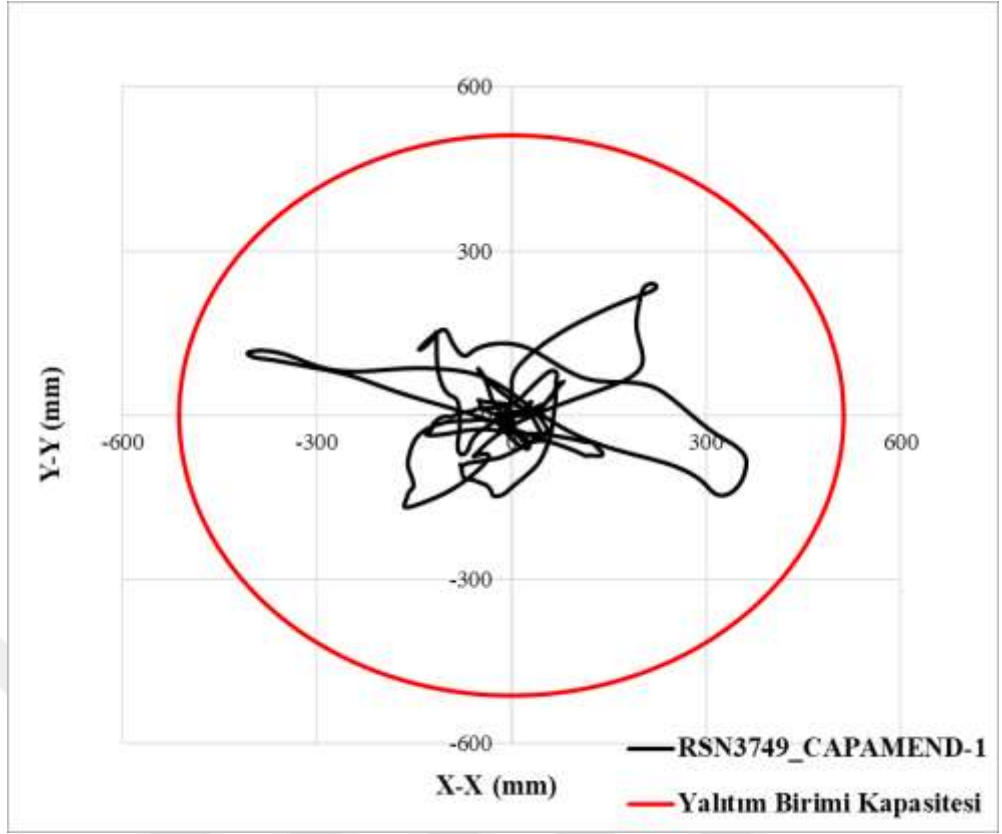
Şekil A.28 : 4625-PAZARCIK yerdeğiştirme orbiti-2.



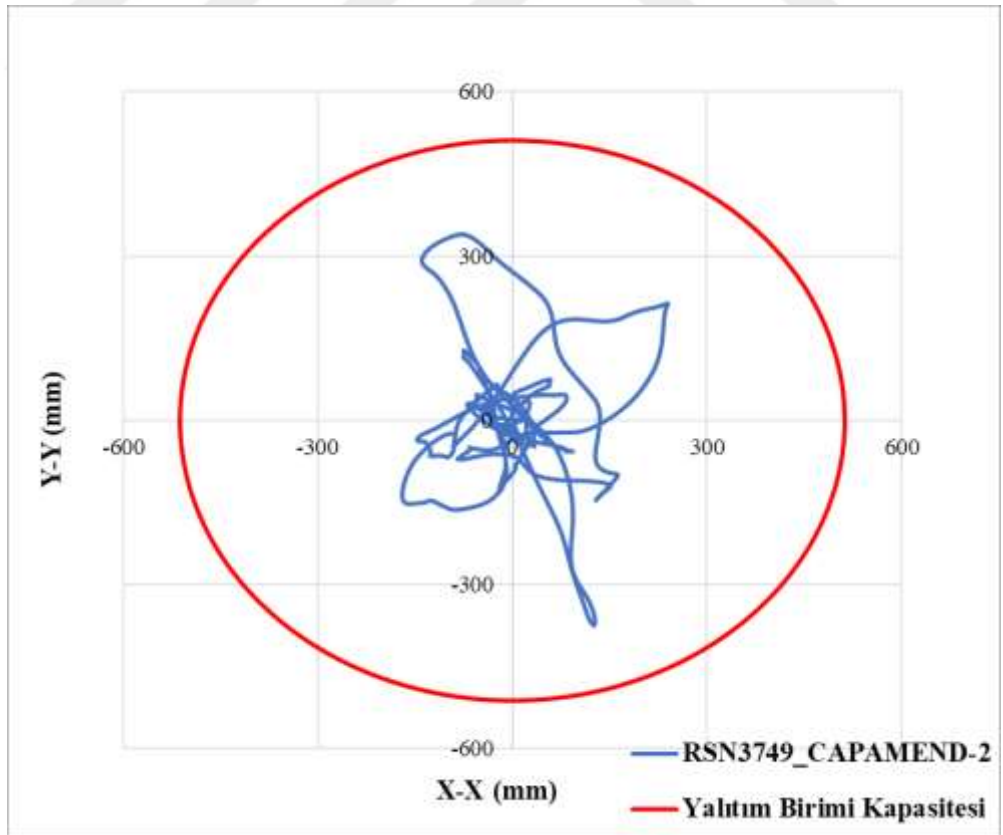
Şekil A.29 : RSN1198-CHICH1 yerdeğiştirme orbiti-1.



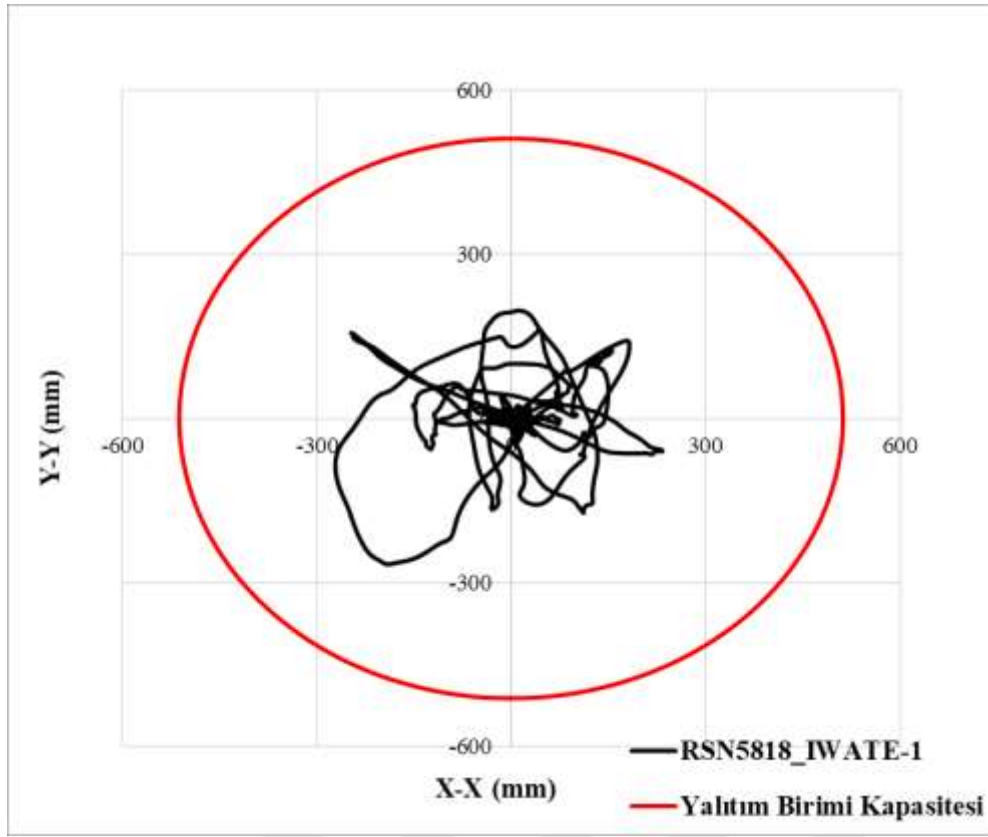
Şekil A.30 : RSN1198-CHICH1 yerdeğiştirme orbiti-2.



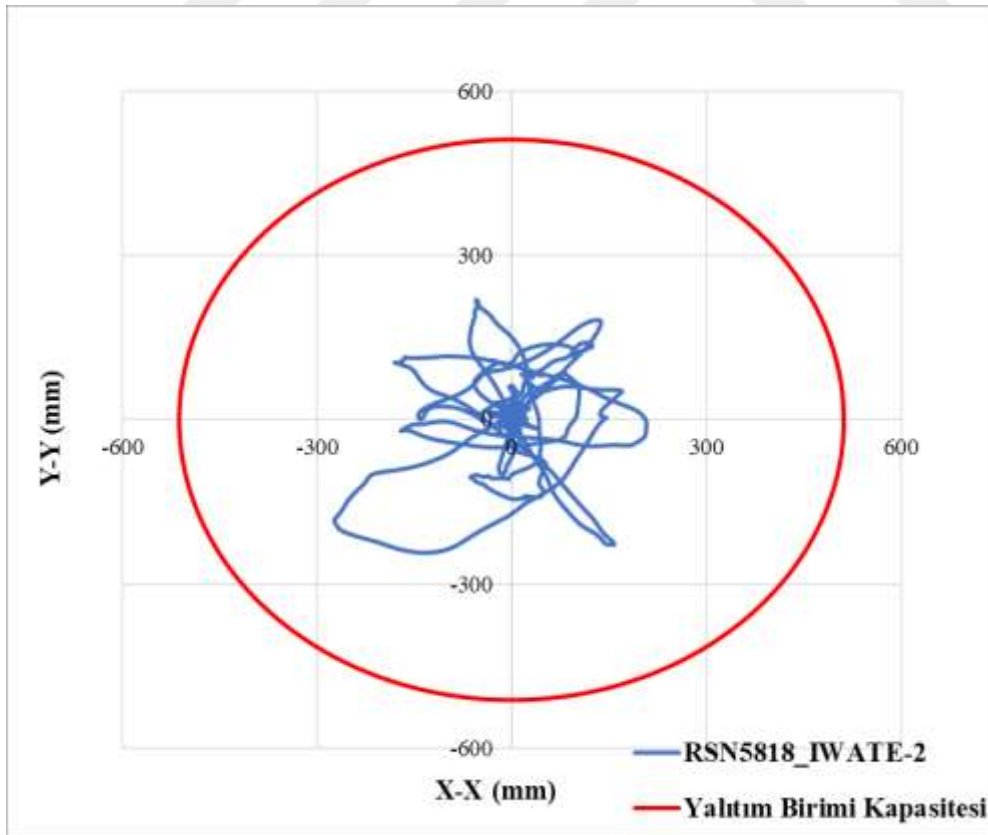
Şekil A.31 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-1.



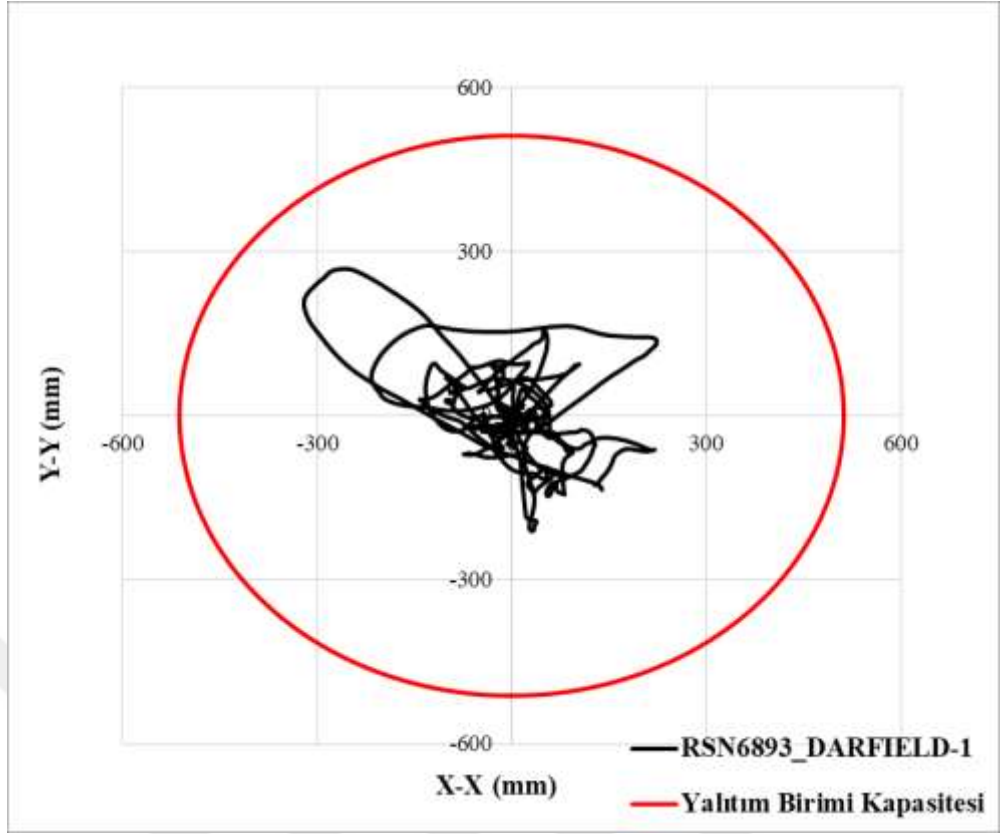
Şekil A.32 : RSN3749-CAPAMEND yerdeğiştirme orbiti-2.



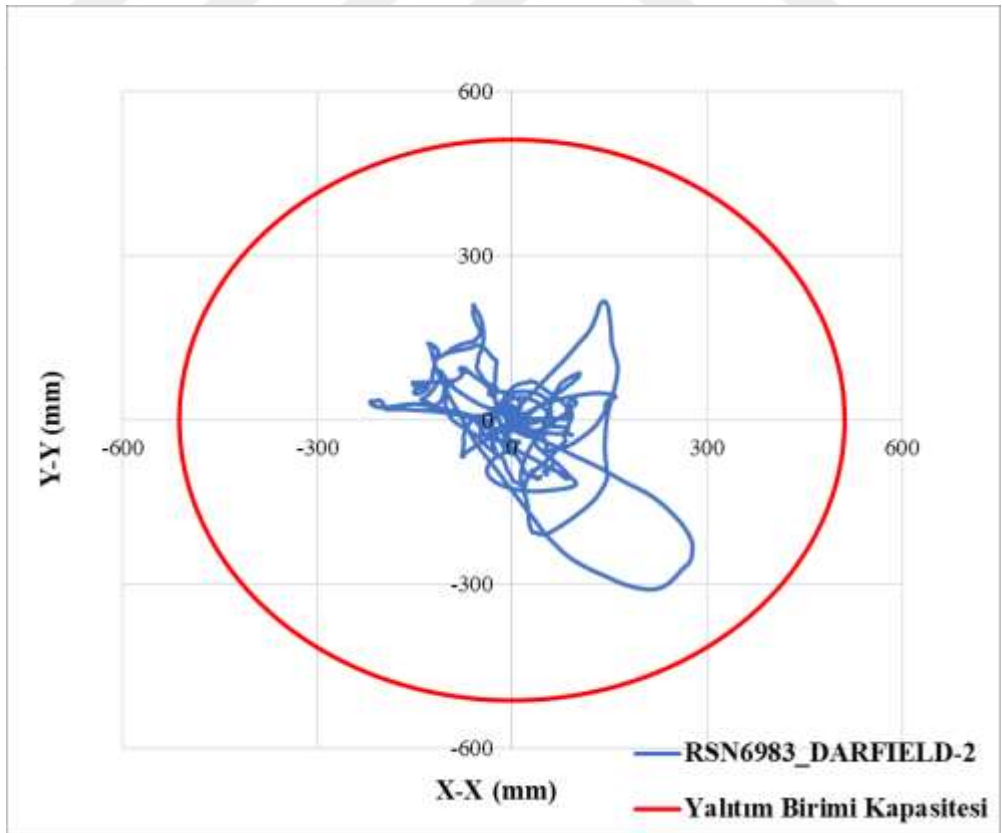
Şekil A.33 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-1.



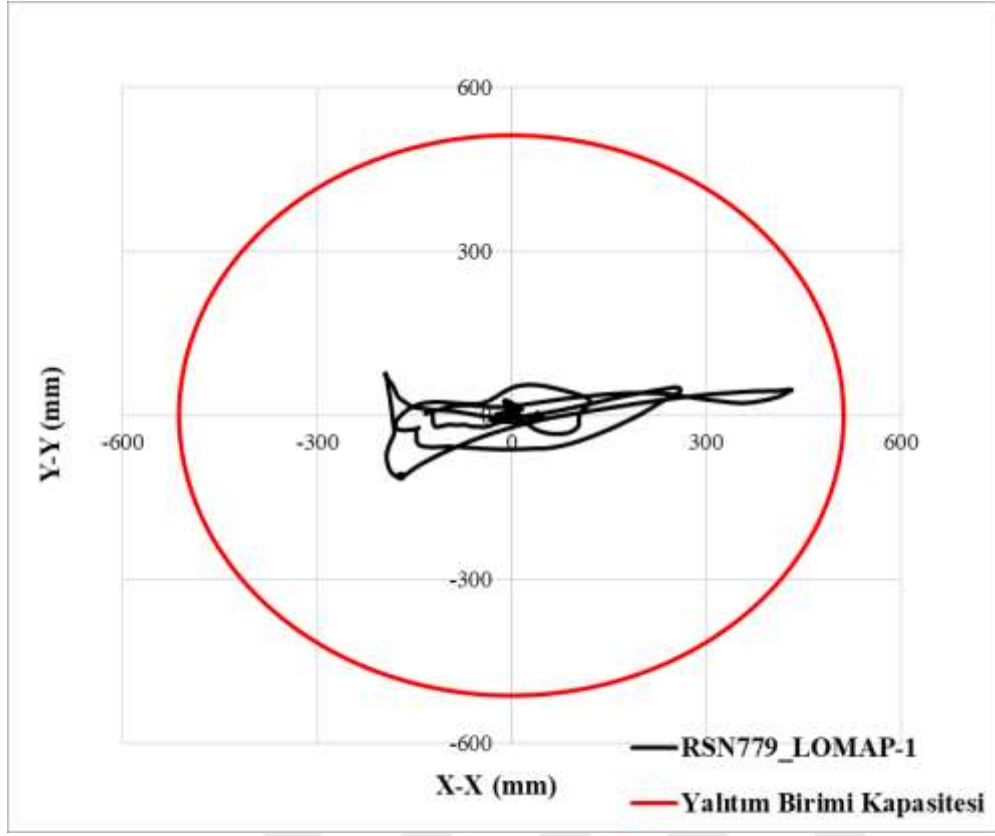
Şekil A.34 : RSN5818-IWATE yerdeğiştirme orbiti-2.



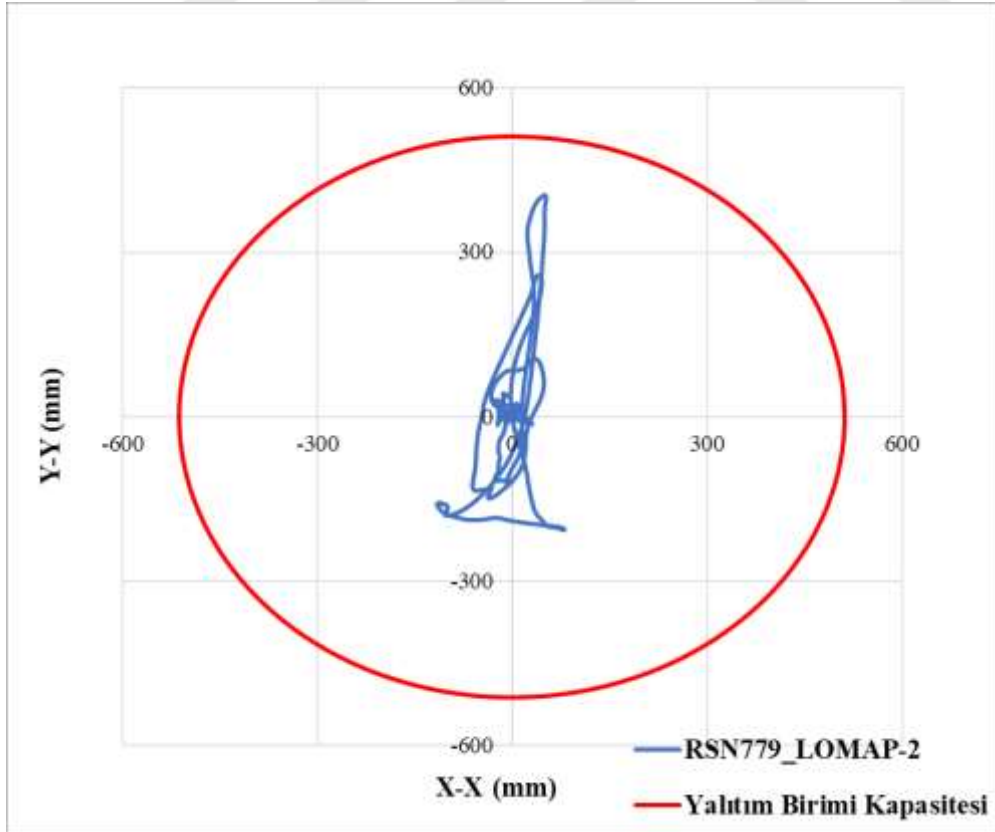
Şekil A.35 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-1.



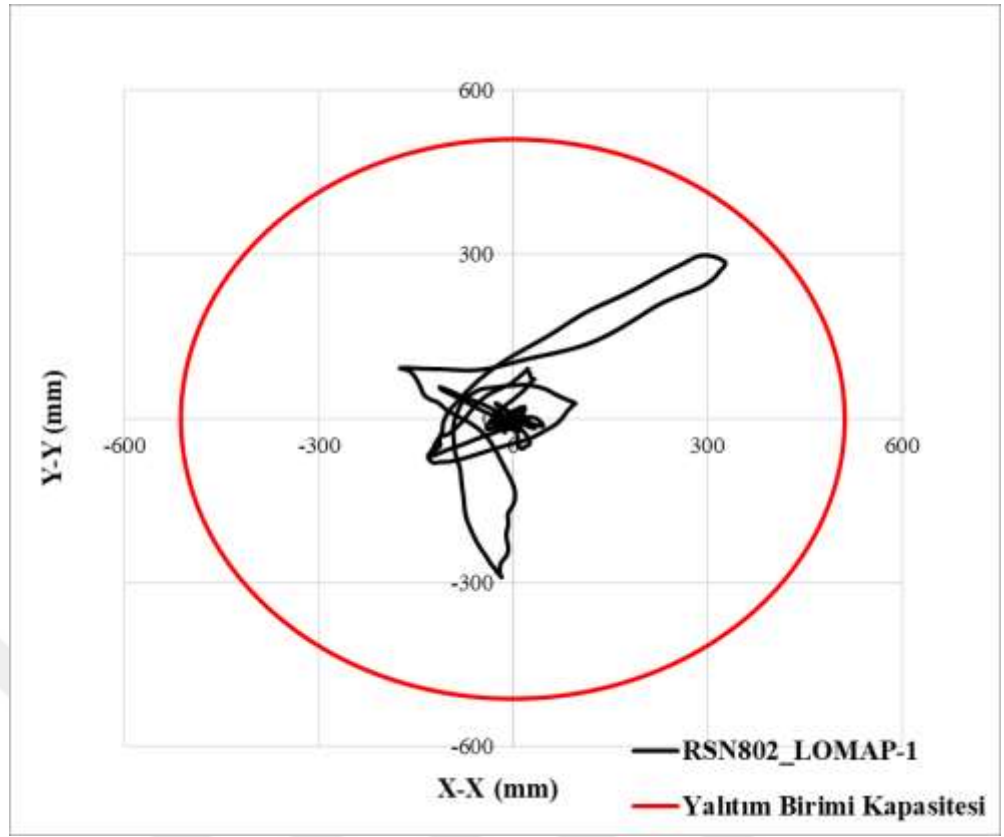
Şekil A.36 : RSN6893-DARFIELD yerdeğiştirme orbiti-2.



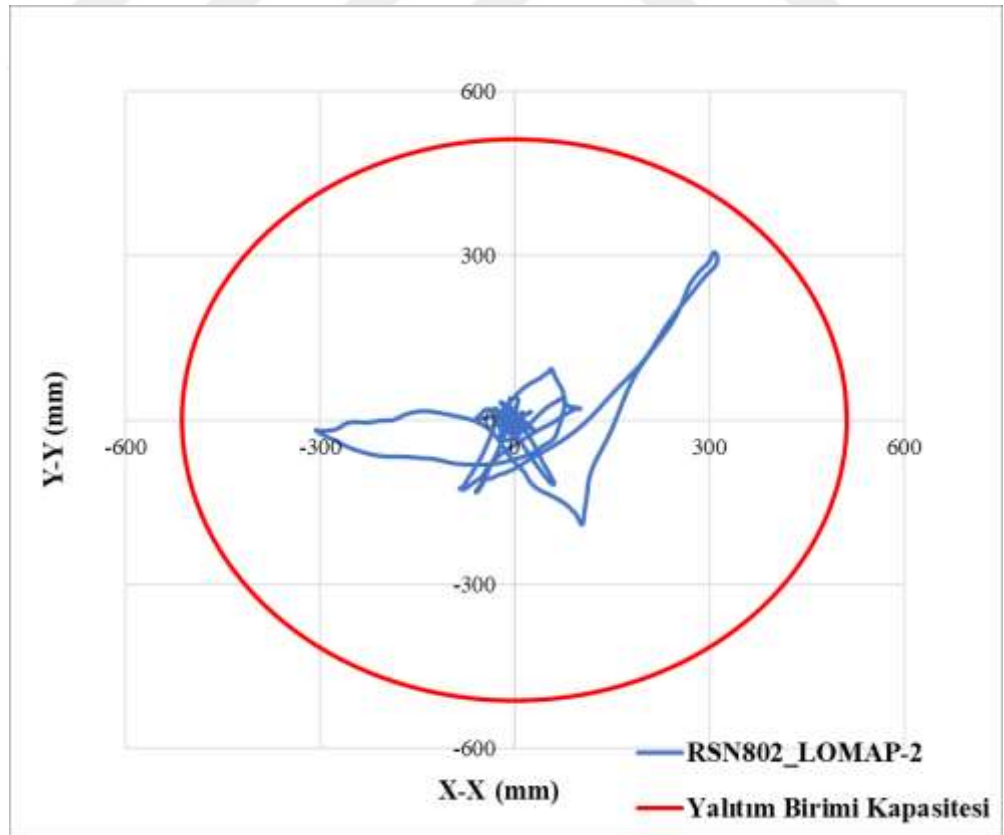
Şekil A.37 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.



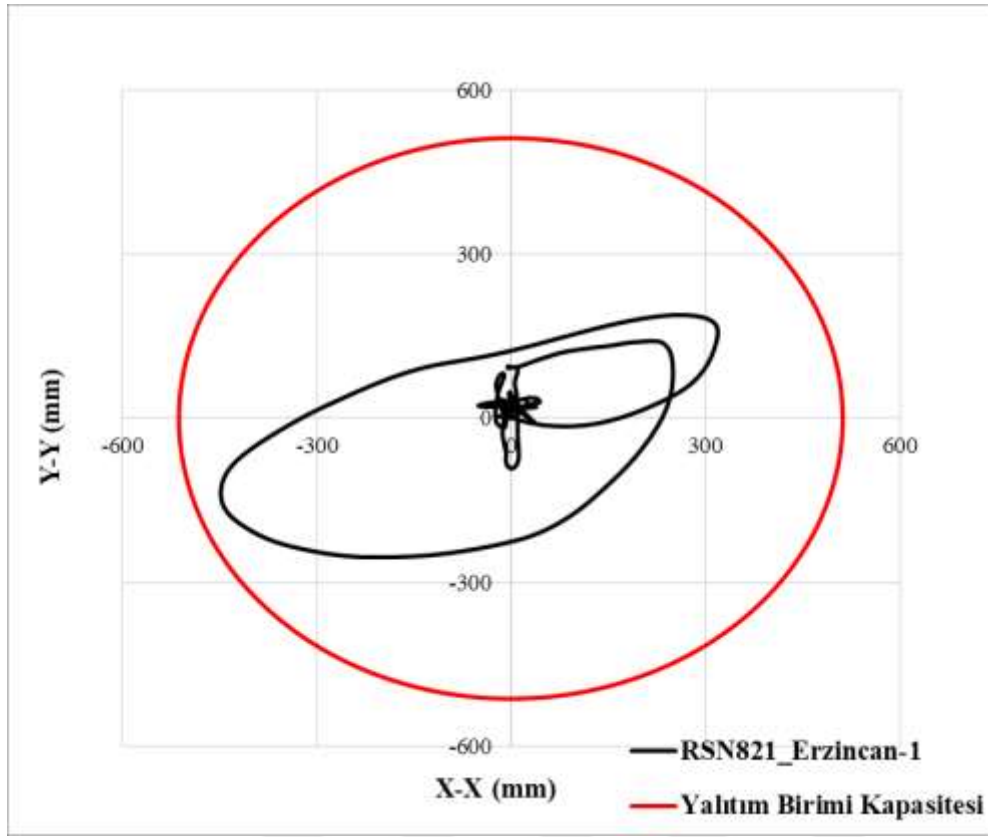
Şekil A.38 : RSN779-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.



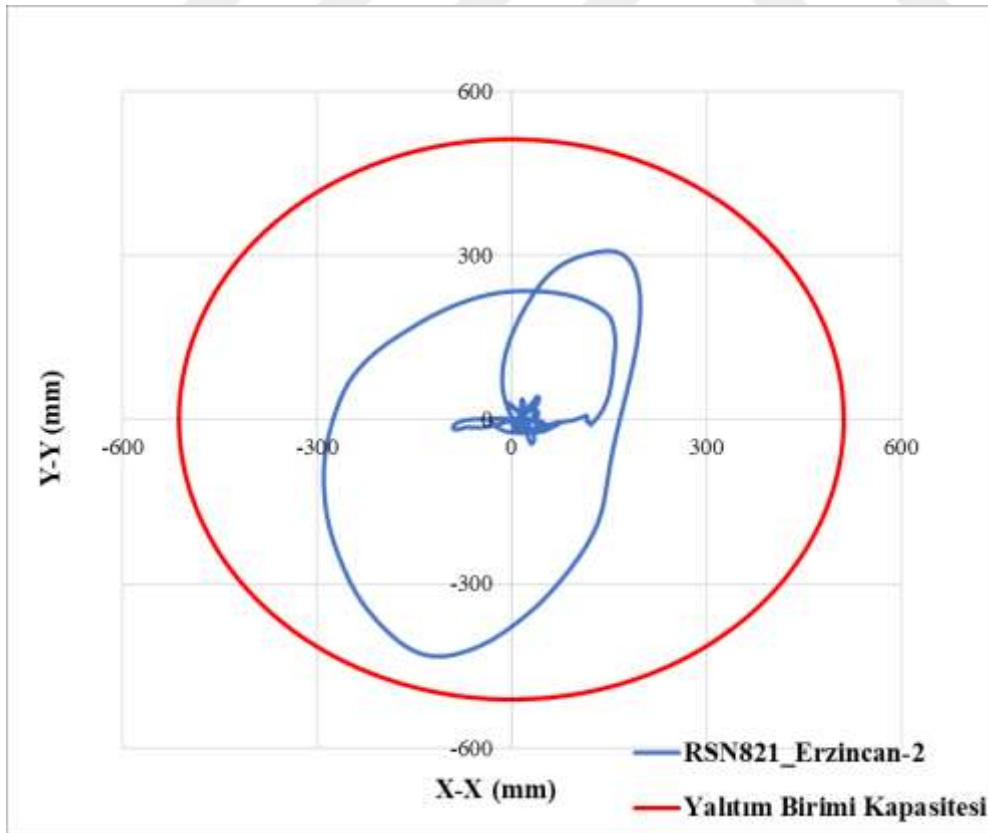
Şekil A.39 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-1.



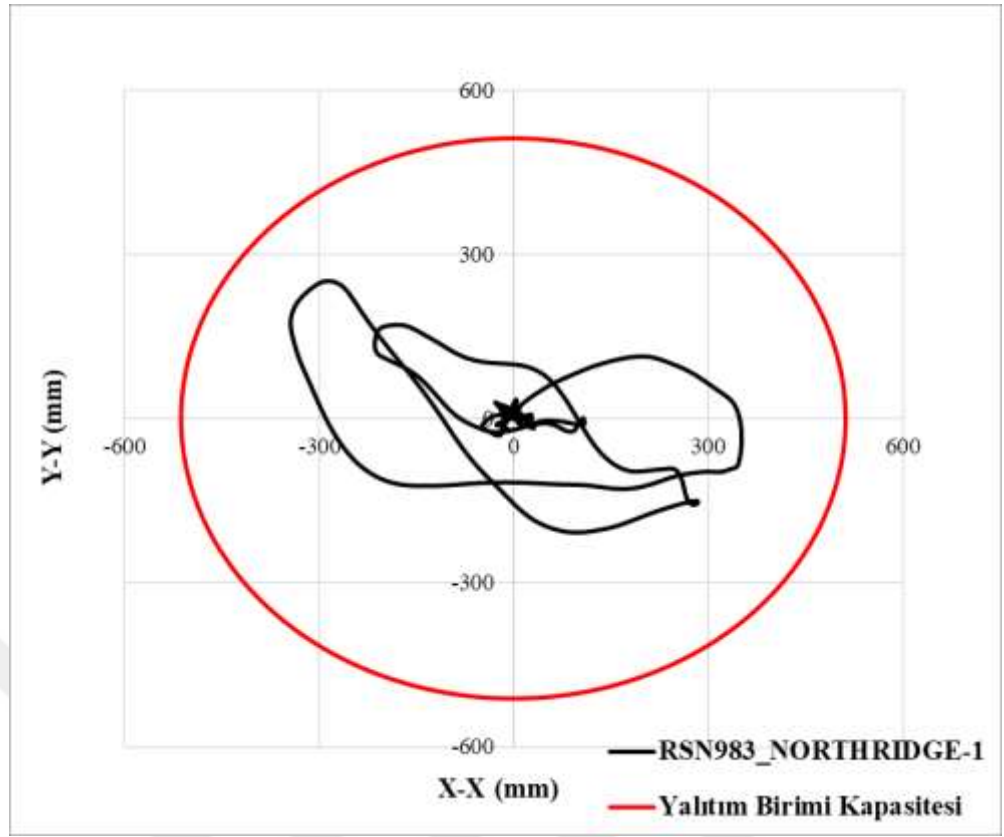
Şekil A.40 : RSN802-LOMAP yerdeğiştirme orbiti-2.



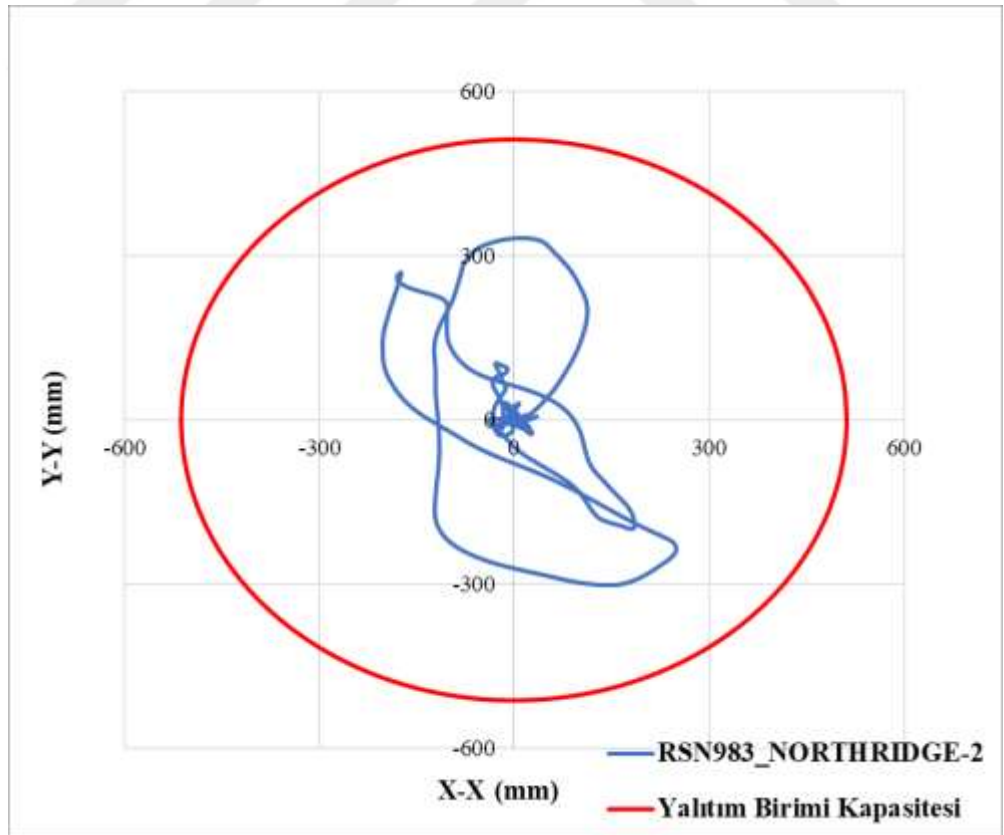
Şekil A.41 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-1.



Şekil A.42 : RSN821-ERZINCAN yerdeğiştirme orbiti-2.



Şekil A.43 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğişirme orbiti-1.



Şekil A.44 : RSN983-NORTHRIDGE yerdeğişirme orbiti-2.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Murat Alperen TAZKIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

MESLEKİ DENEYİM

- 2017-2018 TAŞYAPI İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret, Stajyer İnşaat Mühendisi
- 2019-2019 Perform Mühendislik&Müşavirlik, Stajyer İnşaat Mühendisi
- 2023-2023 Promer Mühendislik&Müşavirlik, İnşaat Mühendisi
- 2023-2024 Isamgeo Teknoloji, İnşaat Mühendisi
- 2024-2025 Sistechno Software Engineering, Yapısal Tasarım Mühendisi