T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

SİSMİK İZOLASYONLU BİNALARIN DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ OLASILIKSAL DAVRANIŞI

Hatice GAZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Cenk ALHAN

Haziran, 2015

İSTANBUL

Bu çalışma 01/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:

Doç. Dr. Cenk ALHAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ünal ALDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Ercan YÜKSEL
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'nin 20206 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını yöneten, değerli Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Cenk ALHAN'a tez çalışmalarım dahili ve haricinde gerçekleştirmiş olduğumuz tüm çalışmalardaki rehberliği, teşvik edici ve anlayışlı tavrı ile üzerimdeki bütün emekleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez İzleme Komitesi'ndeki saygıdeğer Hocalarım Sayın Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN ve Sayın Prof. Dr. Ünal ALDEMİR'e ve ayrıca tez savunma sınavı jürisinde bulunan değerli Hocalarım Sayın Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK ile Sayın Doç. Dr. Ercan YÜKSEL'e görüş, öneri ve tavsiyeleri ile mevcut çalışmaya yapmış oldukları değerli katkıları için teşekkür ederim.

Mevcut tez çalışması kapsamındaki yoğun nümerik analizleri, Bölümümüz Bilgisayar Laboratuvarı ve İnşaat Yönetimi Bilgisayar Laboratuvarı'nda gerçekleştirebilmem için gerekli müsaadeleri tanıyarak; bu çalışmaya çok önemli bir katkıda bulunan değerli Hocalarım Sayın Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU ve Sayın Prof. Dr. Ekrem MANİSALI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca, tez projesi kapsamında gerçekleştirdiğimiz bu çalışmayı destekleyen İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'ne teşekkürlerimi sunarım.

Değerli arkadaşlarım Sayın Yard. Doç.Dr. Barış ERDİL, Sayın Araş. Gör. Sezar GÜLBAZ ve Sayın Araş. Gör. Dr. Barış GÜNEŞ başta olmak üzere, tez çalışmalarım boyunca manevi destek ve tavsiyelerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, doktora tez sürecinde olduğu gibi tüm eğitim, iş ve özel hayatım boyunca her zaman yanımda olan, desteğini esirgemeyen kıymetli Annem Meral GAZİ başta olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2015 Hatice GAZİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vi**
TABLO LİSTESİ ..... **xv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xx**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI 8
1.2. TEZİN GENEL YAPISI 8
2. GENEL KISIMLAR **10**
2.1. SİSMİK İZOLASYON HAKKINDA GENEL BİLGİLER 10
2.2. SİSMİK İZOLATÖRLER 14
2.2.1. Kauçuk Esaslı Sismik İzolatörler 15
2.2.1.1. Düşük Sönümlü Kauçuk İzolatörler (LDRB) 15
2.2.1.2. Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatörler (HDRB) 16
2.2.1.3. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler (LRB) 16
2.2.2. Kayıcı İzolatörler 17
2.2.2.1. Düz Yüzeyli Kayıcı İzolatörler 17
2.2.2.2. Eğrisel Yüzeyli Kayıcı İzolatörler 18
2.3. SİSMİK İZOLATÖRLERİN MEKANİK KARAKTERİSTİKLERİ 18
2.3.1. Mekanik Karakteristikleri Etkileyen Faktörler 21
2.3.1.1. Yaşlanma Faktörü 24
2.3.1.2. Sıcaklık Faktörü 26
2.3.1.3. Gerilme-Yumuşaması (Scragging) Faktörü 27
2.3.2. Sismik İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri ile İlgili Çalışmalar 29
2.3.2.1. Parametrik Çalışmalar 29
2.3.2.2. Olasılıksal Çalışmalar 34

2.4. YAKIN-FAY YER HAREKETLERİ 42
2.4.1. Yakın-Fay Yer Hareketlerinin Sentetik Olarak Modellenmesi 47
2.4.1.1. Hall ve diğ. (1995) Puls Modelleri 47
2.4.1.2. Makris (1997) Puls Modelleri 48
2.4.1.3. Makris ve Chang (1998) Puls Modeli 49
2.4.1.4. Alavi ve Krawinkler (2001) Puls Modelleri 50
2.4.1.5. Agrawal ve He (2002) Puls Modeli 51
2.4.1.6. Menun ve Fu (2002) Puls Modeli 53
2.4.1.7. He ve Agrawal (2008) Puls Modeli 54
2.4.2. Yakın-Fay Yer Hareketlerine Maruz Sismik İzolasyonlu Yapısal Sistemlerin Dinamik Davranışı ile İlgili Çalışmalar 55
2.4.2.1. Parametrik Çalışmalar 55
2.4.2.2. Olasılıksal Çalışmalar 58
3. MALZEME VE YÖNTEM 60
3.1. MONTE CARLO SİMÜLASYON TEKNİĞİ 60
3.1.1. Uygulama Alanları ve Literatür Çalışma Örnekleri 63
3.1.2. Olasılık Teorisi ile İlgili Terimler 65
3.1.2.1. Olasılık Dağılımı 65
3.1.2.2. Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) 66
3.1.2.3. Olasılık Kütle Fonksiyonu (PMF) 66
3.1.2.4. Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF) 66
3.1.2.5. Üniform Dağılım 68
3.1.2.6. Normal Dağılım 68
3.1.2.7. Lognormal Dağılım 69
3.1.2.8. Weibull Dağılım 70
3.1.3. Rastgele Sayıların Üretilmesi 71
3.1.4. Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi 71
3.1.4.1. Üniform Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi 73
3.1.4.2. Normal Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi 73
3.1.4.3. Lognormal Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi 74
3.1.4.4. Weibull Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi 74
3.1.5. Simülasyon Sonuçlarının İstatiksel Olarak Değerlendirilmesi 75
3.1.5.1. Başarısızlık olasılığı (P_f – Probability of failure) 75
3.1.5.2. P. yüzdelik değer (P^{th} percentile value) 75
3.2. 3D-BASIS PROGRAMI 76

3.2.1. Üst Yapı Elemanlarının Matematiksel Modellemesi 77
3.2.2. İzolasyon Sistemi Elemanları 79
3.2.3. Programın Çözüm Algoritması ve Kod Yapısı 79
3.2.4. Programda Yapılan Modifikasyonlar 83
3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN PROTOTİP YAPI 84
3.3.1. Yapısal Sistem ve Malzeme Özellikleri 84
3.3.2. Taban-Ankastre Binanın Modal Analizi 85
3.4. ÇALIŞMADA KULLANILAN DEPREM KAYITLARI 86
3.4.1. Tarihi Deprem Kayıtları 87
3.4.2. Sentetik Depremler 95
3.5. KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNDEKİ RASTGELE DEĞİŞİMLERİN GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULDUĞU SİSTEMLERİN ÜRETİLMESİ 95
3.5.1. Referans İzolasyon Sistemleri 96
3.5.2. Üretilmiş İzolasyon Sistemleri 99
3.5.3. Birinci Ana Bölüm Kapsamında 3D-BASIS Programında Gerçekleştirilen Modifikasyonlar: 3D-BASIS-MONTE 107
3.5.3.1. 3D-BASIS-MONTE Programının Verifikasyonu 110
3.5.4. Uygun Simülasyon Sayısının Tespiti 114
3.6. PULS İÇEREN YAKIN-FAY YER HAREKETLERİNİN SENTETİK OLARAK ÜRETİLMESİ 117
3.6.1. Senaryo-I: Moment Büyüklüğü ve Faya Olan En Yakın Mesafenin Bilinmesi Durumu 118
3.6.1.1. Sentetik Deprem Parametreleri 119
3.6.1.2. İzolasyon Sistemi Parametreleri 130
3.6.1.3. İkinci Ana Bölüm Kapsamında 3D-BASIS Programında Gerçekleştirilen Modifikasyonlar: 3D-BASIS-MONTEQ 136
3.6.1.4. Uygun Simülasyon Sayısı ve İzolasyon Sistemi Parametreleri Varyasyon Katsayısı Tespiti İçin Yapılan Ön Çalışma 139
3.6.2. Senaryo-II: Moment Büyüklüğü ve Faya Olan En Yakın Mesafenin Bilinmemesi Durumu 146
3.6.2.1. Sentetik Deprem Parametreleri 146
3.6.2.2. İzolasyon Sistemi Parametreleri 153
3.6.2.3. Uygun Simülasyon Sayısı Tespiti İçin Yapılan Ön Çalışma 153
4. BULGULAR 158
4.1. İZOLASYON SİSTEMİ KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNDEKİ RASTGELE DEĞİŞİMİN YAPISAL SİSTEMİN DİNAMİK DAVRANIŞI VE GÜVENİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ 158

4.1.1. Yapısal Cevap Parametrelerine Ait CDF Grafikleri 160
4.1.2. Yapısal Cevap Parametrelerine Ait Önemli Yüzdelik Değerleri 167
4.1.3. Burulma Büyütmeleri 190
4.1.4. Güvenilirlik Analizleri 199
4.1.4.1. Pik En Üst Kat Kütle Merkezi Toplam İvmeleri İçin 200
4.1.4.2. Pik İzolatör Deplasmanlarının Maksimumları İçin 208
4.1.4.3. Pik Göreli Kat Öteleme Oranlarının Maksimumları İçin 215
4.1.5. Güvenilirlik Analizlerinin İzolatör Karakteristik Parametreleri Varyasyon Katsayılarına Olan Duyarlılığı 223
4.2. SİSMİK İZOLASYONLU BİNA TÜRÜ YAPILARIN YAKIN-FAY YER HAREKETLERİ ETKİSİNDEKİ OLASILIKSAL DİNAMİK DAVRANIŞININ VE DOĞRUSAL OLMAYAN İZOLASYON SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ 227
4.2.1. Senaryo-I için Gerçekleştirilen Analizlere Ait Bulgular 227
4.2.1.1. Yapısal Cevap Parametreleri 228
4.2.1.2. Güvenilirlik Analizleri 240
4.2.1.3. Performans Testleri 255
4.2.2. Senaryo-II için Gerçekleştirilen Analizlere Ait Bulgular 267
4.2.2.1. Yapısal Cevap Parametreleri 268
4.2.2.2. Güvenilirlik Analizleri 277
4.2.2.3. Performans Testleri 282
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 290
5.1. İZOLASYON SİSTEMİ KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNDEKİ RASTGELE DEĞİŞİMİN YAPISAL SİSTEMİN DİNAMİK DAVRANIŞI VE GÜVENİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ 290
5.2. SİSMİK İZOLASYONLU BİNA TÜRÜ YAPILARIN YAKIN-FAY YER HAREKETLERİ ETKİSİNDEKİ OLASILIKSAL DİNAMİK DAVRANIŞININ VE DOĞRUSAL OLMAYAN İZOLASYON SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ 293
KAYNAKLAR 297
ÖZGEÇMİŞ 317

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: İzolasyon sisteminin yapısal periyodu arttırmasının (a) Spektral ivmeler ve (b) Spektral deplasmanlar üzerindeki etkileri (Skinner ve diğ., 1993'ten adapte edilmiştir.). 13

Şekil 2.2: n katlı tipik bir sismik izolasyonlu binanın kesit görünüşü (Alhan ve Sürmeli, 2011'den adapte edilmiştir.). 13

Şekil 2.3: İdealize edilmiş yumuşak ikili-doğrusal (smooth bilinear) histeretik kuvvet – deplasman ilişkisi (FEMA 274, 1997; Tsopelas ve diğ., 1994).....20

Şekil 2.4: (a) Yönelim pulsu (directivity pulse), (b) sıçrama adımı (fling step) (Stewart ve diğ., 2001'den adapte edilmiştir.). 44

Şekil 2.5: Yönelim pulsu ve sıçrama adımı hareket doğrultularının şematik gösterimi: (a) doğrultu atımlı, (b) eğim atımlı faylar için (Stewart ve diğ., 2001'den adapte edilmiştir.). 44

Şekil 2.6: Tipik hız-zaman ve deplasman-zaman geçmişleri: (a, b) İleri-yönelim etkisi taşıyan yakın-fay yer hareketi, (c, d): Sıçrama adımı etkisi taşıyan yakın-fay yer hareketi, (e, f) Uzak-fay yer hareketi için (Kalkan ve Kunnath, 2006'dan adapte edilmiştir.). 46

Şekil 2.7: Yer Hareketi-A ve Yer Hareketi-B modelleri için önerilen deplasman-zaman: (a, d), hız-zaman: (b, e) ve ivme-zaman: (c, f) geçmişleri (Hall ve diğ., 1995'den adapte edilmiştir).....47

Şekil 2.8: Örnek yer hareketi bileşeni deplasman-zaman kayıtları ve bu kayıtlar için Makris (1997) denklemlerine göre üretilmiş sentetik hız-zaman ve deplasman-zaman kayıtları: (a, b) N90 için, (c, d) RRS228 için (Gazi ve diğ., 2013'ten adapte edilmiştir.). 49

Şekil 2.9: SCS052 yer hareketi bileşeni hız-zaman (a) ve deplasman-zaman (b) kayıtları ve bu kayıtlar için Tip C_2 puls modeli kullanılarak üretilmiş sentetik kayıtlar (Makris ve Chang, 2000'den adapte edilmiştir.).....50

Şekil 2.10: P3 puls modeline ait deplasman-zaman: (a), hız-zaman: (b) ve ivme-zaman: (c) geçmişleri (Krawinkler ve Alavi, 1998'den adapte edilmiştir). 51

Şekil 2.11: Örnek yer hareketi bileşeni deplasman-zaman kayıtları ve bu kayıtlar için Agrawal ve He (2002) denklemlerine göre üretilmiş sentetik hız-zaman ve deplasman-zaman kayıtları: (a, b) N90 için, (c, d) RRS228 için (Gazi ve diğ., 2013'ten adapte edilmiştir.). 52

Şekil 3.1: Monte Carlo Simülasyon Tekniği'nin aşamaları.....63

Şekil 3.2: rastgele değişkenin bir fonksiyon olarak şematik gösterimi (Hsu, 1996 ile Nowak ve Collins, 2000'den adapte edilmiştir). 65

Şekil 3.3: Süreksiz bir X rastgele değişkeni için olasılık fonksiyonu örnekleri: (a) PMF örneği, (b) CDF örneği (Nowak ve Collins (2000)'den adapte edilmiştir). 67

Şekil 3.4: Üniform dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için olasılık fonsiyonları: (a) PDF, (b) CDF (Hsu (1996)'dan adapte edilmiştir). 68

Şekil 3.5: Normal dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için olasılık fonksiyonu örnekleri (a) PDF, (b) CDF (Hsu, 1996'dan adapte edilmiştir). 69

Şekil 3.6: Lognormal dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için olasılık fonksiyonu örnekleri (a) PDF, (b) CDF. 70

Şekil 3.7: Weibull dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için PDF fonksiyonu örnekleri (a) Farklı γ_X değerleri için (b) Farklı k_X değerleri için (Rinne, 2009'dan adapte edilmiştir). 70

Şekil 3.8: Ters-transformasyon metodundaki simülasyon haritası (Haldar ve Mahadevan (2000)'dan adapte edilmiştir). 72

Şekil 3.9: P. yüzdelik değer. 76

Şekil 3.10: 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programının ana hatlarıyla akış diyagramı. 80

Şekil 3.11: MAIN1 alt programının ana hatlarıyla akış diyagramı. 81

Şekil 3.12: Kat planı ve izolasyon sistemi planı (Tena - Colunga ve Escamilla-Cruz, 2007'den adapte edilmiştir.). 85

Şekil 3.13: Tipik cephe görünüşü ve üç boyutlu görünüş. 85

Şekil 3.14: Taban-ankastre binanın SAP2000 modeline ait görünüş. 86

Şekil 3.15: X yönünde uygulanan tarihi deprem bileşenlerinin r, PGA, PGV değerleri. 89

Şekil 3.16: X yönünde uygulanan tarihi deprem bileşenlerinin (a) r, (b) PGA, (c) PGV ve (d) PGV/PGA değerlerinin dağılımı. 90

Şekil 3.17: İleri-yönelim etkisi içeren (FD) yer hareketi bileşenlerine ait hız-zaman geçmişi grafikleri. 91

Şekil 3.18: İleri-yönelim etkisi içermeyen (NFD) yer hareketi bileşenlerine ait hız-zaman geçmişi grafikleri. 92

Şekil 3.19: FD yer hareketi bileşenlerine ait spektrumlar:(a) Hız, (b) Deplasman (ζ=%10 için). 93

Şekil 3.20: NFD yer hareketi bileşenlerine ait spektrumlar:(a) Hız, (b) Deplasman (ζ=%10 için). 93

Şekil 3.21: FD20x ve NFD15x yer hareketi bileşenlerine ait (a) ivme, (b) hız ve (c) deplasman spektrumları (ζ = %10 için). 94

Şekil 3.22: Üretilmiş izolasyon sistemleri için değer üreten programın akış diyagramı. 101

Şekil 3.23: $T_{0,nom}$ = 2 s olması durumunda A4 izolatörü için üretilmiş K_1, K_2 ve D_y parametrelerine ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu (Cumulative Distribution Function: CDF) grafikleri: (a) – (c) ve normal olasılık kağıdı grafikleri: (d) – (f). 104

Şekil 3.24: $T_{0,nom}$=3.5 s olması durumunda A4 izolatörü için üretilmiş K_1, K_2 ve D_y parametrelerine ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu (Cumulative Distribution Function: CDF) grafikleri: (a) – (c) ve normal olasılık kağıdı grafikleri: (d) – (f). 105

Şekil 3.25: $T_{0,nom}$ = 2 s (a) – (c) ve $T_{0,nom}$ = 3.5 s (d) – (f) olması durumlarında A4 izolatörü için elde edilen α, F_y, Q parametrelerine ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu (Cumulative Distribution Function: CDF) grafikleri. 106

Şekil 3.26: Set1A_{NL} ($T_{0,nom}$ = 2 s ve *c.o.v.* = % 5) kapsamında A4 izolatörü için üretilmiş K_1 değerlerine ait yoğunluk (density) diyagramı. 107

Şekil 3.27: 3D-BASIS-MONTE programının genel hatlarıyla akış diyagramı. 109

Şekil 3.28: Referans izolasyonlu binaların SAP2000 modeline ait tipik görünüş. 111

Şekil 3.29: FD1 etkisiyle oluşan (a), (d): izolasyon katı kütle merkezi deplasmanlanının, (b), (e): üst kat kütle merkezi toplam ivmesinin, (c), (f): üst kat kütle merkezi deplasmanının zamana bağlı değişimi. 112

Şekil 3.30: NFD4 etkisiyle oluşan (a), (d): izolasyon katı kütle merkezi deplasmanlanının, (b), (e): üst kat kütle merkezi toplam ivmesinin, (c), (f): üst kat kütle merkezi deplasmanının zamana bağlı değişimi. 113

Şekil 3.31: N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarının CDF grafikleri; (a): $bdix_{max}$, (b): $drix_{max}$ ve (c): tax_{max} için. 115

Şekil 3.32: N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına ait başarısızlık olasılıklarının değişimi; (a)-(c): $bdix_{max}$, (d)-(f): $drix_{max}$, (g)-(i): tax_{max} için. 116

Şekil 3.33: Nominal sentetik depremlere ait (a) V_p ve (b) T_p değerleri. 120

Şekil 3.34: Nominal sentetik depremlere ait hız –zaman geçmişleri. 121

Şekil 3.35: Nominal sentetik depremlere ait ivme –zaman geçmişleri. 121

Şekil 3.36: Senaryo-I kapsamındaki her bir sentetik depremler seti için V_p, T_p ve ζ_p değerlerini hesaplayan programın akış diyagramı. 123

Şekil 3.37: Türev sentetik depremler için üretilen V_p değerleri; (a) M_w = 6.0, (b) M_w = 6.5 ve (c) M_w = 7.0 için (Tablo 3.4'deki depremler ile karşılaştırmalı olarak). 126

Şekil 3.38: Türev sentetik depremler için üretilen V_p değerlerine ait CDF grafikleri: (a) – (c) ve Histogramlar: (d) – (f). 127

Şekil 3.39: Türev sentetik depremler için üretilen T_p değerleri (Tablo 3.4'deki depremler ile karşılaştırmalı olarak). 128

Şekil 3.40: Türev sentetik depremler için üretilen T_p değerlerine ait CDF grafikleri. 128

Şekil 3.41: Türev sentetik depremler için üretilen T_p değerlerine ait histogramlar; (a) M_w = 6.0, (b) M_w = 6.5 ve (c) M_w = 7.0 için. 129

Şekil 3.42: Türev sentetik depremler için üretilen ζ_p değerlerine ait tipik CDF grafiği. 130

Şekil 3.43: A4 izolatörü bağımsız değişken parametreleri için üretilmiş rastgele değerlerin CDF ve histogram grafikleri; K_1: (a) ve (d), K_2: (b) ve (e), D_y: (c) ve (f) [$T_{0,nom}$ = 2.0 s – *c.o.v.* = %10]. 133

Şekil 3.44: A4 izolatörü bağımsız değişken parametreleri için üretilmiş rastgele değerlerin CDF ve histogram grafikleri; K_1: (a) ve (d), K_2: (b) ve (e), D_y: (c) ve (f) [$T_{0,nom}$ = 3.5 s – *c.o.v.* = %10]. 134

Şekil 3.45: A4 izolatörü bağlı değişken parametreleri için hesaplanan değerlerin CDF grafikleri; $T_{0,nom}$ = 2 s: (a) - (c), $T_{0,nom}$ = 3.5 s: (d) - (f) [*c.o.v.* = %10]. 135

Şekil 3.46: NEARFAULT.FOR isimli altprograma ait akış diyagramı. 137

Şekil 3.47: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için üretilen deprem setine ait parametrelerin CDF grafikleri. 142

Şekil 3.48: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için üretilen izolasyon sistemi setlerindeki A4 izolatörü parametrelerine ait CDF grafikleri [$T_{0,nom}$ = 3.5 s]. 143

Şekil 3.49: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarının CDF grafikleri; *c.o.v.* = %5: (a)-(c), *c.o.v.* = %10: (d)-(f), *c.o.v.* = %15: (g)-(i). 144

Şekil 3.50: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına ait başarısızlık olasılıklarının N_{MCA}'ya göre değişimi; $bdix_{max}$ için: (a)-(c), $drix_{max}$ için: (d)-(f), tax_{max} için: (g)-(i). 145

Şekil 3.51: Senaryo-II kapsamındaki her bir sentetik depremler seti için V_p, T_p ve ζ_p değerlerini hesaplayan programın akış diyagramı. 148

Şekil 3.52: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki M_w değerlerine ait CDF grafikleri. 149

Şekil 3.53: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki M_w değerlerine ait histogramlar. 149

Şekil 3.54: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki *r* değerlerine ait (a) tipik CDF grafiği ve (b) tipik histogram. 150

Şekil 3.55: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki V_p değerlerine ait CDF grafikleri. 151

Şekil 3.56: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki V_p değerlerine ait histogramlar. 151

Şekil 3.57: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki T_p değerlerine ait CDF grafikleri. 152

Şekil 3.58: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki T_p değerlerine ait histogramlar. 152

Şekil 3.59: Senaryo-II kapsamında kullanılacak N_{MCA} sayısını tespit için üretilen deprem seti parametrelerinin değerleri. 155

Şekil 3.60: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarının CDF grafikleri; (a) $bdix_{max}$, (b) $drix_{max}$ (c) tax_{max} için. 156

Şekil 3.61: Senaryo-II kapsamında N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına ait başarısızlık olasılıklarının değişimi; (a)-(c): $bdix_{max}$, (d)-(f): $drix_{max}$, (g)-(i): tax_{max} için. 157

Şekil 4.1: Üretilmiş 1. Grup Sistemlerin ($Set1_{NL}$) FD20 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü). 163

Şekil 4.2: Üretilmiş 1. Grup Sistemlerin ($Set1_{NL}$) NFD15 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü). 164

Şekil 4.3: Üretilmiş 2. Grup Sistemlerin ($Set2_{NL}$) FD20 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü). 165

Şekil 4.4: Üretilmiş 2. Grup Sistemlerin ($Set2_{NL}$) NFD15 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü). 166

Şekil 4.5: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ ($T_{0,nom}$=2 s *c.o.v.*=%10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri. 173

Şekil 4.6: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 2 s *c.o.v.*= %10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri. 174

Şekil 4.7: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set2B_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 3.5 s *c.o.v.*= %10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri. 175

Şekil 4.8: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set2B_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 3.5 s, *c.o.v.*= %10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri. 176

Şekil 4.9: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin *P*'ye göre değişimi (X yönü). 183

Şekil 4.10: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin *P*'ye göre değişimi (Y yönü). 184

Şekil 4.11: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin *P*'ye göre değişimi (X yönü). 185

Şekil 4.12: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin *P*'ye göre değişimi (Y yönü). 186

Şekil 4.13: Yer hareketi türü ve hedef periyodu gözetilmeksizin yapısal cevap parametrelerinin X yönü bileşenlerine ait e_{Mean} değerlerinin ortalamaları (e_{Mean}^{*})....188

Şekil 4.14: Yer hareketi türü ve hedef periyodu gözetilmeksizin yapısal cevap parametrelerinin Y yönü bileşenlerine ait e_{Mean} değerlerinin ortalamaları (e_{Mean}^{*})....189

Şekil 4.15: FD20 etkisindeki $Set1_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri. 193

Şekil 4.16: FD20 etkisindeki $Set2_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri. 193

Şekil 4.17: NFD15 etkisindeki $Set1_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri. 194

Şekil 4.18: NFD15 etkisindeki $Set2_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri. 194

Şekil 4.19: Tüm FD yer hareketi etkisinde tüm alt izolasyon sistemi setleri için hesaplanan burulma büyütmelerinin önemli yüzdelik değerlerinin ortalamaları; (a) ve (b): $Set1_{NL}$, (c) ve (d): $Set2_{NL}$. 197

Şekil 4.20: Tüm NFD yer hareketi etkisinde tüm alt izolasyon sistemi setleri için hesaplanan burulma büyütmelerinin önemli yüzdelik değerlerinin ortalamaları; (a) ve (b): $Set1_{NL}$, (c) ve (d): $Set2_{NL}$. 198

Şekil 4.21: Yer hareketi türü ve hedef periyodu farkı gözetilmeksizin önemli yüzdelik değerleri için hesaplanan ortalama burulma büyütmeleri; (a) A_x, (b) A_y 199

Şekil 4.22: Aşılan limit adımı sıralamasına göre tfax için başarısızlık olasılıkları. 204

Şekil 4.23: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre tfax için başarısızlık olasılıkları ($Set1B_{NL}$). 205

Şekil 4.24: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre tfax için başarısızlık olasılıkları ($Set2B_{NL}$). 206

Şekil 4.25: PGA / PGV oranına göre tfax için başarısızlık olasılıkları ($Set1B_{NL}$)....207

Şekil 4.26: PGA / PGV oranına göre tfax için başarısızlık olasılıkları ($Set2B_{NL}$)....208

Şekil 4.27: Aşılan limit adımı sıralamasına göre $bdix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları. 211

Şekil 4.28: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre $bdix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları ($Set1B_{NL}$). 212

Şekil 4.29: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre $bdix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları ($Set2B_{NL}$). 213

Şekil 4.30: PGA / PGV oranına göre bdixmax için başarısızlık olasılıkları ($Set1B_{NL}$). 214

Şekil 4.31: PGA / PGV oranına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları ($Set2B_{NL}$). 215

Şekil 4.32: Aşılan limit adımı sıralamasına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları. 218

Şekil 4.33: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması ($Set1B_{NL}$). 219

Şekil 4.34: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması ($Set2B_{NL}$). 220

Şekil 4.35: PGA / PGV oranına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması ($Set1B_{NL}$). 221

Şekil 4.36: PGA / PGV oranına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması ($Set2B_{NL}$). 222

Şekil 4.37: $tfax_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılığı.....224

Şekil 4.38: $bdix_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılığı.....225

Şekil 4.39: $drix_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılığı.....226

Şekil 4.40: Referans izolasyonlu binaların nominal depremler etkisindeki yapısal cevap parametreleri; (a) – (c)**:** I. Grup Referans Binalar (d) – (f)**:** II. Grup Referans Binalar. 230

Şekil 4.41: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.....234

Şekil 4.42: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri. 235

Şekil 4.43: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri. 236

Şekil 4.44: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri. 237

Şekil 4.45: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.....238

Şekil 4.46: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri. 239

Şekil 4.47: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre). 245

Şekil 4.48: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre). 246

Şekil 4.49: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre). 247

Şekil 4.50: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre). 248

Şekil 4.51: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre). 251

Şekil 4.52: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre).....252

Şekil 4.53: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre). ..253

Şekil 4.54: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre). ..254

Şekil 4.55: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test1, Test2, Test3, Test4.....259

Şekil 4.56: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test5, Test6, Test7, Test8.....260

Şekil 4.57: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test9, Test10, Test11, Test12.....261

Şekil 4.58: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test13, Test14, Test15, Test16.....262

Şekil 4.59: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test1, Test2, Test3, Test4.....263

Şekil 4.60: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test5, Test6, Test7, Test8.....264

Şekil 4.61: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test9, Test10, Test11, Test12.....265

Şekil 4.62: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test13, Test14, Test15, Test16.....266

Şekil 4.63: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.....271

Şekil 4.64: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri. 272

Şekil 4.65: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri.....273

Şekil 4.66: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.....274

Şekil 4.67: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.....275

Şekil 4.68: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.....276

Şekil 4.69: Senaryo-II kapsamında oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerinin belirli limitlere göre başarısızlık olasılıkları; (a) – (d): $T_{0,nom}$ = 2 s, (e) – (h): $T_{0,nom}$ = 3.5 s.....280

Şekil 4.70: Senaryo-II kapsamında oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerinin belirli limitlere göre başarısızlık olasılıkları; (a) – (d): $T_{0,nom}$ = 2 s, (e) – (h): $T_{0,nom}$ = 3.5 s.....281

Şekil 4.71: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test1, Test2, Test3, Test4, Test5, Test6, Test7 ve Test8. 286

Şekil 4.72: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test9, Test10, Test11, Test12, Test13, Test14, Test15 ve Test16. 287

Şekil 4.73: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test1, Test2, Test3, Test4, Test5, Test6, Test7 ve Test8. 288

Şekil 4.74: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test9, Test10, Test11, Test12, Test13, Test14, Test15 ve Test16. 289

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Üst yapı elemanlarına ait malzeme ve kesit bilgileri. 84

Tablo 3.2: Taban-ankastre binaya ait modal analiz sonuçları. 86

Tablo 3.3: Çalışmada kullanılan tarihi depremler. 88

Tablo 3.4: İleri-yönelim etkisi içeren (FD: Forward-Directivity) tarihi yer hareketi bileşenleri. 88

Tablo 3.5: İleri-yönelim etkisi içermeyen (NFD: Non Forward-Directivity) tarihi yer hareketi bileşenleri.....89

Tablo 3.6: Referans İzolasyon Sistemlerindeki izolatörlerin karakteristik parametreleri. 98

Tablo 3.7: Üretilmiş İzolasyon Sistemi Setleri. 102

Tablo 3.8: Nominal sentetik depremlere ait T_p ve V_p değerleri. 120

Tablo 3.9: Senaryo-I kapsamında üretilen türev sentetik deprem setleri için üretilen V_p, T_p, ζ_p değerleri için weibull dağılıma ait ölçek (γ) ve şekil (k) parametreleri. 122

Tablo 3.10: İkinci ana bölüm kapsamında oluşturulan referans izolasyon sistemlerindeki izolatörlere ait karakteristik parametrelerin değerleri. 131

Tablo 3.11: Senaryo-II kapsamında üretilen türev sentetik deprem setleri için rastgele değişken deprem parametrelerine ait değerler. 146

Tablo 4.1: FD20 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 1. Grup Sistemler için yüzdelik (P) ve nominal değerden sapma yüzdesi (e) değerleri.....169

Tablo 4.2: NFD15 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 1. Grup Sistemler için yüzdelik (P) ve nominal değerden sapma yüzdesi (e) değerleri.....169

Tablo 4.3: FD20 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 2. Grup Sistemleri için yüzdelik (P) ve nominal değerden sapma yüzdesi (e) değerleri.....170

Tablo 4.4: NFD15 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 2. Grup Sistemleri için yüzdelik (P) ve nominal değerden sapma yüzdesi (e) değerleri. 170

Tablo 4.5: bdcx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri. 178

Tablo 4.6: bd1x için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri. 178

Tablo 4.7: tfdx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri. 179

Tablo 4.8: tfax için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri. 179

Tablo 4.9: ssx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri. 180

Tablo 4.10: bsx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri. 180

Tablo 4.11: Tüm bina setleri için tfax değerlerinin maksimumları.....203

Tablo 4.12: Tüm bina setleri için $bdix_{max}$ değerlerinin maksimumları. 210

Tablo 4.13: Tüm bina setleri için $drix_{max}$ değerlerinin maksimumları. 218

Tablo 4.14: Senaryo-I için Performans Testi Koşulları ve Limitleri. 255

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
a	: Üniform dağılıma sahip rastgele değişkenin dağılım aralığının alt sınırı
A_X	: Burulma büyütme katsayısı (X yönü)
A_Y	: Burulma büyütme katsayısı (Y yönü)
A_{UBC}	: UBC (1997) yönetmeliğinde tanımlanan burulma büyütme katsayısı
$a(t)$	: Titreşimin zamana bağlı ivme değişimi (cm/s^2)
b	: Üniform dağılıma sahip rastgele değişkenin dağılım aralığının üst sınırı
$d(t)$	: Titreşimin zamana bağlı deplasman değişimi (cm)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
C	: He ve Agrawal (2002) puls modeli genlik ölçek faktörü
C_{eff}	: İzolatör efektif sönüm katsayısı
D	: Maksimum izolatör deplasmanı (m)
D_D	: Tasarım deplasmanı
D_M	: Maksimum deplasman
D_t	: Deprem kaydı zaman adım aralığı (s)
D_{TD}	: Toplam tasarım deplasmanı
D_{TM}	: Toplam maksimum deplasman
D_y	: İzolatör akma deplasmanı (m)
dk	: Modikikasyon katsayısı için düzeltme katsayısı
E	: Betonun elastisite modülü (N/mm^2)
e	: P. Yüzdelik değerin nominal değerden sapma yüzdesi (%)
e_{Mean}	: e sapma yüzdelerinin ortalaması
e_{Mean}*	: e_{Mean} ortalama sapma yüzdelerinin ortalaması
f_c	: Beton karakteristik basınç dayanımı (N/mm^2)
f_y	: Çelik akma dayanımı (N/mm^2)
f_X	: X rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu
F_y	: İzolatör akma kuvveti (kN)
F_X	: X rastgele değişkeninin kümülatif dağılım fonksiyonu
F^{-1}	: Kümülatif dağılım fonksiyonunun tersi
$g(X)$	: Limit durum fonksiyonu
IP_{max}	: İzolatör karakteristik parametresinin maksimum değeri
IP_{min}	: İzolatör karakteristik parametresinin minimum değeri
IP_{nom}	: İzolatör karakteristik parametresinin nominal değeri
k_X	: Weibull dağılıma sahip X rastgele değişkeni için şekil parametresi
K_{eff}	: İzolatör efektif rijitliği (kN/m)
K_1	: İzolatör akma öncesi rijitliği (kN/m)
K_2	: İzolatör akma sonrası rijitliği (kN/m)
$K_{2,s}$	: İzolasyon sistemi akma sonrası rijitliği (kN/m)
m_x	: Kat ötelenme kütlesi (X doğrultusu)
m_y	: Kat ötelenme kütlesi (Y doğrultusu)
m_θ	: Dönel kütle atalet momenti (Z ekseni etrafında)

M_{bina} : Bina kütlesi (kNs^2/m)
M_w : Deprem moment büyüklüğü
MF_{max} : İzolatör modifikasyon katsayısı maksimum değeri
MF_{min} : İzolatör modifikasyon katsayısı minimum değeri
n : Sayılabilir bir büyüklüğün adedi
N_B : İzolatör sayısı
N_{MCA} : Monte Carlo simülasyonu sayısı
P : Yüzdelik değer
P_f : Başarısızlık olaslığı (%)
P_r : Olasılık
p_X : Olasılık kütle fonksiyonu
Q : İzolatör karakteristik kuvveti (kN)
Q_s : İzolasyon sistemi karakteristik kuvveti (kN)
r : Faya olana en yakın mesafe (km)
R_I : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
s_i : Standart normal sayılar
S : Standart normal değişken
t : Zaman adımı (s)
t_p : Puls modeli pik yer hızının oluştuğu an (s)
t_0 : Puls hareketinin başlama anı (s)
T : Periyot (s)
T_{eff} : Efektif periyot (s)
T_p : Puls periyodu (s)
T_0 : İzolasyonlu yapı hedef periyodu (s)
T_1 : Taban anksatre yapı birinci mod periyodu (s)
u_i : [0, 1] aralığında düzgün dağılıma sahip değişken sayılar
U : [0, 1] aralığında üniform dağılıma sahip rastgele değişken
$v(t)$: Titreşimin zamana bağlı hız değişimi (cm/s)
V_p : Puls hızı (cm/s)
W : Bina ağırlığı (kN)
x_i : X rastgele değişkeninin i. simülasyonsaki değeri
X : Belirli bir istatiksel dağılım fonksiyonuna sahip rastgele değişken
X_{nom} : X değişkeninin nominal değeri
L_X : X ekseni doğrultusundaki bina boyutu
L_Y : Y ekseni doğrultusundaki bina boyutu
α : İzolatör rijitlikleri oranı
β_{eff} : Bir izolatör için efektif viskoz sönüm oranı (%)
γ_X : Weibull dağılıma sahip X rastgele değişkeni için ölçek parametresi
Γ : Puls modeli hız pulsu başlangıç genliği (cm/s)
ζ_p : Puls azalma (sönüm) oranı (%)
ζ_p^* : He ve Agrawal (2002) puls modeli azalma (sönüm) faktörü
ζ_s : Üstyapı sönüm oranı (%)
ζ_X : Lognormal dağılıma sahip X rastgele değişkeni için şekil parametresi
κ : İzolasyon sistemi karakteristik kuvvet oranı (%)
λ : Özdeğer
λ_X : Lognormal dağılıma sahip X rastgele değişkeni için ölçek parametresi
μ_X : X rastgele değişkeninin ortalama değeri
σ_X : X rastgele değişkeninin standart sapma değeri
φ : Faz açısı

Ψ : İzolatörün kat kütle merkezine olan yatay mesafesi
δ : Rastlantısal eksantrisite
ω : Açısal frekans (rad/s)
ω_{eff} : Efektif açısal frekans (rad/s)
ω_p : Hız pulsu açısal frekansı (rad/s)
Ω : Puls modeli zarf eğrisi keskinlik kontrol parametresi

Kısaltmalar **Açıklama**

bdc : Taban katı kütle merkezi deplasmanı (m)
bdi : i. köşe izolatör deplasmanı (m)
bs : Taban kesme kuvveti (kN)
c.o.v. : Varyasyon katsayısı (Standart sapma yüzdesi)
CDF : Kümülatif dağılım fonksiyonu
dri : Katlararası göreli öteleme oranı
FD : İleri yönelim etkisi içeren (Forward Directivity)
HDRB : Yüksek sönümlü kauçuk izolatör
ISEV : 3D-BASIS program kodunda üstyapı türü değişken kodu
Limit_a : İvme limit adımı
Limit_d : Deplasman limit adımı
Limit_{dr} : Göreli kat öteleme oranı limit adımı
LDRB : Düşük sönümlü kauçuk izolatör
LOR : Deprem kaydı toplam süresi
LRB : Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör
Mean : Ortalama
NFD : İleri yönelim etkisi içermeyen (Non-Forward Directivity)
PGA : Pik yer ivmesi (cm/s^2 veya g)
PGV : Pik yer hızı (cm/s)
PDF : Olasılık yoğunluk fonksiyonu
PMF : Olasılık kütle fonksiyonu
rtfd : En üst kat kütle merkezinin tabana göre göreli öteleme oranı
SA : Spektral ivme (cm/s^2 veya g)
Set1_{NL} : 1. Grup üretilmiş doğrusal olmayan izolasyon sistemleri seti
Set2_{NL} : 2. Grup üretilmiş doğrusal olmayan izolasyon sistemleri seti
Set1A_{NL} : $T_{0,nom}$ = 2 s ve *c.o.v.* = %5 için üretilmiş izolasyon sistemleri alt seti
Set1B_{NL} : $T_{0,nom}$ = 2 s ve *c.o.v.* = %10 için üretilmiş izolasyon sistemleri alt seti
Set1C_{NL} : $T_{0,nom}$ = 2 s ve *c.o.v.* = %15 için üretilmiş izolasyon sistemleri alt seti
Set2A_{NL} : $T_{0,nom}$ = 3.5 s ve *c.o.v.* = %5 için üretilmiş izolasyon sistemleri alt seti
Set2B_{NL} : $T_{0,nom}$ = 3.5 s ve *c.o.v.* = %10 için üretilmiş izolasyon sistemleri alt seti
Set2C_{NL} : $T_{0,nom}$ = 3.5 s ve *c.o.v.* = %15 için üretilmiş izolasyon sistemleri alt seti
SD : Spektral deplasman (cm)
ss : Üstyapı kesme kuvveti (kN)
Std. : Standart sapma
SV : Spektral hız (cm/s)
ta : Kat kütle merkezindeki toplam ivme
tfa : En üst kat kütle merkezi ivmesi (m/s^2)
tfd : En üst kat kütle merkezi deplasmanı (m)
ZTAAY : Zaman tanım alanında analiz yöntemi
TSD : Tek Serbestlik Dereceli

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SİSMİK İZOLASYONLU BİNALARIN DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ OLASILIKSAL DAVRANIŞI

Hatice GAZİ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cenk ALHAN

Sismik izolatörlerin mekanik parametrelerinin tasarıma esas değerleri, yoğun prototip testlerinden elde edilen sonuçlara göre tayin edilirler. Ayrıca, bu prototip testlere ek olarak söz konusu test sonuçlarının ön tasarım aşamasında kabul edilen sınırlar içerisinde bulunup bulunmadığını kontrol etmek amacıyla, tüm izolatörler için üretim testleri gerçekleştirilir. Ancak, söz konusu testlere rağmen sismik izolatörlerin gerçek mekanik özellikleri, bu izolatörlerin malzeme özelliklerindeki, eleman boyutlarındaki, üretim metotlarındaki, kalite kontrolündeki ve kurulum aşamalarındaki hatalar ve/veya belirsizlikler gibi nedenlerle belirsizlikler içerebilir ve bu nedenle tasarıma esas olmak üzere testlerden elde edilen nominal değerlerinden farklılıklar gösterebilir. İzolatör parametrelerindeki söz konusu belirsizlikler ise, sismik izolasyonlu binaların hem altyapı hem de üstyapı dinamik cevap parametrelerinde değişikliklere yol açabilir.

Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan izolasyon sistemi elemanlarının mekanik parametrelerinde, bu parametrelerin tasarıma esas olmak üzere tespit edilen nominal değerlerine göre yukarıda belirtildiği gibi çeşitli nedenlerle meydana gelebilecek değişiklikleri göz önünde bulundurmak suretiyle oluşturulan üç boyutlu sismik izolasyonlu binaların farklı frekans veya hız içeriklerine sahip yer hareketlerine maruz kalmaları halinde, dinamik davranışlarının ve güvenilirliklerinin olasılıksal açıdan incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tez kapsamında; üç boyutlu olasılıksal bir yapısal modelin oluşturulması ve bu olasılıksal modelin Monte Carlo analizleri yardımıyla incelenmesi suretiyle: (1) doğrusal olmayan izolasyon sistemlerinde

meydana gelebilecek rastgele değişimlerin taban izolasyonlu binaların dinamik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmış, (2) UBC-1997 (Uniform Building Code, 1997, Volume 2: Structural Engineering Provisions, International Conference of Building Officials, Whittier, California) yönetmeliğine göre sismik izolasyonlu yapılar için rastlantısal olarak ortaya çıkan izolasyon sistemi elemanları rijitliklerindeki farklılıklara bağlı olarak hesaplanan burulma büyütme katsayılarının güvenilirliği ortaya konulmuş, (3) doğrusal olmayan izolasyon sistemine sahip taban izolasyonlu binaların yakın-fay depremleri altındaki güvenilirlikleri, farklı deprem momenti büyüklüğü ve farklı fay mesafelerine bağlı olarak ortaya konulmuş ve (4) karakteristik kuvvet oranının (sönümün) yakın-fay depremleri etkisindeki söz konusu binaların güvenilirliklerini ne derece etkilediği incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen amaç ve kapsam doğrultusunda, bu tez çalışması iki ana bölüme ayrılmıştır. Çalışmanın birinci ana bölümünde, öncelikle iki farklı izolasyon periyodu seviyesi için izolatör karakteristik parametreleri kendi içlerinde aynı olan iki referans izolasyon sistemi modellenmiştir. Ardından, bu sistemler referans alınmak suretiyle, izolatör karakteristik parametreleri için belirlenen üç farklı varyasyon katsayısı seviyesi için, her bir izolatörü birbirinden farklı mekanik özelliklere sahip toplam 30,000 adet birbirinden farklı doğrusal olmayan izolasyon sistemi Monte Carlo simülasyonları dahilinde üretilmiştir. Üretilmiş izolasyon sistemlerini betonarme çerçeve ve çelik çapraz elemanlardan oluşan üç katlı aynı üstyapı ile entegre ederek, 30,000 adet üç boyutlu sismik izolasyonlu bina oluşturulmuştur. Monte Carlo simülasyonları dahilinde her bina, farklı frekans içeriklerine sahip toplam 54 adet tarihi yer hareketi çiftine ayrı ayrı maruz bırakılarak, dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapısal cevap parametreleri olarak pik taban katı kütle merkezi deplasmanları, pik izolatör deplasmanları, pik en üst kat kütle merkezi deplasmanları, pik en üst kat kütle merkezi toplam ivmeleri, pik üstyapı kesme kuvvetleri ve pik taban katı kesme kuvvetleri göz önünde bulundurulmuştur. Yer hareketi türü, nominal izolasyon periyodu ve varyasyon katsayısı farkı gözetilerek, tüm binalar için yapısal cevap parametrelerinin değerleri ve bu değerlerin referans binalardaki nominal değerlerinden sapma yüzdeleri hesaplanmıştır. Ayrıca, burulma büyütme katsayıları hesaplanmış ve bu katsayılarının güvenilirlikleri ortaya konulmuştur. Ardından, pik en üst kat kütle merkezi ivmeleri, pik izolatör deplasmanlarının maksimumları ve pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları için de güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, bu güvenilirlik analizlerinin izolatör karakteristik parametrelerinin varyasyon katsayılarına olan duyarlılığı da araştırılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci ana bölümünde ise, izolatör karakteristik parametrelerindeki belirsizliklerin yanı sıra, yer hareketlerinin karakteristik parametrelerindeki belirsizlikler de hesaba katılmıştır. Bu ana bölümde, iki farklı nominal hedef periyodu, üç farklı karakteristik kuvvet oranı ve tek varyasyon katsayısı seviyesi için üretilen her biri birbirinden farklı izolatörlerden oluşan 60,000 adet birbirinden farklı doğrusal olmayan izolasyon sistemine sahip toplam 60,000 adet üç boyutlu sismik izolasyonlu bina oluşturulmuştur. Ardından bu binalar, puls içeren sentetik yakın-fay yer hareketlerine maruz bırakılmıştır. Söz konusu sentetik yer hareketlerinin üretilmesinde, deprem momenti büyüklüğü ve faya olan en yakın mesafe parametrelerinin kesin olarak bilinip bilinmemesine göre iki senaryo oluşturulmuştur. Birinci senaryoda (Senaryo-I), deprem momenti büyüklüğü ve fay mesafesi parametrelerinin değerlerinin bilindiği varsayılarak bu parametreler, deterministik parametreler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Ancak, puls hızı, puls periyodu ve puls sönüm oranı rastgele değişkenler olarak ele alınmıştır.

İkinci senaryoda (Senaryo-II) ise, deprem momenti büyüklüğü ve fay mesafesinin de kesin olarak bilinmediği göz önünde bulundurularak, bu parametreler de rastgele değişkenler olarak hesaba katılmıştır. Çalışmanın bu ana bölümündeki dinamik analizler de Monte Carlo simülasyonları dahilinde gerçekleştirilmiştir. Yapısal cevap parametreleri olarak, pik izolatör deplasmanlarının, pik göreli kat öteleme oranlarının ve pik kat kütle merkezi ivmelerinin maksimumları inceleme kapsamına alınmıştır. Bu cevap parametrelerinin değişimleri, göz önünde bulundurulan nominal izolasyon periyodu ve nominal izolasyon sönüm oranları için uygulamada mühendislerin de ön tasarımlarında referans alabileceği ve nihai tasarımlarında da güvenilirlik değerlendirmesi yapabileceği kümülatif dağılım fonksiyonları ile ortaya konmuştur. Bu bölümde ayrıca, pik izolatör deplasmanları ve pik kat kütle merkezi ivmelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ve birlikte değerlendirmeleri durumlarında tüm binalar için güvenilirlik analizleri ve performans testleri, deprem momenti büyüklüğü, fay mesafesi, izolasyon periyodu, karakteristik kuvvet oranı farkı gözetilerek gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında ayrıca, orijinal halinde bir sismik izolasyonlu binanın bir deprem etkisinde üç boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizini gerçekleştiren 3D-BASIS (Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and Contantinou, M.C., 1991, 3D-BASIS: A General Program for the Nonlinear Dynamic Analysis of Three Dimensional Base Isolated Buildings, Department of Civil Engineering State University of New York, Buffalo) programında yazılım modifikasyonları ve alt program ilaveleri de yapılmıştır. Böylece söz konusu program, Monte Carlo simülasyonları dahilinde istenilen sayıda sismik izolasyonlu binanın hem tarihi yer hareketleri etkisinde hem de kendi bünyesinde ürettiği puls içeren sentetik yakın-fay yer hareketleri etkisinde tekrarlı dinamik analizlerini yapabilir hale getirilmiştir.

Haziran 2015, 343 sayfa.

Anahtar kelimeler: Deprem Mühendisliği, Sismik Taban İzolasyonu, Olasılıksal Analiz, Güvenilirlik Analizi, Performans Testleri, Monte Carlo Simülasyon Tekniği, 3D-BASIS.

SUMMARY

Ph. D. THESIS

PROBABILISTIC BEHAVIOR OF SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS UNDER EARTHQUAKE LOADINGS

Hatice GAZİ

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cenk ALHAN

Design values of mechanical parameters of seismic isolators are determined on the basis of the results obtained from extensive prototype tests. Moreover, in addition to these prototype tests, production tests are conducted for all of the isolators in order to check whether the results of the subject tests are in the ranges accepted in the preliminary design stage or not. However, the actual mechanical properties of the seismic isolators may have uncertainties and thus may vary from their nominal design values determined from the aforementioned tests for some reasons such as the errors and/or uncertainties in the properties of the materials, dimensions of the elements, manufacturing methods, quality control and installation steps. The subject uncertainties in the isolator parameters may lead to changes in the dynamic response parameters of both the substructures and superstructures of the seismically isolated buildings.

The aim of this dissertation is to investigate the dynamic response and reliability of the three dimensional base isolated buildings, which are modeled by considering the probable variances in the nominal design values of the mechanical parameters of nonlinear isolation systems due to the above-mentioned reasons, in a probabilistic fashion under the ground motions with different frequency or velocity content. To this end, the following steps are conducted in the scope of this study by generating a three dimensional probabilistic structural model and analyzing this model via Monte Carlo analyses: (1) the effects of the random variabilities in the parameters of the nonlinear isolation systems on the dynamic response of base isolated buildings are investigated, (2) the reliability of the

torsional amplification factors, which are calculated based on the random variabilities in the lateral stiffness of the isolation system elements as determined in the UBC-1997 code (Uniform Building Code, 1997, Volume 2: Structural Engineering Provisions, International Conference of Building Officials, Whittier, California) is revealed, (3) the reliabilities of the base isolated buildings with nonlinear isolation systems under near-fault earthquakes are revealed for various earthquake moment magnitudes and fault distances, and (4) the degree of the effect of the characteristic strength ratio (i.e. damping ratio) on the reliability of the subject buildings under near-fault earthquakes is investigated.

In accordance with the above-mentioned aim and scope, this dissertation is divided into two main parts. In the first main part of the dissertation, first of all two benchmark isolation systems consisting of identical isolators are modeled for two isolation period levels. Subsequently, within the Monte Carlo simulations, totally 30,000 different nonlinear isolation systems each of which are consisting of isolators with different mechanical properties are generated based on the benchmark isolation systems for three different levels of coefficients of variation determined for the characteristic isolator parameters. 30,000 three-dimensional base isolated buildings are formed by integrating the generated isolation systems with the same three-story superstructure consisting of reinforced concrete and steel frame elements. Nonlinear dynamic analyses are conducted within in the Monte Carlo simulations by subjecting each of the buildings to the records of totally 54 historical ground motion couples with different frequency contents. The peak displacements at the center of mass of base, the peak isolator displacements, the peak displacements at the center of mass of top floor, the peak accelerations at the center of mass of top floor, the peak structural shear forces and the peak base shear forces are considered as the structural response parameters. By considering the differences in the ground motions records, isolation periods, and the coefficients of variation; all of the response parameters of all the buildings and the percentages of deviations of the subject response parameters with respect to the ones obtained from the corresponding benchmark buildings are calculated. In addition, the torsional amplification factors are computed and the reliability of these factors are revealed. Subsequently, reliability analyses are also conducted for the peak top floor accelerations at the center of mass, the maximums of the peak isolator displacements and the maximums of the peak interstory drift ratios. Finally, sensitivities of these reliability analyses to the coefficients of variation of the isolator characteristic parameters are also investigated.

In the second main part of the dissertation, the uncertainties in the characteristic parameters of the ground motions are also taken into account in addition to the uncertainties in the isolator characteristic parameters. In this main part, totally 60,000 three-dimensional base isolated buildings are formed with 60,000 different nonlinear isolation systems each of which are consisting of different isolators generated for two levels of nominal isolation periods, three levels of characteristic strength ratio and a coefficient of variation level. Then, these buildings are subjected to the synthetic pulse-like near-fault ground motions. For the generation of the subject synthetic ground motions, two scenarios are built based on the earthquake moment magnitudes and fault distances. In the first scenario (Scenario-I), it is assumed that the values of the earthquake moment magnitudes and the fault distances are known exactly, and the subject parameters are considered as deterministic parameters. However, velocity of the pulse, period of the pulse, and the decaying ratio of the pulse are taken into account as random parameters. In

the second scenario (Scenario-II), it is considered that the earthquake moment magnitudes and fault distances are not known exactly, and these parameters are also taken into account as random parameters. The dynamic analyses in this main part of the study are also conducted within the Monte Carlo simulations. The maximum values of the peak isolator displacements, the peak interstory drift ratios and the peak floor accelerations are considered as the structural response parameters. The variances in the subject response parameters are revealed in terms of their cumulative distribution functions which can be taken as a reference for the preliminary design stage and used for reliability assessments for the final design stage by the design engineers. In this main part, reliability analyses and performance tests are also conducted for all the generated buildings for various levels of earthquake moment magnitudes, fault distances, isolation periods, and characteristic strength ratios, while the peak isolator displacements and the peak floor accelerations of the buildings are taken into account separately and together.

In the scope of this dissertation, some software modifications are also made and some subroutines are added to 3D-BASIS (Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and Contantinou, M.C., 1991, 3D-BASIS: A General Program for the Nonlinear Dynamic Analysis of Three Dimensional Base Isolated Buildings, Department of Civil Engineering State University of New York, Buffalo) which is a computer program that is originally able to conduct three-dimensional nonlinear dynamic analyses for a single seismically isolated building under a single earthquake loading. Thus, the subject program is improved to be able conduct recursive dynamic analyses within the Monte Carlo simulations for the required number of base isolated buildings under the historical ground motions as well as the synthetic pulse-like near-fault ground motion records, which are generated within its own structure.

June 2015, 343 Pages.

Keywords: Earthquake Engineering, Seismic Base Isolation, Probabilistic Analysis, Reliability Analysis, Performance Tests, Monte Carlo Simulation Technique, 3D-BASIS.

1. GİRİŞ

Sismik izolasyon, bir yapının depreme dayanıklılık kapasitesini arttırmak yerine, o yapının hakim frekansını tehlikeli rezonans bölgesinden uzaklaştırmak suretiyle maruz kalacağı sismik kuvvetleri azaltarak, sismik talebi indirgeme anlayışı üzerine kurulmuş bir depreme dayanıklı tasarım yaklaşımıdır. Bu teknolojinin doğru uygulanması, şiddetli depremler süresinde bile neredeyse elastik davranan ve iyi performansa sahip binaların inşa edilmesini sağlar. Çoğu uygulamalarda sismik izolatör adı verilen yapısal elemanlar, yapının temel seviyesine yerleştirilir ve bu uygulama şekli "taban izolasyonu" olarak adlandırılır. Taban izolasyonu uygulamasında izolasyon sistemi temel olarak, üstyapı ve temel arasına yerleştirilen ve yapının büyük yanal deplasmanlar yapmasına olanak veren söz konusu izolatörlerden oluşmaktadır. Düşük yanal rijitliğe ve yüksek düşey rijitliğe sahip olan bu elemanlar sayesinde yatay deprem titreşimlerinin sadece bir kısmı üst yapıya iletilir. Bu durum, yapının taban ankastre haline ait frekansından ve yer hareketinin hakim frekansından çok daha düşük bir temel frekansa sahip olmasına olanak verir. Ayrıca, sismik izolasyonlu bir yapıda deformasyon meydana getiren yüksek modlar, ilk moda ve yer hareketine ortogonal olur; bu nedenle de harekete katkıda bulunamazlar. Böylece, eğer yüksek frekans seviyelerinde yer hareketinde yüksek enerji varsa; bu enerji, yapıya iletilmez (Naeim ve Kelly, 1999; Kelly, 2001; Tezcan ve Cimilli, 2002; Cheng ve diğ., 2008).

Sismik izolasyon, katlar arası göreli deplasmanların büyük olduğu ve kat ivmelerinin küçük olduğu esnek yapılar ile katlar arası göreli deplasmanların küçük olduğu ve buna karşılık kat ivmelerinin yüksek olduğu rijit yapıların avantajlarını bir araya getirerek; hem göreli kat deplasmanlarını hem de kat ivmelerini aynı anda azaltabilir. Göreli kat deplasmanlarının azalmasının esas nedeni, üstyapının rijit bir blok gibi davranmasıdır. Üstyapı, izolasyon katı ile kıyaslandığında rölatif olarak çok rijit kalmaktadır ve deplasmanların önemli bir kısmı, izolasyon katında meydana gelmektedir. Göreli kat deplasmanlarının azaltılması, deprem hareketi nedeniyle gerçekleşebilecek olası yapısal veya yapısal olmayan zararların en aza indirilmesini sağlar. Buna ek olarak, yapısal

sistemin hakim periyodunun uzaması neticesinde kat ivmelerinin azalması ise, kat kesme kuvvetlerinin de azalmasına yardımcı olur. Kat ivmelerinin azalması ayrıca, yapısal elemanların ve yapı içerisinde bulunan yapısal olmayan bileşenlerin göreceği hasarın da indirgenmesini sağlar (Komodromos, 2000; Naeim ve Kelly, 1999; Datta, 2010).

Sismik izolasyonun kullanılmasının en uygun olduğu yapılar, bir saniyeden daha az temel doğal periyoda sahip kısa periyotlu yapılar olup; bu teknolojinin betonarme binalar için genellikle on kattan daha az kata sahip, çelik çerçeveli esnek yapılar için ise genellikle beş kattan daha az kata sahip yapılara uygulanması daha uygundur (Kelly, 2001). Bu tip yapılar için yapının periyodunu arttırmak suretiyle yapının frekansı, depremin hakim frekansından uzaklaştırılarak yapının rezonansa girmesi önlenebilir. Esnek izolasyon sistemleri, bu tip yapıları yüksek frekans ve ani ivme değişiklikleri içeren uzak-fay yer hareketlerine karşı etkin bir şekilde koruyabilirken; söz konusu yapıların yüksek hızlı ve uzun periyotlu pulslar içeren yakın-fay yer hareketlerine maruz kalmaları halinde, yapısal cevap parametreleri artabilmektedir (Makris,1997; Hall ve diğ., 1995; Hall ve diğ., 1999; Hasgür ve Umut, 2007). Dahası, yakın-fay yer hareketleri etkisindeki sismik izolatörlerde meydana gelebilecek büyük deplasmanlar, izolasyon elemanlarının deplasman kapasitesini aşarak izolatörlerin yırtılması, burkulması gibi sorunlara sebep olabilir (Nagarajaiah ve Ferrell, 1999; Alhan ve Göktaş, 2009) ve bu durumda yapısal bütünlük tehlikeye girebilir. Söz konusu yer hareketleri nedeniyle oluşabilecek yüksek kat ivmeleri ise, yapısal elemanların yanı sıra sismik izolasyonlu yapılarda bulunması muhtemel kritik işleve sahip, titreşime duyarlı cihazlara zarar verebilir ve dolayısıyla söz konusu yapıların cihaz bazında performanslarını olumsuz yönde etkileyebilirler. Bu nedenlerden ötürü, sismik izolasyonlu yapıların hem yapısal bütünlüğü hem de hassas cihazlar bazında performansları açısından maruz kalabilecekleri deprem hareketlerinin frekans içerikleri büyük önem taşımaktadır. Deprem hareketleri ile ilgili olarak göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus ise, bu hareketlerin belirsizlikler içermesidir. Yapıların tasarım aşamasındaki deprem datası, her ne kadar ilgili yönetmeliklere göre belirlense de deprem hareketleri rastgele hareketlerdir, dolayısıyla yapının gerçekte maruz kalacağı yer hareketinin içeriği kesin olarak bilinemez ve tasarım aşamasında belirlenen deprem datasından önemli farklılıklar gösterebilir (Politopoulos ve Pham, 2009; Jangid, 2008). Yer hareketlerindeki bu belirsizlikler, sismik izolasyonlu yapıların hem altyapı hem de üstyapı dinamik cevap parametrelerinde önemli değişikliklere yol açabilir.

Sismik izolasyon uygulaması ile ilgili olarak göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus ise, izolasyon sistemi elemanlarının mekanik özellikleri ile ilgilidir. Sismik izolatörlerin mekanik parametrelerinin tasarıma esas değerleri, yoğun prototip testlerinden elde edilen sonuçlara göre tayin edilirler. Ayrıca, bu prototip testlere ek olarak söz konusu test sonuçlarının ön tasarım aşamasında kabul edilen sınırlar içerisinde bulunup bulunmadığını kontrol etmek amacıyla, tüm izolatörler için üretim testleri gerçekleştirilir. Ancak, söz konusu testlere rağmen sismik izolatörlerin gerçek mekanik özellikleri, bu izolatörlerin malzeme özelliklerindeki, eleman boyutlarındaki, üretim metotlarındaki, kalite kontrolündeki ve kurulum aşamalarındaki hatalar ve/veya belirsizlikler gibi nedenlerle belirsizlikler içerebilir ve bu nedenle tasarıma esas olmak üzere testlerden elde edilen nominal değerlerinden farklılıklar gösterebilir. Ayrıca, izolatörlerin mekanik özellikleri, yaşlanma, sıcaklık değişimi, gerilme-yumuşaması, aşınma, kontaminasyon ve yük geçmişi gibi nedenlerle servis ömrü süresince zaman içerisinde de değişebilir (Cheng ve diğ., 2008; Hirata ve diğ, 1989; De la Llera ve Inaudi, 1994; Constantinou ve diğ., 1999; Thompson ve diğ., 2000; Shenton III ve Holloway, 2000; AASHTO, 2010). Yer hareketlerindeki belirsizliklerin sebep olduğu gibi, izolatör parametrelerindeki söz konusu belirsizlikler de sismik izolasyonlu yapıların hem altyapı hem de üstyapı dinamik davranışında önemli değişikliklere yol açabilir; hatta tasarıma esas kuvvetler ve deplasmanlar geçerliliğini yitirebilir. Bu belirsizlikler, özellikle kritik işleve sahip, titreşime hassas cihazların bulunabileceği hastane, üniversite ve veri depolama merkezi gibi sismik izolasyonlu binalar için daha büyük önem taşımaktadır. Zira, söz konusu cihazların çalışmalarına ara vermeden dayanabilecekleri ivme seviyeleri oldukça düşüktür; bu nedenle bu cihazların bulundukları sismik izolasyonlu binaların deprem yükleri altındaki kat ivmelerinin hassas bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Ayrıca, söz konusu binaların yapısal bütünlüğü açısından da izolasyon sistemi deplasmanlarının gerçekçi bir şekilde hesaplanması gerekmektedir (Alhan ve Hışman, 2011b). Sismik izolasyonlu yapılara ait söz konusu cevap parametrelerinin gerçekçi ve hassas bir şekilde hesaplanabilmesi için de izolasyon sistemi parametrelerindeki ve yer hareketlerindeki belirsizliklerin birlikte göz önünde bulundurulduğu analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Alhan ve Gavin, 2005).

Ancak, sismik izolasyonlu yapısal sistemlerin analizi ile ilgili çalışmaların çoğunluğunda, izolatör karakteristik parametreleri deterministik parametreler olarak tanımlanmakta ve

bu parametrelerin aldığı belirli sabit değerlere bağlı olarak hesaplanan yapısal sistem cevap parametrelerinin değişimi incelenmektedir. Söz konusu çalışmaların örneklerini Su ve diğ. (1989), Fan ve Ahmadi (1992), Pan ve Cui (1994), Park ve diğ. (2002), Yoo ve Kim (2002), Ordonez ve diğ. (2003), Alhan ve Gavin (2004a), Alhan ve Gavin (2004b), Matsagar ve Jangid (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmaların yanı sıra son on yıl içerisinde gerçekleştirilmiş olan Dicleli ve Buddaram (2006a), Kim ve Yun (2007), Providakis (2008), Hameed ve diğ. (2008), Providakis (2009), Sharma ve Jangid (2011), Özdemir ve Akyüz (2012), Mazza ve diğ., (2012), Haque ve diğ. (2013) ile Bhagat ve Wijeyewickrema (2014) gibi birçok çalışmada görmek mümkündür. Bu çalışmaların yanı sıra; izolasyon sisteminin karakteristik parametreleri farklı değerlere sahip olan elemanlardan oluşması veya karakteristik parametreleri aynı değerlere sahip izolasyon sistemi elemanlarının plan üzerinde farklı dizilimi ile oluşturulan asimetrik izolasyon sistemlerine sahip yapıların dinamik davranışlarının incelendiği parametrik çalışmalar da (Matsagar ve Jangid, 2005; Matsagar ve Jangid, 2006; Tena-Colunga ve Zambrana-Rojas, 2006 ile Kilar ve Koren, 2009) bulunmaktadır. Ayrıca, yüksek sönümlü kauçuk izolatörler, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ve sürtünme sarkaç tipi izolatörler gibi çevrimsel yanal yükler etkisinde doğrusal olmayan histeretik davranış sergileyen izolatörlerin, eşdeğer doğrusal modellemeler ile elde edilen doğrusal eşlenikleri kullanılarak gerçekleştirilen parametrik çalışmalar da (Hwang ve Sheng, 1993; Hwang ve Chiou 1996; Hwang, 1996; Franchin ve diğ., 2001; Matsagar ve Jangid 2004; Jara ve Casas, 2006; Dicleli ve Buddaram, 2006b; Dicleli ve Buddaram, 2007a; Dicleli ve Buddaram, 2007b; Dall'Asta ve Ragni, 2008; Sayani ve Ryan, 2009; Özgür, 2010; Alhan ve Şahin, 2011; Jara ve diğ., 2012) mevcut olup; bu çalışmalarda, eşdeğer doğrusal modelleme ile elde edilen eşlenik izolatör parametrelerinin farklı deterministik değerleri için doğrusal dinamik analizler gerçekleştirilmekte ve ayrıca bu analiz sonuçlarına göre söz konusu doğrusal modellerin geçerliliği sorgulanmaktadır. Yukarıda belirtilen tüm parametrik çalışmalar, sismik izolasyonlu sistemlerin dinamik davranışlarının analizi ve/veya tasarımı ile ilgili önemli bilgiler içermekte olup, literatüre değerli katkılarda bulunmuştur. Ancak, söz konusu çalışmalarda izolatörlerin ve/veya diğer yapısal sistem elemanlarının karakteristik parametrelerinin belirli ve sabit değerleri için analizler gerçekleştirilmekte; dolayısıyla yapısal sistemin davranışı, bu parametrelerin sadece göz önünde bulundurulan sınırlı sayıdaki sabit değerleri için elde edilmekte; gerek izolatörlerin mekanik özelliklerindeki gerekse yer hareketlerindeki belirsizlikler dikkate

alınmamaktadır. Bu çalışmaların yanı sıra, izolatör karakteristik parametrelerinde, bu parametrelerin tasarıma esas nominal değerlerinden çeşitli sebeplerle meydana gelen sapmaların göz önünde bulundurulduğu parametrik çalışmalar da (Su ve diğ., 1990a; Fan ve diğ., 1991; Hışman, 2011; Alhan ve Hışman, 2011a; Alhan ve Hışman, 2011b; Choun ve diğ., 2014) bulunmakta olup; detayları Bölüm 2.3.2.1'de verilen bu çalışmalar kapsamında ise, söz konusu izolatör parametrelerinin belirli aralıklar dahilinde sabit küçük artımlarla değişen değerler aldığı veya nominal değerlerinden yine belirli ve sabit miktarlarda sapmalar (ötelenmeler) gösterdiği varsayılarak yoğun parametrik analizler gerçekleştirilmekte ve yapısal sistemlerin ilgili parametrelere bağlı olarak davranış değişkenliği incelenmektedir. Diğer taraftan, detayları Bölüm 2.4.2'de verilen ve sismik izolasyonlu sistemlerin yakın-fay yer hareketlerine maruz kalması durumunda gerçekleştirilen çalışmalar da, yine ağırlıklı olarak parametrik çalışmalar olup; bu çalışmaların örneklerini ise, Heaton ve diğ. (1995), Hall ve diğ. (1995), Makris (1997), Kelly (1999), Hall (1999), Makris ve Chang (2000a), Makris ve Chang (2000b), Hall ve Ryan (2000), Jangid ve Kelly (2001), Alhan ve Gavin (2004a), Alhan ve Gavin (2004b) çalışmalarında ve son dönemde gerçekleştirilmiş olan Dicleli (2006), Dicleli ve Buddaram (2007a), Hasgür ve Umut (2007), Jangid (2007), Providakis (2008), Providakis (2009), Mazza ve Vulcano (2009), Alhan ve Göktaş (2009), Karalar ve diğ. (2012), Öncü ve Alhan (2012), Öncü-Davas ve Alhan (2013) çalışmalarında görmek mümkündür. Yakın-fay yer hareketleri etkisindeki sismik izolasyonlu sistemlerin dinamik davranışları hakkında önemli bilgiler sunan bu çalışmalarda, gerçek veya sentetik yer hareketleri olarak göz önünde bulundurulan yakın-fay yer hareketleri ile bu yer hareketlerine maruz kalan izolasyon sistemlerinin parametreleri deterministik olarak ele alınmakta ve bu parametrelerin sınırlı sayıdaki farklı değerleri için yine sınırlı sayıda yer hareketi etkisindeki davranışları analiz edilmektedir. Bu çalışmaların yanı sıra, yakın-fay yer hareketlerindeki ve izolasyon sistemi parametrelerindeki belirsizlikleri, çok sayıda farklı izolatör ve yer hareketi parametreleri için gerçekleştirilen yoğun analizler ile ele alan daha detaylı parametrik çalışmalar da (Zhang ve Huo, 2009; Öncü, 2011) bulunmaktadır.

Sismik izolasyonlu yapısal sistemler ile ilgili olasılıksal değerlendirmelerin yapıldığı çalışmalar ise, bu konudaki parametrik çalışmalara göre oldukça az olup; bu çalışmaların büyük çoğunluğunda yer hareketlerindeki belirsizlikler göz önünde bulundurulurken; izolasyon sistemi parametrelerindeki belirsizlikler göz ardı edilmektedir. Örnekleri, Su

ve Ahmadi (1988), Constantinou ve Papageorgiou (1990), Fan ve Ahmadi (1990), Su ve diğ. (1990b), Chen ve Ahmadi (1992), Jangid ve Datta (1995a), Jangid ve Datta (1995b), Pirrotta ve İbrahim (1997) ile Pagnini ve Solari (1999)'nin yanı sıra son yıllarda gerçekleştirilmiş olan Chen ve diğ. (2007), Karim ve Yamazaki (2007), Şafak ve Kaya (2008), Jangid (2008), Bucher (2009), Jangid (2010), Ma ve diğ. (2011), Ateş (2012), Jacob ve diğ. (2013), Curadelli (2013), Ma ve diğ. (2013), Bakhshi ve Mostafavi (2014)'de görülebilen söz konusu çalışmalarda belirli bazı yer hareketi parametrelerinin rastgele değişkenler olarak hesaba katılması veya farklı frekans içeriklerine sahip çok sayıda yer hareketinin göz önünde bulundurulması suretiyle yer hareketlerindeki belirsizlikler göz önünde bulundurulurken; izolasyon sistemi parametreleri deterministik parametreler olarak ele alınmaktadır. Diğer taraftan, sismik izolasyonlu sistemlerde izolatörlerin karakteristik parametrelerindeki belirsizlikleri göz önünde bulundurarak, bu parametreleri rastgele değişken parametreler olarak tanımlayan olasılıksal çalışmaların (Hirata ve diğ.,1989; De La Llera ve Inaudi, 1994; Shenton III ve Holloway, 2000; Nagai ve Nishitani, 2005, Okamura ve Fujita 2007; Gazi ve Alhan, 2013) sayısı ise, oldukça azdır. Detayları Bölüm 2.3.2.2 Kısım a'da verilen bu çalışmalarda ise, izolatör karakteristik parametrelerindeki belirsizlikler hesaba katılırken; yer hareketlerindeki belirsizlikler göz ardı edilmektedir. Sismik izolasyonlu sistemlerin izolatör parametrelerindeki belirsizliklerin yanı sıra yer hareketlerindeki belirsizliklerin de göz önünde bulundurulduğu çalışmalar (Manolis ve diğ. 1990; Pinto ve Vanzi, 1992; Alhan ve Gavin, 2005; Politopoulos ve Sollogoub, 2005; Politopoulos ve Pham, 2009; Mishra ve Chakraborty, 2013; Mishra ve diğ., 2013; Roy ve Chakraborty, 2013; Roy ve diğ., 2014; Kwag ve Ok, 2013; Saha ve diğ., 2013) ise, özellikle son yıllarda gerçekleştirilmiş olup; yine sınırlı sayıdadır. Detayları Bölüm 2.3.2.2 Kısım b'de verilen bu çalışmalar, izolasyon sistemi elemanlarındaki ve yer hareketlerindeki belirsizliklerin birlikte hesaba katılması durumunda incelenen sistemlerin dinamik davranışlarındaki değişkenliğin görülebilmesi açısından çok önemli çalışmalardır. Bununla birlikte, söz konusu çalışmaların incelenmesinden görüleceği üzere; bu çalışmalardaki izolasyon sistemi elemanları ya doğrusal elemanlar olarak ele alınmakta (Alhan ve Gavin, 2005; Politopoulos ve Sollogoub, 2005; Politopoulos ve Pham, 2009), ya doğrusal olmayan izolasyon sistemi elemanlarının eşdeğer doğrusallaştırma teknikleri ile elde edilen doğrusal eşlenikleri kullanılmakta (Manolis ve diğ., 1990; Saha ve diğ., 2013) ya da doğrusal olmayan izolasyon sistemlerine sahip yapısal sistemlerin olasılıksal davranışını

tahmin edebilmek için doğrusal olmayan sistemlere eşdeğer olan doğrusal sistemlerin kullanıldığı stokastik doğrusallaştırma metodu kullanılmaktadır (Pinto ve Vanzi, 1992; Kwag ve Ok, 2013; Mishra ve Chakraborty, 2013; Mishra ve diğ., 2013; Roy ve Chakraborty, 2013; Roy ve diğ., 2014). Ayrıca, bu çalışmalardan çok serbestlik dereceli bir sistem olarak modellenen altı katlı taban izolasyonlu bir çelik çerçeve sisteminin kullanıldığı Manolis ve diğ. (1990) çalışması ile üç boyutlu bir kayma çerçevesi olarak modellenen dört katlı taban-ankastre bir binanın kullanıldığı Alhan ve Gavin (2005) çalışması haricindeki diğer çalışmalarda, izolasyonlu yapısal sistemler ya iki boyutlu kayma çerçevesi olarak ya da en fazla üç serbestlik dereceli sistemler olarak modellenmektedir. Ayrıca, birçok parametresi rastgele değişken olarak ele alınan ve sentetik olarak üretilen yer hareketlerinin kullanıldığı Alhan ve Gavin (2005) ile genlik ve frekans parametreleri rastgele değişken olarak tanımlanan sinüs dalgalarının kullanıldığı Saha ve diğ. (2013) haricindeki çalışmalarda yer hareketleri, Kanai-Tajimi stokastik modeli ile modellenmekte ve bu modelin frekansı ile sönüm oranı veya pik ivme parametreleri rastgele değişken parametreler olarak ele alınmaktadır.

Mevcut tez çalışmasında ise incelenen tüm izolasyon sistemleri, doğrusal olmayan kauçuk esaslı izolatörlerden meydana gelmekte olup; bu izolatörler gerçeğe en yakın davranışları göz önünde bulundurularak, yumuşak ikili-doğrusal histeretik model ile doğrusal olmayan elemanlar olarak modellenmiştir. Söz konusu izolatörlerin mekanik parametrelerindeki belirsizliklerin hesaba katılabilmesi için izolatörlerin ana karakteristik parametreleri olan akma öncesi rijitlik, akma sonrası rijitlik ve akma deplasmanı parametreleri rastgele değişken parametreler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Bu izolatörler ile izole edilen binalar ise, tam üç boyutlu olarak ele alınmış ve bu binaların dinamik cevap parametreleri, Monte Carlo simülasyonları dahilinde gerçekleştirilen tekrarlı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri ile elde edilmiştir. İzolatör karakteristik parametrelerindeki belirsizliklerin yanı sıra yer hareketlerindeki belirsizlikleri de göz önünde bulundurabilmek için mevcut tezin birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında farklı frekans içeriklerine sahip elli dört tarihi yer hareketi çifti, ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında ise moment magnitüdü, fay mesafesi, puls hızı, puls periyodu ve puls sönüm oranı parametreleri rastgele değişken parametreler olarak tanımlanan sentetik yakın-fay yer hareketleri kullanılmış olup; farklı izolasyon periyodu, varyasyon katsayısı ve karakteristik kuvvet oranı seviyeleri için üretilen izolasyon

sistemlerine sahip binaların söz konusu yer hareketleri etkisindeki dinamik davranışları, güvenilirlikleri ve duyarlılıkları farklı fay mesafesi, pik yer ivmesinin pik yer hızına oranı ve deprem moment magnitüdü seviyeleri için olasılıksal açıdan incelenmiştir.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu tez kapsamında, doğrusal olmayan kauçuk esaslı izolatörlerin ana karakteristik parametreleri olan akma öncesi rijitlik, akma sonrası rijitlik ve akma dayanımı parametrelerinde, bu parametrelerin tasarıma esas olmak üzere tespit edilen nominal değerlerine göre malzeme özelliklerindeki, eleman boyutlarındaki, üretim metotlarındaki, kalite kontroldeki veya kurulum sırasındaki hatalar ve/veya belirsizlikler gibi nedenlerle meydana gelebilecek değişiklikleri göz önünde bulundurmak suretiyle oluşturulan üç boyutlu sismik izolasyonlu binaların, farklı frekans veya hız içeriklerine sahip yer hareketlerine maruz kalmaları halinde, dinamik davranışlarının ve güvenilirliklerinin olasılıksal açıdan incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tez kapsamında, üç boyutlu olasılıksal bir yapısal modelin oluşturulması ve bu olasılıksal modelin Monte Carlo analizleri yardımıyla incelenmesi suretiyle (1) doğrusal olmayan izolasyon sistemlerinde meydana gelebilecek rastgele değişimlerin taban izolasyonlu binaların dinamik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmış, (2) UBC (1997) yönetmeliğine göre sismik izolasyonlu yapılar için rastlantısal olarak ortaya çıkan izolasyon sistemi elemanları rijitliklerindeki farklılıklara bağlı olarak hesaplanan burulma büyütme katsayılarının güvenilirliği ortaya konulmuş, (3) doğrusal olmayan izolasyon sistemine sahip taban izolasyonlu binaların yakın-fay depremleri altındaki güvenilirlikleri, farklı deprem momenti büyüklüğü ve farklı fay mesafelerine bağlı olarak ortaya konulmuş ve (4) karakteristik kuvvet oranının (sönümün) yakın-fay depremleri etkisindeki söz konusu binaların güvenilirliklerini ne derece etkilediği incelenmiştir.

1.2. TEZİN GENEL YAPISI

Mevcut tez çalışması, esas olarak Genel Kısımlar, Malzeme ve Yöntem ile Bulgular bölümünden ibaret olup; Genel Kısımlar bölümünde, öncelikle sismik izolasyon teknolojisi ve sismik izolasyon uygulamalarında genel olarak kullanılan sismik izolatörler hakkında bilgilere; ardından tez çalışmasında kullanılan doğrusal olmayan kauçuk esaslı izolatörlerin mekanik karakteristikleriyle ilgili bilgilere, söz konusu mekanik

karakteristikleri etkileyen faktörlere ve bu mekanik karakteristiklerle ilgili olarak gerçekleştirilen parametrik ve olasılıksal çalışmalara ait bilgilere yer verilmiştir. Bu bölümde ayrıca, yakın-fay yer hareketlerinin özelliklerine, puls içeren yakın-fay yer hareketlerinin sentetik olarak modellenebilmesi için geliştirilen puls modellerine ve bu yer hareketlerinin sismik izolasyonlu yapılar üzerindeki etkilerini inceleyen parametrik ve olasılıksal çalışmalara ait bilgilere yer verilmiştir.

Tezin Malzeme ve Yöntem bölümünde ise sırasıyla, Monte Carlo Simülasyon Tekniği ile 3D-BASIS (Nagarajaiah vd, 1991a) programı hakkındaki bilgilere ve mevcut tez kapsamında 3D-BASIS programında gerçekleştirilen modifikasyonlara yer verilmiştir. Ardından, tez çalışmasında analiz edilen prototip yapıya ve tezin birinci ana bölümü kapsamındaki analizler için kullanılan tarihi yer hareketlerine ait bilgilere yer verilmiştir. Yine bu bölümde, tez çalışmasının birinci ana bölümü kapsamındaki dinamik analizlerde kullanılan referans izolasyon sistemleri ile üretilmiş izolasyon sistemlerinin elde edilişi ve söz konusu analizler için gerçekleştirilmesi gereken uygun Monte Carlo simülasyon sayısının tespit çalışması sunulmuştur. Bu bölümde son olarak, tez çalışmalarının ikinci ana bölümü kapsamında oluşturulan iki senaryo dahilindeki analizler için üretilen sentetik yakın-fay depremlerinin parametrelerine, bu depremlerin üretilme aşamasına, söz konusu senaryolar dahilinde analizi gerçekleştirilen izolasyon sistemlerinin üretilme aşamasına ve her iki senaryo için de ayrı ayrı olmak üzere gerçekleştirilen uygun Monte Carlo simülasyon sayısı tespit çalışmasına yer verilmiştir.

Tezin Bulgular bölümünde ise, tez çalışmasının birinci ana bölümünde elde edilen cevap parametrelerinin kümülatif dağılım fonksiyonu grafiklerine, bu parametrelere ait önemli yüzdelik değerlere, söz konusu yüzdelik değerlerin nominal değerlerden sapma yüzdelerine, pik izolatör deplasmanlarına göre hesaplanan burulma büyütme katsayılarıyla ilgili değerlendirmelere ve birinci ana bölümde elde edilen cevap parametrelerine göre incelenen sistemlerinin güvenilirlik analizleri ile duyarlılık analizleri sonuçlarına yer verilmiştir. Bulgular bölümünde ayrıca, mevcut tezin ikinci ana bölümü kapsamında gerçekleştirilen iki senaryo çalışması dahilindeki dinamik analiz sonuçları ile güvenilirlik analizleri sonuçlarına ve ayrıca, yine her iki senaryo için ayrı ayrı olmak üzere analizi gerçekleştirilen tüm sismik izolasyonlu binaların hem titreşime hassas cihazlar bazında performanslarının hem de yapısal bütünlüğünün birlikte incelendiği performans testlerine yer verilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölüm kapsamında, Bölüm 2.1'de sismik izolasyon teknolojisi hakkında genel bilgilere; Bölüm 2.2'de sismik izolasyon sistemi eleman türlerine ait genel bilgilere; Bölüm 2.3'de sismik izolasyon sistemi elemanlarının mekanik özelliklerine, bu özellikleri etkileyen faktörlere ve söz konusu özelliklerle ilgili literatürde mevcut olan çalışmalara ait bilgilere; Bölüm 2.4'de ise yakın-fay yer hareketleri hakkındaki genel bilgilere, bu yer hareketlerin sentetik olarak modellenmesine ve yakın-fay yer hareketlerinin sismik izolasyonlu yapılar üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalara yer verilmiştir.

2.1. SİSMİK İZOLASYON HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Klasik depreme dayanıklı tasarım metotları ile tasarlanmış betonarme veya çelik yapılar, deprem sırasında bu yapılara geçecek olan dinamik enerjiyi karşılamaları için düşük malzeme sönümlerine sahip olmaları, sabit dayanım ve enerji sönümleme kapasitelerine sahip olmaları, değişen çevresel etkilere değişkenlik gösterebilecek bir şekilde tasarlanmamaları ve bu yapıların tamamıyla rijitliklerine bağlı olarak yüklere karşı koymaları gibi nedenlerle sınırlı kapasiteye sahiptirler (Cheng ve diğ., 2008). Geleneksel yaklaşımdaki bu kısıtlamalar, araştırmacıları yapısal elamanları ve yapısal olmayanları rüzgâr, deprem vb. gibi kuvvetli dinamik dış etkilere karşı daha iyi koruyabilmek için mevcut klasik tasarım yöntemlerine alternatif yaklaşımları araştırmaya yönlendirmiştir (Aldemir ve Aydın, 2005). Kırk yılı aşkın bir süredir gerçekleşen bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu, bir taraftan konstrüksiyon maliyetlerini makul düzeyde korurken aynı zamanda yapıların sismik performansını yükseltebilecek yaratıcı depreme dayanıklı sistemleri geliştirmek üzerine yoğunlaşmış olup; söz konusu sistemlerin çoğu, ilave sönüm mekanizmaları ile deprem sırasında yapıya giren sismik enerjinin dağıtılması ve/veya izolasyon sistemleri vasıtasıyla yapının bu sismik enerjiden izole edilmesi prensiplerine dayanan (Christopoulos ve Filiatrault, 2006) "Yapısal Kontrol Sistemleri"dir. Deprem veya rüzgar gibi dinamik kuvvetler tarafından üretilen yapısal

titreşimlerin kontrolü, rijitlikleri, kütleleri, sönümü modifiye ederek veya pasif ya da aktif kuvvetler temin ederek yapılabilmekte (Housner ve diğ., 1997) olup; yapısal kontrol sistemleri, yapıya sönüm ilave etmektedir ve/veya yapının dinamik özelliklerini değiştirmektedir (Cheng ve diğ., 2008). Söz konusu sistemler, aktif, pasif, yarı-aktif ve hibrid kontrol sistemleri olmak üzere dört grupta toplanabilir (Alhan, 2003).

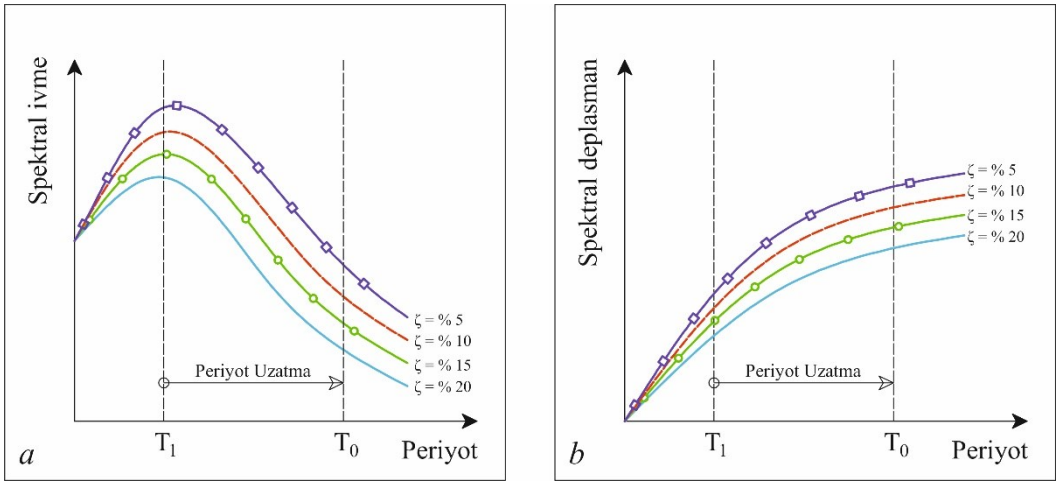
Aktif kontrol sistemleri, eş zamanlı işlem yapan sensörler, kontrol sistemleri, kontrol algoritmaları ve aktif kontrol kuvvet üreticisinden meydana gelen dinamik sistemlerdir (Spencer ve Soong, 1999; Chu ve diğ., 2002). Tipik olarak bir aktif kontrol sistemi, birbirine entegre üç bileşenden oluşmakta olup; bu üç bileşenden zemine ve yapıya yerleştirilen sensörler, hem dış uyarıları hem de yapısal cevap parametrelerini ölçerek, yapının mevcut durum bilgisini kontrol mekanizmalarına gönderirler. Kontrol sistemi algoritmasına göre gerekli olan kontrol kuvvetinin kontrol mekanizması tarafından hesaplanmasının ardından bu kuvvetler aktivatörler ile üretilerek, yapıya uygulanırlar (Christopoulos ve Filiatrault, 2006; Spencer ve Soong, 1999; Aldemir ve Aydın, 2005). Bu sistemlerde aktivatörler, kontrol kuvvetlerini üretebilmek ve düzgün çalışabilmek için sürekli, harici bir güç kaynağına ihtiyaç duyarlar (Alhan, 2003). Diğer taraftan, pasif kontrol sistemleri, kontrol kuvvetlerini üretmek için harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar (Housner ve diğ., 1997). Kontrol kuvvetlerinin üretilmesi için bu sistemleri, yapının hareketi yönlendirir (Cheng ve diğ., 2008). Ayrıca pasif kontrol sistemleri, yapısal değişikliklere ve değişken yükleme koşullarına uyarlanamazlar (Spencer ve Nagarajaiah, 2003). Yarı-aktif kontrol sistemleri ise, harici enerji ihtiyaçlarının tipik bir aktif kontrol sisteminden daha az olduğu bir aktif kontrol sistemi sınıfı olup; bu sistemleri çalıştırmak için bir pil gücü yeterlidir (Luca ve diğ., 2005). Bu kontrol sistemlerinde, bir aktif kontrol sisteminde olduğu gibi bir kontrol mekanizması ölçümleri izler ve bu ölçümlere göre yarı-aktif aygıtlara uygun komut sinyalini gönderir. Ayrıca, bu kontrol sistemlerinde, pasif kontrol sistemlerinde olduğu gibi kontrol kuvvetleri yapının kendi hareketinin bir sonucu olarak gelişir (Symans ve Constantinou, 1999). Son olarak hibrid kontrol sistemleri ise, aktif, pasif veya yarı-aktif kontrol sistemlerinin bir kombinasyonudur (Housner ve diğ., 1997).

Mevcut tez çalışmasına konu olan sismik izolasyon, yapının hakim periyodunu uzatmak suretiyle yapının hakim frekansını rezonans için tehlikeli bölgenin dışına çıkarmak ve

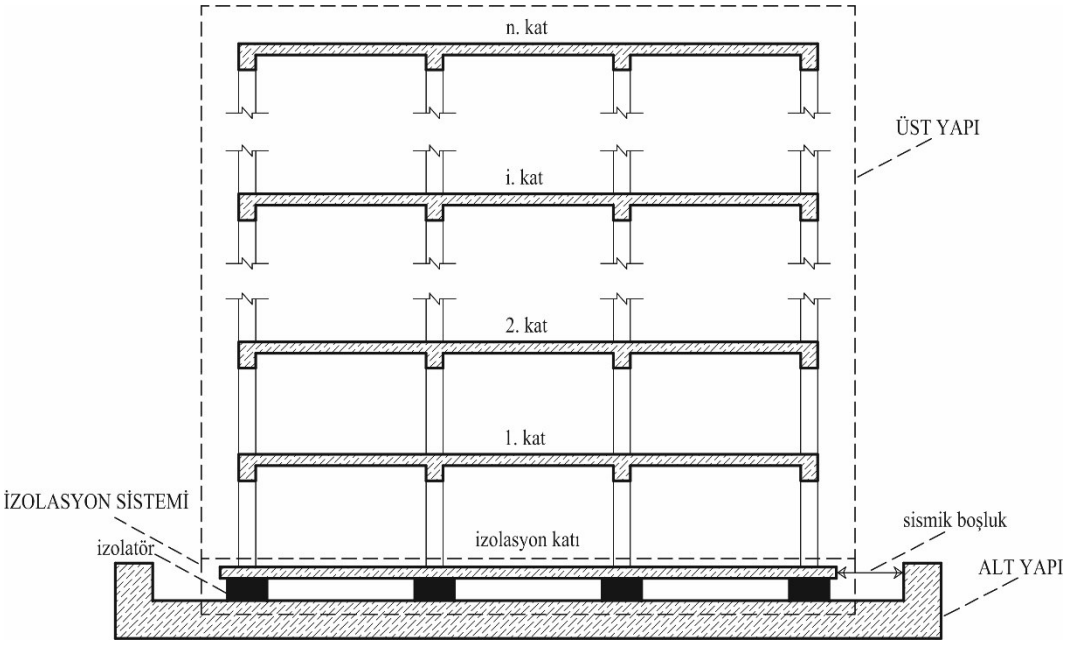
böylelikle depremden kaynaklanan atalet kuvvetlerini azaltmak prensibi üzerine kurulmuş (AASHTO, 2010; Gavin ve Alhan, 2003; Makris, 1997; Yamada ve Kobori, 2001) ve klasik depreme dayanıklı tasarım metotlarına alternatif bir "Pasif Yapısal Kontrol" yaklaşımıdır (Cheng ve diğ., 2008; Chen ve Scawthorn, 2002). Yapıların depreme dayanıklılık kapasitesinin arttırmayı amaçlayan çoğu geleneksel depreme dayanıklı tasarım metotlarının aksine sismik izolasyon, yapının depreme dayanıklılık kapasitesini arttırmak yerine deprem hareketlerinden kaynaklanan ve yapıya iletilecek olan sismik kuvvetleri azaltma prensibine dayanmaktadır (Komodromos, 2000; Naeim ve Kelly, 1999; Cheng ve diğ., 2008; Kelly, 2001). Bu teknoloji ile bir binanın hakim periyodunun uzatılması, binanın göreli kat ötelemelerinin ve kat ivmelerinin eş zamanlı olarak azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Söz konusu yapısal cevap parametrelerinin azaltılması ise, izolasyon sistemi üzerindeki üstyapının büyük depremlerde dahi elastik ya da yaklaşık elastik davranmasına ve iyi bir performans sergilemesine olanak tanımaktadır (Warn ve Ryan, 2012; Naeim ve Kelly, 1999). Sismik izolasyonun en önemli karakteristiği, izolasyon sisteminin yüksek yanal esnekliğine bağlı olarak tüm yapısal sistemin periyodunun uzatılması olup (Christopoulos ve Filiatrault, 2006); bu periyot uzatma işleminin etkileri ve ayrıca izolasyon sistemi elemanlarına bağlı olarak artan sönümün etkileri, sırasıyla Şekil 2.1 (a) ve (b)'de verilen ivme spektrumu ve deplasman spektrumu eğrileri üzerinde daha açık bir şekilde görülebilir. Bu şekillerde; T_1, taban - ankastre yapı 1. mod periyodunu ve T_0 ise, izolasyonlu yapı hedef periyodunu göstermektedir.

Sismik izolasyon sistemi, çoğu uygulamada yapının tabanına yerleştirilir ve bu nedenle "taban izolasyonu" olarak da adlandırılır (Komodromos, 2000; Kelly 2001). "İzolatör" adı verilen, düşük yatay rijitlik, yüksek düşey rijitlik ve yatay fleksibilite ile enerji sönümleme kapasitelerine sahip yapısal elemanlardan oluşan izolasyon sistemi, taban izolasyonu uygulamalarında yapı ve temeli arasına yerleştirilmek suretiyle yer hareketinin yatay bileşenlerinden yapıyı ayrıklaştırır, yer hareketinin yüksek frekans içeriğini filtreler ve böylece yapı, eşlenik taban-ankastre yapıdan ve tipik bir depremin hakim frekansından daha düşük bir hakim frekansa sahip olur (Naeim ve Kelly, 1999; Nagarajaiah ve diğ., 1989; Cheng ve diğ., 2008). İzolasyon sistemi sayesinde yer değiştirme ve enerji sönümleme talepleri ile doğrusal olmayan davranış izolasyon sistemi seviyesinde toplanır ve temelden yapıya transfer edilen hareketler sınırlanarak, depremin

yapı üzerindeki talebi modifiye edilebilir (Kelly, 2001; Nagarajaiah ve diğ., 1991b). Sismik izolasyon sistemine sahip binaların üç ana bölümden oluştuğu varsayılabilir olup; Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, bunlar: izolasyon katı ve izolasyon elemanlarından oluşan "izolasyon sistemi", izolasyon sistemi üzerinde yer alan "üst yapı" ve izolasyon sistemi altında kalan diğer elemanlar ile temelden oluşan "alt yapı"dır (FEMA 273, 1997).



Şekil 2.1: İzolasyon sisteminin yapısal periyodu arttırmasının (a) Spektral ivmeler ve (b) Spektral deplasmanlar üzerindeki etkileri (Skinner ve diğ., 1993'ten adapte edilmiştir.).



Şekil 2.2: n katlı tipik bir sismik izolasyonlu binanın kesit görünüşü (Alhan ve Sürmeli, 2011'den adapte edilmiştir.).

Sismik izolasyon, genellikle düşük ve orta yükseklikli binalar (Nagarajaiah ve diğ., 1991b; Cheng ve diğ., 2008) ve doğal periyodu 1 s'den az kısa periyotlu yapılar için en uygun (Kelly, 2001) olup; hem yeni hem de eski yapılara uygulanabilir. Bu yöntemin çok büyük bir avantajı, yer ivmesi büyültmelerinden kaçınılmasıdır. Ayrıca, binalarda üstyapının deformasyonu, ilk moda ortogonal olan yüksek modlardan kaynaklanmakta olup; sismik izolasyonlu bir yapıda, büyük ölçüde izolasyon sistemi seviyesinde gerçekleşen deformasyonlar, hakim mod yani ilk mod etkisiyle gerçekleşir ve ilk mod yüksek modlara karşılık gelen enerjinin yapıya iletilmesine izin vermez. Böylece, üstyapı büyük depremlerde dahi elastik ya da yaklaşık elastik ve rijit bir davranış sergiler (Komodromos, 2000).

Sismik izolasyon teknolojisi, tüm yapıyı izole etmek yerine yapının sadece bir parçasını ya da değerli eşyalarını yahut da önemli bir tesis içerisinde bulunan önemli ve pahalı ekipmanları izole etmek için de kullanılabilir (FEMA 273, 1997; Komodromos, 2000). Ayrıca, deprem kuvvetlerine karşı düzgün bir şekilde tasarlanmamış, narin ve güçsüz yığma binalar veya eski yönetmeliklere göre tasarlanmış betonarme binalar gibi mevcut yapıların güçlendirilmesinde de kullanılabilir olup (Chopra, 1995); özellikle hastaneler, acil operasyon merkezleri, önemli teçhizatların bulunduğu binalar ve hassas eşyaların bulunduğu tarihi binalar gibi önemli binalarda (Wolff ve Constantiou, 2004); deprem sırasında ve sonrasında kullanılabilir kalması gereken kamu binalarında, karayolu köprüleri gibi altyapı tesislerinde, içerisinde değerli sergiler bulunduran müzelerde, içinde bulunanların hasara uğraması ya da kullanım dışı kalmasının ekonomiye büyük zarar vereceği ileri teknoloji, endüstri ve telekomünikasyon merkezlerinde de sismik izolasyon tercih edilmektedir (Komodromos, 2000).

2.2. SİSMİK İZOLATÖRLER

İzolasyon sistemi, izolatörler ve izolasyon sistemi elemanları arasında yük transferini sağlayan tüm yapısal elemanlar ile diğer yapısal elemanlarla olan bağlantı noktalarından oluşan bir yapısal elemanlar bütünüdür. Bu elemanlardan izolatörler, Bölüm 2.1'de de belirtildiği üzere; izolasyon sisteminin deprem yükleri altında büyük yanal deformasyon kapasitesine sahip, yatay doğrultuda esnek, düşey doğrultuda ise rijit olan yapısal elemanlardır (UBC, 1997; ASCE/SEI 7-05, 2006). Sismik izolasyonlu yapılarda kullanılan izolatörler, genel olarak (1) kauçuk esaslı sismik izolatörler ve (2) kayıcı sismik

izolatörler olmak üzere iki ana sınıf altında gruplandırılmakta (Kelly, 1997; Naeim ve Kelly, 1999; Chen ve Scawthorn, 2002) olup; bu izolatör sınıfları hakkındaki bilgiler, kauçuk esaslı sismik izolatörler için Bölüm 2.2.1'de; kayıcı sismik izolatörler için ise Bölüm 2.2.2'de verilmiştir.

2.2.1. Kauçuk Esaslı Sismik İzolatörler

Kauçuk esaslı sismik izolatörler, kauçuk tabakalar ve çelik levhalardan oluşmaktadır (Nagarajaiah ve diğ., 1991b). Bu tip izolatörler, orijinal olarak sadece doğal kauçuk kullanılarak yapılmış olup; daha sonra çelik plakalar eklenmek suretiyle düşey rijitlikleri, arttırılmıştır (Cheng ve diğ., 2008). Söz konusu kauçuk ve çelik plakalar, yüksek basınç ve ısı altında, vulkanizasyon adı verilen bir işlem vasıtasıyla (Christopoulos ve Filiatrault, 2006) tabakalar halinde biraya getirilirler. Çelik plakalar, kauçuk plakaların yanal doğrultuda şişmesini engellerler ve böylece izolatörler, yüksek miktarlardaki düşey kuvvetleri, küçük deformasyonlar ile karşılayabilirler (Kelly, 2001). Bu tip izolatörlerin yanal fleksibilitesi ise, çelik plakalara bağlantısı yanal deformasyonu engellenecek şekilde yapılmamış olan kauçuk plakaların kayma deformasyonu tarafından sağlanır (Komodromos, 2000). Yüksek basınç rijitliği ve düşük kayma riijitliği, bu izolatörlerin titreşim takozları, ani ve yüksek sarsıntı sönümleyicileri, köprü mesnetleri veya binalarda taban izolatörleri olarak kullanılmasına olanak sağlar (Simo ve Kelly, 1984). Günümüzde en yaygın olarak kullanılan kauçuk esaslı sismik izolatörler: (1) Düşük Sönümlü Kauçuk İzolatörler (Low Damping Rubber Bearings: LDRB), (2) Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatörler (High Damping Rubber Bearings: HDRB) ve (3) Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlerdir (Lead Rubber Bearings: LRB) (Pan ve diğ., 2005).

2.2.1.1. Düşük Sönümlü Kauçuk İzolatörler (LDRB)

Bu tip izolatörlerde çelik plakalarla birlikte kullanılan kauçuk, doğal kauçuk (FEMA 274, 1997) olup; eşdeğer sönüm oranı, %100 kayma deformasyonu seviyesinde %2~%3 aralığında değişmektedir (Warn ve Ryan, 2012). Doğal kauçuğun sönümünün düşük olması sebebiyle, LDRB tipi izolatörlerin servis yüklerine karşı dayanımları düşüktür ve yüksek yanal deplasmanları kontrol edebilmek amacıyla bu izolatörlerin bulunduğu sistemlerde ilave sönüm aygıtlarına ihtiyaç duyulur (Cheng ve diğ., 2008; Chopra, 1995). Bu nedenle söz konusu izolatörler, genellikle viskoz sönümleyiciler, çelik çubuklar, kurşun çubuklar ve sürtünme aygıtları gibi ilave sönüm aygıtlarıyla birlikte kullanılırlar

(Naeim ve Kelly, 1999). Bu izolatörler ayrıca, yüksek kayma deformasyonu seviyelerine kadar lineer - elastik ve lineer - viskoz davranış sergilerler (FEMA 274, 1997). Bu elemanların avantajları, modellemelerinin ve üretimlerinin basit olması ve ayrıca, mekanik özelliklerinin çevre koşullarından az etkilenmesi olup; ilave sönüm elemanlarına ihtiyaç duymaları, tek dezavantajlarıdır (Aldemir ve Aydın, 2005).

2.2.1.2. Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatörler (HDRB)

HDRB izolatörler de LDRB izolatörlerde olduğu gibi, çelik ve kauçuk plakalardan meydana gelmektedir. Ancak, HDRB izolatörler LDRB izolatörlere göre yüksek esneklik ve sönüm özelliklerine sahiptirler (Dezfuli ve Alam, 2014). Çünkü, HDRB izolatörlerde doğal kauçuğun sönüm özellikleri, karbon-bloklar, yağ, reçine ve diğer dolgu malzemelerini eklemek suretiyle iyileştirilmiş ve sönüm oranı, %100 kayma deformasyonu seviyelerinde %10~%20 aralığında olacak şekilde yükseltilmiştir (Naeim ve Kelly, 1999). Yüksek sönümlü kauçuğun kayma rijitliği, düşük deformasyon seviyelerinde yüksektir; fakat deformasyonun artması halinde düşer ve %50 kayma deformasyonu seviyelerinde minimum değerine ulaşır. %100 kayma deformasyonu seviyelerinde ise, kayma rijitliği tekrar artışa geçer (Nagarajaiah ve diğ., 1991b). Söz konusu izolatörlerin imalatında yüksek sönümlü doğal kauçuğun kullanılması nedeniyle ilave enerji sönümleme aygıtlarına ihtiyaç duyulmaz (Burtscher ve Dorfmann, 2004); bu nedenle, HDRB tipi izolatörler en ekonomik ve en etkili izolatör çeşitlerinden biridir (Tsai ve diğ, 2003).

2.2.1.3. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler (LRB)

Bu izolatörler ya da diğer adıyla "Yeni Zelanda İzolatörleri" (Datta, 2010) tipik olarak merkezinde bir kurşun çekirdek bulunan düşük sönümlü kauçuk bir izolatörden oluşmaktadır (Constantinou ve diğ., 2007). Kurşun çekirdek, büyük yanal yükler altında histeretik enerji sönümleme kapasitesi sağlamakta (Kelly, 2001) olup; ayrıca, düşük ölçekli deprem ve kuvvetli rüzgar yüklerine karşı başlangıç rijitliği sağlamaktadır (Jangid, 2007). Düşük yanal yükler altında hem yatay doğrultuda hem de düşey doğrultuda rijit olan kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerdeki kurşun çekirdek yüksek yatay yük seviyelerinde akma seviyesine ulaşır ve bu nedenle izolatörün yanal rijitliğinde önemli düşüş gözlenir. İzolatörün yüksek deformasyon seviyelerinde çevrimsel yüklemeye maruz kalması halinde; enerji, kurşun çekirdeğin plastik deformasyonu ile

absorbe edilir. Bu özellikler, LRB izolatörlerin en yaygın kullanılan izolatörler olmasını sağlamakta olup (Kelly, 2001); bu izolatörler, özellikle Yeni Zelanda'da yaygın bir şekilde olmak üzere, Japonya ve Avrupa'da birçok binada kullanılmıştır (Tan ve Huang, 2000).

2.2.2. Kayıcı İzolatörler

Kayıcı izolatörler, kayıcı ara yüzeyler ve bu yüzeyler arasındaki teması sağlamak için gerekli olan hareketli bir elemandan oluşurlar (Constantinou ve diğ., 2007). Bu tip izolatörlerde düz ya da eğrisel ara yüzeyler kullanılır (AASHTO, 2010). Bu nedenle kayıcı izolatörler, tipik olarak "düz yüzeyli kayıcı izolatörler" ve "eğrisel yüzeyli kayıcı izolatörler" olmak üzere (Lee ve diğ., 2008) iki gruba ayrılırlar. Kayıcı ara yüzeylerde izolatör malzemesi olarak da çoğu kayıcı izolatörde paslanmaz çelik ve politetrafloroetilen (PTFE) ya da benzeri bir malzeme kullanılır (Warn ve Ryan, 2012). Maruz kalınan enerji, bu tip izolatörlerde kayıcı ara yüzeylerde meydana gelen sürtünme kuvvetleri ile karşılanır (Berton ve diğ., 2007).

2.2.2.1. Düz Yüzeyli Kayıcı İzolatörler

Düz yüzeyli kayıcı izolatörler, kayıcı izolatörlerin en basit formudurlar (İsmail ve diğ., 2009) Bu tip izolatörlerde yapısal sistem üzerine etkiyen yanal yük, sürtünme katsayısı ve izolatörler üzerine etkiyen düşey yükün çarpımı kadar bir reaksiyon kuvvet ile karşılanır (Cheng ve diğ., 2008) ve yapıya aktarılacak toplam taban kesme kuvveti, bu reaksiyon kuvveti ile sınırlıdır (Kelly, 2001). Çünkü reaksiyon kuvveti aşılması halinde kayma gerçekleşir ve üstyapıya olan kesme kuvvetlerinin aktarımı engellenir. Böylelikle de söz konusu kesme kuvvetleri, depremin büyüklüğünden bağımsız hale gelir (Komodromos, 2000). Bu duruma uygun olarak, düz yüzeyli kayıcı izolatörlerin çevrimsel yanal yükler altındaki kuvvet-deplasman eğrileri, elastik-mükemmel plastik histerezis eğrileri şeklinde olup; yapısal sisteme uygulanan yükün yukarıda belirtilen reaksiyon kuvvetini aşması halinde, bu eğrilerde hiçbir pekleşme gerçekleşmez (Kelly, 2001). Fakat, diğer taraftan bu tip izolatörlerde geri çağırıcı kuvvet mekanizmasının olmaması, izolatör deplasmanlarında önemli değişimlere sebep olabilir ve yapısal sistemde kalıcı deplasmanlar oluşabilir (FEMA 274, 1997) ve bu durum düz yüzeyli kayıcı izolatörler için büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır (Cheng ve diğ., 2008).

2.2.2.2. Eğrisel Yüzeyli Kayıcı İzolatörler

Düz yüzeyli kayıcı izolatörlerde meydana gelebilecek büyük yer değiştirmeleri önlemek amacıyla çeşitli geri çağırma mekanizmaları geliştirilmiş ve bu mekanizmaların bulunduğu "Resilient-Friction Base Isolator" (R-FBI), "TASS System", "Earthquake Barrier System" ve "Friction Pendulum System" (FPS) gibi çeşitli kayıcı izolasyon sistemleri önerilmiştir (Nagarajaiah ve diğ., 1989; Jangid, 2000). Önerilen diğer kayıcı izolasyon sistemlerinde geri çağırma mekanizmaları, kauçuk bloklar, kauçuk çekirdekler veya helisel yaylar gibi yardımcı elemanlarla sağlanırken (Nagarajaiah ve diğ., 1989), eğrisel yüzeyli kayıcı izolatörler olan "sürtünmeli sarkaç sistemler" (Friction Pendulum Systems: FPS) kendi kendilerini merkezleyebilme özelliğine sahiptirler (Ray ve diğ., 2013; Berton ve diğ., 2006). FPS izolatörleri, paslanmaz çelikten oluşan eğrisel yüzey üzerinde hareket eden mafsallı bir kayıcıdan oluşmakta olup; söz konusu geri çağırma kuvvetlerini eğrisel yüzeyin geometrisi ile sağlamakta ve kayma hareketi ile birleştirmektedir (Naeim ve Kelly, 1999). FPS tipi izolatörlerin çalışma mekanizması, sarkaç hareketi esasına dayanmakta ve bu tip izolatörler üzerine mesnetli bir yapı, yer hareketlerine düşük genlikli sarkaç hareketleri ile tepki göstermektedir (Komodromos, 2000; Jangid ve Datta, 1995). Bu tip izolatörlerin kullanıldığı yapısal sistemlerde izolasyon, mafsallı kayıcının eğrisel yüzey üzerindeki kayma hareketi ile; enerji dağılımı ise, paslanmaz çelik ile mafsallı kayıcı arasındaki sürtünme ile sağlanmaktadır (Constantinou ve diğ., 2007). FPS izolatörlerinin kuvvet-deplasman davranışı, kayıcı ara yüzeylerdeki sürtünme katsayısı, izolatör üzerindeki düşey yük ve eğrisel yüzeyin yarıçapına bağlı olup; sabit düşey yük ve sürtünme katsayısı için yatay doğrultuda bir FPS izolatörün kuvvet-deplasman ilişkisi ise, ikili-doğrusal model ile ifade edilebilmektedir (Kumar ve diğ., 2014).

2.3. SİSMİK İZOLATÖRLERİN MEKANİK KARAKTERİSTİKLERİ

Sismik izolayonlu yapıların doğrusal olmayan davranışı, yapının taşıyıcı sistemi ve izolasyon sisteminin inelastik deformasyonundan kaynaklanmaktadır. Ancak, yapının taşıyıcı sistemi izolasyon sisteminden daha rijittir. Bu nedenle, söz konusu inelastik deformasyon ağırlıklı olarak izolasyon sisteminde yoğunlaşır ve yapının taşıyıcı sistemlerinin neredeyse elastik sınırlar içerisinde kaldığı ve doğrusal davranış sergilediği varsayılabilir. Bu nedenle, sadece izolasyon sisteminin doğrusal olmayan davranışını göz

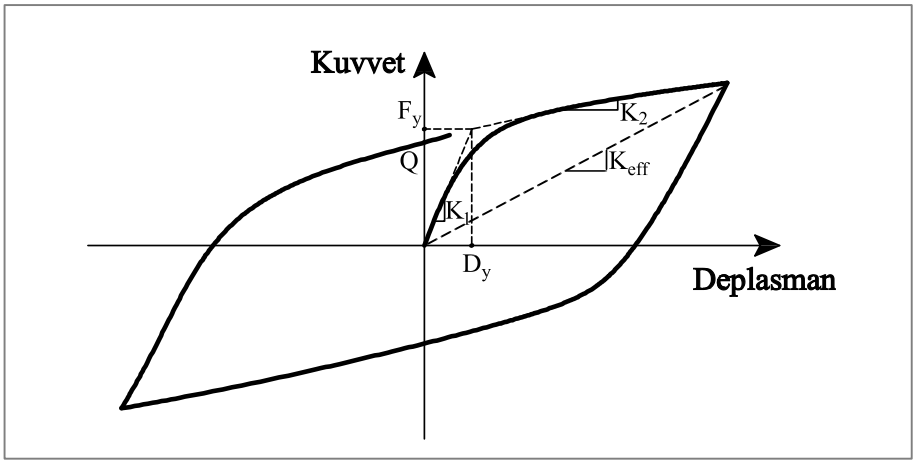
önünde bulundurularak; sismik izolasyonlu yapıların gerçek performansı yeterli doğrulukta yansıtılabilir (Cheng ve diğ., 2008).

Çeşitli izolatör tiplerinin mekanik özellikleri, yoğun bir şekilde araştırılmış ve literatürde bu inelastik yapısal elemanların kuvvet-deformasyon ilişkilerini karakterize etmek için birtakım modeller önerilmiştir. Söz konusu elemanların kuvvet-deformasyon ilişkilerini karakterize etmek için önerilen iki belirgin model tipi: Ramberg-Osgood modeli (Ramberg ve Osgoood, 1943), ikili-doğrusal ve elasto-plastik modeller gibi cebirsel denklemlerle tanımlanan modeller ile Wen modeli (Wen, 1976) gibi diferansiyel denklemlerle tanımlanan modellerdir (Nagarajaiah, 1989). Önerilen söz konusu modellerden ikili-doğrusal model, doğrusal olmayan izolatör davranışını basit ve gerçekçi bir şekilde karakterize edebilmesi sebebiyle çoğu araştırmacı tarafından gerçekleştirilen araştırmalar için ve yine çoğu mühendis tarafından da tasarım uygulamaları için kullanılmakta olup; büyük ölçüde benimsenmiştir. Çünkü bu modelin basitliği sadece söz konusu izolatörlerin mekanik özelliklerini gerçeğe yakın bir şekilde karakterize etmekle kalmaz; aynı zamanda hem kauçuk esaslı izolatörlere hem de kayıcı izolatörlere de uymaktadır (Cheng ve diğ., 2008; Naeim ve Kelly, 1999). Doğrusal olmayan izolasyon sistemlerinin kuvvet-deformasyon ilişkilerini karakterize edebilmek için ikili-doğrusal modeli kullanan çok sayıda çalışma mevcuttur (Tena-Colunga ve Escamilla-Cruz, 2007; Alhan ve Şahin, 2011; Matsagar ve Jangid, 2004).

Kesme kuvveti ve yatay deplasman arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılan ikili-doğrusal model, iki kol ile idealize edilmekte olup; akma öncesi rijitlik (K_1), akma sonrası rijitlik (K_2) ve karakteristik kuvvet (Q) olmak üzere üç karakteristik parametre ile tanımlanabilmektedir. Bunlardan akma öncesi rijitlik (K_1) ve akma sonrası rijitlik (K_2), söz konusu kolların eğimleridir. Doğrusal olmayan izolatörlerin histeretik kuvvet-deplasman ilişkisini modellemek için kullanılan idealize edilmiş yumuşak ikili-doğrusal (smooth bilinear) model, Şekil 2.3'de görüldüğü gibidir. Bu şekil üzerinde söz konusu izolatörlerin karakteristik parametreleri de görülmektedir.

Sismik izolasyonlu bir yapının rijit kütle modu periyodu (T_0), Denklem (2.1)'deki gibi tanımlanmak üzere; izolasyon sistemi akma sonrası rijitlikler toplamı ($K_{2,s}$) ve bir izolatöre ait akma sonrası rijitliği (K_2) Denklem (2.2)'deki gibi hesaplanır. Bu

denklemlerde W bina ağırlığını, g yer çekimi ivmesini, M_{bina} bina kütlesini, N_B ise izolatör sayısını göstermektedir.



Şekil 2.3: İdealize edilmiş yumuşak ikili-doğrusal (smooth bilinear) histeretik kuvvet – deplasman ilişkisi (FEMA 274, 1997; Tsopelas ve diğ., 1994).

$$T_0 = 2\pi \left(\frac{W}{K_{2,s} g} \right)^{1/2} \tag{2.1}$$

$$K_{2,s} = \frac{4\pi^2 M_{bina}}{T_0^{\,2}} \quad \Rightarrow \quad K_2 = \frac{K_{2,s}}{N_B} \tag{2.2}$$

İzolatörün akma sonrası rijitliğinin akma öncesi rijitliğine oranı (Denklem (2.3)) ise, rijitlikler oranı (α) olarak tanımlanmaktadır.

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} \tag{2.3}$$

İzolasyon sistemi toplam karakteristik kuvveti (Q_s) ise, Denklem (2.4)'deki gibi bina ağırlığının κ katı olarak tanımlanmakta olup; bu oran tipik olarak %5 mertebelerinde değerler almaktadır. Bir izolatörün karakteristik kuvveti (Q) ise yine Denklem (2.4)'de görüldüğü gibi, izolasyon sistemi toplam karakteristik kuvvet dayanımının N_B izolatör sayısına bölünmesiyle elde edilir.

$$Q_s = \kappa W \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{Q_s}{N_B} \tag{2.4}$$

İzolatörde akma başlangıcına karşılık gelen D_y akma deplasmanı ise, Q, K_1 ve K_2 parametreleri cinsinden Denklem (2.5)'deki gibi elde edilir. Akma deplasmanına karşılık gelen akma kuvveti F_y ise, K_1 ve D_y cinsinden Denklem (2.6) ile hesaplanır.

$$D_y = \frac{Q}{(K_1 - K_2)} \tag{2.5}$$

$$F_y = K_1 D_y \tag{2.6}$$

Doğrusal olmayan izolasyon sistemlerinin eşdeğer doğrusal olarak modellenmesi halinde kullanılmak üzere efektif rijitlik (K_{eff}) ve efektif viskoz sönüm oranı (β_{eff}) ise, sırasıyla Denklem (2.7) ve (2.8) ile tanımlanır (Matsagar ve Jangid, 2004). Bu denklemlerde D, tasarım deplasmanı olup; doğrusal olmayan izolatörün maruz kaldığı yer hareketi altındaki maksimum deplasmanına eşittir.

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \tag{2.7}$$

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \tag{2.8}$$

Efektif rijitliğe bağlı olarak izolasyon sisteminin efektif titreşim periyodu T_{eff} ve efektif viskoz sönüm katsayısı C_{eff} ise, sırasıyla Denklem (2.9) ve (2.10) ile hesaplanır. Denklem (2.10)'daki ω_{eff} ise, efektif açısal frekans olup; T_{eff} ile aralarındaki ilişki, Denklem (2.11) 'deki gibidir.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{bina}}{K_{eff}}} \tag{2.9}$$

$$C_{eff} = 2M_{bina}\omega_{eff}\beta_{eff} \tag{2.10}$$

$$\omega_{eff} = \frac{2\pi}{T_{eff}} \tag{2.11}$$

2.3.1. Mekanik Karakteristikleri Etkileyen Faktörler

Sismik izolasyon tasarım uygulamalarında, ön tasarım aşamasında gerçekleştirilen statik ve dinamik analiz prosedürlerinde kullanılan izolasyon sistemi mekanik karakteristiklerinin prototip testleriyle verifikasyonunun gerçekleştirilmesi

gerekmektedir (Cheng ve diğ., 2008). Ön tasarım aşamasının tamamlanmasının ardından söz konusu prototip testlerinin uygulanabilmesi amacıyla projede kullanılacak her tip ve büyüklükteki izolatörleri temsilen iki tam ölçekli izolatör üretilir (Naeim ve Kelly, 1999). Söz konusu prototip testleriyle ilgili hükümler ASCE/SEI 7-05 (2006) Kısım 17.8'da ve UBC (1997) Kısım 1665'de tanımlanmış olup; yoğun bir prototip testleri programının ardından bu testler neticesinde tasarım deplasmanı seviyesindeki maksimum ve minimum efektif rijitlikler ile maksimum deplasman seviyesindeki maksimum ve minimum efektif rijitlikler ve ayrıca, yine tasarım ve maksimum deplasmanı seviyelerindeki efektif sönüm oranları hesaplanır (ASCE/SEI 7-05, 2006; UBC, 1997). Bu testlerin yanı sıra, tüm izolatörlere üretim testleri uygulanarak, test sonuçlarının ön tasarım aşamasında belirlenen sınırlar içerisinde olup olmadığı kontrol edilir (Cheng ve diğ., 2008). Ancak yine de malzeme özelliklerindeki, eleman boyutlarındaki, üretim metotlarındaki ya da kalite kontroldeki belirsizlikler ile kurulum sırasındaki hatalar nedeniyle bir izolatörün gerçek mekanik parametreleri, tasarıma esas olacak şekilde testlerden elde edilen nominal değerlerinden farklılıklar gösterebilir. Ayrıca, izolatörlerin karakteristik parametrelerinin değerleri yaşlanma, sıcaklık değişimi, gerilme-yumuşaması (scragging), aşınma, kontaminasyon ve yükleme geçmişi gibi nedenlerle servis ömrü süresince zaman içerisinde de değişebilir (Cheng ve diğ., 2008; Hirata ve diğ, 1989; De la Llera ve Inaudi, 1994; Constantinou ve diğ., 1999; Thompson ve diğ., 2000; Shenton III ve Holloway, 2000, AASHTO, 2010). Bu olası değişimler ve belirsizlikler nedeniyle, izolatör parametrelerinin sismik yüklere maruz kaldığı andaki gerçek durumları kesin olarak bilinemeyebilir. Söz konusu parametrelerdeki değişim ise, hem altyapı hem de üstyapının dinamik cevap parametrelerinde değişikliklere yol açabilir ve hatta tasarıma esas kuvvetler ve deplasmanlar geçerliliğini yitirebilir.

Japonya'daki taban izolasyonu uygulamalarının istatiksel verilerle desteklenerek incelendiği Pan ve diğ., (2002) çalışmasında belirtildiği üzere; LDRB tipi izolatörlerin düşey ve yatay rijitliklerinin, yaşlanma, düşey gerilme, kayma deformasyonu, sıcaklık, yük geçmişi, yükleme çevrimlerinin frekansına bağlı olarak değişimi %10 mertebelerinde olup; üretici firma kataloglarında genellikle yatay özellikler için %20'ye varan, düşey özellikler için ise %10'a varan değişimler olabileceği rapor edilmektedir. Diğer taraftan HDRB tipi izolatörlerin düşey ve yatay rijitlikleri ile eşdeğer sönüm katsayısının yukarıda belirtilen faktörlere göre değişiminin ise, LDRB tipi izolatörlere göre daha yüksek olup,

%20~%25 mertebelerinde olduğu belirtilmektedir. LRB tipi izolatörlerin mekanik parametrelerindeki değişimin ise, %20 mertebelerine kadar çıkabildiği belirtilmektedir. Buna karşılık, tasarımcıların ise, söz konusu faktörlere bağlı olarak izolatör rijitlikleri ve akma dayanımı için genellikle alt ve üst olmak üzere iki limit göz önünde bulundurmakta olduğu; söz konusu limitlerin izolatör rijitliği için ±%10 ve ±%25 aralığında, akma dayanımı için ise ±%10 ve ±%15 aralığında değiştiğinin varsayıldığı belirtilmektedir (Pan ve diğ., 2005).

ASCE/SEI 7-05 (2006) Madde 17.2.4.1 ve UBC (1997) Madde 1661.2.1'de ise, izolasyon sistemlerinin rüzgar ve deprem yüklerinden kaynaklanan düşey ve yatay yükleri karşılamalarının yanı sıra; yaşlanma, sünme, yorulma, operasyon ısısı, rutubete maruz kalma gibi çevresel koşulları da göz önünde bulundurarak tasarlanmaları gerektiği belirtilmektedir. AASHTO (2010)'da ise, kayıcı izolatörler ve kauçuk izolatörler için ayrı ayrı olmak üzere birçok faktörün izolatör karakteristik parametreleri üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurmak üzere modifikasyon katsayıları (property modification factors) sunulmuştur. Söz konusu modifikasyon katsayıları, kayıcı izolatörler için yaşlanma, sıcaklık değişimi, kontaminasyon ve aşınma faktörleri için tanımlanırken; kauçuk esaslı izolatörler için ise, yaşlanma, sıcaklık değişimi ve gerilme-yumuşaması (scragging) faktörleri için tanımlanmıştır. Constantinou ve diğ. (1999, 2007) ile Warn ve Whittaker (2006) çalışmalarından temin edilen bu katsayılar, her bir faktör tipi için maksimum ($MF_{\max,f}$) ve minimum ($MF_{\min,f}$) olarak ayrı ayrı tanımlanmıştır. Yukarıda belirtilen çeşitli faktörlerin izolatör karakteristik parametreleri üzerindeki etkisini, söz konusu modifikasyon katsayıları ile göz önünde bulunduran "sistem özellikleri modifikasyonu konsepti"ne (Constantinou ve diğ., 1999) göre, öncelikle farklı faktörlerin aynı anda etkime durumu gözetilerek, tüm faktörlere ilişkin modifikasyon katsayılarının Denklem (2.12)'deki gibi çarpılmasıyla $MF_{\max}$ ve $MF_{\min}$ katsayıları elde edilmekte ve ardından izolatör karakteristik parametreleri için testlerden elde edilen nominal değerler (IP_{nom}), Denklem (2.13)'deki gibi bu MF_{max} veya MF_{min} katsayıları ile çarpılarak, göz önünde bulundurulan karakteristik parametre için sırasıyla maksimum (IP_{max}) ve minimum (IP_{min}) sınır değerleri elde edilmektedir. Ancak, tasarım depremi seviyesinde düşük sıcaklık, maksimum yaşlanma veya maksimum aşınma gibi faktörlerinin hepsinin aynı anda gerçekleşme olasılığının düşük olması sebebiyle; modifikasyon katsayıları, [0, 1]

aralığında değerler alan düzeltme katsayıları (*dk*) ile Denklem (2.14)'deki gibi çarpılarak düzeltilmektedir.

$$MF_{\max} = MF_{\max,f1}.MF_{\max,f2}.MF_{\max,f3}.... \qquad MF_{\min} = MF_{\min,f1}.MF_{\min,f2}.MF_{\min,f3}.... \quad (2.12)$$

$$IP_{\max} = MF_{\max} \times IP_{nom} \qquad IP_{\min} = MF_{\min} \times IP_{nom} \quad (2.13)$$

$$MF_{\max,\text{düzeltilmiş}} = 1 + (MF_{\max} - 1).dk \qquad MF_{\min,\text{düzeltilmiş}} = 1 + (1 - MF_{\min}).dk \quad (2.14)$$

Denklem (2.12)'deki $MF_{\max,fi}$ (i = 1, 2,…) modifikasyon katsayıları, yukarıda da belirtildiği üzere; kauçuk esaslı izolatörler için yaşlanma, sıcaklık değişimi ve gerilme-yumuşaması (scragging) faktörleri, kayıcı izolatörler için ise yaşlanma, sıcaklık değişimi, kontaminasyon ve aşınma faktörleri için tanımlanmıştır (AASHTO, 2010). Mevcut tez kapsamında incelenen izolasyon sistemlerinin doğrusal olmayan kauçuk esaslı izolatörlerden oluşması sebebiyle, bu bölümde sadece kauçuk esaslı izolatörlerin mekanik karakteristiklerini etkileyen faktörlere ve bu faktörlerle ilgili modifikasyon katsayılarına yer verilmiş olup; söz konusu faktörler ile ilgili detaylı bilgilere, Bölüm 2.3.1.1, 2.3.1.2 ve 2.3.1.3'de yer verilmiştir.

2.3.1.1. Yaşlanma Faktörü

Yaşlanma (aging) faktörü, sismik izolatörlerin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilmekte olup (Constantinou ve diğ., 2007); bu faktör, kauçuk esaslı izolatörlerin akma sonrası rijitliği ve karakteristik kuvvet parametrelerinin her ikisinin de artmasına sebep olur (Constantinou ve diğ., 1999) iken, sönüm oranının azalmasına sebep olmaktadır (Russo ve diğ., 2013). Kauçuk esaslı izolatörlerin mekanik parametrelerinde yaşlanmaya bağlı olarak meydana gelen uzun-dönem etkileri, kauçuğun devam eden vulkanizasyonundan kaynaklanan pekleşmesinden ve ayrıca, kauçuğun ozon ve oksijene maruz kalma nedeniyle bozulmasından kaynaklanabilmektedir (Thompson ve diğ., 2000). Kauçuğun zaman içerisinde devam eden vulkanizasyonu nedeniyle gerçekleşen söz konusu rijitleşme veya pekleşmesi ise, efektif kayma modülünde artışa sebep olabilmektedir. Efektif kayma modülündeki bu artışın yüzdesi ise, başlangıç vulkanizasyonun tamamlanması ve sıcaklık değişimi gibi birtakım faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Morgan ve diğ., 2001). Constantinou ve diğ., (1999) tarafından belirtildiği üzere, yaklaşık otuz yıllık bir periyot için kauçuk esaslı izolatörlerin akma sonrası rijitliği ve karakteristik kuvvet parametrelerindeki artış, LDRB tipi

izolatörler için yaklaşık %10 mertebelerinde olup; HDRB tipi izolatörler için ise daha yüksek (%20~%30) mertebelerdedir. Hamaguchi ve diğ., (2009)'un tespitine göre ise, 60~80 yıllık bir sürede söz konusu rijitlik artışı, %20 seviyelerini aşmamaktadır.

Bina, köprü, nükleer santral gibi çeşitli yapılardaki sismik izolatörler için yaşlanma etkileri, çeşitli çalışmalarda incelenmiş olup; örneğin, İngiltere'deki Pelham Köprüsü'ndeki kauçuk esaslı izolatörler üzerinde yaşlanma etkilerini inceleyen Kato ve diğ. (1996)'da, kırk yıllık bir zaman diliminin sonunda izolatör yanal rijitliklerinin tasarım değerlerine göre %10 oranında artarken, fiziksel özelliklerde meydana gelen değişimlerin yüzeyden yaklaşık 50 mm'lik bir derinliğe kadar indiği, ancak daha derin mesafelerde fiziksel özelliklerin sabit olduğu belirtilmiştir. On beş yıl önce inşa edilmiş ve LRB tipi izolatörlerden oluşan bir izolasyon sistemine sahip bir bina için Shimoda ve diğ. (2004) tarafından yapılan araştırmada ise, düşey rijitliğin yaklaşık %17 oranında artarken, yanal rijitliğin %5 oranında arttığı, ancak akma kuvvetinin ise çok az (%0.7~%3) miktarda arttığı tespit edilmiştir. Kurşun çekirdekli ve doğal kauçuk izolatörler üzerinde ısıl (hızlandırılmış) yaşlandırma testleri gerçekleştiren Kim ve diğ., (2014) ise, bir yıl süreli testler sonucunda kauçuk malzemelerinin çekme dayanımları ve uzamasının azalırken, yanal rijitliklerinin arttığını; buna karşılık düşey rijitliklerinin ise %2~%3 mertebesinde azalma gösterdiğini ve ayrıca incelenen izolatörlerin kayma modüllerinin yaklaşık %3 mertebelerinde azalma gösterirken, eşdeğer sönüm oranının kurşun çekirdekli ve doğal kauçuk izolatörlerde sırasıyla yaklaşık %2 ve %11 seviyelerinde azaldığını tespit etmişlerdir. Paramashanti ve diğ., (2011) tarafından gerçekleştirilen ve 43.5 yıllık bir yaşlanma süresine karşılık gelen 16 günlük bir ısıl yaşlandırma çalışması sonucunda ise, HDRB tipi izolatörlerde eşdeğer sönüm oranının sadece %1 oranında azaldığı görülmüştür. Bir diğer hızlandırılmış yaşlanma çalışmasında LDRB tipi izolatörler üzerinde gerçekleştirdikleri testler sonucunda Nakazawa ve diğ., (1991) ise, efektif kayma modülünde beş yılda %3, on yılda %7 ve elli yılda ise %17 mertebelerinde artışların olacağını rapor etmişlerdir. HDRB tipi bir izolatör üzerinde gerçekleştirilen yedi yıllık yaşlanma testlerinin sonuçlarını sunan Kulak ve diğ. (1998) ise, efektif kayma modülünde ortalama %10 ve sönüm oranında ise %6 artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Diğer taraftan, sistem özellikleri modifikasyonu konseptine (Constantinou ve diğ., 1999) göre yaşlanma etkilerini dikkate alabilmek amacıyla AASHTO (2010)'da tanımlanan modifikasyon katsayıları (Denklem 2.12), LDRB tipi izolatörlerin akma sonrası rijitliği (K_2) ve karakteristik kuvvet (Q) parametrelerinin her ikisi için de $MF_{max,fi} = 1.1$ olarak tanımlanmıştır. HDRB tipi izolatörler için ise, bu tip izolatörlerde gerilme-yumuşaması (scragging: Bölüm 2.3.1.3) durumunun gerçekleştiği ve gerçekleşmediği konumlar arasında küçük farklar bulunması halinde, söz konusu modifikasyon katsayıları yine aynı izolatör parametreleri için $MF_{max,fi} = 1.2$ olarak tanımlanırken; bu tip izolatörlerde gerilme-yumuşaması durumunun gerçekleştiği ve gerçekleşmediği konumlar arasında büyük farkların bulunması halinde ise, söz konusu katsayılar $MF_{max,fi} = 1.3$ olarak tanımlanmıştır.

2.3.1.2. Sıcaklık Faktörü

Kauçuğun mekanik özellikleri, zamana bağlı olmasının yanı sıra sıcaklığa da bağlı olup; genellikle, sıcaklık arttığında rijitlik ve sönüm oranları düşerken (Komodromos, 2000); aksine düşük sıcaklıklarda ise elastomerik izolatörlerin rijitlik ve dayanımları artmaktadır (Constantinou ve diğ., 1999). Doğal kauçuğun çalışma sıcaklığının üst sınırı yaklaşık +60°C dolaylarında olup; bu kauçuğun rijitliğinde -20°C~+60 ºC aralığında çok büyük değişimler olmaz iken, -20°C'nin altına inildiğinde rijitlikte hızlı artışlar meydana gelmeye başlar (Kelly, 2001). Ayrıca, eğer izolatör 0°C'nin altında düşük sıcaklıklara çok uzun süre maruz kalırsa, rijitlikte meydana gelen çok büyük artışlarla birlikte kauçuğun kristalize olma riski ortaya çıkabilir (Cardone ve diğ., 2011). Eğer sıcaklık, camsılığa geçiş (glass transition) sıcaklığının (doğal kauçuk için bu sıcaklık -55°C'dir.) altına düşer ise, elastomer malzemesi kolayca kırılabilir hale gelir; tüm mekanik ve fiziksel özelliklerinde önemli ve hızlı değişimler gözlenir (Constantinou ve diğ., 2007).

Kauçuk esaslı izolatörler üzerinde sıcaklık etkisini inceleyen çok sayıda deneysel çalışma (Roeder ve diğ., 1990; Yakut ve Yura 2002; Fuller ve diğ., 2004) gerçekleştirilmiş olup; bu çalışmalardan Skinner ve diğ. (1993)'de LRB tipi bir izolatör üzerinde sıcaklığın etkileri araştırılmış; söz konusu izolatörün efektif rijitliğinin -15°C ve -35°C sıcaklıklardaki değerlerinin 18°C'deki değerinin sırasıyla 1.2 ve 1.4 katı; +45°C'deki efektif rijitliğin ise, 18°C'deki değerinin 0.9 katı olduğu tespit edilmiştir. Elastomerik köprü izolatörleri üzerinde düşük sıcaklığın etkilerini araştıran Pinarbasi ve diğ. (2007) ise, dört gün boyunca -29ºC'de beklettikleri test izolatörlerinin kayma rijitliklerinin, oda

sıcaklığındaki (21ºC~26 ºC) kayma rijitliklerinin yaklaşık 2 katı seviyesine ulaştığını tespit etmişlerdir. Elastomerik izolatörlerin çevrimsel davranışı üzerinde hava sıcaklığının etkisini araştıran Cardone ve Gesualdi (2012) ise, söz konusu izolatörler üzerinde -20ºC~+40ºC aralığında değişen altı farklı hava sıcaklığı için gerçekleştirdikleri testler neticesinde, özellikle hava sıcaklığının 0ºC altına düşmesi halinde, izolatörlerin kayma rijitliği ve gerilme seviyesinin arttığını; yüksek hava sıcaklıklarında elastomerik malzemelerin çevrimsel davranışında önemli bir değişiklik olmadığını ve ayrıca, göz önünde bulundurdukları hava sıcaklığı aralığında eşdeğer viskoz sönüm oranının sabit kaldığını belirtmişlerdir.

Sıcaklık faktörünün HDRB ve LDRB tipi izolatörler üzerindeki etkilerini dikkate alabilmek amacıyla, AASHTO (2010)'da bu izolatörlerin K_2 ve Q parametreleri için +20ºC~-30ºC aralığında modifikasyon katsayıları tanımlanmış olup; bu katsayılar, sıcaklığın azalmasıyla artmaktadır. LDRB tipi izolatörlerin K_2 ve Q parametreleri için tanımlanan modifikasyon katsayıları, sırasıyla 1.0~1.3 ve 1.0~1.5 aralığında artan değerler almaktadır. HDRB tipi izolatörler için ise, bu tip izolatörlerde gerilme-yumuşaması (scragging: Bölüm 2.3.1.3) durumunun gerçekleştiği ve gerçekleşmediği konumlar arasındaki farkın büyüklüğüne göre farklı modifikasyon katsayıları tanımlanmış olup; söz konusu farkın büyük olması halinde, K_2 ve Q parametreleri için modifikasyon katsayıları, sırasıyla 1.0~2.0 ve 1.0~2.5 aralığında artan değerler almaktadır. Diğer taraftan, söz konusu farkın az olması durumunda ise bu katsayılar, yine aynı sırayla 1.0~1.4 ve 1.0~2.0 aralığında artan değerler almaktadır.

2.3.1.3. Gerilme-Yumuşaması (Scragging) Faktörü

Kauçuk esaslı izolatörler, ilk kez teste tabi tutulduklarında tipik olarak daha fazla karakteristik dayanım ve rijitlik sergilemekte olup; aynı izolatörler için aynı koşullarda takip eden test çevrimlerinde daha düşük karakteristik dayanım ve rijitlik değerleri elde edilmektedir (Constantinou ve diğ., 1999). Özellikle, HDRB tipi izolatörlerde kullanılan dolgu malzemesi katkılı elastomerlerde görülen bu dayanım ve rijitlik azalması, gerilme-yumuşaması (scragging) nedeniyle meydana gelmektedir (Morgan, 2001). Söz konusu gerilme yumuşaması, orta kayma deformasyonu seviyelerinden yüksek kayma deformasyonu seviyelerine doğru, elastomerlerde görülen hacim modülünün azalması olarak tanımlanmaktadır (Thompson ve diğ., 2000). Gerilme-yumuşaması, daha çok HDRB tipi izolatörlerde görülürken, LDRB tipi izolatörlerde bu durumun etkisi az olup;

genellikle ilk çevrim ve daha sonraki çevrimlerde LDRB tipi izolatörlerin mekanik özellikleri arasında fazla bir fark görülmez (Constantinou ve diğ., 1999). HDRB tipi izolatörlerde söz konusu gerilme-yumuşaması durumu, bu izolatörlere sönüm arttırıcı olarak eklenen bileşenlerden kaynaklanmaktadır (Morgan, 2001). Zira, doğal kauçuğa karbon siyahı, sentetik elastomer, yağ ve reçine gibi ilave dolgu malzemelerinin katılması, izolatörün sönümünü arttırırken (Constantinou ve diğ., 2007); aynı zamanda da hacim modülünün azalmasına (Morgan, 2001) ve dolayısıyla gerilme-yumuşaması durumuna sebep olur.

Kauçuk izolatörlerde gerilme-yumuşaması davranışı ile ilgili olarak gerçekleştirilmiş birçok deneysel çalışma bulunmakta olup; bu çalışmalardan Thompson ve diğ., (2000)'de orta ölçekli 23 adet kauçuk izolatör üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda, efektif rijitliklerin birinci çevrimden üçüncü çevrime yaklaşık 1.4~2.1 kat azalırken; efektif kayma modülünün ise yaklaşık 10 kat azaldığı görülmüştür. Bir diğer çalışmada Morgan ve diğ., (2001), 45 orta ölçekli kauçuk izolatör üzerinde çalışarak, Thompson ve diğ., (2000) çalışmasına benzer sonuçlar elde etmiş ve ayrıca, efektif kayma modülündeki azalma yüzdesinin kauçuk bileşimine, vulkanizasyon profiline ve uygulanan deformasyon geçmişine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmalara karşılık, Cho ve Retamal (1993), Murota ve diğ., (1994) ve Kulak ve diğ., (1998) çalışmalarında görüldüğü üzere ise, testlerin akabinde kısa bir süre içerisinde izolatörlerde iyileşme (recovery) olduğu gözlenmekte; birbirini izleyen yükleme çevrimleri arasındaki en büyük gerilme farklılığı birinci ve ikinci çevrimler arasında olurken, bu farklılıklar yaklaşık 6~10 çevrim sonrasında ihmal edilebilir seviyelere gerilemektedir. Bu durum ise, ilk defa Mullins (1967)'de tespit edilmiş olup; söz konusu çalışmada, elastomerlerin hacim modülündeki en fazla azalmanın birinci çevrimde gerçekleştiği ve izleyen çevrimlerde ise daha küçük azalmaların meydana geldiği detaylı olarak ortaya konulmuştur. Bu nedenle gerilme-yumuşaması (scragging), "Mullins etkisi" olarak da bilinmektedir (Dorfman ve Ogden, 2004). Farklı malzemeler üzerinde söz konusu Mullins etkilerinin incelendiği çalışmalar ile ilgili detaylı literatür araştırması, Diani ve diğ., (2009)'dan temin edilebilir.

Diğer taraftan, Bölüm 2.3.1'de tanımlanan sistem özellikleri modifikasyonu konseptine göre, HDRB tipi izolatörlerde söz konusu gerilme-yumuşaması etkilerini dikkate

alabilmek için, bu tip izolatörlerde efektif sönümün 0.15'den daha az olması halinde, K_2 ve Q parametreleri $MF_{max,fi} = 1.2$ modifikasyon katsayısı ile çarpılırken; efektif sönümün 0.15'den daha fazla olması halinde ise, aynı tip izolatörlerin K_2 ve Q parametreleri sırasıyla $MF_{max,fi} = 1.8$ ve $MF_{max,fi} = 1.5$ modifikasyon katsayıları ile çarpılmaktadır. LDRB tipi izolatörlerde ise, gerilme-yumuşaması etkisinin çok az olması sebebiyle (Constantinou ve diğ., 1999), K_2 ve Q parametrelerinin her ikisi için de modifikasyon katsayıları $MF_{max,fi} = 1.0$ olarak tanımlanmıştır (AASHTO, 2010).

2.3.2. Sismik İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri ile İlgili Çalışmalar

Mevcut bölümde, sismik izolasyonlu yapıların izolatör mekanik parametrelerine bağlı olarak gerçekleştirilen çalışmalara yer verilmiştir. İzolatör karakteristik parametrelerinin deterministik olarak tanımlandığı parametrik çalışmalara, Bölüm 2.3.2.1'de; söz konusu parametrelerde, bu parametrelerin tasarıma esas nominal değerlerine göre çeşitli nedenlerle meydana gelebilecek değişimleri göz önünde bulundurarak ilgili parametreleri rastgele değişken parametreler olarak ele alan olasılıksal çalışmalara ise Bölüm 2.3.2.2'de yer verilmiştir. Bölüm 2.3.2.2'de ayrıca, sadece yer hareketi parametrelerindeki belirsizliklerin göz önünde bulundurulduğu olasılıksal çalışmalar ile izolatör karakteristik parametrelerindeki belirsizliklerin yanı sıra yer hareketi parametrelerindeki belirsizliklerin de birlikte hesaba katıldığı olasılıksal çalışmalar ile ilgili detaylara da yer verilmiştir.

2.3.2.1. Parametrik Çalışmalar

Bu bölümde, sismik izolatörlerin karakteristik parametrelerine bağlı olarak gerçekleştirilen parametrik çalışmalar incelenmiş olup; mevcut bölüm kapsamında söz konusu izolatör parametrelerinin farklı sabit değerleri için gerçekleştirilen parametrik çalışmaların yanı sıra, bu parametrelerde çeşitli sebeplerle tasarım değerlerine göre meydana gelebilecek sapmaları da göz önünde bulunduran parametrik çalışmalara da yer verilmiştir. Literatür araştırmasından tespit edildiği üzere, sismik izolasyonlu yapısal sistemlerin analizi ile ilgili çalışmaların çoğunluğunda, izolatör karakteristik parametreleri deterministik parametreler olarak tanımlanmakta ve bu parametrelerin aldığı belirli sabit değerlere bağlı olarak hesaplanan yapısal sistem cevap parametrelerinin değişimi incelenmektedir. Söz konusu çalışmaların örneklerini, Su ve diğ. (1989), Fan ve Ahmadi (1992), Pan ve Cui (1994), Park ve diğ. (2002), Yoo ve Kim (2002), Ordonez ve

diğ. (2003), Alhan ve Gavin (2004a), Alhan ve Gavin (2004b), Matsagar ve Jangid (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmaların yanı sıra son on yıl içerisinde gerçekleştirilmiş olan Dicleli ve Buddaram (2006a), Kim ve Yun (2007), Providakis (2008), Hameed ve diğ. (2008), Providakis (2009), Sharma ve Jangid (2011), Özdemir ve Akyüz (2012), Mazza ve diğ., (2012), Haque ve diğ. (2013) ile Bhagat ve Wijeyewickrema (2014) gibi birçok çalışmada görmek mümkündür. Bu çalışmaların yanı sıra; izolasyon sisteminin, karakteristik parametreleri farklı değerlere sahip olan elemanlardan oluşması veya karakteristik parametreleri aynı değerlere sahip izolasyon sistemi elemanlarının plan üzerinde farklı dizilimi ile oluşturulan asimetrik izolasyon sistemlerine sahip yapıların incelendiği parametrik çalışmalar da (Matsagar ve Jangid, 2005; Matsagar ve Jangid, 2006; Tena-Colunga ve Zambrana-Rojas, 2006 ile Kilar ve Koren, 2009) bulunmaktadır. Yukarıda belirtilen çalışmalardan örneğin, taban izolasyonlu yapıların sismik davranışı üzerinde izolatörlere ait kuvvet-deformasyon eğrisi şeklinin öneminin araştırıldığı Matsagar ve Jangid (2004) çalışmasında, izolatörler ikili-doğrusal ve eşdeğer doğrusal elastik elemanlar olarak modellenerek; izolasyon sistemi akma deplasmanı, izolasyon periyodu ve karakteristik kuvvet oranı parametrelerinin yanı sıra sismik izolasyonlu binanın kat sayısını deterministik parametre olarak göz önünde bulundurulmuş ve bu parametrelerin sayısal değerlerindeki değişime bağlı olarak, izolatör deplasmanları ile en üst kat ivmesinin değişimi incelenmiştir. Dicleli ve Buddaram (2006a) ise gerçekleştirdikleri parametrik çalışmada, izolatör karakteristik kuvveti ve akma sonrası rijitliğinin yanı sıra köprü altyapı rijitliği ve pik yer ivmesinin pik yer hızına oranını deterministik parametreler olarak göz önünde bulundurmuşlar ve maksimum izolatör kuvvetleri ile deplasmanlarının değişimini incelemek suretiyle söz konusu parametrelerin sismik izolasyonlu köprülerin performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bir diğer parametrik çalışmada ise, Tena-Colunga ve Zambrana-Rojas (2006) izolasyon sistemi elemanlarının deterministik parametreler olarak ele alınan farklı rijitlik değerlerine sahip olması ile meydana getirdikleri izolasyon sistemi eksantrisitesinin yapısal sistemde sebep olduğu burulma davranışını incelemişlerdir. Providakis (2008) ise, kuvvet-deplasman eğrilerini ikili-doğrusal histeretik model ile modellediği LRB tipi izolatörlerin karakteristik kuvvet oranı, izolasyon periyodu ile izolasyon sistemine dahil ettiği viskoz sönümleyicilerin sönüm katsayısını deterministik parametreler olarak göz önünde bulundurmuş ve bu parametrelerin farklı değerleri ile oluşturduğu sismik izolasyonlu binaların dinamik analizleri ile elde ettiği taban ve üstyapı deplasmanlarının değişimini

incelemiştir. Son dönem çalışmalarından Özdemir ve Akyüz (2012)'de ise, ikili-doğrusal elemanlar olarak modellenen LRB tipi izolatörlerden oluşan sismik izolasyon sistemlerinin çok sayıda farklı karakteristik kuvvet ve rijit-kütle mod periyodu değerlerine sahip olması halinde, tek yönlü ve iki yönlü yakın-fay yer hareketleri altında elde edilen maksimum izolatör deplasmanları karşılaştırılmıştır.

Yukarıda belirtilen parametrik çalışmalardan ağırlıklı olarak son on yıla ait olanlarda izolatörlerin kuvvet-deformasyon ilişkileri, ikili-doğrusal model ile modellenmekte ve bu modele ait belirli karakteristik parametrelerinin farklı değerleri için nümerik analizler yapılmaktadır. Söz konusu çalışmaların yanı sıra, LRB, HDRB ve FPS gibi çevrimsel yanal yükler etkisinde doğrusal olmayan histeretik davranış sergileyen izolatörlerin, eşdeğer doğrusal modelleme ile elde edilen doğrusal eşlenikleri kullanılarak gerçekleştirilen parametrik çalışmalar da (Hwang ve Sheng, 1993; Hwang ve Chiou 1996; Hwang, 1996; Franchin ve diğ., 2001; Matsagar ve Jangid 2004; Jara ve Casas, 2006; Dicleli ve Buddaram, 2006b; Dicleli ve Buddaram, 2007a; Dicleli ve Buddaram, 2007b; Dall'Asta ve Ragni, 2008; Sayani ve Ryan, 2009; Özgür, 2010; Alhan ve Şahin, 2011; Jara ve diğ., 2012) mevcuttur. Bu çalışmalarda ise, eşdeğer doğrusal modelleme ile elde edilen eşlenik izolatör parametrelerinin (izolatör efektif rijitliği ve/veya sönüm katsayısı) farklı deterministik değerleri için doğrusal dinamik analizler gerçekleştirilmekte ve bu analiz sonuçlarına göre söz konusu doğrusal modellerin geçerliliği sorgulanmaktadır. Örneğin; üç boyutlu, çok katlı ve iki yönlü deprem yüklerine maruz bir sismik izolasyonlu bina modeli için gerçekleştirdiği dinamik analizler ile eşdeğer doğrusal modellemenin doğruluğunu araştıran Özgür (2010) çalışmasında, çok sayıda farklı karakteristiklere sahip doğrusal olmayan izolasyon sistemleri ve bunların eşdeğer doğrusal eşlenikleri tarihi depremlere maruz bırakılarak; efektif periyot, efektif sönüm oranı, rijit-kütle modu periyodu ve akma sonrası rijitliğinin akma öncesi rijitliğe oranı parametrelerine göre izolasyon sistemi deplasmanları, en üst kat ivmeleri, kat yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri ve taban burulma momentlerinin pik değerlerinin değişimi incelenmiştir. Eşdeğer doğrusal analiz metodunun TSD olarak modellenen sismik izolasyonlu yapılar için değerlendirilmesini yapan Dicleli ve Buddaram (2007b) çalışmasında ise, izolatör karakteristik parametreleri (akma öncesi ve sonrası rijitlikleri ile akma dayanımı oranı) ile yapı kütlesinin yanı sıra yer hareketinin şiddet ve frekans karakteristikleri deterministik parametreler olarak göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen doğrusal

olmayan ve doğrusal dinamik analizlerden elde edilen maksimum izolatör deplasmanlarının ve kuvvetlerinin değerleri karşılaştırılmaktadır.

- **İzolatör karakteristik parametrelerindeki belirsizliklerin nominal değerden sabit sapmalar halinde göz önünde bulundurulduğu parametrik çalışmalar:**

Yukarıda kısaca özetlenen çalışmalarda izolatörlerin ve/veya diğer yapısal sistem elemanlarının karakteristik parametrelerinin sınırlı sayıda ve belirli sabit değerleri için analizler gerçekleştirilmekte olup; yapısal sistemin davranışı, bu parametrelerin sadece göz önünde bulundurulan sabit değerleri için elde edilebilmektedir. Sismik izolasyonlu sistemler için gerçekleştirilen son dönem çalışmalarından görüldüğü üzere; izolatör karakteristik parametrelerinde, bu parametrelerin tasarıma esas nominal değerlerinden çeşitli sebeplerle meydana gelen sapmaların göz önünde bulundurulduğu parametrik çalışmalar da (Su ve diğ., 1990a; Fan ve diğ., 1991; Hışman, 2011; Alhan ve Hışman, 2011a; Alhan ve Hışman, 2011b; Choun ve diğ., 2014) bulunmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında, söz konusu izolatör parametrelerinin belirli aralıklar dahilinde sabit küçük artımlarla değişen değerler aldığı veya nominal değerlerinden yine belirli ve sabit miktarlarda sapmalar (ötelenmeler) gösterdiği varsayılarak yoğun parametrik analizler gerçekleştirilmekte ve yapısal sistemlerin ilgili parametrelere bağlı olarak davranış değişkenliği incelenmektedir. Bu çalışmalardan Su ve diğ., (1990a) çalışmasında, pik üstyapı ve izolasyon katı deplasmanları ile ivmelerinin, izolatörlerin doğal periyodu, sönüm oranı, sürtünme katsayıları ve üst yapı sönüm oranında belirli sabit aralıklarda meydana gelen küçük değişiklikler ile yapı şeklindeki değişikliklere olan duyarlılığı incelenmektedir. Çalışmada kauçuk esaslı izolatörler ve sürtünme tipi izolatörlerden oluşan altı farklı izolasyon sisteminin kayma kirişi olarak modellenen üst yapı ile entegre edilmesiyle oluşturulan sistemler, beş farklı tarihi yer hareketine maruz bırakılmış olup; izolasyon sistemleri performanslarının doğal periyotlardaki, sönüm oranlarındaki ve sürtünme katsayılarındaki küçük değişikliklere duyarlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Benzer bir parametrik çalışma ise, Fan ve diğ. (1991) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada da kauçuk esaslı izolatörler ve sürtünme tipi izolatörlerden oluşan altı farklı izolasyon sistemi, kayma çerçevesi olarak modellenen üst yapı entegre edilmiş olup; sürtünme tipi izolatörlere sahip yapılarda izolatör sürtünme katsayısı ile tüm yapılarda doğal periyot ve üstyapının sönüm oranları ile kütle oranlarının yanı sıra, yer hareketlerinin genlik ve frekans içeriklerinde meydana gelen değişiklikler için duyarlılık analizleri yapılmış; pik

üstyapı ve taban katı deplasmanları ile pik kat ivmelerinin söz konusu değişken parametrelere olan hassasiyeti incelenmiştir.

Son dönem çalışmalarından Alhan ve Hışman (2011a)'da ise, izolasyon sisteminin rijitliği ve sönüm katsayısının yanı sıra üst yapının kütle, rijitlik ve modal sönüm oranı parametrelerinde, hedeflenen nominal tasarım değerlerine göre çeşitli nedenlerle meydana gelebilecek sapmaların, sismik izolasyonlu binaların dinamik davranışları üzerindeki etkilerini tespit edebilmek amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu parametrik çalışma kapsamında, izolasyon sistemi elemanları doğrusal elemanlar olarak modellenmiş ve yukarıda belirtilen parametrelerdeki sabit sapma oranları, ±%5, ±%15 ve ±%25 olarak göz önünde bulundurulmuş olup; iki farklı periyot seviyesi için oluşturulan sistemler, iki tarihi yer hareketine maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda, üst yapı rijitliği ve sönüm oranına olan duyarlılığın çok az iken; üst yapı kütlesi, izolasyon sistemi rijitliği ve izolasyon sistemi sönüm katsayısına duyarlılığın kayda değer seviyede olduğu tespit edilmiştir. Alhan ve Hışman (2011b)'de de, Alhan ve Hışman (2011a) çalışmasına benzer şekilde yapısal parametrelerde hedeflenen nominal tasarım değerlerine göre çeşitli nedenlerle meydana gelebilecek sabit sapmaların (±%5, ±%15 ve ±%25), sismik izolasyonlu binaların taban deplasmanı ve en üst kat ivmesi üzerindeki etkilerini tespit edebilmek amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu çalışmada izolasyon sistemleri doğrusal olmayan davranışa sahip olacak şekilde modellenmiş ve yapısal parametreler olarak izolasyon sisteminin akma deplasmanı, akma dayanımı ve rijitlikler oranı parametreleri ile üst yapının kütle, rijitlik ve modal sönüm oranı parametreleri değişken parametreler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışma sonucunda da sismik performansın yine üst yapı kütlesi ile göz önünde bulundurulan izolasyon sistemi parametrelerine çok duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Alhan ve Hışman (2011a) ve Alhan ve Hışman (2011b) çalışmalarındaki duyarlılık analizlerini kapsayan Hışman (2011) çalışmasında ise, doğrusal ve doğrusal olmayan izolasyon sistemleri için sırasıyla Alhan ve Hışman (2011a) ve Alhan ve Hışman (2011b) çalışmalarındaki parametrelerde nominal tasarım değerlerine göre ±%5, ±%10, ±%15, ±%20 ve ±%25 oranında sabit sapmalar olması durumunda, pik en üst kat ivmeleri ve pik izolasyon deplasmanlarına ilaveten pik taban kesme kuvvetlerindeki değişim ve bu değişimlerin yukarıda belirtilen yapısal parametrelere olan duyarlılığı incelenmiştir. Söz konusu çalışma sonucunda, farklı yapısal parametrelerin farklı performans kriterlerini

farklı seviyelerde etkilediği ve duyarlılığın izolasyon sistemi karakteristik özelliklerine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Son olarak, Choun ve diğ. (2014) çalışmasında ise, taban izolasyonlu bir nükleer santral bölümündeki izolatörlerin akma sonrasındaki rijitlik ve karakteristik kuvvet parametrelerinde sıcaklık, yıpranma ve çalışma ısısı nedeniyle nominal tasarım değerlerinden sapma meydana gelmesi halinde, yapısal sistemin dinamik davranışının değişkenliği, farklı PGA/PGV oranlarına sahip toplam yirmi yedi adet gerçek yer hareketi altında incelemektedir. Bu çalışmada, LRB tipi izolatörlerden oluşan iki farklı izolasyon sistemi oluşturulmuş olup; ilk sistemde tüm izolatörlerin mekanik parametrelerinin aynı miktarda (±%20) sabit sapma yaptığı; ikinci sistemde ise iki bölgeye ayrılan izolasyon sisteminde aynı bölgedeki izolatörlerin parametrelerinin aynı miktarda sapma yapması kaydıyla, iki bölgede farklı sabit sapmaların meydana geldiği varsayılarak, pik izolatör deplasmanı, pik izolatör kayma deformasyonu, pik üstyapı ivmesi ve pik üstyapı göreli deplasman parametreleri, her bir yer hareketi altında ayrı ayrı elde edilerek, karşılaştırılmaktadır.

2.3.2.2. Olasılıksal Çalışmalar

Mevcut bölümde, sismik izolasyonlu yapısal sistemler için gerçekleştirilen olasılıksal çalışmalara yer verilmiş olup; bu çalışmalarla ilgili yapılan literatür araştırmasından tespit edildiği üzere, sismik izolasyonlu yapılarla ilgili olasılıksal değerlendirmelerin yapıldığı çalışmaların büyük çoğunluğunda yer hareketleri, rastgele hareketler olarak tanımlanıp, belirli bazı yer hareketi parametreleri rastgele değişken parametreler olarak hesaba katılmak veya farklı frekans içeriğine sahip çok sayıda yer hareketi ele alınmak suretiyle yer hareketlerindeki belirsizlikler göz önünde bulundurulurken; izolasyon sistemi parametreleri deterministik parametreler olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmaların örnekleri, Su ve Ahmadi (1988), Constantinou ve Papageorgiou (1990), Fan ve Ahmadi (1990), Su ve diğ. (1990b), Chen ve Ahmadi (1992), Jangid ve Datta (1995a), Jangid ve Datta (1995b), Pirrotta ve İbrahim (1997) ile Pagnini ve Solari (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmaların yanı sıra son yıllarda gerçekleştirilmiş olan Chen ve diğ. (2007), Karim ve Yamazaki (2007), Şafak ve Kaya (2008), Jangid (2008), Bucher (2009), Jangid (2010), Ma ve diğ. (2011), Ateş (2012), Jacob ve diğ. (2013), Curadelli (2013), Ma ve diğ. (2013), Bakhshi ve Mostafavi (2014)'de görülebilmektedir. Diğer taraftan, izolatör parametrelerindeki belirsizlikler dikkate alınırken, yer hareketlerindeki

belirsizliklerin hesaba katılmadığı çalışmalar ise, oldukça az olup; bu çalışmalar ile ilgili detaylara Kısım a'da yer verilmiştir. Daha gerçekçi bir analiz için yer hareketlerindeki belirsizliklerin yanı sıra, izolatör parametrelerindeki belirsizliklerin de aynı anda hesaba katıldığı çalışmalar da yine sayıca az olup; bu çalışmalar ile ilgili detaylara ise, Kısım b'de yer verilmiştir.

a) İzolatör Parametrelerindeki Belirsizlikler Göz Önünde Bulundurulurken Yer Hareketlerindeki Belirsizliklerin Dikkate Alınmadığı Olasılıksal Çalışmalar:

Bu bölümde, sismik izolasyonlu sistemlerin izolatör karakteristik parametrelerindeki belirsizlikleri göz önünde bulundurarak, bu parametreleri rastgele değişken parametreler olarak tanımlayan olasılıksal çalışmalara (Hirata ve diğ.,1989; De La Llera ve Inaudi, 1994; Shenton III ve Holloway, 2000; Nagai ve Nishitani, 2005, Okamura ve Fujita 2007; Gazi ve Alhan, 2013) yer verilmiştir. Belirtilen çalışmaların ilkinde, Hirata ve diğ. (1989) ikili-doğrusal elamanlar olarak modelledikleri elastomer mesnetlerin akma öncesi rijitliğini normal dağılıma uygun rastgele değişken parametre olarak modellemiş ve bu parametredeki değişkenliğe bağlı olarak gerçekleştirdikleri Monte Carlo simülasyonları ile izolasyon katının ağırlık ve geometrik merkezleri arasındaki eksantrisite mesafesinin değişimini ve ayrıca bu mesafenin değişimine bağlı olarak da göz önünde bulundurdukları sistemin burulma davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ise, söz konusu eksantrisite mesafesinin çok kısa olduğunu ve bu nedenle izolasyon sistemi elemanlarının rijitliklerindeki rastgeleliğin yapısal sistemin davranışı üzerindeki etkisinin çok az olduğunu belirtmişlerdir.

İzolatör rijitliklerindeki belirsizliklerin sismik izolasyonlu binaların tasarım deplasmanlarında sebep olduğu artışı hesaplamak ve bu artışı, taban izolasyonlu binalar için UBC yönetmeliğinde rastlantısal burulmaya bağlı olarak tanımlanan deplasman artışı ile karşılaştırmak için gerçekleştirilen De La Llera ve Inaudi (1994) çalışmasında, doğrusal elemanlar olarak modellenen izolatörlerin doğrusal ve açısal rijitlikleri ile izolasyon sistemi statik eksantrisiteleri, rastgele değişkenler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Tek izolasyon periyodu, rastgele parametreler için belirlenen iki farklı varyasyon katsayısı seviyesi ve altı farklı izolatör sayısı için Monte Carlo simülasyonları ile gerçekleştirilen çalışma sonucunda, maksimum izolatör deplasmanlarındaki artışın nadiren %10 seviyesini aştığı, bu artışın da izolatör sayısına bağlı olarak azaldığı ve

ayrıca, söz konusu artışın UBC yönetmeliğinde rastlantısal burulmaya bağlı olarak tarif edilen deplasman artışından daha az olduğu belirtilmiştir.

Shenton III ve Holloway (2000) çalışmasında ise, yine doğrusal elemanlar olarak modellenen izolatörlerin rijitliklerinin normal dağılıma uygun rastgele değişken olduğu varsayılarak, farklı izolatör sayı ve yerleşim düzenleri ile farklı yapı en-boy oranları için izolatör rijitliklerindeki değişimin sismik izolasyonlu yapıların izolasyon katı merkez deplasmanı, dönmesi, köşe deplasmanı ve taban kesme kuvveti parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma, hem analitik hem de Monte Carlo simülasyonları dahilindeki nümerik analizler ile gerçekleştirilmiş olup; sonucunda, izolasyon katı merkez deplasmanları ile taban kesme kuvvetlerindeki değişimin izolatörlerin rijitlik değişiminden, köşe deplasmanlarının (standart sapma dahil) ise UBC yönetmeliğinde tanımlanmış rastlantısal eksantrisiteden daha az olduğu tespit edilmiştir.

İzolatörlerin mekanik karakteristiklerinde nominal değerden sapmalar olması halinde, sismik izolasyonlu binaların güvenilirliğini değerlendirebilmek için pertürbasyon yaklaşımı ile kombine edilen bir eşdeğer doğrusallaştırma metodunun önerildiği Nagai ve Nishitani (2005) çalışmasında ise, izolatör akma sonrası rijitliğinin varyasyon katsayısı %10 olan ve TSD bir sistem olarak modellenen sismik izolasyonlu bir binanın gerçek iki yer hareketi kaydı etkisinde deplasman parametresinin değişimi incelenmiş olup; önerilen metodun verifikasyonu için söz konusu izolatör akma sonrası rijitliğinin lognormal dağılıma sahip rastgele değişken olduğu varsayılarak Monte Carlo simülasyonları da gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Okamura ve Fujita (2007) çalışmasında, biri simetrik diğeri asimetrik plana sahip ve sürtünme sarkaç tipi izolatörlerle izole edilmiş, El Centro depremi etkisindeki iki sismik izolasyonlu yapısal sistem göz önünde bulundurularak; izolatörlerin sürtünme katsayısı ile üzerlerindeki düşey yüklerin normal dağılıma uygun rastgele değişkenler olması halinde gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonları ile söz konusu sistemlerin izolasyon katı ağırlık merkezinde oluşan deplasman ve ivme değerlerinin değişimi incelenmiştir. İzolatör sayısı farklılığının da göz önünde bulundurulduğu çalışma sonucunda; izolasyon sistemi performansının düşey yüklerdeki değişimden etkilenmezken, sürtünme katsayılarındaki değişimin bu performansı etkilediği belirtilmiştir.

Son olarak Gazi ve Alhan (2013) çalışmasında ise, izolasyon katı dahil iki katlı bina türü bir yapısal sistemin izolatörleri, ikili-doğrusal davranış sergileyen elemanlar olarak modellenmiş olup; bu izolatörlerin akma kuvveti, akma deplasmanı ve rijitlikler oranı parametreleri, normal dağılıma uygun rastgele değişkenler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada, Monte Carlo simülasyonları kapsamında biri yakın-fay diğeri uzak-fay olmak üzere iki tarihi yer hareketi etkisinde gerçekleştirilen tekrarlı doğrusal olmayan ZTAAY analizleri ile pik izolatör deplasmanları, pik normal kat ivmeleri ve pik göreli kat öteleme oranlarının değişimi, farklı simülasyon sayıları için elde edilen kümülatif dağılım grafikleri ile ortaya konmuştur. Çalışma sonucunda ise, ele alınan izolatör karakteristik parametrelerindeki değişimlerin, hem üstyapı hem de alt yapı performansını etkilediği; etkileme derecesinin ise, yer hareketine ve yapısal cevap parametresine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir.

b) İzolatör ve Yer Hareketi Parametrelerindeki Belirsizliklerin Birlikte Göz Önünde Bulundurulduğu Olasılıksal Çalışmalar:

Bu bölümde ise, sismik izolasyonlu sistemlerde izolatör parametrelerinin yanı sıra yer hareketlerindeki belirsizliklerin de birlikte göz önünde bulundurulduğu çalışmalara (Manolis ve diğ. 1990; Pinto ve Vanzi, 1992; Alhan ve Gavin, 2005; Politopoulos ve Sollogoub, 2005; Politopoulos ve Pham, 2009; Mishra ve Chakraborty, 2013; Mishra ve diğ., 2013; Roy ve Chakraborty, 2013; Roy ve diğ., 2014; Kwag ve Ok, 2013; Saha ve diğ., 2013) yer verilmiştir. Bu çalışmalardan ilkinde Manolis ve diğ. (1990), kayıcı izolatörlerle birlikte helisel yaylardan oluşan izolasyon sistemine ve en üst katında ankre edilen ikincil sistemlere sahip altı katlı rijit bir çelik çerçeve sistemi için gerçekleştirdikleri çalışmalarında, eşdeğer doğrusallaştırma tekniği ile doğrusallaştırılmış izolatörlerin sürtünme katsayısı ve doğal frekansı ile yer hareketleri için kullandıkları Kanai-Tajimi modelinin sönüm oranı ve frekans parametrelerini bağımsız rastgele değişkenler olarak modelleyerek; ikincil sistemlerin ivmelerinin kare ortalamalarının karekökünün rastgele değişken parametrelere olan duyarlılığını incelemişlerdir. Söz konusu duyarlılık analizleri, kompleks modal analiz ve eşdeğer doğrusallaştırma tekniğinin yanı sıra incelenen cevap parametresinin deterministik değeri etrafında Taylor serileri açılımını kullanan bir metodoloji ile gerçekleştirilmiş olup; bu analizler sonucunda, belirsiz parametrelerin dinamik davranış üzerindeki etkisinin ihmal edilemeyecek mertebede olduğu belirtilmiştir.

Pinto ve Vanzi (1992) ise, elastoplastik bir üstyapı ve yüksek sönümlü kauçuk izolatör içeren bir izolasyon sisteminden oluşan sismik izolasyonlu bir yapıyı iki serbestlik dereceli olarak modelledikleri çalışmalarında, Kanai-Tajimi spektrumunun frekansı ve izolatör efektif rijitliğinin yanı sıra üstyapı elastik rijitliği ile akma dayanımı parametrelerini rastgele değişkenler (normal veya lognormal) olarak göz önünde bulundurmuşlardır. Pinto ve Vanzi, stokastik doğrusallaştırma tekniğini kullanarak gerçekleştirdikleri bu çalışma kapsamında inceledikleri yapısal sistemin taban katına göre deplasmanı ile izolatör yanal deplasmanı cevap parametrelerinin belirtilen rastgele parametrelere olan duyarlılığını araştırmışlardır.

İki aşamalı Alhan ve Gavin (2005) çalışmasında, üç boyutlu kayma çerçevesi olarak modellenen dört katlı taban ankastre bir binanın ikinci katında bulunan ve titreşime duyarlı bir bilgisayar düzeneğini izole etmek için kullanılan bir doğrusal izolasyon sistemi ele alınmış olup; çalışmanın birinci aşamasında, izolasyon sistemi ile yer hareketi parametrelerindeki değişikliklerden etkilenmeyecek yüksek performanslı izolasyon sisteminin periyodu ve sönüm oranı tespit edilmektedir. İkinci aşamada ise, tespit edilen bu yüksek performanslı izolasyon sisteminin rijitlik ve sönüm katsayısı lognormal dağılıma uyan; sentetik olarak üretilen yer hareketlerinin parametreleri (episantr mesafesi, puls hızı, puls periyodu, yer hareketi frekansı ve sönüm oranı ile hedeflenen pik yer hızı) ise üniform veya weibull dağılıma uyan; ayrıca yapısal sistemde bulunan perde duvarların yeri ise üniform dağılıma uyan rastgele değişkenler olarak göz önünde bulundurulmak suretiyle, tekrarlı zaman tanım alanı analizlerinin gerçekleştirildiği Monte Carlo simülasyonları sonucunda, izolasyon sistemi ve bu sistemin bulunduğu normal katın ivmelerine ait kümülatif dağılım grafikleri elde edilmekte ve izolasyon sistemi için güvenilirlik analizi yapılarak, bu analizin izolatör değişken parametrelerinin varyasyon katsayılarına olan duyarlılığı araştırılmaktadır. Çalışma sonucunda ise, iyi tasarlanmış izolasyon sistemlerinin uzak-fay bölgelerinde bulunan kritik işleve sahip binalardaki hassas cihazları koruyabildiği; ancak, yakın-fay bölgelerinde söz konusu pasif izolasyon sistemlerinin titreşime hassas cihazların korunması için güvenilir bir çözüm olmadığı tespitlerine ulaşılmaktadır.

Politopoulos ve Sollogoub (2005) çalışmalarında, Kanai-Tajimi ile modelledikleri yer hareketinin pik ivme ve frekansı ile izolatör rijitliklerinin yanı sıra inceledikleri yapıların

düktilite kapasiteleri, rijitlikleri ve akma kuvvetlerinde belirsizlikler olması durumunda, taban izolasyonlu ve taban ankastre binaların hasar görebilirlik oranlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada, doğrusal elastik elastomerik izolatörler ve elastik-mükemmel-plastik davranışa sahip üstyapıdan oluşan izolasyonlu bina, iki serbestlik dereceli yapı olarak ele alınmıştır. Belirsizliklerin dikkate alındığı parametreler ise, normal veya lognormal rastgele değişkenler olarak ele alınmış olup; gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonları ile incelenen binaların düktilite talepleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda ise, sismik izolasyonlu binaların ve içindeki ekipmanların özellikle yer hareketlerindeki değişkenliklere yüksek duyarlılık gösterdiği, ayrıca bu duyarlılığın da konvansiyonel binalarınkine oranla genel olarak daha fazla olduğu tespitlerine ulaşılmıştır.

Politopoulos ve Pham (2009) da Politopoulos ve Sollogoub (2005)'e benzer şekilde gerçekleştirdikleri olasılıksal çalışmada, sismik izolasyonlu yapıların yer hareketlerinin (Kanai-Tajimi) pik ivme ve frekansı ile izolatör rijitliğinin yanı sıra yapının düktilite kapasitesi, akma kuvveti ve rijitliğindeki küçük sapmalara olan duyarlılığını incelemişlerdir. Çalışmalarında çeşitli izolasyon sistemlerini (yüksek ve düşük sönümlü ile kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler; sürtünme sarkaç tipi izolatörler; aktif ve yarı aktif kontrol sistemleri), elastoplastik ve doğrusal olmayan elastik gibi farklı bünye denklemlerine sahip üstyapılarla entegre ederek oluşturdukları izolasyonlu yapıları, iki serbestlik dereceli sistemler olarak göz önünde bulundurmuşlar ve bu sistemlerdeki mevcut düktilite talebinden daha yüksek düktilite talebi oluşması olasılığı olarak tanımladıkları başarısızlık olasılıklarının değişimini, gerçekleştirdikleri Monte Carlo simülasyonları ile farklı üst yapı frekans seviyeleri için incelemişlerdir.

Mishra ve Chakraborty (2013) çalışmasında LRB tipi izolatörlere mesnetlenmiş ve iki boyutlu kayma çerçevesi olarak modellenmiş beş katlı taban izolasyonlu bir yapıda, izolatörlerin akma öncesi rijitliği, viskoz sönüm katsayısı ve akma deplasmanı ile Kanai-Tajimi modeli ile modellenen yer hareketinin sönüm oranı, açısal frekansı ve sismik şiddet parametrelerinin yanı sıra kat rijitlikleri ve sönüm katsayıları normal dağılıma uygun değişkenler olarak ele alınmıştır. Dinamik hareket denklemlerinin pertürbasyon tabanlı bir yöntem ile analiz edilmesi suretiyle, en üst kat ivme ve deplasmanlarının kare ortalamalarının kareköklerinin belirsizlik içeren parametrelere bağlı olarak değişiminin

incelendiği bu çalışmada, doğrusal olmayan yapısal sistemin olasılıksal davranışını tekrarlı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri yapmadan tahmin edebilmek için stokastik doğrusallaştırma metodu kullanılmış olup; bu metot kapsamında doğrusal olmayan sisteme eşdeğer olan doğrusallaştırılmış sistem kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ise, binanın dinamik davranışı üzerinde yer hareketindeki belirsizliğin etkisinin baskın olmasına rağmen yapısal sistem parametrelerindeki belirsizliklerin de etkili olduğu belirtilmiştir.

Benzer şekilde, Mishra ve diğ. (2013), Roy ve Chakraborty (2013) ve Roy ve diğ. (2014) çalışmalarında da Mishra ve Chakraborty (2013)'deki LRB tipi izolatörlere mesnetlenmiş ve iki boyutlu kayma çerçevesi olarak modellenmiş beş katlı taban izolasyonlu yapı, yine Kanai-Tajimi modeli ile modellenen yer hareketlerine maruz bırakılarak; aynı izolasyon sistemi, yer hareketi ve üstyapı parametreleri belirsizlikler içeren parametreler olarak ele alınmıştır. Bu çalışmalardan Mishra ve diğ. (2013)'de istatiksel olarak yine normal dağılıma uygun değişkenler olarak ele alınan söz konusu parametrelerdeki belirsizliklerin dikkate alınması durumunda taban izolasyonlu sistemler için güvenilirlik analizleri esasına dayanan bir tasarım optimizasyon metodu önerisi üzerinde durulmuştur. Önerilen bu metot kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında LRB tipi izolatörlerin akma kuvvetleri, tasarım parametresi olarak ele alınmış ve en üst kat deplasmanlarını minimum seviyede tutan optimum akma kuvveti değerlerinin belirsiz parametrelere göre değişimi incelenerek; taban izolasyonu sistemlerinin optimum performansları üzerinde söz konusu parametrelerdeki belirsizliklerin etkisi incelenmiştir. Diğer taraftan Roy ve Chakraborty (2013)'de ise, Mishra ve Chakraborty (2013)'den farklı olarak belirsiz parametrelerin alt ve üst sınır değerleri (nominal değerden sırasıyla -%10 ve +%10 sapma yapmış değerler) bilinen belirsiz parametreler olduğu varsayılmış ve çalışmada önerilen optimizasyon prosedürü kapsamında, söz konusu belirsiz parametrelere bağlı olarak en üst kat ivmelerinin kare ortalamalarının karekökleri ile izolatörlerin optimum akma dayanımlarının alt ve üst sınır değerlerinin değişimi incelenmiştir. Benzer çalışma, Roy ve diğ. (2014)'de yapılmış olup; Roy ve Chakraborty (2013)'de olduğu gibi bu çalışmada da yine aynı sistem ve deprem parametreleri sınır değerleri bilinen belirsiz parametreler olarak ele alınmakta ve bu parametrelerdeki değişime bağlı olarak, yine en üst kat ivmelerinin kare ortalamalarının karekökleri ile izolatörlerin optimum akma dayanımlarının alt ve üst sınır değerlerinin değişimi incelenmektedir. Ancak, bu

çalışmada farklı olarak Roy ve Chakraborty (2013)'deki metot ile tasarlanan taban izolasyonlu yapılardaki kat ivmelerinin saçılımını azaltmak amacıyla optimizasyon tabanlı yeni bir tasarım metodu önerisi yapılmaktadır. Ayrıca, Mishra ve diğ. (2013) ile Roy ve Chakraborty (2013) çalışmalarının yanı sıra bu çalışmada da Mishra ve Chakraborty (2013)'de olduğu gibi doğrusal olmayan yapısal sistemin olasılıksal davranışını tahmin edebilmek için stokastik doğrusallaştırma metodu kullanılmış olup; bu metot kapsamında söz konusu çalışmalarda ele alınan doğrusal olmayan sistemlere eşdeğer olan doğrusallaştırılmış sistemler kullanılmıştır.

Kwag ve Ok (2013)'da ise köprü elemanları, izolasyon sistemi ve deprem parametrelerinde belirsizliklerin bulunması durumunda köprüler için optimum ve güvenilir sismik izolatör özelliklerini tespit edebilmek için pertürbasyon tabanlı bir tasarım optimizasyon metodu önerilmekte olup; bu çalışmada da ele alınan doğrusal olmayan sistemlerin olasılıksal davranışlarını tahmin edebilmek için stokastik doğrusallaştırma metodu kullanılmaktadır. Çalışmada, köprü ayağı ve izolatörlerin elastik rijitliği, rijitlikler oranı ve akma deplasmanı, normal dağılıma uygun rastgele değişken sistem parametreleri olarak ele alınırken; rastgele yer hareketlerini tanımlayabilmek için Kanai-Tajimi modeli kullanılmış olup; incelenen sismik izolasyonlu köprü sistemleri iki serbestlik dereceli sistemler olarak ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, sistem parametrelerindeki belirsizliklerin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar için iki farklı şekilde tasarlanan köprünün analizleri gerçekleştirilmiş olup; çalışma kapsamında önerilen tasarım optimizasyon metodu ile tasarlanan, belirsizliklerin göz önünde bulundurulduğu köprü modelinin sismik performansının daha yüksek olduğu tespitine ulaşılmıştır.

Son olarak Saha ve diğ. (2013) ise doğrusal olarak modelledikleri LRB tipi izolatörlerden oluşan bir izolasyon sisteminin sönüm oranı ve rijitliği ile sinüs dalgası olarak modelledikleri yer hareketlerinin genlik ve frekans parametrelerini, normal dağılıma uygun rastgele değişkenler olarak göz önünde bulundurmuşlar; ve üç serbestlik dereceli toplu kütleli bir sistem olarak modelledikleri bir dairesel çelik sıvı depolama tankında taban kesme kuvveti, taban deplasmanı, tank içerisindeki suyun çalkalanma deplasmanı ve devrilme momenti parametrelerinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarını elde ederek, bu cevap parametrelerinin değişimini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında incelenen

yapısal sistemlerin nümerik dinamik simülasyonu için genelleştirilmiş polinom kaos açılım tekniği üzerine kurulu bir stokastik simülasyon metodu kullanılmış olup; bu metodun sonuçları, Monte Carlo simülasyonları ile de karşılaştırılmıştır. Ayrıca, söz konusu analizlerde izolasyon sistemi ve deprem parametrelerdeki belirsizliklerin hepsi aynı anda hesaba katılmamış olup; bir parametre rastgele değişken olarak ele alınırken, diğer parametreler deterministik olarak ele alınmıştır.

2.4. YAKIN-FAY YER HAREKETLERİ

Depremler, yer kabuğunu oluşturan plakaları sınırlayan çizgiler olan faylar (Celep ve Kumbasar, 2004) üzerinde bir noktada başlayan ve neredeyse kayma dalgası hızı kadar hızlarla ilerleyen kayma yer değiştirmesi (Somerville, 2005) hareketleridir. Bir bölgede kaydedilen bu yer hareketlerinin tipleri, deprem büyüklüğü, sismik kaynak karakteristikleri, faya olan uzaklık, faya göre olan doğrultu, topografik özellikler ve zemin katmanlarının özellikleri gibi birçok etkene göre çeşitlilik göstermektedir (Makris, 1997; Cox ve Ashford, 2002).

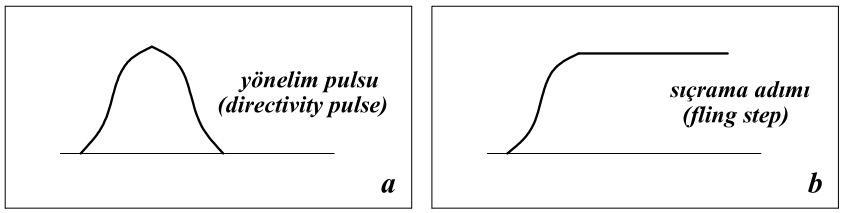
Mevcut bölüme konu olan "yakın-fay yer hareketleri", bir fay kırığı yüzeyinin civarındaki bölgede kaydedilen yer hareketleri olarak nitelendirilmektedir (Gibson ve diğ., 2002; He ve Agrawal, 2008). Fay kırığına yakın olan bu yer hareketleri, sismik kaynaktan uzakta olan yer hareketlerinden önemli ölçüde farklılıklar gösterebilmektedir (Stewart ve diğ., 2001). Sismolojistlerin ve mühendislerin özelliklerini ve etkilerini ilk olarak yaklaşık 500 milyon $ üzerinde maddi hasara yol açan, 6.5 (M_w) büyüklüğündeki 1971 San Fernando – Kaliforniya depremi (SCEDC, 2015) ile fark ettikleri yakın-fay yer hareketleri, sismik kaynağın civarında büyük hasarlara yol açabilmektedirler. Nitekim bu hasarların örnekleri, 1994 Northridge, 1995 Kobe ve 1999 Taiwan depremleri sırasında da görülmüştür (Alavi ve Krawinkler, 2001). Bununla birlikte, yakın-fay bölgesi için literatürde sabit bir mesafe değeri bulunmamakta olup; bu bölge için genellikle en fazla 10~20 km'ye kadar olan farklı mesafe değerleri telaffuz edilmektedir. Örneğin, Cox ve Ashford (2002) bu bölgenin maksimum 10 km'lik bir mesafeyi kapsadığını belirtirken; Bray ve Rodriguez-Marek (2004) yakın-fay bölgesini tipik olarak kırılmış faydan 20 km ile sınırlandırılmaktadır. Pik yer ivmelerinin 0.4g'den büyük olduğu bölgelerde (Sismik Bölge-4) binaların tasarım taban kesme kuvvetlerinin hesabında yakın-fay etkisini gözönünde bulundurabilmek için tasarım spektrumu değerlerinin "yakın kaynak

faktörleri" ile çarpılması gerektiğini belirten UBC (1997)'de ise; söz konusu çarpanlar, sismik kaynağa olan en yakın mesafenin en fazla 10 km ve 15 km olması durumları için tanımlanmıştır. Öte yandan, Stewart ve diğ. (2001) ise, yakın-fay bölgesinin tipik olarak kırılmış faydan 20~60 km'ye kadar mesafe içerisinde kaldığını belirtmektedirler.

Yakın-fay bölgesindeki yer hareketleri, bir takım faktörlerden önemli ölçüde etkilenirler ve bu faktörlere bağlı olarak belirgin karakteristik özelliklere sahip olurlar. Söz konusu faktörler, fay kırığı mekanizması, fay kırığı geometrisi, hareket eden sismik dalgaların ilerleme yönü, fay kırığının yayılma doğrultusu ve fayın kaymasından kaynaklanan olası kalıcı zemin yer değiştirmeler olup (Somerville 2000; Bray ve Rodriguez-Marek, 2004); yakın-fay yer hareketlerinde "yönelim" (directivity) ve "sıçrama adımı" (fling step) etkilerine sebep olurlar (Stewart ve diğ., 2001). Burada "yönelim", fay kırığının ilerleme yönünü ifade etmekte olup (Cox ve Ashford, 2002); yönelim etkileri, "ileri-yönelim etkileri" (forward-directivity), "geri-yönelim etkileri" (backward-directivity) ve "nötr-yönelim etkileri" (neutral-directivity) olarak sınıflandırılabilir (Orozco ve Ashford, 2002). Ancak, mühendislik yapıları açısından daha önemli olmaları sebebiyle, "yönelim etkileri" ifadesi ile genellikle "ileri-yönelim etkileri" kastedilmektedir (Cox ve Ashford, 2002).

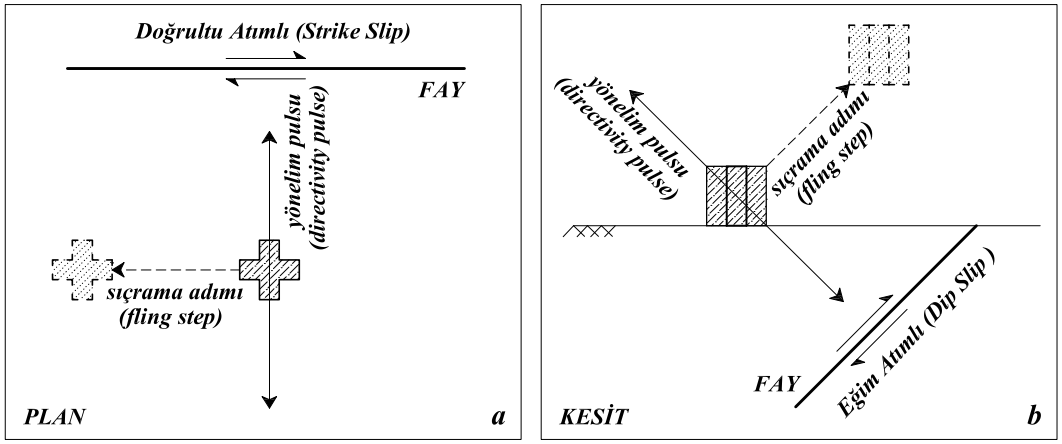
İleri-yönelim etkileri, fay kırığının bir bölgeye doğru ilerlemesi ve fay üzerindeki kaymanın da aynı bölgeye doğru olması halinde gerçekleşir (Somervillle, 2003) ve faya normal doğrultuda, uzun periyotlu ve büyük genlikli yatay yer hareketleri olan "yönelim pulsları"na (directivity pulse: Şekil 2.4.a) sebep olurlar (Erdik, 2000; Gibson ve diğ., 2002). Yönelim pulsları, genellikle çift yönlü hız pulsları şeklinde olup; bu pulslar etkisinde kalıcı olmayan, dinamik zemin yer değiştirmeleri meydana gelir (Bray ve Rodriguez-Marek (2004). Fakat bir yer hareketi sırasında, tüm yakın-fay bölgelerinde ileri-yönelim etkileri gerçekleşmez (Gibson ve diğ., 2002). Fay kırığının bir bölgeden uzaklaşması halinde, o bölgede geri-yönelim etkileri gerçekleşir ve bu etkiler, uzun süreli fakat düşük genlikli yer hareketlerine sebep olurlar (Somervillle, 2005). Nötr-yönelim ise, göz önünde bulundurulan bölgenin fay kırığına dik olması durumunda gerçekleşir (Orozco ve Ashford, 2002). Diğer yakın-fay etkisi sıçrama adımı (fling step: Şekil 2.4.b) ise, fay kırığı mekanizması ile ilgili tektonik deformasyonlardan kaynaklanan kalıcı statik zemin yer değiştirmelerinin bir sonucu olup; genellikle tek yönlü ve büyük genlikli bir

hız pulsu ve deplasman-zaman geçmişinde de belirgin bir deplasman adımı ile karakterize edilirler (Kalkan ve Kunnath, 2006; Stewart ve diğ., 2001). Sıçrama adımı etkileri de puls içeren hareketlere sebep olurlar; ancak bu etkilerin sebep olduğu pulslar, ileri-yönelim etkilerinin sebep olduğu yönelim pulslarından farklıdır. İleri-yönelim etkileri, kalıcı deformasyon oluşturmayan iki yönlü hız pulsları oluştururken; kalıcı, zemin deplasmanlarının sonucu olan sıçrama adımı etkisinde ise, kalıcı deformasyonlara neden olan tek yönlü hız pulsları oluşur (Bray ve Rodriguez-Marek, 2004).



Şekil 2.4: (a) Yönelim pulsu (directivity pulse), (b) sıçrama adımı (fling step) (Stewart ve diğ., 2001'den adapte edilmiştir.).

Yakın-fay bölgelerinde meydana gelen puls ve sıçrama hareketlerinin doğrultuları, fayın doğrultu atımlı (strike slip) ve eğim atımlı (dip slip) olması hallerinde şematik olarak sırasıyla, Şekil 2.5.(a) ve (b)'deki gibi gösterilebilir. Şekil 2.5.(a)'daki doğrultu atımlı fay durumunda atımın doğrultusu, fayın doğrultusu ile aynı olup; puls hareketinin doğrultusu atıma dik iken, sıçrama hareketinin doğrultusu atıma paraleldir. Diğer taraftan Şekil 2.5.(b)'daki eğim atımlı fay durumunda atımın doğrultusu, sayfa düzlemine dik olup; puls hareketinin doğrultusu fayın eğimine dik doğrultuda iken, sıçrama hareketinin doğrultusu fay eğimine paraleldir. Ancak her ikisi de atıma dik doğrultuda hem düşey hem de yatay bileşenlere sahiptir (Somerville, 2005).

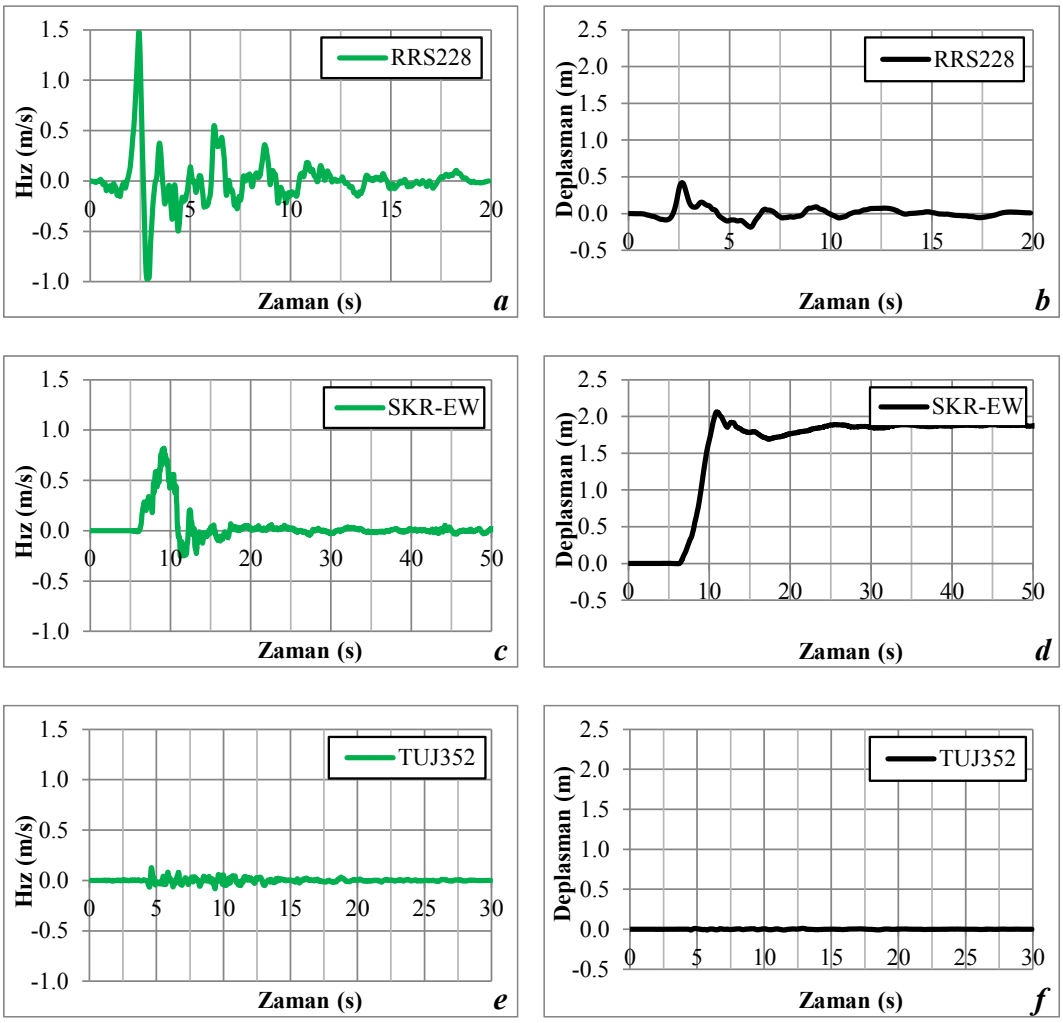


Şekil 2.5: Yönelim pulsu ve sıçrama adımı hareket doğrultularının şematik gösterimi: (a) doğrultu atımlı, (b) eğim atımlı faylar için (Stewart ve diğ., 2001'den adapte edilmiştir.).

Yakın-fay bölgelerinde ileri-yönelim etkisinden etkilenen yer hareketlerinde fay kırığı, bir bölgeye doğru çok yüksek hızla ilerler ve bu durum, kırıktan yayılan enerjinin çoğunun yer hareketi kaydının başında meydana gelen, uzun periyotlu, tek ve büyük bir puls halinde bölgeye varmasına neden olur. Fay üzerindeki kayma yer değiştirmesinin yayılma düzeni ise, bu puls hareketinin faya dik doğrultuda yönlenmesine sebep olur (Malhotra, 1999; Somerville, 1997). Bu nedenle, fay kırığına yakın olan yer hareketleri; sismik kaynaktan uzak bölgelerdeki sıradan yer hareketlerinden farklı olarak, genellikle fay doğrultusuna dik doğrultudaki yatay yer hareketi bileşeni üzerinde meydana gelen, kuvvetli, uzun periyotlu, yüksek pik yer hızı (PGV) değerlerine sahip ve ayrıca, etkidiği yapıyı yüksek enerji girişine ve kalıcı yer hareketlerine maruz bırakan pulslar ile karakterize edilirler (Somerville, 2002; Alavi ve Krawinkler, 2001; He ve Agrawal, 2008). Ayrıca, bu yer hareketleri, hız ve deplasman zaman geçmişlerinde önemli pulslar içermelerinin yanı sıra bazı durumlarda ivme zaman geçmişlerinde de belirgin pulslar içermekte olup; söz konusu hız pulsları 0.5 m/s veya daha fazla pik hız değerlerine sahip iken; deplasman pulsları ise 0.5 m'den 1.5 m'ye kadar ve hatta 1.5 m'nin de üzerine çıkabilen deplasman değerlerine sahip olmaktadır. (Makris ve Chang, 2000). İleri-yönelim etkileri taşıyan yakın-fay hareketleri, yüksek PGV/PGA oranlarına sahip olup; aynı PGA ve titreşim süresine sahip yer hareketlerinden yönelim pulslarının bulunduğu bu yer hareketleri, söz konusu ileri-yönelim etkileri ve dolayısıyla pulsların bulunmadığı bir yer hareketinden daha fazla taban kesme kuvvetlerine, göreli kat öteleme oranlarına ve en üst kat deplasmanlarına sebebiyet verebilirler (Malhotra, 1999).

İleri-yönelim etkisi taşıyan bir yakın-fay yer hareketi ile sıçrama etkisi taşıyan bir yakın-fay yer hareketi ve ayrıca söz konusu iki yakın-fay etkisinin de görülmediği, fay kırığı yüzeyine uzak mesafede kaydedilmiş bir uzak-fay yer hareketi arasındaki farkları, bu yer hareketlerine örnek teşkil etmek üzere seçilmiş yer hareketi bileşenlerine ait hız-zaman ve deplasman-zaman geçmişleri (Şekil 2.6) üzerinde görmek mümkündür (Kalkan ve Kunnath, 2006). İleri-yönelim etkisi taşıyan tipik bir yakın-fay yer hareketini temsilen 1994 Northridge depremi Rinaldi Receiving istasyonunda (r = 7.1 km) kaydedilen RRS228 bileşeni (PEER, 2011) (Şekil 2.6 (a) ve (b)); sıçrama etkisi taşıyan tipik bir yakın-fay yer hareketini temsil etmek üzere ise, 1999 Kocaeli depremi Sakarya istasyonunda (r = 3.2 km) kaydedilen SKR-EW bileşeni (USGS, 2015) (Şekil 2.6 (c) ve (d)); tipik bir uzak-fay yer hareketini temsilen de yine 1994 Northridge depremi sırasında

Big Tujunga istasyonunda (r = 24.0 km) kaydedilen TUJ352 bileşeni (PEER, 2011) (Şekil 2.6 (e) ve (f)) seçilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere; hız pulsları, ileri-yönelim etkisi taşıması sebebiyle RRS228 bileşeninde çok daha belirgin olmak üzere her iki yakın-fay yer hareketi bileşeninde de (Şekil 2.6 (a) ve (c)) görülürken; TUJ352 uzak-fay yer hareketinde (Şekil 2.6 (e)) bu pulslar görülmemektedir. Sıçrama adımı etkisi ise, SKR-EW bileşeninin deplasman-zaman geçmişinde (Şekil 2.6 (d)) açıkça görülürken; diğer yakın-fay yer hareketi bileşeni RRS228'in (Şekil 2.6 (b)) sadece ileri-yönelim etkisi taşıdığı; sıçrama adımı etkisi taşımadığı görülmektedir. Ayrıca, TUJ352 uzak-fay yer hareketinde de (Şekil 2.6 (f)) sıçrama adımı etkisinin olmadığı görülmektedir.



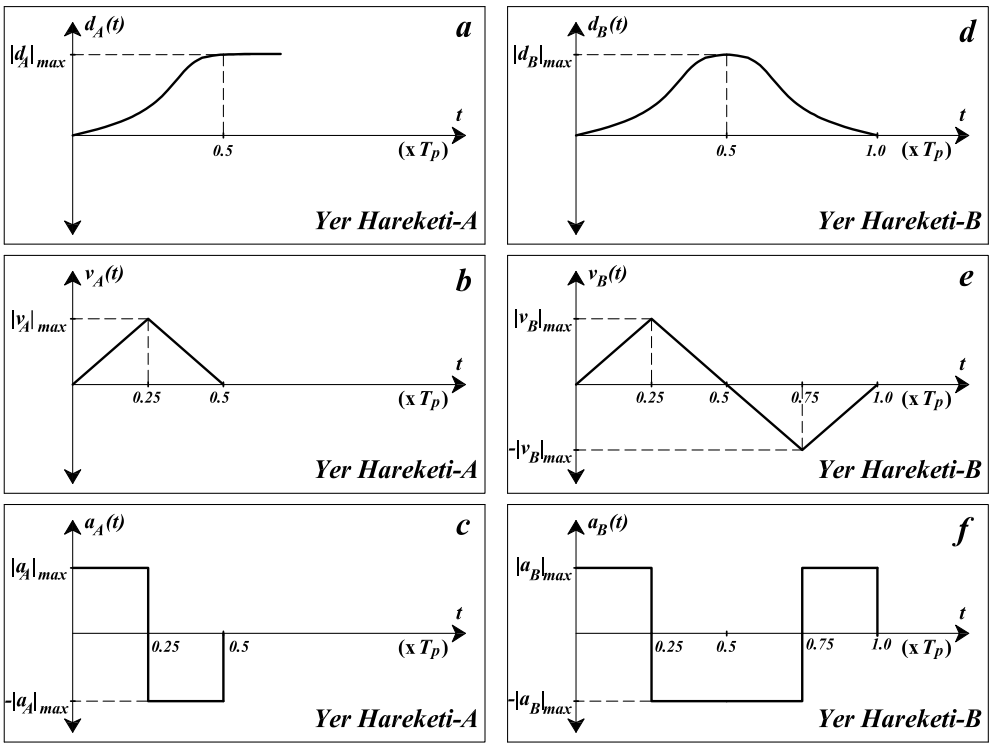
Şekil 2.6: Tipik hız-zaman ve deplasman-zaman geçmişleri: (a, b) İleri-yönelim etkisi taşıyan yakın-fay yer hareketi, (c, d): Sıçrama adımı etkisi taşıyan yakın-fay yer hareketi, (e, f): Uzak-fay yer hareketi için (Kalkan ve Kunnath, 2006'dan adapte edilmiştir.).

2.4.1. Yakın-Fay Yer Hareketlerinin Sentetik Olarak Modellenmesi

Puls içeren sentetik yakın-fay hareketlerinin deprem büyüklüğü ve fay uzaklığı parametrelerine bağlı olarak sistematik bir şekilde üretilebilmesi için literatürde birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiş modeller (Hall ve diğ., 1995; Makris, 1997; Makris ve Chang, 1998; Alavi ve Krawinkler, 2001; Agrawal ve He, 2002; Menun ve Fu, 2002; Mavroeidis ve Papageorgiou, 2003; He ve Agrawal, 2008) bulunmakta olup; bu bölümde bu modellere yer verilmiştir.

2.4.1.1. Hall ve diğ. (1995) Puls Modelleri

Hall ve diğ. (1995) 1m/s veya daha fazla pik hıza sahip zemin deplasmanı olarak tanımladıkları deplasman pulsları için iki farklı model sunmuşlardır. Söz konusu puls modellerinin ilkinde sadece ileri yönlü, ikincisinde ise ileri ve geri yönlü zemin deplasman hareketleri bulunmakta olup; sırasıyla "Yer Hareketi-A" ve "Yer Hareketi-B" olarak isimlendirilmişlerdir. Bu puls modellerine ait deplasman-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman fonksiyonlarını; Yer Hareketi-A için sırasıyla Şekil 2.7 (a), (b) ve (c)'deki gibi, Yer Hareketi-B için ise yine sırasıyla Şekil 2.7 (d), (e) ve (f)'deki gibi tanımlamışlardır.



Şekil 2.7: Yer Hareketi-A ve Yer Hareketi-B modelleri için önerilen deplasman-zaman: (a, d), hız-zaman: (b, e) ve ivme-zaman: (c, f) geçmişleri (Hall ve diğ., 1995'den adapte edilmiştir).

2.4.1.2. Makris (1997) Puls Modelleri

Makris (1997), Bölüm 2.4.1.1 gibi sadece ileri yönlü ve ileri-geri yönlü puls içeren yer hareketleri için Hall ve diğ. (1995) tarafından yapılan adlandırmayı aynen koruyarak; söz konusu titreşim hareketleri için basit trigonometrik fonksiyonlar önermişlerdir. Bu fonksiyonlar, sadece ileri yönlü puls hareketinin görüldüğü "Tip A" yer hareketlerinin deplasman, hız ve ivme geçmişleri için zamana (t) bağlı olarak sırasıyla Denklem (2.15), (2.16) ve (2.17)'teki gibi; ileri-geri yönlü puls hareketinin görüldüğü "Tip B" yer hareketlerinin deplasman, hız ve ivme geçmişleri için ise yine zamana (t) bağlı olarak sırasıyla Denklem (2.18), (2.19) ve (2.20)'deki gibi verilmiştir. T_p, puls hareketinin hakim periyodu olmak üzere; $0 \le t \le T_p$ aralığında geçerli olan bu denklemlerde V_p hız pulsunun genliğini, ω_p ise hız pulsunun açısal frekansını göstermektedir. T_p ve ω_p arasındaki bağıntı ise, $T_p = 2\pi / \omega_p$ şeklindedir.

$$d_A(t) = \left(V_p / 2\right)t - \left(V_p / 2\omega_p\right)\sin\left(\omega_p t\right) \tag{2.15}$$

$$v_A(t) = V_p / 2 - \left(V_p / 2\right)\cos\left(\omega_p t\right) \tag{2.16}$$

$$a_A(t) = \omega_p\left(V_p / 2\right)\sin\left(\omega_p t\right) \tag{2.17}$$

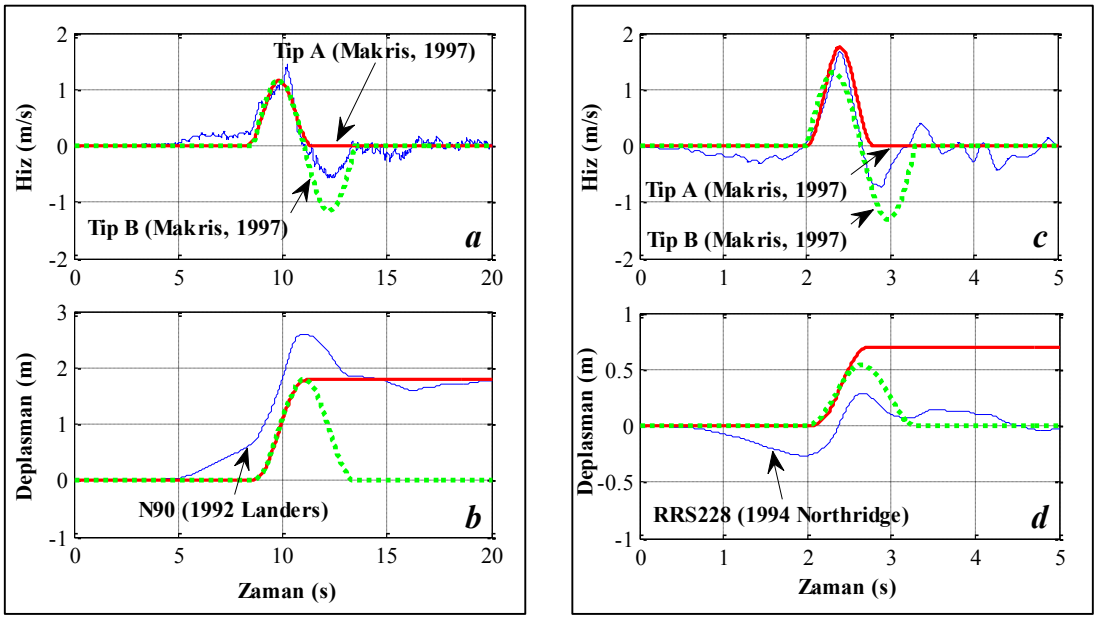
$$d_B(t) = \left(V_p / \omega_p\right) - \left(V_p / \omega_p\right)\sin\left(\omega_p t + \pi / 2\right) \tag{2.18}$$

$$v_B(t) = -V_p \cos\left(\omega_p t + \pi / 2\right) \tag{2.19}$$

$$a_B(t) = \omega_p V_p \sin\left(\omega_p t + \pi / 2\right) \tag{2.20}$$

Yukarıda verilen denklemler (Denklem (2.15) - (2.20)) ile Tip A ve Tip B puls modellerine göre üretilen sentetik yakın-fay yer hareketlerinin puls içeren kayıtlı yakın-fay yer hareketlerine olan benzerliğini, örnek teşkil etmesi amacıyla seçilmiş olan 28 Haziran 1992 tarihli Landers depremi sırasında SCE Lucerne Valley İstasyonu'nda kaydedilmiş N90 yer hareketi bileşeninin hız-zaman (Şekil 2.8.a) ve deplasman-zaman (Şekil 2.8.b) geçmişleri ile 17 Ocak 1994 tarihli Northridge depremi sırasında LADWP Rinaldi Receiving İstasyonu'nda kaydedilmiş RRS228 yer hareketi bileşeninin hız-zaman (Şekil 2.8.c) ve deplasman-zaman (Şekil 2.8.d) geçmişlerinden görmek mümkündür. Bu şekillerden görüldüğü üzere; söz konusu puls modelleri ile üretilen sentetik kayıtlar, gerçek yer hareketlerinin hız-zaman ve deplasman-zaman geçmişlerine tamamen uyum sağlamamaktadır. Ancak yine de, N90 yer hareketi bileşeninin hız-zaman

geçmişine Tip B, deplasman-zaman geçmişine ise Tip A puls modeli benzerlik gösterirken; RRS228 yer hareketi bileşeninin hız-zaman geçmişine Tip A, deplasman-zaman geçmişine ise Tip B puls modelinin benzerlik gösterdiği söylenebilir.



Şekil 2.8: Örnek yer hareketi bileşeni deplasman-zaman kayıtları ve bu kayıtlar için Makris (1997) denklemlerine göre üretilmiş sentetik hız-zaman ve deplasman-zaman kayıtları: (a, b) N90 için, (c, d) RRS228 için (Gazi ve diğ., 2013'ten adapte edilmiştir.).

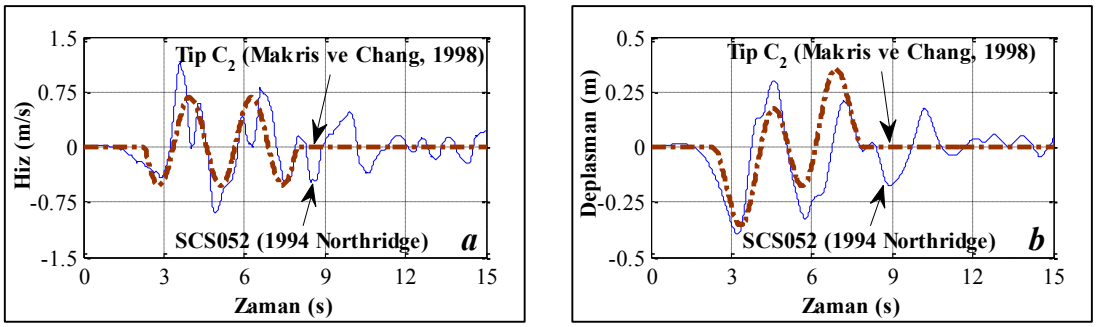
2.4.1.3. Makris ve Chang (1998) Puls Modeli

Şekil 2.8'daki yer hareketi kayıtları, örnek olarak verilmiş olup; birçok puls içeren yer hareketi kaydı için söz konusu Tip A ve Tip B puls modellerini kullanmak mümkündür. Ancak, tüm yakın-fay yer hareketleri sadece ileri yönlü ya da ileri-geri yönlü değildir. Şekil 2.9.b'de görüldüğü üzere; örnek teşkil etmesi için seçilmiş olan 17 Ocak 1994 Northridge depreminin Sylmar İstasyonu'nda kaydedilen faya normal yer hareketi bileşeninin (SCS052) deplasman-zaman geçmişi, iki ana pulstan oluşmaktadır. Makris ve Chang (1998), söz konusu şekilde de görüldüğü gibi deplasman geçmişinde bir ya da daha fazla puls bulunan yakın-fay yer hareketleri için n puls sayısını göstermek üzere, "Tip C_n" puls modelini geliştirmişler ve bu model ile üretilecek sentetik titreşimlerin zamana (t) bağlı deplasman, hız ve ivme geçmişleri için sırasıyla Denklem (2.21), (2.22) ve (2.23) 'deki trigonometrik fonksiyonları vermişlerdir. Verilen bu fonksiyonlar, φ faz açısını göstermek üzere, $0 \le t \le (n + 1/2 - \varphi/\pi)T_p$ zaman aralığında geçerli olup; söz konusu faz açısı (φ), puls hareketinin sonunda zemin deplasmanının sıfır olması esasına göre düzenlenmiş $\int_0^{(n+1/2-\varphi/\pi)T_p} v_{C_n}(t)\,\mathrm{d}t = 0$ denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$d_{C_n}(t) = -\left(V_p / \omega_p\right)\cos\left(\omega_p t + \varphi\right) - V_p t \sin\left(\varphi\right) + \left(V_p / \omega_p\right)\cos\left(\varphi\right) \tag{2.21}$$

$$v_{C_n}(t) = V_p \sin\left(\omega_p t + \varphi\right) - V_p \sin\left(\varphi\right) \tag{2.22}$$

$$a_{C_n}(t) = \omega_p V_p \cos\left(\omega_p t + \varphi\right) \tag{2.23}$$



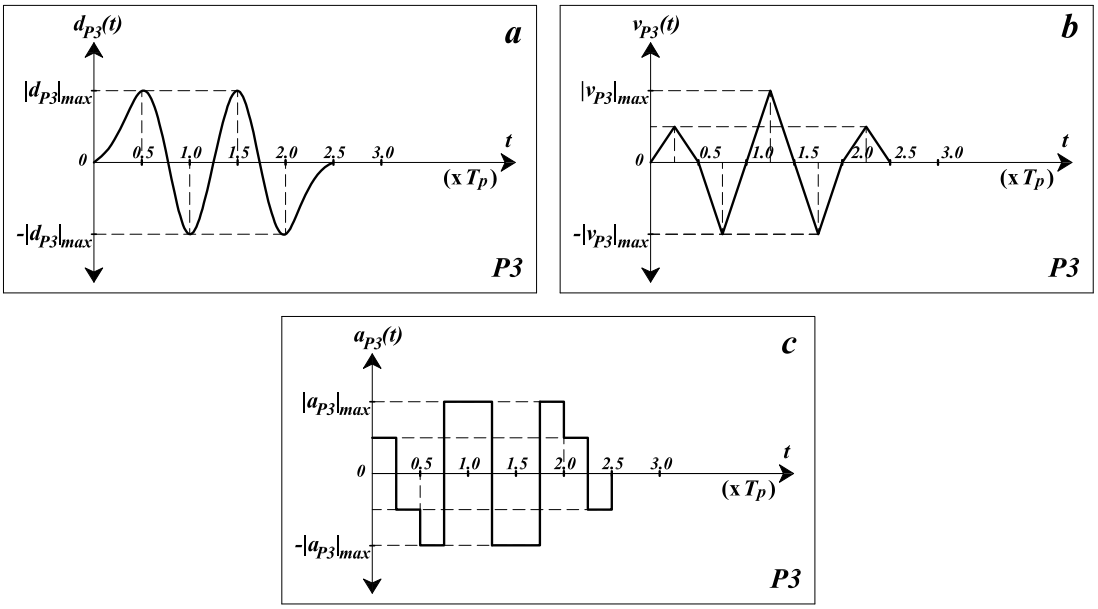
Şekil 2.9: SCS052 yer hareketi bileşeni hız-zaman (a) ve deplasman-zaman (b) kayıtları ve bu kayıtlar için Tip C_2 puls modeli kullanılarak üretilmiş sentetik kayıtlar (Makris ve Chang, 2000'den adapte edilmiştir.).

Şekil 2.9.b'de SCS052 yer hareketi bileşeninin gerçek deplasman-zaman kaydının yanı sıra, n = 2 olmak üzere bu kayıt için Denklem (2.21) ile üretilmiş Tip C_2 sentetik deplasman-zaman geçmişi de verilmiştir. Söz konusu yer hareketi bileşeninin hız-zaman geçmişi de pulslar içermekte olup; yine n = 2 olmak üzere bu kayıt için Denklem (2.22) ile üretilmiş Tip C_2 sentetik hız-zaman geçmişi de ayrıca Şekil 2.9.a'da verilmiştir.

2.4.1.4. Alavi ve Krawinkler (2001) Puls Modelleri

Alavi ve Krawinkler (2001) yakın-fay yer hareketlerinin darbe karakteristiklerinin gösterimi için temel olarak kullandıkları üç ana puls modeline yer vermişlerdir. Bu modellerden "P1" olarak adlandırılan ilk model, Makris (1997)'de Tip A olarak adlandırılan puls modeli ile aynı olup; Şekil 2.7 (a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi, yarı-çevrim üçgen hız-zaman geçmişi ve ikinci dereceden tek yönlü bir deplasman-zaman geçmişi ile sonuçlanan bir kare dalga şeklindeki ivme-zaman geçmişi ile gösterilmektedir. Diğer taraftan, "P2" olarak adlandırılan ikinci model ise; yine Makris (1997)'de Tip B olarak adlandırılan puls modeli ile aynı olup; Şekil 2.7 (d), (e) ve (f)'de görüldüğü gibi, tam-çevrim üçgen hız-zaman geçmişi ve ikinci dereceden dönüşümlü deplasman-zaman geçmişi ile sonuçlanan tam-çevrim kare dalga şeklindeki ivme-zaman geçmişi ile gösterilmektedir. Alavi ve Krawinkler (2001) üçüncü ana puls modelini ise "P3" olarak adlandırmış olup; tekrarlı pulsların etkilerini incelemek üzere kullandıkları bu modele ait deplasman-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman geçmişlerini sırasıyla, Şekil

2.10 (a), (b) ve (c)'deki gibi vermişlerdir. P1 ve P2 puls modellerinin periyotları, sırasıyla $0.5T_p$ ve T_p iken (Şekil 2.7); P3 modelinin periyodu, Şekil 2.10'de görüldüğü üzere $2.5T_p$'dir.



Şekil 2.10: P3 puls modeline ait deplasman-zaman: (a), hız-zaman: (b) ve ivme-zaman: (c) geçmişleri (Krawinkler ve Alavi, 1998'den adapte edilmiştir).

2.4.1.5. Agrawal ve He (2002) Puls Modeli

Mevcut konu ile ilgili olarak Makris (1997), Makris ve Chang (1998) çalışmalarını referans alan Agrawal ve He (2002) çalışmasında, yakın-fay yer hareketlerinin hız-zaman geçmişlerinin sönümlenen sinüzoidler içerdiği ya da sönümlenen çeşitli sinüzoidlerin bir kombinasyonu olduğu belirtilerek; yakın-fay yer hareketlerindeki uzun periyotlu hız pulslarını modellemek amacıyla, sönümlenen bir sinüs fonksiyonu kullanılmak suretiyle basitleştirilmiş kapalı-form denklem önerilmiştir. Söz konusu hız pulsu fonksiyonu ve bu fonksiyona bağlı olarak ivme-zaman ve deplasman-zaman fonksiyonlarının elde edilebilmesi için öncelikle, maksimum puls hızı (V_p) ve puls periyodu (T_p) değerleri, üretilecek sentetik depremin moment büyüklüğü (M_w) ve faya olan uzaklık (r) parametrelerine bağlı olarak Denklem (2.24)'deki fonksiyonlar (Somerville, 1998) ile hesaplanır. Ardından, ζ_p sönümlenen pulsun azalma (sönüm) oranı olmak üzere; üretilecek pulsun açısal frekansının (ω_p), maksimum puls hızının meydana geldiği zamanın (t_p) ve hız pulsu ilk genliğinin (Γ), Denklem (2.25)'deki ifadelerle (Dicleli ve Buddaram, 2007a) hesaplanır. Sonuç olarak, $\phi = -\zeta_p\omega_p$ ve $\delta = \omega_p(1-\zeta_p^2)^{0.5}$ olmak üzere, Agrawal ve He (2002) tarafından önerilen hız pulsu modeline ait hız-zaman geçmişi

fonksiyonu ($v(t)$) ve bu fonksiyona bağlı olarak hesaplanan ivme-zaman ($a(t)$) ve deplasman-zaman ($d(t)$) geçmişi fonksiyonları, sırasıyla Denklem (2.26), (2.27) ve (2.28) 'daki gibi elde edilir.

$$V_p = \mathrm{e}^{(-2.31+1.15M_w-0.5\ln(r))} \qquad T_p = 10^{(-2.5+0.425M_w)} \tag{2.24}$$

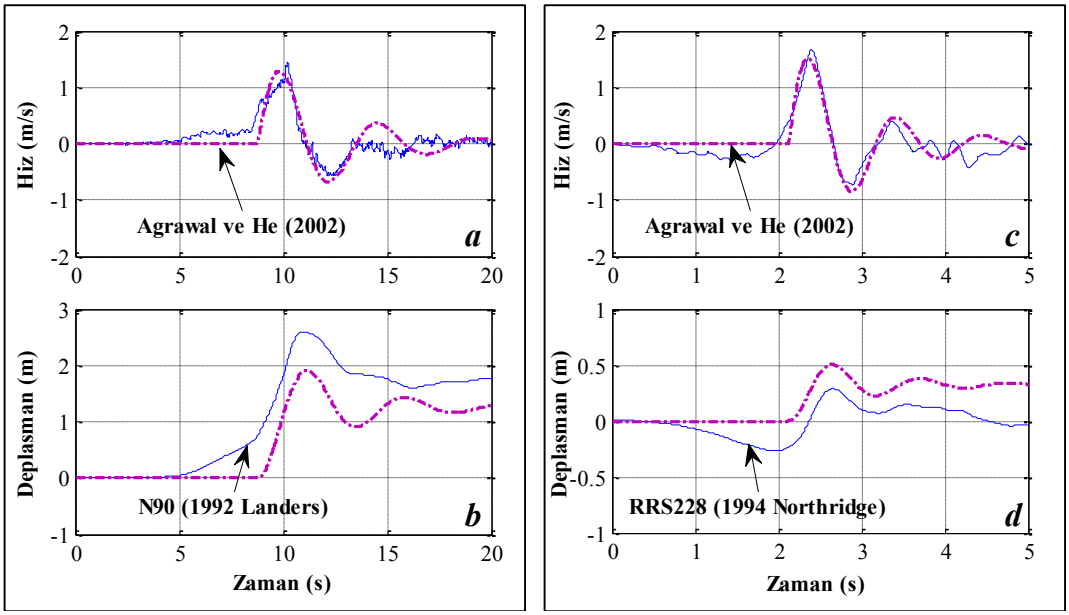
$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p\sqrt{1-\zeta_p{}^2}} \qquad t_p = \frac{\tan^{-1}\left(\sqrt{1/\zeta_p{}^2-1}\right)}{\delta} \qquad \Gamma = \frac{V_p}{\mathrm{e}^{\phi t_p}\sin\left(\phi t_p\right)} \tag{2.25}$$

$$v(t) = \Gamma \mathrm{e}^{\phi t}\sin(\delta t) \tag{2.26}$$

$$a(t) = \Gamma \mathrm{e}^{\phi t}\left[\,\phi\sin(\delta t)+\delta\cos(\delta t)\,\right] \tag{2.27}$$

$$d(t) = \left[\Gamma \mathrm{e}^{\phi t}\left[\,\phi\sin(\delta t)-\delta\cos(\delta t)\,\right]+\Gamma\delta\right] / \omega_p{}^2 \tag{2.28}$$

Şekil 2.8'da Makris (1997)'de önerilen Tip A ve Tip B modelleri kullanılarak üretilen sentetik deprem titreşimleriyle karşılaştırılan N90 (1992 Landers Depremi) ve RRS228 (1994 Northridge Depremi) yer hareketi bileşenlerinin hız-zaman ve deplasman-zaman geçmişleri, Şekil 2.11'da görüldüğü üzere; ilgili kayıtlar için Agrawal ve He (2002) puls modeli kullanılarak üretilen sentetik titreşimlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.11: Örnek yer hareketi bileşeni deplasman-zaman kayıtları ve bu kayıtlar için Agrawal ve He (2002) denklemlerine göre üretilmiş sentetik hız-zaman ve deplasman-zaman kayıtları: (a, b) N90 için, (c, d) RRS228 için (Gazi ve diğ., 2013'ten adapte edilmiştir.).

Şekil 2.8 ve Şekil 2.11'un karşılaştırılmasından görüldüğü üzere; örnek olarak seçilmiş N90 ve RRS228 yer hareketi bileşenlerinin hız-zaman ve deplasman-zaman geçmişlerine, bu zaman geçmişleri için Agrawal ve He (2002) puls modeli kullanılarak üretilen sentetik titreşimler, Makris (1997) puls modelleri kullanılarak üretilen sentetik titreşimlerden daha çok benzerlik göstermektedir. Agrawal ve He (2002) puls modelinin yukarıda verilen modellerden bir diğer farkı ise; bu puls modeli için kullanılan fonksiyonlar, diğer puls modelleri için önerilen fonksiyonların aksine sadece puls hareketi süresince değil, pulsun başladığı (t_0) anından kaydın sona erdiği ana kadar geçerlidir.

Makris (1997) puls modellerinin yanı sıra Agrawal ve He (2002) puls modelinin gerçek yakın-fay yer hareketi kayıtlarını simule etmedeki başarısı, Gazi ve diğ. (2013) ile Öncü-Davas ve diğ. (2013) çalışmalarında karşılaştırmalı olarak tartışılmış olup; bu çalışmalarda ayrıca söz konusu puls modellerinin sismik izolasyonlu binaların yapısal cevap parametrelerinden göreli kat öteleme oranlarını (Gazi ve diğ., 2013) ve kat ivmelerini yansıtmadaki başarısı da araştırılmıştır. Çalışmalarda çok katlı, sismik izolasyonlu betonarme bir bina, farklı hedef periyotları (T_0) ve karakteristik kuvvet oranlarına (Q/W) sahip doğrusal olmayan izolasyon sistemleri ile izole edilerek; seçilmiş tarihi yakın-fay yer hareketlerine ve bunların Makris (1997) çalışmasındaki Tip A ve Tip B puls modelleri ile Agrawal ve He (2002) puls modeli kullanılarak üretilen sentetik eşleniklerine maruz bırakılmıştır.

2.4.1.6. Menun ve Fu (2002) Puls Modeli

Faya normal bileşenlerinin hız-zaman geçmişlerinde büyük genlikli pulslar bulunan yakın-fay yer hareketlerinin sentetik olarak üretilebilmesi için bir başka model de Menun ve Fu (2002) tarafından önerilmiştir. n_1 ve n_2 şekil parametreleri olmak üzere; önerdikleri hız pulsu modeli, Denklem (2.29)'de görüldüğü gibi iki parçalı fonksiyondan oluşmaktadır. Bu fonksiyonlardan ilki $t_0 < t < ¾\ T_p$ zaman aralığında, ikincisi ise, $t_0 + ¾\ T_p < t < 2\ T_p$ zaman aralığında geçerlidir.

$$v(t) = V_p\, \mathrm{e}^{-n_1\left(\frac{3}{4}T_p - t + t_0\right)\times\sin\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)\right)} \qquad v(t) = V_p\, \mathrm{e}^{-n_2\left(t - t_0 - \frac{3}{4}T_p\right)\times\sin\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0)\right)} \tag{2.29}$$

Menun ve Fu (2002) çalışmalarında ayrıca, yukarıda görüldüğü üzere yine parçalı fonksiyonlardan oluşan Makris ve Chang (2000) ile Alavi ve Krawinkler (2001) puls modellerine alternatif olarak geliştirdikleri bu modelin yapısal analizler açısından

uygunluğunu, doğrusal ve doğrusal olmayan TSD sistemler üzerinde gerçekleştirdikleri analizler ile araştırmışlardır. Bu araştırma sonucunda ise yapısal sistemin periyodu T olmak üzere, $0.65 \leq T/T_p \leq 1.5$ aralığında; önerilen model ile üretilen sentetik deprem etkisinde elde edilen deplasman değerlerinin, gerçek yer hareketi kaydı etkisinde elde edilenlerden farkının %10 sınırı dahilinde olduğunu; ancak söz konusu periyotlar oranı aralığının dışında ise, önerdikleri model ile gerçek değerlerden daha az deplasmanlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

2.4.1.7. He ve Agrawal (2008) Puls Modeli

Mevcut konu ile ilgili olarak gerçekleştirilen çalışmalardan biri de He ve Agrawal (2008)'e ait olup; çalışmalarında Agrawal ve He (2002)'de önerdikleri modeli geliştirmek suretiyle, yakın-fay yer hareketlerinde bulunan hız pulsları için yeni bir analitik model önermişlerdir. Denklem (2.30)'da görülen ve Agrawal ve He (2002) modelinde olduğu gibi yine sönümlenen sinüzoid şeklindeki bu yeni modele ait fonksiyon, pulsun t_0 başlama anından kayıt sonuna kadar geçerli olup; bu fonksiyonda C genlik ölçek faktörünü, Ω puls zarf eğrisinin keskinliğini kontrol eden parametreyi, $\zeta_p{}^*$ puls azalma (sönüm) faktörünü ve φ sinüzoidal bileşenin faz açısını göstermektedir.

$$v(t) = Ct^{\Omega} \mathrm{e}^{-\zeta_p{}^* t} \sin\left(\omega_p t + \varphi\right) \qquad \zeta_p{}^* = \sqrt{\zeta_p{}^2 \omega_p{}^2 \Big/ \left(1 - \zeta_p{}^2\right)} \tag{2.30}$$

Denklem (2.30)'da ayrıca, $\zeta_p{}^*$ ile Agrawal ve He (2002) modelindeki ζ_p puls azalma (sönüm) oranı arasındaki ilişki de verilmiş olup; $\zeta_p{}^*$ dahil olmak üzere C, T_p, Ω ve t_0'dan oluşan puls parametreleri vektörü, gerçek yer hareketi kaydı ve ilgili kayıt için Denklem (2.30) ile üretilen sentetik yer hareketi arasında yapılan doğrusal olmayan en küçük kareler regresyon analizleri ile elde edilmiştir. Yapılan bu genelleştirme ile Denklem (2.30)'in elde edilmesinin ardından, Agrawal ve He (2002) hız pulsu modeli, Ω=0 olmak üzere He ve Agrawal (2008) puls modelinin bir özel hali durumuna gelmiştir. He ve Agrawal (2008) ayrıca, geliştirdikleri modelin doğruluğunu ispat amacıyla hız pulsu içeren birçok tarihi yer hareketi kaydı için söz konusu parametreleri elde etmişlerdir.

2.4.2. Yakın-Fay Yer Hareketlerine Maruz Sismik İzolasyonlu Yapısal Sistemlerin Dinamik Davranışı ile İlgili Çalışmalar

Mevcut bölümde, yakın-fay yer hareketlerinin sismik izolasyonlu yapısal sistemlerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalara yer verilmiş olup; söz konusu çalışmalar, parametrik ve olasılıksal çalışmalar olmak üzere iki gruba ayrılmış ve sırasıyla Bölüm 2.4.2.1 ve 2.4.2.2'de sunulmuştur.

2.4.2.1. Parametrik Çalışmalar

Sismik izolasyonlu sistemlerin yakın-fay yer hareketlerine maruz kalması durumunda gerçekleştirilen çalışmalar, literatür araştırmasından tespit edildiği üzere; ağırlıklı olarak parametrik çalışmalar olup; bu çalışmalarda gerçek veya sentetik yer hareketleri olarak göz önünde bulundurulan yakın-fay yer hareketleri ile bu yer hareketlerine maruz kalan izolasyon sistemlerinin parametreleri, deterministik parametreler olarak ele alınmakta ve bu parametrelerin sınırlı sayıda farklı değerleri için sistem davranışları elde edilmektedir. Söz konusu çalışmaların örnekleri, Heaton ve diğ. (1995), Hall ve diğ. (1995), Makris (1997), Kelly (1999), Hall (1999), Makris ve Chang (2000a), Makris ve Chang (2000b), Hall ve Ryan (2000), Jangid ve Kelly (2001), Alhan ve Gavin (2004a), Alhan ve Gavin (2004b) çalışmalarının yanı sıra son on yıl içerisinde gerçekleştirilmiş olan Dicleli (2006), Dicleli ve Buddaram (2007a), Hasgür ve Umut (2007), Jangid (2007), Providakis (2008), Providakis (2009), Mazza ve Vulcano (2009), Alhan ve Göktaş (2009), Karalar ve diğ. (2012), Öncü ve Alhan (2012), Öncü-Davas ve Alhan (2013) çalışmalarında görülebilmekte olup; bu çalışmaların aksine göz önünde bulundurulan yakın-fay yer hareketlerindeki ve/veya izolasyon sistemi parametrelerindeki belirsizlikleri, yoğun parametrik analizler ile inceleyen çalışmalar (Zhang ve Huo, 2009; Öncü, 2011) da mevcuttur.

Yukarıda belirtilen çalışmalardan örneğin; Heaton ve diğ., (1995)'de moment büyüklüğü (M_w) 7.0 olan, büyük yer hızlarına ve 2 m'yi bulan deplasman pulslarına sahip yakın-fay yer hareketleri simüle edilerek; üç katlı taban izolasyonlu bir bina söz konusu sentetik yer hareketlerine maruz bırakılmıştır. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan Hall ve diğ., (1995)'de daha detaylı sunulan bu çalışmada, üç farklı sismik boşluk mesafesi (40 cm, 50 cm ve 60 cm) ve üç farklı viskoz sönüm oranı (%0, %5 ve %10) göz önünde bulundurularak, yakın-fay yer hareketleri etkisinde farklı "sismik boşluk mesafesi/viskoz

sönüm oranı" kombinasyonları için binanın çevresindeki koruyucu duvarlara çarpma riski araştırılmıştır. Söz konusu çalışmalar sonucunda, göreli kat ötelemeleri açısından, taban izolasyonu avantajının yakın-fay bölgeleri dışında belirgin olduğu; hatta bazı yakın-fay bölgelerinde taban izolasyonu uygulamasının dezavantaj bile olabileceği belirtilmiştir.

Büyük deplasman pulsları içeren yakın-fay yer hareketlerinin sentetik olarak modellenebilmesi için detayları Bölüm 2.4.1.2'de verilen puls modellerini (Tip A ve Tip B) öneren Makris (1997) ise, çalışmasında ayrıca TSD bir sistem olarak göz önünde bulundurduğu taban izolasyonlu bir sistemi, düşük (T_0 = 0.625 s) ve yüksek (T_0 = 2.25 s) olmak üzere iki farklı periyot seviyesi için modellemiş ve söz konusu iki yapısal sistemi sırasıyla Tip A (T_p = 1.0 s) ve Tip B (T_p = 2.4 s) puls modelleri ile ürettiği sentetik yer hareketlerine maruz bırakmıştır. Bu çalışmada ayrıca, yapı sistemindeki deplasman, hız ve ivme cevap parametrelerinin değişimi göz önünde bulundurularak viskoz sönüm seviyesinin ve bu sönüme yapılan sürtünme tipi sönüm ilavesinin etkisi de incelenmiştir.

Alhan ve Gavin (2004a) ise, sekiz katlı taban ankastre bir binayı, farklı karakteristik parametre değerlerine sahip doğrusal ve doğrusal olmayan izolasyon sistemleri ile izole ederek oluşturdukları taban izolasyonlu bina setlerini, uzak-fay ve yakın-fay özellikleri taşıyan yer hareketi kayıtlarına maruz bırakmışlardır. Yapısal cevap parametreleri olarak taban deplasmanları, göreli kat öteleme oranları ve kat ivmelerini göz önünde bulundurmuşlar ve bu parametrelerin izolasyon sistemi parametrelerine bağlı olarak değişimini incelemişlerdir.

Hasgür ve Umut (2007) tarafından yapılan parametrik çalışmada ise, kauçuk izolatörlü betonarme bir köprü ile dört farklı şekilde (i- taban ankastre, ii- viskoz sönümleyicili, iii- kauçuk izolatörlü, iv- kauçuk izolatörlü ve viskoz sönümleyicili olarak) modellenen beş katlı bir betonarme bina, Tip A (Makris, 1997) ve Tip-C_2 (Makris ve Chang, 1998) puls modelleri kullanılarak üretilen sentetik deprem pulslarının tarihi bir yer hareketinin bileşenleri üzerine bindirilmesi suretiyle elde edilen yakın-fay yer hareketlerine ve ayrıca altı adet tarihi yer hareketinin bileşenlerine maruz bırakılarak; en büyük yer değiştirmeler ile en büyük göreli kat öteleme oranlarının değişimi incelenmiştir.

Bir diğer parametrik çalışmada ise; Providakis (2008), altı katlı taban izolasyonlu iki adet binadaki LRB tipi izolatörleri, üç farklı Q/W oranı (%5, %10 ve %15), beş farklı periyot

değeri (1.5 s~2.5 s) ve üç farklı ilave viskoz sönüm katsayısı (0 kNs/m, 100 kNs/m ve 200 kNs/m) için modellemek suretiyle elde ettiği toplam doksan adet taban izolasyonlu binayı, biri yakın-fay diğeri uzak-fay özellikleri taşıyan iki yer hareketine maruz bırakarak; taban ve üstyapı deplasmanlarının değişimini incelemiştir.

Alhan ve Göktaş (2009) ise, iki farklı periyot değeri (T_0 = 2 s ve 3 s) için doğrusal olarak modelledikleri izolasyon sistemlerine sahip üç katlı bir betonarme binayı; üç farklı episantr mesafesine (2 km, 5 km ve 10 km) ve iki farklı puls periyoduna (T_p = 2 s ve 3 s) sahip olacak şekilde ürettikleri sentetik yakın-fay hareketlerinin yanı sıra, biri uzak-fay ve diğeri yakın-fay özellikleri taşıyan iki tarihi yer hareketi kaydına maruz bırakmışlar; taban deplasmanları, taban ivmeleri, en üst kat ivmeleri ile en üst katın izolasyon katına göre öteleme oranlarının değişimini incelemişlerdir.

Sentetik olarak modellenen yakın-fay yer hareketlerinin sönüm oranlarının sismik izolasyonlu binaların dinamik davranışına etkisinin incelendiği Öncü-Davas ve Alhan (2013) parametrik çalışmasında ise, yakın-fay yer hareketleri Agrawal ve He (2002) puls modeli ile modellenerek; iki farklı r, dört farklı M_w ve üç farklı ζ_p değeri için toplam yirmi dört adet sentetik yakın-fay yer hareketi üretilmektedir. Üretilen bu depremler ise, ikili-doğrusal davranışa sahip bir izolasyon sistemi ile kayma çerçevesi olarak modellenen beş katlı üstyapıdan oluşan sismik izolasyonlu binaya uygulanmakta; en üst kat ivmesi ile en üst katın izolasyon katına göre öteleme oranının pik değerleri ve zamana bağlı değişimleri incelenmektedir. Benzer parametrik çalışma, Öncü ve Alhan (2012)'de yapılmış olup; bu çalışmada, Öncü-Davas ve Alhan (2013)'den farklı olarak sentetik depremler tek ζ_p değeri için üretilirken, Q/W farkı hesaba katılarak iki izolasyon sistemi oluşturulmuş; ve pik kat ivmelerinin değişimleri göz önünde bulundurularak, yakın-fay bölgelerindeki sismik izolasyonlu binalarda bulunabilecek hassas cihazların korunması için izolasyon sistemlerinin etkinliği araştırılmıştır.

Sismik izolasyon elemanlarının mekanik özelliklerinin deprem yükleri nedeniyle meydana gelen yapısal hasarları azaltmadaki etkisini inceleyen Zhang ve Huo (2009) çalışmasında ise, bir köprü sisteminin farklı akma öncesi ve sonrası rijitlikleri ile farklı karakteristik kuvvet değerlerine sahip elastomerik, LRB ve FPS tipi izolatörler ile izole edilmesi ve ağırlıklı olarak yakın-fay özelliklerine sahip olan iki yüz elli adet gerçek yer hareketi kaydına maruz kalması halinde doğrusal olmayan dinamik analizleri

gerçekleştirilmektedir. Oldukça yoğun bu parametrik analiz sonuçları kullanılarak da izolatör ve kolon elemanları cevap parametrelerine göre belirlenen hafif, orta, yoğun hasar ve göçme seviyeleri için kırılganlık eğrileri çıkartılmak suretiyle, incelenen köprülerin her bir hasar seviyesinde hasar görme olasılıkları, yer hareketlerinin PGA değerlerine bağlı olarak tespit edilmektedir.

Yakın-fay yer hareketlerindeki ve izolasyon sistemi parametrelerindeki belirsizliklerin etkisini yoğun parametrik analizlerle tespit etmeye çalışan bir başka çalışma ise, Öncü (2011) tarafından gerçekleştirilmiş olup; yukarıda özetlenen Öncü-Davas ve Alhan (2013) ile Öncü ve Alhan (2012) çalışmalarını kapsayan bu çalışmada, yer hareketi ve izolasyon sistemi parametreleri, deterministik parametreler olarak tanımlanmıştır. Söz konusu çalışmada, yakın-fay hareketleri için yine Agrawal ve He (2002) puls modeli kullanılarak, sekiz farklı r (2.5 km ~ 10 km), dört farklı T_p (2 s ~ 5 s) ve üç farklı ζ_p (%10, %20 ve %40) için sentetik yer hareketleri üretilmiştir. Dört farklı T_0 (2 s ~ 5 s), üç farklı Q/W (%5, %10 ve %15) için oluşturulan on iki farklı izolasyon sistemi ile ilave sönüm (%15 ve %30) eklenerek oluşturulan sekiz izolasyon sistemi, üretilen tüm sentetik yer hareketlerine maruz bırakılmış ve doğrusal olmayan dinamik analizlerle elde edilen pik taban deplasmanları ile pik en üst kat ivmesinin değişimi incelenmiştir.

2.4.2.2. Olasılıksal Çalışmalar

Mevcut bölümde sismik izolasyonlu sistemlerin yakın-fay yer hareketleri altındaki davranışlarını olasılıksal açıdan inceleyen çalışmalara (Alhan ve Gavin, 2005; Jia ve diğ., 2014; Bakhshi ve Mostafavi, 2014) yer verilmiştir. Bu çalışmalardan detayları, Bölüm 2.3.2.2 Kısım b'de verilmiş olan Alhan ve Gavin (2005)'de, taban ankastre bir binanın ikinci katında yer alan bir izolasyon katı üzerindeki titreşime duyarlı bir bilgisayar düzeneğinin güvenilirliği sorgulanmakta olup; bu çalışmada, episantr mesafesi, puls hızı, puls periyodu, yer hareketi frekansı ve sönüm oranı ile hedeflenen pik yer hızı parametreleri rastgele değişkenler olarak tanımlanan ve sentetik olarak üretilen yer hareketlerinin episantr mesafeleri, yakın-fay bölgelerini de kapsayacak şekilde 0~50 km aralığında üniform rastgele değişken olarak ele alınmaktadır. Çalışmada, izolasyon sistemi parametrelerindeki belirsizlikler de ele alınmış olup; sonucunda yakın-fay bölgelerinde söz konusu pasif izolasyon sistemlerinin titreşime duyarlı cihazların korunması için güvenilir bir çözüm olmadığı tespitine ulaşılmaktadır.

Benzer bir şekilde, taban ankastre bir bina içerisinde bulunan izolasyon katı ile izole edilen ve titreşime duyarlı bir bilgisayar sunucusunun güvenilirliğini inceleyen Jia ve diğ. (2014) çalışmasında, yakın-fay yer hareketlerindeki ve bazı yapısal sistem parametrelerindeki (kat rijitlikleri, kat kütleleri, kat akma deplasmanları ve üst yapı modal sönüm oranı ile rijitlikler oranındaki) belirsizlikler dikkate alınırken; izolasyon sistemlerinin parametreleri için güvenilirlik tabanlı bir optimizasyon çalışması -göz önünde bulundurulan titreşime duyarlı sistemde kabul edilebilir ivme limitlerinin aşılmaması üzerine kurulu- gerçekleştirilmekte ve bu parametrelerin optimum değerleri tespit edilmektedir. Çalışmada, yüksek frekans ve uzun periyotlu puls bileşenlerinden oluşan yakın-fay yer hareketlerinin, bu bileşenler için kullanılan modellere ait parametrelerin yanı sıra M_w ve r parametreleri de değişken olarak ele alınmakta olup; gerçekleştirilen duyarlılık analizleri sonucunda, sistem parametrelerindeki belirsizliklerin yer hareketi parametrelerindekilere göre ihmal edilebilir mertebede olduğu ve ayrıca M_w ve r parametrelerindeki belirsizliklerin ise, davranışı büyük ölçüde etkilediği belirtilmiştir.

Bakhshi ve Mostafavi (2014)'de ise, yer hareketlerindeki belirsizliklerin yedi uzak-fay ve yedi yakın-fay hareketi kullanılarak göz önünde bulundurulduğu belirtilirken; incelenen betonarme yapısal sistemin malzeme özelliklerindeki belirsizlikler de hesaba katılarak, beton karakteristik basınç dayanımı, elastisite modülü ve çelik akma dayanımı normal veya lognormal dağılıma sahip değişkenler olarak tanımlamaktadır. İzolatör karakteristik parametrelerinin deterministik parametreler olarak tanımlandığı bu çalışmada, farklı kat sayıları için taban ankastre ve taban izolasyonlu olarak modellenen sistemlerin uzak-fay ve yakın-fay yer hareketleri etkisinde kırılganlık eğrileri elde edilmekte ve bu eğrilere göre performans karşılaştırılması yapılmaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde mevcut tez çalışması kapsamında kullanılan malzeme ve yöntemlere yer verilmiştir. Tez çalışmasının iki ana bölümünde de analizi yapılacak sismik izolasyonlu binalar için üretilen tüm izolasyon sistemleri, Monte Carlo Simülasyon Tekniği'ne göre üretilmişlerdir. Bu teknik hakkında detaylı bilgi, Bölüm 3.1'de verilmiştir. Söz konusu sismik izolasyonlu binaların dinamik analizleri, 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programında bir dizi değişiklik yapılarak gerçekleştirilmiştir. Programın orijinal hali ve modifikasyonlar hakkındaki detaylı bilgiler, Bölüm 3.2'de verilmiştir. Tez çalışması kapsamında oluşturulan tüm sismik izolasyonlu binalar için aynı üstyapı kullanılmıştır. Bu üstyapı hakkında gerekli bilgiler, Bölüm 3.3'de verilmiştir. Tez çalışmasının birinci ana bölümündeki dinamik analizler, seçilmiş tarihi depremlere ait yer hareketi bileşenleri etkisinde; ikinci ana bölümündeki analizler ise, sentetik olarak üretilen yakın-fay yer hareketleri etkisinde yapılmıştır. Tüm bu depremler ile ilgili bilgiler, Bölüm 3.4'de verilmiştir. Tez çalışmasının birinci ana bölümünde üretilen tüm izolasyon sistemleri, bu bölüm kapsamında 3D-BASIS programında gerçekleştirilen modifikasyonlar ve yine bölüm kapsamında gerçekleştirilmesi gereken ideal simülasyon sayısının tespiti hakkındaki bilgiler ise, Bölüm 3.5'de verilmiştir. Son olarak Bölüm 3.6'de ise, tez çalışmasının ikinci ana bölümü kapsamında oluşturulan iki senaryo için üretilen sentetik deprem parametrelerine, izolasyon sistemlerine ait bilgilere, gerçekleştirilmesi gereken yeterli simülasyon sayısının tespit çalışmalarına ve ikinci ana bölüm kapsamında 3D-BASIS programında gerçekleştirilen modifikasyonlar hakkındaki detaylara yer verilmiştir.

3.1. MONTE CARLO SİMÜLASYON TEKNİĞİ

Simülasyon, gerçek bir sistemin davranışını tarif eden matematik veya mantıksal modellerini içeren deneylerin, dijital bir bilgisayarda gerçek zamana göre uzatılmış zaman periyotlarında gerçekleştirilmesi için kullanılan nümerik bir tekniktir (Rubinstein, 1981) Simülasyon, gerçek bir sistemi manipüle etmenin imkânsız veya maliyetli olduğu

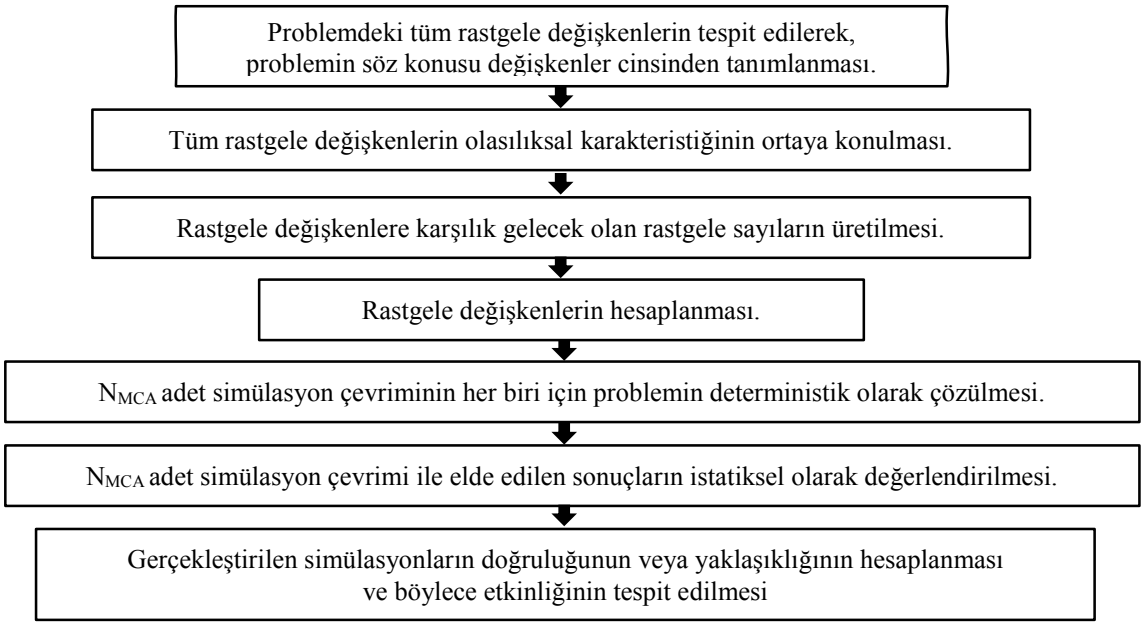
durumlarda söz konusu sistemin bir temsilini manipüle edebilmesi sebebiyle, mühendislik problemlerinde sıkça kullanılan popüler bir modelleme ve karar verme aracıdır. Bu teknik, model parametrelerinin, değişkenlerin, başlangıç koşullarının ya da gerçek sistemde mümkün olamayacak bir şeyin araştırmacı tarafından kontrol edilebilmesine olanak vermekte olup; tasarım datalarındaki belirsizliklerin etkilerini hesaplamak için de kullanılabilmektedir. Ayrıca, geçmişte gerçekleşmemiş fakat gelecekte gerçekleşmesi mümkün olan koşullar için göz önünde bulundurulan sistemin tepkisini hesaplamak için de kullanılabilir. (Ayyub ve McCuen, 2011). Adından da anlaşıldığı üzere, simülasyonun arkasındaki temel fikir, bir olayı nümerik olarak benzeştirmek ve beklenen bir durumun kaç defa meydana geldiğini gözlemlemektir (Nowak ve Collins, 2000). Simülasyon genellikle, incelenen bir problem veya sistem için gerçekleştirilen tüm çözüm teknikleri başarısızlığa uğradığında son çare olarak kullanılan bir teknik gibi görülse de, simülasyon tekniklerindeki gelişmeler, bilgisayarların yazılım ve donanım teknolojisindeki gelişmeler, simülasyonu sistem analizi ve yöneylem araştırmalarında oldukça geniş ölçüde kullanılan bir araç haline getirmiştir (Rubinstein, 1981).

Basit bir simülasyon işleminde, problemde bulunan her bir rastgele (random) değişken (Bölüm 3.1.2) olasılıksal karakteristiklerine göre kendi gerçek dağılımını ortaya koyması amacıyla bir çok defa örneklenir. Her gerçekleşim için problemi deterministik olarak çözmek, bir simülasyon çevrimi, denemesi veya çalıştırması olarak bilinir. Özellikle çevrim sayısı, sonsuza gittiğinde çok sayıda simülasyon çevrimi ile problemin tüm olasılıksal karakteristikleri ortaya konulabilir (Haldar ve Mahadevan, 2000). Bu durumda anlaşılmaktadır ki, bir problemde problemi etkileyen değişkenlerde belirsizlik olması halinde, bilgisayar yardımıyla bir simülasyon tekniği uygulanabilir ve bu teknik ile problemdeki belirsizlik durumu, aynı amaçla yapılacak laboratuvar testlerine kıyasla çok daha kısa sürelerde ve bütçe açısından da uygun bir şekilde belirlenebilir.

Monte Carlo Simülasyon Tekniği, fiziksel bir test gerçekleştirmeksizin bir problem veya sistem için nümerik olarak sonuçlar elde edilmesine olanak sağlayan özel bir simülasyon tekniğidir (Nowak ve Collins, 2000). Bu teknik, matematiksel problemler için istatiksel örnekleme deneyleri gerçekleştirmek suretiyle yaklaşık çözümler temin etmekte olup; genel hatlarıyla istatiksel bir simülasyon tekniği olarak tanımlanabilir (Pengelly, 2002).

Monte Carlo Simülasyon Tekniği kullanılarak, sadece temel olasılık ve istatistik bilgileri ile karmaşık mühendislik sistemlerinin risk ya da güvenilirliği hesaplanabilmekte (Haldar ve Mahadevan, 2000) olup; Alhan ve Gazi (2014) tarafından lisans eğitiminde de önerilmiştir. Bu teknik, kapalı çözümün imkânsız ya da çok zor olduğu karmaşık problemleri çözmek için yahut da birçok basitleştirici varsayımlar yapılarak kapalı formda çözülebilen karmaşık problemleri bu varsayımlar olmadan çözebilmek için kullanılmakta (Nowak ve Collins, 2000) olup; incelenen problemdeki değişkenlerin rastgele bir şekilde değişmesi halinde ve dağılım bir fonksiyonla hesaplanabilecekse kullanılmaktadır.

Monte Carlo ismi, ilk defa 2. Dünya Savaşı esnasında New Mexico'daki Los Alamos Scientific Laboratory'de devam eden nükleer silah işleri için bir şifre olarak matematikçi John von Neumann tarafından kullanılmıştır (Haldar ve Mahadevan, 2000). Los Alamos Scientific Laboratory'deki fizikçiler, radyasyon kalkanı projesi üzerinde çalışırlarken çeşitli metaller boyunca nötronların ne kadar uzak mesafeye yol alabilecekleri bilgisine ihtiyaç duyarlar, ancak gerekli birçok dataya sahip olmalarına rağmen problemi analitik olarak çözemezler. Bunun üzerine John von Neumann ve kendisi gibi matematikçi olan Stanislaw Ulam, bilgisayarda şans faktörüne dayalı bir deney modelleyerek; problemi çözmeyi önerirler (Grinstead ve Snell, 2010). Önerdikleri Monte Carlo Simülasyon Tekniği, fiziksel ve matematiksel sistemlerin simülasyonunda rastgele üretilen sayılardan faydalanmaktadır. Genelde göz önünde bulundurulan bir sistemdeki rastgele bir değişkenin veya değişkenlerin söz konusu sisteme etkisini inceleyen bu simülasyon tekniği, sistemdeki mevcut rastgele değişkenlere karşılık gelen rastgele sayıları üreten bir algoritma ile çalışmaktadır. Söz konusu algoritmanın aşamaları (Haldar ve Mahadevan, 2000; Ayyub ve McCuen, 2011), sırasıyla Şekil 3.1'de verildiği gibi olup; bu aşamalardan rastgele sayıların üretilme aşaması Bölüm 3.1.3'de, söz konusu rastgele sayılara bağlı olarak rastgele değişkenlerin elde edilme aşaması Bölüm 3.1.4'de ve simülasyon sonuçlarının istatiksel olarak değerlendirme aşaması hakkında detaylar ise Bölüm 3.1.5'de sunulmuştur. Ancak, söz konusu simülasyon tekniği kapsamında gerçekleştirilen aşamalar ile ilgili detaylara geçilmeden evvel, bu aşamaların anlaşılabilmesi için Bölüm 3.1.2'de bu teknik kapsamında sıklıkla kullanılan olasılık teorisi ilgili terimlere yer verilmiştir.



Şekil 3.1: Monte Carlo Simülasyon Tekniği'nin aşamaları.

3.1.1. Uygulama Alanları ve Literatür Çalışma Örnekleri

Bölüm 3.1'de belirtildiği üzere, temelleri nükleer silah çalışmaları kapsamında atılan Monte Carlo Simülasyon Tekniği günümüzde hesaplamalı fizik (Bentner ve diğ., 2001), fiziksel kimya (Edholm ve Nagle, 2005), istatistiksel fizik (Kastner, 2010), parçacık fiziği (Billard ve diğ., 2011) gibi fiziki bilimlerin birçok alanında, yapı mühendisliği (Alhan ve Gazi, 2014; Vargas ve diğ., 2014;), yazılım mühendisliği (Brun ve diğ., 2003), makine mühendisliği (Chen ve Zhao, 2010) ve malzeme mühendisliği (Kazeminezhad ve diğ., 2007) gibi yine birçok mühendislik alanı ile finans (Castelnuovo, 2013) ve telekomünikasyon (Wang ve diğ., 2013) alanlarında duyarlılık, olasılık ve risk analizlerinde sıkça kullanılmaktadır.

Monte Carlo Simülasyon Tekniği, mevcut tez çalışma konusu olan sismik izolasyonlu sistemlerin analizi ile ilgili olarak gerçekleştirilen birçok çalışmada kapsamında da kullanılmıştır (Su ve Ahmadi, 1988; Constantinou ve Papageorgiou, 1990; Fan ve Ahmadi, 1990; Pirotta ve İbrahim, 1997; Shenton III ve Holloway, 2000; Alhan ve Gavin, 2005). Bu çalışmalardan Su ve Ahmadi (1988)'de sürtünme tipi izolatörler ile izole edilmiş bir yapısal sistem, düşey ve yatay doğrultuda random yer hareketlerine maruz bırakılmak suretiyle yapısal cevap parametreleri hem analitik olarak hem de Monte Carlo

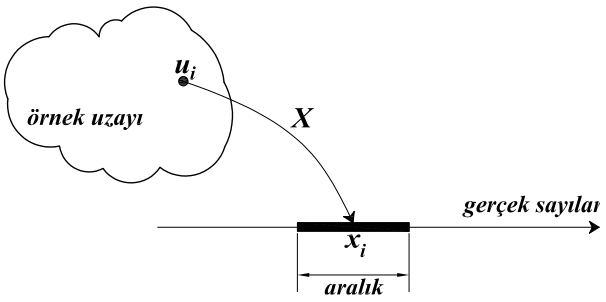
simülasyonları ile elde edilmekte ve sonuçların makul yaklaşıklıkta olduğu gösterilmektedir. Yine sürtünme tipi izolatörlerle izole edilen bir yapısal sistemin random yer hareketlerine maruz kalması durumunu inceleyen Pirotta ve İbrahim (1997) çalışmasında ise; Monte Carlo analiz sonuçları, hem deneysel hem de analitik analiz sonuçları ile karşılaştırılmakta ve deneysel analiz sonuçları ile simülasyon sonuçlarının oldukça uyumlu olduğunu gösterilmektedir. Detayları Bölüm 2.3.2'de verilen ve izolatör rijitliklerindeki değişimin sismik izolasyonlu yapıların dinamik davranışı üzerindeki etkisinin incelendiği Shenton III ve Holloway (2000) çalışmasında ise, yapısal cevap parametreleri yine hem analitik hem de Monte Carlo simülasyonları ile elde edilmekte ve her iki yolla elde edilen sonuçların uyumlu olduğu gösterilmektedir.

Literatür araştırmasından tespit edildiği üzere; sadece yer hareketlerindeki belirsizliklerin göz önünde bulundurulması halinde (De Grandis ve diğ., 2009, Perrotti ve diğ., 2013) veya sadece izolasyon sistemi parametrelerinde belirsizliklerin göz önünde bulundurulması (Okamura ve Fujita, 2007; Gazi ve Alhan, 2013) veyahut da yer hareketlerinin yanı sıra üstyapı elemanlarındaki belirsizliklerinde göz önünde bulundurulması (Bakhshi ve Mostafavi, 2014) hallerinde gerçekleştirilen yakın dönem çalışmalarındaki olasılıksal analizler, Monte Carlo simülasyonları ile gerçekleştirilmektedir. Öte yandan, yapısal sistemdeki veya yer hareketlerindeki belirsizlikleri göz önünde bulundurarak sismik izolasyonlu yapısal sistemlerin olasılıksal analizi için yaklaşık metotlar öneren bir çok son dönem çalışmasında (Spanos ve Evangelatos, 2010; Ma ve diğ., 2011, Jacob ve diğ., 2013, Saha ve diğ. 2013, Ma ve diğ., 2013, Ma ve diğ., 2014), önerilen metodun verifikasyonu için Monte Carlo Simülasyon Tekniği kullanılmakta ve önerilen metot ile elde edilen sonuçlar, Monte Carlo simülasyonlarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Yukarıda belirtilen çalışmaların yanı sıra, Pradlwarter ve Shueller (1998) ile Alhan ve Gavin (2005) çalışmalarında da açıkça belirtildiği üzere; analitik çözüm sonuçları ile oldukça uyumlu olasılıksal analiz istatistikleri elde etmek için Monte Carlo Simülasyon Tekniği etkili bir metottur. Ayrıca, Monte Carlo simülasyon tekniği, sistem ve analiz yönteminin karmaşık olması durumlarında olasılıksal davranışın elde edilmesi için güvenilir ve doğru bir metottur. Bu nedenle, mevcut tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerin Monte Carlo Simülasyon Tekniği dahilinde gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür.

3.1.2. Olasılık Teorisi ile İlgili Terimler

Bu bölümde mevcut tez kapsamında sıklıkla kullanılan "rastgele değişken", "olasılık yoğunluğu fonksiyonu", "kümülatif dağılım fonksiyonu", "olasılık dağılımı", "üniform dağılım", "normal dağılım", "lognormal dağılım", "weibull dağılım", "ortalama değer", "standart sapma", "varyasyon katsayısı" gibi olasılıkla ilgili bazı temel terimlerin açıklamalarına yer verilmiştir.

Bir "rastgele değişken" (X), Şekil 3.2'deki gibi rastgele bir deneyin tüm olası sonuçlarının oluşturduğu bir örnek uzayının her bir u noktasına karşılık gelecek şekilde değişken değeri olarak adlandırılan x gerçek değerini atayan, tek değerli gerçek bir fonksiyondur (Hsu, 1996). X rastgele değişkeninin alabileceği tüm olası değerlerin bütününe, o rastgele değişkenin "değerler kümesi" denilmekte olup; eğer rastgele değişken sadece belirli ayrık noktalarda gerçekleşiyor ve bu nedenle söz konusu değişkenin değerler kümesi sayılabilir ya da sonlu sayıda değer içeriyorsa, X bir "süreksiz rastgele değişken" olarak tanımlanır (Haldar ve Mahadevan, 2000; Stirzaker, 1999). Diğer taraftan değişkenin değerler kümesi, sonsuz ya da sonlu miktarda gerçek sayılar içeren bir veya birçok aralıktan oluşuyorsa, bu durumda X bir "sürekli rastgele değişken" olarak tanımlanır (Hsu, 1996; McCool, 2012).



Şekil 3.2: rastgele değişkenin bir fonksiyon olarak şematik gösterimi (Hsu, 1996 ile Nowak ve Collins, 2000'den adapte edilmiştir).

3.1.2.1. Olasılık Dağılımı

X rastgele değişkeninin hangi değerleri alacağını ve bu değerleri hangi olasılıklarla alacağını belirleyen matematiksel fonksiyonlara "olasılık dağılımı" adı verilmektedir. Süreksiz ve süreksiz rastgele değişkenler için örnek uzaylarının yapısının farklı olması nedeniyle bu değişkenler için olasılık dağılım türleri de çeşitlilik göstermektedir (Moore ve diğ., 2011). Olasılıksal analizlerde sıklıkla kullanılan sürekli dağılım türleri: üniform,

normal, lognormal, gamma, beta, eksponansiyel, weibull ve pareto dağılımları olarak sıralanabilir. Buna karşılık, yine sıklıkla kullanılan önemli süreksiz dağılım türleri ise, bernoulli, binomial, süreksiz üniform, geometrik ve poisson dağılımlarıdır (Rubinstein ve Kroese, 2008). Yapısal güvenilirlik analizlerinde en sık kullanılan olasılık dağılım türleri olması sebebiyle mevcut tez kapsamında üniform, normal, lognormal ve weibull dağılımlar (Nowak ve Collins, 2000) ile ilgili detaylar incelenmiş olup; bu detaylar, olasılıksal analizlerde rastgele değişkenler için kullanılan temel fonksiyonların Bölüm 3.1.2.2, Bölüm 3.1.2.3 ve Bölüm 3.1.2.4'teki gibi tanımlanmasının ardından sırasıyla Bölüm 3.1.2.5, 3.1.2.6, 3.1.2.7 ve 3.1.2.8'te sunulmuştur. Diğer olasılık dağılım türleri için gerekli bilgileri, Hsu (1996), Nowak ve Collins (2000), Rubinstein ve Kroese (2008) gibi olasılık teorisi ile ilgili kaynaklarda bulmak mümkündür.

3.1.2.2. Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF)

"Yoğunluk eğrisi" (density curve) ya da diğer bir deyişle "olasılık yoğunluk fonksiyonu" (probability density function: PDF) sürekli bir rastgele değişkenin olasılıksal dağılımının matematiksel bir modelidir (Moore ve diğ., 2011). Bir X rastgele değişkeninin $[x_1, x_2]$ aralığında değerler alma olasılığı, bu iki limit değer arasında yoğunluk eğrisinin altında kalan alana eşittir ve Denklem (3.1)'deki gibi tanımlanır (Haldar ve Mahadevan, 2000). Bu denklemde P_r olasılık değerine, $f_X(x)$ ise olasılık yoğunluk fonksiyonuna karşılık gelmektedir.

$$P_r\left(x_1 < X \le x_2\right) = \int_{x_1}^{x_2} f_X\left(x\right) dx \tag{3.1}$$

3.1.2.3. Olasılık Kütle Fonksiyonu (PMF)

"Olasılık kütle fonksiyonu" (probability mass function: PMF) ise, süreksiz bir rastgele değişkenin olasılıksal dağılımını tanımlamak için kullanılır. PMF, bir rastgele süreksiz X değişkeninin, belirli bir x_i değerine eşit olması halindeki olasılık değeri olup (Nowak ve Collins, 2000); Denklem (3.2)'deki gibi $p_X(x_i)$ ile tanımlanır.

$$P_r\left(X = x_i\right) = p_X\left(x_i\right) \tag{3.2}$$

3.1.2.4. Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF)

"Kümülatif dağılım fonksiyonu" (cumulative distribution function: CDF), sürekli veya süreksiz bir X rastgele değişkeninin belirli bir x_i değerine eşit veya bu değerden daha düşük değerler alma olasılığı bilgisini verir ve Denklem (3.3)'deki gibi hesaplanır (Haldar

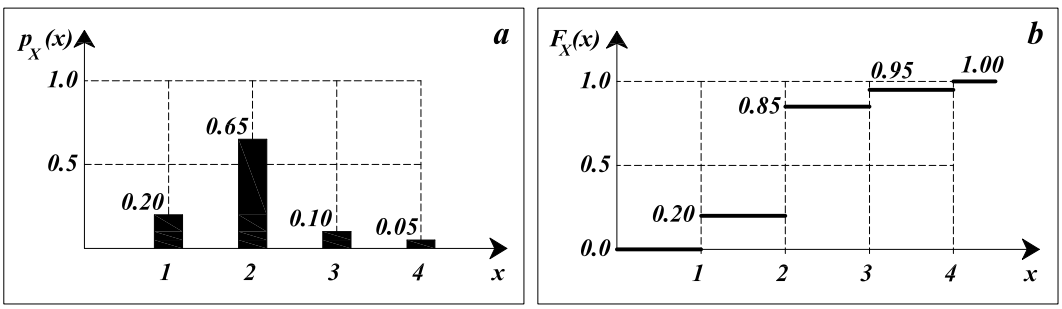
ve Mahadevan, 2000). Bu denklemde F_X kümülatif dağılım fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Sürekli rastgele değişkenler için PDF, CDF'in birinci türevine eşittir (Nowak ve Collins, 2000). Bu nedenle, sürekli bir rastgele değişkenin belirli bir x_i değerine eşit veya o değerden daha düşük değerler alma olasılığı, X değişkeninin söz konusu x_i değerine eşit veya daha küçük tüm olası değerleri için PDF eğrisi altında kalan alan ile de Denklem (3.4)'deki gibi hesaplanabilir. Söz konusu X değişkeninin süreksiz bir rastgele değişken olması halinde belirli bir x_i değerine eşit veya o değerden daha düşük değerler alma olasılığı ise, X değişkeninin söz konusu x_i değerine eşit veya daha küçük tüm olası değerleri için PMF değerlerinin toplamı ile Denklem (3.5)'deki gibi hesaplanabilir.

$$P_r\left(X \le x_i\right) = F_X\left(x_i\right) \tag{3.3}$$

$$P_r\left(X \le x_i\right) = F_X\left(x_i\right) = \int_{-\infty}^{x_i} f_X\left(x\right) dx \qquad X: \text{Sürekli rastgele bir değişken} \tag{3.4}$$

$$P_r\left(X \le x_i\right) = F_X\left(x_i\right) = \sum_{x_i \le x} p_X\left(x_i\right) \qquad X: \text{Süreksiz rastgele bir değişken} \tag{3.5}$$

Ayrıca, sürekli bir rastgele değişken X için CDF yani $F_X(x)$ de süreklidir ve X'in değerler aralığının her noktasında bir $dF_X(x)/dx$ türev değeri yani $f_X(x)$ değeri bulunmaktadır. Diğer taraftan, süreksiz bir rastgele değişken X için $F_X(x)$ fonksiyonu basamak fonksiyonu yapısındadır, yani belirli x değerleri için sıçramalar yaparak farklı değerler alır ve bu sıçrama noktalarının arasındaki bölgelerde ise sabit değerlere sahiptir (Hsu, 1996). Bu yapıyı, örnek teşkil etmek üzere PMF fonksiyonu Şekil 3.3 (a)'daki gibi verilen süreksiz bir X rastgele değişkeninin Şekil 3.3 (b)'de verilen CDF fonksiyonundan görmek mümkündür.



Şekil 3.3: Süreksiz bir X rastgele değişkeni için olasılık fonksiyonu örnekleri: (a) PMF örneği, (b) CDF örneği (Nowak ve Collins (2000)'den adapte edilmiştir).

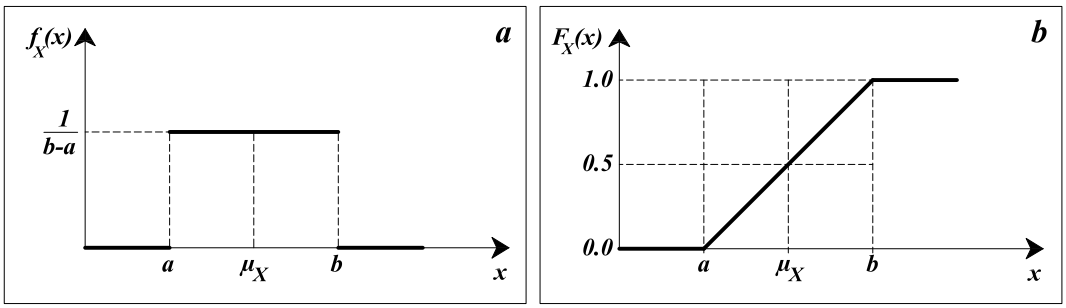
Sürekli rastgele değişkenlerin olasılık fonksiyonlarının söz konusu yapılarını ise, üniform, normal, lognormal ve weibull olasılık dağılım türleri için sırasıyla Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'den görmek mümkündür.

Aşağıda, yapısal güvenilirlik analizlerinde sürekli rastgele değişkenler için sıklıkla kullanılan üniform, normal, lognormal ve weibull tipi olasılık dağılımlarına yer verilmiş olup; sürekli rastgele değişkenlerin olasılıksal dağılımlarına ait tüm matematiksel modellerin PDF fonksiyonları ile yansıtılabilmesi sebebiyle, söz konusu dağılım türlerine ait tanımlamalar, PDF fonksiyonları üzerinden yapılmıştır.

3.1.2.5. Üniform Dağılım

Rastgele değişken X, belirli bir [a, b] aralığında üniform dağılıma sahip bir sürekli değişken ise; PDF fonksiyonu, [a, b] aralığında rastgele değişkenin tüm olası değerleri için Denklem (3.6)'daki gibi sabit bir değere eşittir. Yani söz konusu [a, b] değerler aralığındaki tüm sayıların gerçekleşme olasılığı eşittir (Nowak ve Collins, 2000). Bu aralığın dışında sayıların gerçekleşme olasılığı ise bulunmamakta olup; $f_X(x) = 0$'dır. Üniform dağılıma sahip sürekli bir rastgele değişkenin PDF ve CDF grafikleri, sırasıyla Şekil 3.4.(a) ve (b)'de verildiği gibidir.

$$f_X(x) = 1/(b-a) \qquad a \le x \le b \tag{3.6}$$



Şekil 3.4: Üniform dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için olasılık fonsiyonları: (a) PDF, (b) CDF (Hsu (1996)'dan adapte edilmiştir).

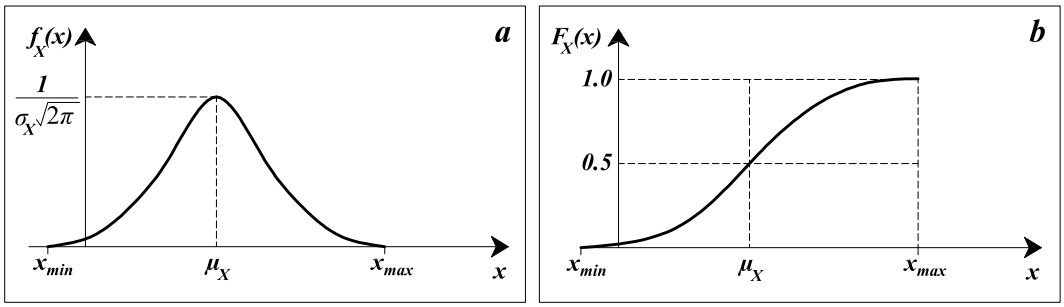
3.1.2.6. Normal Dağılım

Uygulamalı istatistikte en önemli olasılık dağılım türü olan normal dağılım ya da diğer adıyla gaussian dağılım, PDF fonksiyonu Denklem (3.7)'deki gibi olan iki parametreli bir dağılım türüdür (McCool, 2012; Hsu, 1996). Söz konusu parametreler, rastgele değişkenin standart sapmasını gösteren σ_X ve ortalamasını gösteren μ_X'dir. Herhangi bir

olasılık dağılımına uyan ve gerçekleşme aralığı n adet x_i değerinden oluşan bir rastgele değişkenin ortalaması, söz konusu değişkene ait değerler dizisinin merkezi eğilimini göstermektedir ve matematiksel olarak Denklem (3.8)'daki gibi μ_X ile hesaplanabilir. Söz konusu rastgele değişkenin ortalama değeri etrafındaki dağılımının ölçüsü olan standart sapma değeri ise, matematiksel olarak yine Denklem (3.8)'deki gibi σ_X ile hesaplanabilir. Bu iki parametreye bağlı olarak, söz konusu değişkenin μ_X değeri etrafındaki dağılımının boyutsuz ölçüsü olan varyasyon katsayısı (coefficient of variation: *c.o.v.*) ise yine Denklem (3.8)'deki gibi $c.o.v._X$ ile hesaplanır (Haldar ve Mahadevan, 2000). Normal dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için PDF ve CDF yapıları, sırasıyla Şekil 3.5. (a) ve (b)'deki grafiklerde görüldüğü gibidir.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu_X)^2/\left(2\sigma_X{}^2\right)} \qquad -\infty \le x \le +\infty \tag{3.7}$$

$$\mu_X = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \mu_X\right)^2} \qquad c.o.v._X = \frac{\sigma_x}{\mu_X} \tag{3.8}$$



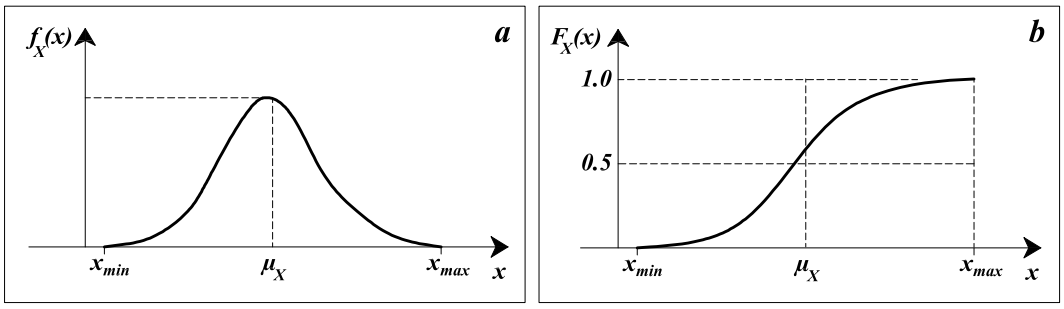
Şekil 3.5: Normal dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için olasılık fonksiyonu örnekleri (a) PDF, (b) CDF (Hsu, 1996'dan adapte edilmiştir).

3.1.2.7. Lognormal Dağılım

Doğal algoritması normal dağılıma sahip olan bir X rastgele değişkeni, lognormal dağılıma sahip rastgele değişken olarak isimlendirilir (McCool, 2012) ve PDF fonksiyonu Denklem (3.9)'deki gibidir. Bu denklemde ζ_X ve λ_X lognormal dağılımın şekil ve ölçek parametreleri olup; rastgele değişkenin σ_X ve μ_X değerleri cinsinden Denklem (3.10)'deki gibi elde edilirler (O'Connor, 2011). Lognormal dağılıma sahip sürekli bir X rastgele değişkeni için PDF ve CDF yapıları, sırasıyla Şekil 3.6.(a) ve (b)'deki grafiklerle verildiği gibidir.

$$f_X(x) = \frac{1}{\zeta_X x\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x-\lambda_X)^2/(2\zeta_X^2)} \qquad 0 \le x \le +\infty \tag{3.9}$$

$$\zeta_X^2 = \ln\left(1+\left[\sigma_X/\mu_X\right]^2\right) \qquad \lambda_X = \ln\mu_X - (1/2)\zeta_X^2 \tag{3.10}$$

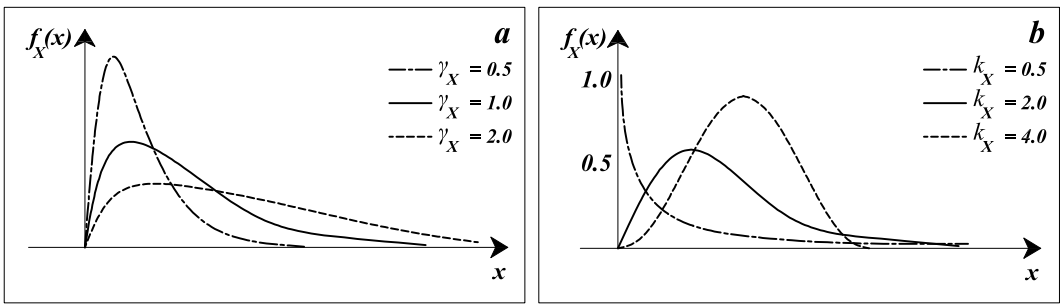


Şekil 3.6: Lognormal dağılıma sahip sürekli bir *X* rastgele değişkeni için olasılık fonksiyonu örnekleri (a) PDF, (b) CDF.

3.1.2.8. Weibull Dağılım

PDF fonksiyonu Denklem (3.11)'daki gibi olan bir sürekli rastgele değişken, weibull dağılıma sahip değişken olarak isimlendirilir (Rubinstein ve Kroese, 2008). Bu denklemde γ_X ve k_X parametreleri, *X* rastgele değişkeninin sırasıyla ölçek ve şekil parametreleridir. γ_X ölçek parametresinin değerine bağlı olarak, rastgele değişkeninin varyasyonu; k_X şekil parametresinin değerlerine bağlı olarak ise PDF fonksiyonunun formu değişmekte olup (Rinne, 2009); söz konusu parametrelerin bu etkileri, weibull dağılıma sahip sürekli bir *X* değişkeni için farklı γ_X ve farklı k_X değerleri için sırasıyla Şekil 3.7.(a) ve Şekil 3.7.(b)'de verilmiş olan PDF örneklerinde görülebilmektedir.

$$f_X(x) = \frac{k_X}{\gamma_X}\left(\frac{x}{\gamma_X}\right)^{k_X-1} e^{-\left(\frac{x}{\gamma_X}\right)^{k_X}} \tag{3.11}$$



Şekil 3.7: Weibull dağılıma sahip sürekli bir *X* rastgele değişkeni için PDF fonksiyonu örnekleri (a) Farklı γ_X değerleri için (b) Farklı k_X değerleri için (Rinne, 2009'dan adapte edilmiştir).

3.1.3. Rastgele Sayıların Üretilmesi

Belirli bir olasılıksal dağılım şekline uygun olacak şekilde rastgele sayılar üretmek, Monte Carlo Simülasyon Tekniği'nin en önemli aşamasıdır (Haldar ve Mahadevan, 2000). Üniform dağılımlı rastgele sayılar, istenilen herhangi bir olasılıksal dağılıma uyacak şekilde dönüştürülebildiği için çoğu simülasyon probleminin temeli olan rastgele sayılar, [0, 1] aralığında üniform dağılım sahip rastgele sayılar olarak üretilirler. Bu nedenle, rastgele sayılar, [0, 1] sürekli aralığında üniform dağılıma sahip rastgele değişkenler olarak da tanımlanabilir (Ayyub ve McCuen, 2011).

Monte Carlo simülasyonları için rastgele sayı dizilerinin hızlı üretilmesinin yanı sıra, etkili veya iyi bir şekilde üretilmesi de önemlidir. Hangi metotla üretilirse üretilsin, elde edilen rastgele sayı dizilerinin "iyi" sayılabilmesi için üniform dağılımlı, istatiksel açıdan bağımsız, tekrar üretilebilir ve oldukça uzun periyotlu (Landau ve Binder, 2000; Rubinstein, 1981) yapıda olması gerekmektedir. Simülasyon tekniğinin kullanılmaya başlandığı ilk zamanlarda rastgele sayı üretimi için yazı-tura atma, zar atma, kart karma, numaralı top çekilişi, rulet tekerleği gibi mekanik teknikler kullanılmakta idi. Fakat daha sonraları gerçekleştirilen simülasyon problemlerinde çok fazla sayıda rastgele sayıya ihtiyaç duyulması, mekanik tekniklerin bu durumda çok yavaş kalması, bu tekniklerle üretilen sayılarda sapmaların tespit edilmesi, üretilen sayı dizilerinin tekrar üretilememesi ve daha sonra gerçekleştirilen simülasyonların doğruluğunu test etmek için mekanik yollarla üretilen sayıların saklanması konusunda yaşanan zorluklar, aritmetik rastgele sayı üretim tekniklerinin gelişmesine yol açmıştır. Aritmetik rastgele sayı üretim teknikleri, analitik modellere dayalı, basit algoritmalara sahip, bilgisayar tabanlı tekniklerdir. (Rubinstein ve Kroese, 2008; Niederreiter, 1992). Günümüzde tercih edilen rastgele sayı üreticileri de aritmetik rastgele sayı üreticiler olup; çoğu popüler matematik programında (Örn: Matlab, Mathematica, Maple, Excel) mevcut bulunan altprogramlar ile tüm modern bilgisayarlarda istenilen olasılıksal dağılım özelliklerine sahip rastgele sayılar üretebilmek mümkündür (Nowak ve Collins, 2000; Haldar ve Mahadevan, 2000).

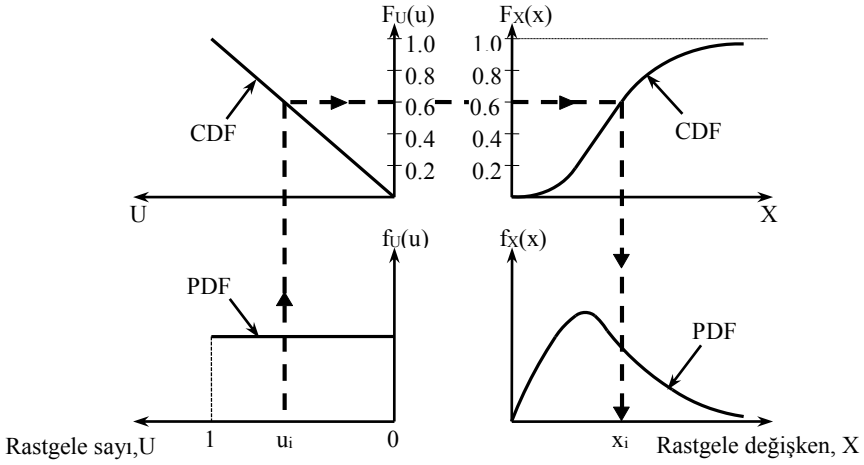
3.1.4. Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi

Rastgele sayıların bilgisayar yardımı ile üretilmesinin ardından bir sonraki aşama, üniform dağılıma sahip rastgele sayıları istenilen olasılık dağılım türünün karakteristiğine sahip rastgele sayılara dönüştürmektir (Haldar ve Mahadevan, 2000). Belirli bir olasılık

dağılımına sahip rastgele bir değişkenden başka bir olasılık dağılımına sahip tek boyutlu değişkenler üretmek için genel olarak kullanılan "inverse-transform method" (ters-transformasyon metodu), "alias method", "composition method", "acceptance-rejection method", "hybrid method" gibi metotlar bulunmaktadır (Rubinstein, 1981; Newman ve Barkema, 2001; Rubinstein ve Kroese, 2008). Üniform dağılıma sahip rastgele değişkenlerden üniform olmayan rastgele değişkenler üretmek için kullanılan metotlardan en iyisi (Newman ve Barkema, 2001) ve en yaygın olanı (Perros, 2009) "ters-transformasyon metodu" ya da "ters CDF (Cumulative Distribution Function) metodu"dur. Ters-transformasyon metodunda öncelikle, [0,1] aralığında üniform dağılıma sahip U rastgele değişkeni için u_i rastgele sayıları üretilir. Ardından, elde edilecek X rastgele değişkeninin her bir x_i değeri için CDF fonksiyonu, Denklem (3.12) 'deki gibi üretilen rastgele u_i sayısına eşitlenir ve son olarak, bu denklem x_i için Denklem (3.13)'deki gibi çözülerek X rastgele değişkenin x_i değerleri elde edilmiş olur. Bu denklemde F^{-1}, CDF fonksiyonunun tersi olup; söz konusu metot, CDF fonksiyonunun tersi için kapalı bir çözümün bulunması halinde kullanılabilmektedir (Nowak ve Collins, 2000; Ayyub ve McCuen, 2011). Bu metot ile gerçekleştirilen rastgele değişken dönüşümünün haritası, grafiksel olarak Şekil 3.8'deki gibi verilebilir.

$$F_X\left(x_i\right) = u_i \tag{3.12}$$

$$x_i = F_X^{-1}\left(u_i\right) \tag{3.13}$$



Şekil 3.8: Ters-transformasyon metodundaki simülasyon haritası (Haldar ve Mahadevan (2000)'dan adapte edilmiştir).

Bölüm 3.1.2'de tanımlanan olasılık dağılım türlerine sahip rastgele değişkenlerin ters-transformasyon metodu kullanılarak elde edilişi; üniform, normal, lognormal ve weibull dağılıma sahip rastgele değişkenler için sırasıyla Bölüm 3.1.4.1, Bölüm 3.1.4.2, Bölüm 3.1.4.3 ve Bölüm 3.1.4.4'de verilmiştir.

3.1.4.1. Üniform Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi

Rastgele değişken (X), eğer üniform dağılıma sahip ise; bu durumda rastgele değişkenin CDF fonksiyonu, Denklem (3.14)'deki gibidir. Ters-transformasyon metoduna göre bu CDF fonksiyonu, üniform dağılıma sahip u_i rastgele sayılarına Denklem (3.12)'deki gibi eşitlenerek, Denklem (3.13)'deki gibi x_i için çözülürse; üniform dağılıma sahip X rastgele değişkeninin her bir x_i değeri, her bir u_i rastgele sayısına karşılık gelecek şekilde Denklem (3.15) ile elde edilir (Nowak ve Collins, 2000).

$$F_X\left(x_i\right) = \left(x_i - a\right) / \left(b - a\right) \tag{3.14}$$

$$x_i = F_X^{-1}\left(u_i\right) = a + \left(b - a\right)\, u_i \tag{3.15}$$

3.1.4.2. Normal Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi

Rastgele değişken (X), normal dağılıma sahip ise; CDF fonksiyonu, Denklem (3.16)'deki gibidir. Fakat bu denklemin kapalı form bir çözümü yoktur. Bu nedenle [0, 1] aralığındaki üniform dağılıma sahip u_i rastgele sayıları, öncelikle X rastgele değişkeninin standart formu (Denklem (3.17)) olan standart normal sayılara (s_i) dönüştürülürler. Standart normal bir S değişkeninin ortalaması 0 ve standart sapması 1 olup; CDF fonksiyonu ise (3.18)'deki gibidir. Ters-transformasyon metoduna göre, u_i sayılarının s_i sayılarına dönüşümü, Denklem (3.12)'e benzer şekilde Denklem (3.19)'deki gibi yapılır. Bu denklemde F^{-1}, CDF fonksiyonunun tersidir. s_i standart normal sayıların elde edilmesinin ardından, her bir s_i sayısı ile bu sayıya karşılık gelen x_i normal rastgele sayısı arasındaki Denklem (3.17)'daki ilişki kullanılarak; normal dağılıma sahip bir X rastgele değişkeninin her bir x_i değeri, (3.20)'daki gibi elde edilir (Haldar ve Mahadevan, 2000).

$$F_X\left(x_i\right) = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-(1/2)\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2} dx \tag{3.16}$$

$$s_i = \frac{x_i - \mu_X}{\sigma_X} \tag{3.17}$$

$$F_S(s_i) = \int_{-\infty}^{s} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)s^2} ds \tag{3.18}$$

$$F_S(s_i) = u_i \qquad \Rightarrow \qquad s_i = F_S^{-1}(u_i) \tag{3.19}$$

$$x_i = \mu_X + \sigma_X s_i = \mu_X + \sigma_X F_S^{-1}(u_i) \tag{3.20}$$

3.1.4.3. Lognormal Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi

Rastgele değişken (X), lognormal dağılıma sahip bir değişken ise; bu durumda üniform dağılıma sahip u_i rastgele sayıları, Bölüm 3.1.4.2'de olduğu gibi Denklem (3.19) kullanılarak s_i standart sayılarına dönüştürülürler. Ancak normal dağılıma sahip x_i rastgele sayılarından (Bölüm 3.1.4.2) farklı olarak, elde edilecek lognormal x_i rastgele sayıları ile s_i standart sayıları arasındaki ilişki, Denklem (3.21)'daki gibidir. Bu denklemde ζ_X ve λ_X lognormal dağılımın sırasıyla şekil ve ölçek parametresi olup; değişkenin μ_X ve σ_X değerleri cinsinden Denklem (3.10)'daki gibi tanımlanmış idi. Denklem (3.21)'un x_i için düzenlenmesi ile lognormal dağılıma sahip X rastgele değişkeninin her bir x_i değeri, Denklem (3.22)'deki gibi elde edilir (Haldar ve Mahadevan, 2000).

$$s_i = \frac{\ln x_i - \lambda_X}{\zeta_X} \tag{3.21}$$

$$x_i = e^{(\lambda_X + \zeta_X s_i)} = e^{\left(\lambda_X + \zeta_X F_s^{-1}(u_i)\right)} \tag{3.22}$$

3.1.4.4. Weibull Dağılıma Sahip Rastgele Değişkenlerin Elde Edilmesi

Rastgele değişken (X), eğer weibull dağılıma sahip ise; bu durumda rastgele değişkenin CDF fonksiyonu, Denklem (3.23)'deki gibidir. Ters-transformasyon metoduna göre bu CDF fonksiyonu, üniform dağılıma sahip u_i rastgele sayılarına Denklem (3.12)'deki gibi eşitlenerek, Denklem (3.13)'deki gibi x_i için çözülürse; weibull dağılıma sahip X rastgele değişkeninin her bir x_i değeri, her bir u_i rastgele sayısına karşılık gelecek şekilde Denklem (3.24) ile elde edilir (Rubinstein, 1981).

$$F_X(x_i) = 1 - e^{(-x_i/\gamma_X)^{k_X}} \tag{3.23}$$

$$x_i = \gamma_X [-\ln(1-u_i)]^{1/k_X} \tag{3.24}$$

3.1.5. Simülasyon Sonuçlarının İstatiksel Olarak Değerlendirilmesi

Bir simülasyon çalışması sonucunda bir değişken parametre (X) için elde edilen değerlerin ortalaması (μ_X), standart sapması (σ_X) ve varyasyon katsayısı ($c.o.v._X$) gibi değerlerinin yanısıra o parametre için hesaplanan başarısızlık olasılığı (P_f - Probability of failure), P. yüzdelik değer gibi özel değerleri de simülasyon sonuçlarının istatiksel değerlendirmelerinde göz önünde bulundurulabilir.

3.1.5.1. Başarısızlık olasılığı (P_f – Probability of failure)

Bir değişken parametrenin (X) bir limit duruma göre "başarısızlık olasılığı", Denklem (3.25) ile tanımlanan bir limit durum fonksiyonunu kullanarak, Denklem (3.26)'deki gibi tanımlanır. Denklem (3.25)'de, $g(X)$ limit durum fonksiyonu olup; X değişken parametresi için tanımlanan bir limit değer (*Limit*) ile bu değişken parametre için i. simülasyonda elde edilen değerin (x_i) farkı olarak tanımlanır. Bu fonksiyonun sıfıra eşit ya da küçük olması ise, *Limit* değerinin aşıldığını göstermekte olup; başarısızlık durumu olarak tanımlanır. Bu başarısızlık durumlarının tüm simülasyonlar içerisinde gerçekleşme yüzdesi ya da olasılığı (P_r) ise; Denklem (3.26)'deki gibi başarısızlık olasılığı (P_f - Probability of failure) olarak tanımlanır.

$$g(X) = Limit - x_i \qquad g(X) \le 0 \Rightarrow \text{Başarısızlık durumu} \tag{3.25}$$

$$P_f = P_r\left[g(X) \le 0\right] \tag{3.26}$$

Monte Carlo simülasyonları ile söz konusu P_f değeri, Denklem (3.27)'daki gibi hesaplanır. Bu denklemde $N_{[g(X)\le 0]}$, Denklem (3.25) ile tanımlanan $g(X) \le 0$ başarısızlık durumunun gerçekleştiği simülasyon sayısını göstermektedir. Bu sayının toplam Monte Carlo simülasyon sayısına (N_{MCA}) oranı, P_f başarısızlık olasılığını verir (Alhan ve Gavin, 2005)

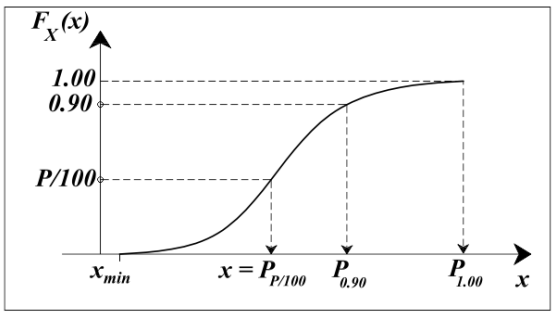
$$P_f = \frac{N_{[g(X)\le 0]}}{N_{MCA}} \tag{3.27}$$

3.1.5.2. P. yüzdelik değer (P^{th} percentile value)

Rastgele değişken değerler alan bir parametre (X) için "P. yüzdelik değer" (P^{th} percentile value), söz konusu parametrenin aldığı değerlerin %P kadarının altında kalacağı değeri göstermektedir. Bu değer, söz konusu X değişkenine ait kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) grafiğinde, kümülatif dağılım değerinin ($F_X(x_i)$), P/100 olması halinde değişkenin

aldığı (x) değeri olup; bir X değişkeni için P. yüzdelik değer $P_{P/100}$ olarak Denklem (3.28) 'deki gibi elde edilir. Örneğin 90. yüzdelik değeri, $P_{0.90}$, 100. yüzdelik değeri, $P_{1.00}$ şeklinde gösterilmektedir. Bu değerler, Şekil 3.9'deki gibi bir X değişkenine ait CDF grafiği üzerinden de görülebilir.

$$F_X(x) = P/100 \quad \Rightarrow \quad x = F_X^{-1}(P/100) = P_{P/100} \tag{3.28}$$



Şekil 3.9: P. yüzdelik değer.

3.2. 3D-BASIS PROGRAMI

3D-BASIS programı (Nagarajaiah ve diğ., 1991a), üç boyutlu taban izolasyonlu yapıların doğrusal olmayan dinamik analizlerini gerçekleştirmek üzere geliştirilmiş açık kaynak kodlu ve özel amaçlı bir programdır. Program, FORTRAN programlama dili ile kodlanmış olup; kullanıcı tarafından hazırlanan 3DBASIS.DAT data dosyasından üstyapı, altyapı, ve izolasyon sistemine ait bilgileri formatsız okumalar yaparak; ve yine kullanıcı tarafından hazırlanan WAVEX.DAT ve WAVEY.DAT dosyalarından ise yapının maruz kalacağı yer hareketi bileşenleri için her zaman adımındaki ivme değerlerini okuyarak; göz önünde bulundurulan yapı için söz konusu yer hareketi veya yer hareketi çiftleri etkisinde, doğrusal veya doğrusal olmayan Zaman Tanım Alanı Analiz Yöntemi ile gerçekleştirdiği üç boyutlu dinamik analiz sonuçlarını 3DBASIS.OUT sonuç dosyasına formatlı olarak yazdırmaktadır.

3D-BASIS programı (Nagarajaiah ve diğ., 1991a), iki eksenli etkileri de göz önünde bulundurarak (1) düşük veya yüksek sönümlü olabilen kauçuk esaslı izolasyon sistemlerinin, (2) kayıcı izolasyon sistemlerinin ve (3) kauçuk esaslı ve kayıcı elemanların da bulunduğu karma izolasyon sistemlerine sahip üç boyutlu taban izolasyonlu yapıların

doğrusal olmayan dinamik analizi için geliştirilmiştir (Reinhorn vd., 2010). Programın 3D-BASIS-M (Tsopelas ve diğ., 1991), 3D-BASIS-ME (Tsopelas ve diğ., 1994), 3DBASIS-TABS (Nagarajaiah ve diğ., 1993) ve 3D-BASIS-ME-MB (Tsopelas ve diğ., 2005) isimli versiyonları bulunmakta olup; program serisi halini almıştır. Seriler, basitleştirilmiş yapısal modellerden karmaşık yapısal sistemlerde bulunan kolonlar, kirişler, duvarlar ve su deposu gibi daha detaylı yapısal model bileşenlerine kadar farklılık göstermiştir. 3D-BASIS-M programı, birden çok sayıda bitişik nizamlı sismik izolasyonlu yapının ortak temel üzerine mesnetlenmesi halinde, bu yapıların doğrusal olmayan dinamik analizlerini gerçekleştirmek için Tsopelas ve diğ. (1991) tarafından geliştirilmiştir. 3D-BASIS-ME programı ise; 3DBASIS-M programına (i) kayıcı izolatörlerde normal kuvvet etkisinin dikkate alınması, (ii) HDRB izolatörlerde yüksek deformasyon durumunda pekleşme etkisinin göz önüne alınması, (iii) sürtünme sarkaç (FPS) izolatörleri modellemek için yeni bir elemanın eklenmesi ve (iv) doğrusal olmayan yeni bir viskoz sönümleyici eklenmesi şeklinde yapılan katkılar ile Tsopelas ve diğ. (1994) tarafından geliştirilmiştir. Diğer taraftan, 3D-BASIS-TABS programı da üç boyutlu taban izolasyonlu yapıların doğrusal olmayan dinamik analizi için Nagarajaiah ve diğ., (1993) tarafından geliştirilmiş olup; bu versiyonda diğer program versiyonlarından farklı olarak kolon, kiriş, panel duvar elemanlarının geometrik bilgileri, kesit bilgileri, malzeme bilgileri ve yük bilgileri ile üstyapı çerçeve bilgileri de tanımlanmaktadır. Serinin son versiyonu olan 3D-BASIS-ME-MB ise, farklı seviyelerde bulunabilen çoklu izolasyon sistemleri üzerindeki çoklu üstyapıların doğrusal olmayan analizlerini yapmakta olup; 3D-BASIS-ME programına (i) gelişmiş viskoz sönümleyici eleman modeli eklenmesi, (ii) eksenel izolatör yükleri üzerinde devrilme momenti etkilerinin dikkate alınması, (iii) gelişmiş bir FPS izolatör elemanının eklenmesi şeklinde yapılan bir çok katkı ile (Tsopelas ve diğ., 2005) tarafından geliştirilmiştir.

3.2.1. Üst Yapı Elemanlarının Matematiksel Modellemesi

3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programında üç boyutlu üstyapı, daima elastik davranacağı varsayımı ile modellenmektedir. Eksantrik kütle ve rijitlik merkezlerine sahip çok katlı binalar, hareket üniform olsa ve de hiçbir açısal bileşene sahip olmasa bile, deprem hareketine karşı birleşik yanal-burulma davranışı ile karşılık verirler. Bu tür binaların analizi, yanal serbestlik derecelerine ilave olarak burulma serbestliklerine de ihtiyaç duyar. Bu nedenle programda, her katta üç serbestlik dereceli üç boyutlu yapının

elastik üstyapıyı tam anlamıyla temsil edebileceği varsayılmıştır. 3D-BASIS'de iki adet üstyapı opsiyonu bulunmaktadır. Birinci seçenekte elastik üstyapı, üç boyutlu kayma çerçevesi olarak ve ikinci seçenekte ise, tam üç boyutlu yapı olarak modellenmektedir. Her iki seçenek de şu varsayımlar üzerine kurulmuştur:

i. X ve Y doğrultularında yanal ve de kat kütle merkezi etrafında dönme olmak üzere her kat üç serbestlik dercesine sahiptir. Bu serbestlikler, her katın kütle merkezine atanmıştır.

ii. Taban seviyesinde tüm izolasyon elemanlarını birleştiren bir rijit döşeme bulunmaktadır. Taban seviyesinde de üç serbestlik derecesi taban katının kütle merkezine atanmıştır.

iii. Üstyapının üç boyutlu gösteriminde her katta üç serbestlik derecesi gerekli olduğundan, modal analizde gerekli olan mod sayısı daima 3'ün katları şeklindedir. Minimum gerekli mod sayısı, üçtür (Nagarajaiah vd., 1991b).

Kayma çerçevesi modelinde N katlı olarak idealize edilmiş üstyapı, kütlesiz ve eksenel rijit olan kolon ve duvarlar üzerine mesnetlenmiş rijit kat döşemelerinden oluşmaktadır. Taban katının ve üst katların kütle merkezinin aynı düşey eksen üzerinde bulunduğu; fakat rijitlik merkezlerinin aynı düşey eksende bulunmasına gerek olmadığı varsayılmıştır (Nagarajaiah vd., 1989). Bu modelde her kat kolonlarının iki ucu ankastre varsayılarak rijitlikleri hesaplanmakta; her kat için ayrı ayrı bu değerlerin toplanması suretiyle kat rijitlikleri hesaplanarak programa kat rijitlik değerleri veri olarak girilmektedir.

Tam üç boyutlu modelde ise; elastik üstyapı, adından da anlaşılacağı üzere tam üç boyutlu bir yapı olarak dikkate alınmaktadır. Söz konusu modelde, ETABS (Wilson ve diğ., 1975) veya benzeri bir bilgisayar programı (Örneğin: SAP2000 (CSI,2011)) ile taban-ankastre durum için gerçekleştirilen serbest titreşim analizinden üstyapının özdeğerleri ve özvektörleri elde edilmekte ve bu değerler, doğrusal olmayan izolasyon sistemini içeren analitik modelde kullanılmaktadır. Bu modelde katların kütle merkezlerinin aynı eksen üzerinde bulunmasına gerek yoktur (Nagarajaiah vd., 1991b). İzolasyon sistemi ise, doğrusal olmayan davranışa sahip olacak şekilde dikkate alınmakta olup; elemanların doğrusal olmayan kuvvet-deplasman karakteristikleri açık bir şekilde modellenmektedir. Bu modelde ayrıca, izolasyon sisteminin düşey doğrultuda rijit olduğu varsayılmakta; mesnetlerin burkulma dayanımı ise, ihmal edilmektedir. Alhan ve Sürmeli (2011),

çalışmasında farklı izolasyon periyoduna ve farklı kat sayısına sahip sismik izolasyonlu yapıların kayma çerçevesi modeli ve tam üç boyutlu model ile modellenmeleri durumundaki performansları karşılaştırılmış olup; bu çalışma sonucunda incelenen doğrusal olmayan izolasyon sistemli binaların ivme parametreleri haricinde göz önünde bulundurulan diğer yapısal cevap parametreleri için iki modelden birbirine çok yakın değerler elde edildiği görülmüştür.

3.2.2. İzolasyon Sistemi Elemanları

Bir izolasyon sisteminin davranışını modellemek için 3D-BASIS programında şu elemanlar bulunmaktadır:

i. *Doğrusal elastik elemanlar:* Doğrusal viskoz elemanla birlikte elastomerik mesnetlerin davranışının yaklaşık olarak simülasyonu için kullanılabilir. Bu elemanlar ayrıca, gerçekten doğrusal elastik davranış sergileyen düşük sönümlü kauçuk (LDRB) izolatörleri modellemek için de kullanılabilirler.

ii. *Doğrusal viskoz elemanlar:* Elastomerik mesnetlerdeki eşdeğer sönümü modellemek için kullanılabilir. Bu elemanlar da ayrıca, doğrusal davranış sergileyen viskoz sönümleyicileri modellemek için kullanılabilir.

iii. *Elastomerik mesnetler için tek eksenli ve iki eksenli histeretik elemanlar:* Bu elemanlar, yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerin, kurşun çekirdekli mesnetlerin, kurşun ekstrüzyon cihazların ve yumuşak çelik sönümleyicilerin davranışının simülasyonu için kullanılabilir. Tek eksenli ve iki eksenli davranışın her ikisi de modellenebilir.

iv. *Kayma tipi mesnetler için tek eksenli ve iki eksenli histeretik elemanlar:* Bu elemanlar ise, teflon-çelik ara yüzlerinin ve diğer sürtünme ara yüzlerinin davranışının simülasyonu için kullanılabilirler. Bu elemanlar ile de tek eksenli ve iki eksenli davranışın her ikisi de modellenebilir (Nagarajaiah vd., 1989).

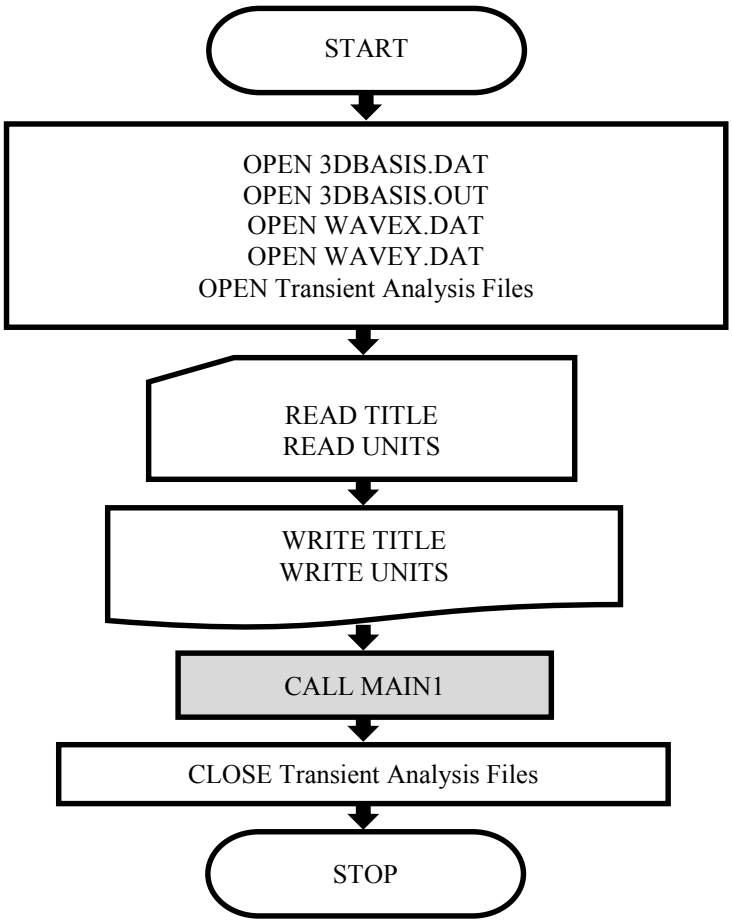
3.2.3. Programın Çözüm Algoritması ve Kod Yapısı

Program için geliştirilen çözüm algoritması ise, iki aşamalı olup; bu aşamalar aşağıdaki gibidir:

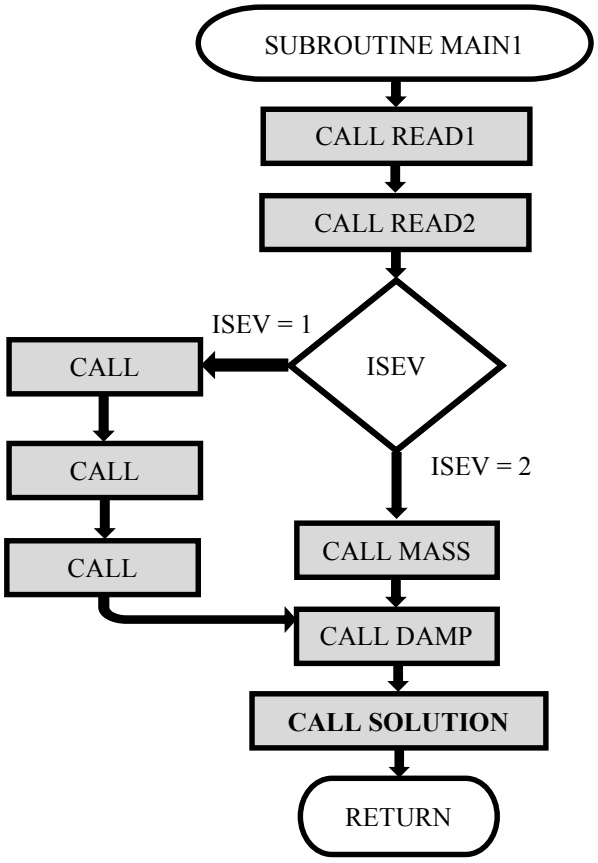
i. Koşulsuz kararlı olan Newmark sabit-ortalama-ivme metodunu kullanarak, hareketin denklemlerinin çözümü (Newmark metodu, pozitif ve negatif tanjant rijitliğinin her ikisi için de koşulsuz kararlı olduğu için için seçilmiştir.)

ii. Koşulsuz kararlı olan yarı-kapalı Runge Kutta metodunu kullanarak, doğrusal olmayan izolasyon elemanlarının davranışını veren diferansiyel denklemlerin çözümü.

Ayrıca, dengeye ulaşılıncaya kadar her zaman adımında, düzeltici virtüel kuvvetler içeren bir iteratif prosedür de kullanılmaktadır (Nagarajaiah vd., 1991b). Üstyapı, altyapı ve izolasyon sistemi için kabulleri, izolasyon sistemi eleman çeşitleri ve çözüm metodu yukarıdaki gibi özetlenen 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programının akış diyagramı, genel hatları ile Şekil 3.10'daki gibidir. Programda söz konusu yapıların analizi, MAIN1 alt programında gerçekleştirilmekte olup; bu alt programın akış diyagramı ise, genel hatlarıyla Şekil 3.11'deki gibidir.



Şekil 3.10: 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programının ana hatlarıyla akış diyagramı.



Şekil 3.11: MAIN1 alt programının ana hatlarıyla akış diyagramı.

MAIN1 altprogramında çağrılan diğer altprogramların gerçekleştirdiği işlemler, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

(1) *SUBROUTINE READ1*: Değişken ve alan tanımlamalarının ardından MAIN1 altprogramı tarafından çağırılan ilk altprogram READ1, 3DBASIS.DAT dosyasından kontrol parametrelerini okur ve program sırasında oluşturulan tüm dizilerin kaydedildiği bir master dizide bu dizilerin yerlerini belirlemek amacıyla bir alan oluşturarak; dizilerin bu alan içindeki konumlarını belirler. Ardından 3DBASIS.DAT data dosyasından okuduğu tüm kontrol parametrelerini formatlı olarak 3DBASIS.OUT dosyasına yazdırır ve son olarak master dizi için boyut kontrolü yapan "SUBROUTINE CHECK**"** çağırılır. Bu altprogram ise, READ1'de oluşturulan alana kaydedilen dizilerin toplam boyutunu veren değişkeninin boyutunu kontrol eder.

(2) *SUBROUTINE READ2*: READ1 tarafından okunan kontrol parametrelerinin ardından 3DBASIS.DAT dosyasında geriye kalan tüm verileri okur ve formatlı olarak 3DBASIS.OUT dosyasına yazdırır. Alt programın tamamlanmasının ardında yine MAIN1 altprogramına geri dönülür.

(3) *ISEV Kontrolü*: Burada üstyapının "Kayma çerçevesi" ya da "Tam üç boyutlu yapı" tipinde olup olmadığını belirten ISEV değişkeni kontrolü yapılır. ISEV = 1 yani yapının "Kayma çerçevesi" olarak alınması halinde sırasıyla STIFF1, MASS ve JACOBI altprogramı; ISEV = 2 yani yapının "Tam üç boyutlu yapı" olarak alınması halinde ise MASS altprogramı çağırılarak ISEV için kurulan "blok if" yapısı tamamlanır ve MAIN1 altprogramının normal akışına dönülür.

(4) *SUBROUTINE STIFF1*: Bu alt program, sistemin rijitlik matrisini oluşturmaktadır. Bunun için 3DBASIS.DAT data dosyasında kullanıcı tarafından girilen kat yanal rijitlikleri ve kat burulma rijitlikleri ile eksantrisitenin etkisini katmak amacıyla kat rijitlik merkezleri ile kat kütle merkezleri arasındaki eksantrisite değerlerini kullanmaktadır. Altprogram ayrıca izolasyon sistemi elemanlarının rijitlik matrisine katkısını sağlamak için yine kullanıcı tarafından 3DBASIS.DAT dosyasında girilen lineer elastik izolasyon sisteminin rijitlikleri ile eksantrisitelerini kullanmaktadır. Program öncelikle sistem rijitlik matrisinin üst üçgen terimlerini ve simetriden yararlanarak alt üçgen terimlerini elde ederek; izolasyon sistemi rijitlik terimlerini de içeren izolasyonlu yapı rijitlik matrisini ve ardından son olarak sadece üstyapıya ait rijitlik terimlerini içeren üstyapı rijitlik matrisini oluşturmakta ve MAIN1 altprogramına dönmektedir.

(5) *SUBROUTINE MASS*: MASS altprogramı, sistemin diyagonal kümülatif kütle matrisini oluşturmaktadır. Bunun için data dosyasından okunan üstyapıya ve taban katına ait yanal kütle değerleri ile kat kütle atalet momentleri kullanılmaktadır. STIFF1 altprogramına benzer şekilde burada da öncelikle taban katı da dahil olmak üzere tüm kat kütleleri ve kütle atalet momentleri, izolasyonlu yapı kütle matrisine kaydedilmektedir. Son olarak da sadece üstyapıya ait kütle terimlerini içeren üstyapı kütle matrisi oluşturularak MAIN1 altprogramına dönülmektedir.

(6) *SUBROUTINE JACOBI:* ISEV = 1 olması hali için tanımlanan if bloğunda MAIN1 altprogramı, MASS altprogramının ardından JACOBI altprogramını çağırmaktadır. Bu altprogram, çok serbestlik dereceli sistemin mod şekillerini veren özdeğer problemini çözmek için kullanılmaktadır. Bu altprogramın çalıştırılmasıyla, tüm modlara ait mod şekilleri ve özdeğerler elde edilmekte ve bu altprogramın içerisinde çağırılan bir başka altprogram "SUBROUTINE MATPRT**"** ile formatlı olarak 3DBASIS.OUT dosyasına yazdırılmaktadır.

(7) *SUBROUTINE DAMP*: Bu altprogram, sistemin modal sönüm matrisini oluşturmaktadır. Bu amaçla öncelikle kullanıcı tarafından data dosyasında tanımlanan üstyapı modal sönüm oranları ve JACOBI altprogramında çözülen özdeğer probleminden elde edilen her moda ait açısal radyal frekanslar kullanılarak; üstyapıya ait modal sönüm matrisi oluşturulmaktadır. Ardından bu matrise, kullanıcı tarafından data dosyasında izolasyon sistemi için tanımlanan global sönüm katsayıları eklenerek, sistemin modal sönüm matrisi elde edilmektedir.

(8) *SUBROUTINE SOLUTION*: Bu altprogramda sırasıyla çağırılan altprogramlar serisi (TRANSF, TMULT, MULT, STIFF2, LOAD, GAUSS, SUBROUTINE BEARING, HYS, BIAXIAL, UNIAXIAL, CONST, CONSTU, DRIFT1, SUBROUTINE DRIFT2, ACCL1 ve ACCL2) ile hareket denklemleri çözülmekte ve Zaman Tanım Alanında Analiz Yöntemi ile yapısal cevap parametreleri için tüm zaman adımlarındaki değerler elde edilmektedir. Program ayrıca, tüm zaman adımlarında elde edilen değerlerin pik değerlerini de hesaplayabilmektedir.

3.2.4. Programda Yapılan Modifikasyonlar

Detayları, Bölüm 3.2'de verilen orijinal 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programı, bir izolasyon sistemi için bir yer hareketi bileşeni veya yer hareketi çifti etkisinde göz önünde bulundurulan taban izolasyonlu yapı için izolasyon sistemine bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirerek; yapısal cevap parametrelerini elde etmektedir. Ancak mevcut tez çalışmaları kapsamında, Monte Carlo simülasyonları dahilinde izolasyon sistemi karakteristik parametreleri birbirinden farklı, çok sayıda (N_{MCA} adet, Örneğin 5,000; 10,000 adet) izolasyon sistemi üretilerek (Bölüm 3.5.2); bu sistemlerle oluşturulmuş N_{MCA} adet üç boyutlu sismik izolasyonlu binanın aynı tarihi yer hareketi çifti altındaki veya bu binaların her biri için ayrı ayrı üretilmiş sentetik depremler altındaki dinamik analizlerinin yine Monte Carlo simülasyonları dahilinde yapılması planlanmıştır. Bu plan doğrultusunda, orijinal 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programının her bina için ayrı ayrı çalıştırılmasının zaman açısından mümkün olmaması sebebiyle, söz konusu 3D-BASIS programında tekrarlı analizler yapmak üzere, mevcut tez çalışması kapsamında modifikasyonlar yapılmıştır. Tez çalışmasının iki ana bölümünde de orijinal programda modifikasyonlara ihtiyaç duyulmuştur. Gerçekleştirilen modifikasyonlardan birinci ana bölüm çalışmaları

kapsamında yapılanlara ait detaylar, Bölüm 3.5.3'de; ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında yapılanlara ait detaylar ise, Bölüm 3.6.1.3'de verilmiştir.

3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN PROTOTİP YAPI

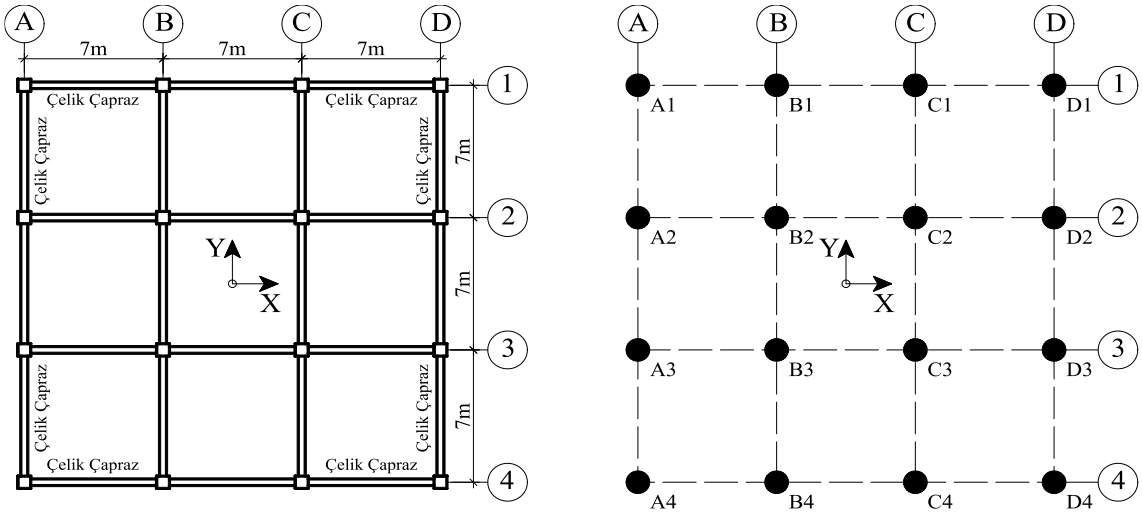
Bu bölümde, tez çalışması kapsamında analizi gerçekleştirilen sismik izolasyonlu binalara ait üst yapı modeline ait yapısal sistem ve bu üst yapıda kullanılan yapı malzemeleri bilgisi ile mevcut çalışma kapsamında oluşturulan tüm izolasyon sistemleri için aynı olan izolasyon sistemi yerleşim planı hakkında bilgi verilmektedir.

3.3.1. Yapısal Sistem ve Malzeme Özellikleri

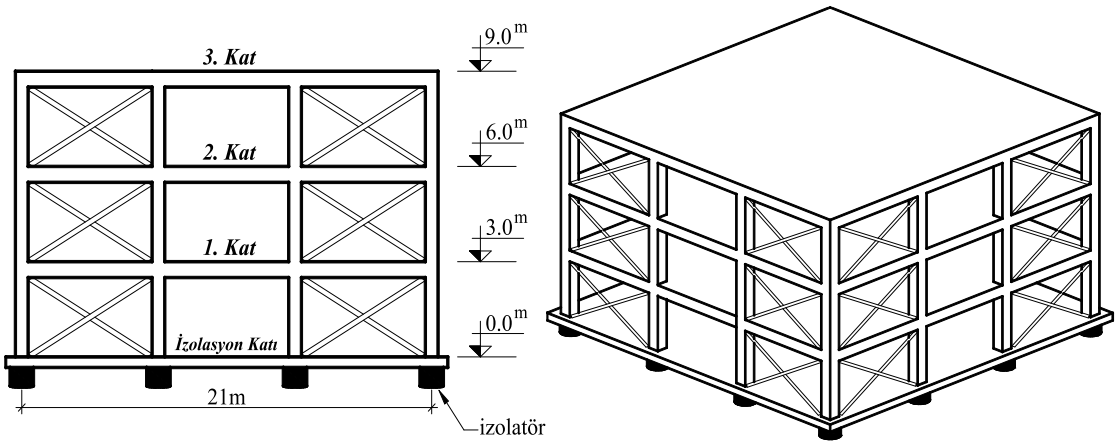
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm analizlerde aynı üstyapı modeli kullanılmış olup; taban izolasyonlu bina modellerinde söz konusu üstyapı, her kolonun altına merkezi olarak yerleştirilmiş, ikili-doğrusal davranışa sahip 16 adet kauçuk esaslı izolatörden oluşan izolasyon sistemi üzerine mesnetlenmiştir. Üstyapıya ait tipik kat planı ve izolasyon sistemi planı, Şekil 3.12'de verilmiştir. Yapının tipik cephe ve üç boyutlu görünüşleri ise, Şekil 3.13'daki gibidir. Üstyapısına ait yapısal sistem ve malzeme bilgisi ile izolasyon sistemi planı Tena-Colunga ve Escamilla-Cruz (2007)'dan alınmış olan yapı, her iki asal eksene (X ve Y) göre simetrik olup; her iki yönde eşit açıklıklı (7 m) ve kat yükseklikleri bina boyunca eşit (3 m) olan çerçevelerden oluşan bir binadır. Döşeme plakları, kolon ve kiriş elemanları betonarmedir. Yapının 1 ve 4 aksları üzerinde bulunan A-B ve C-D açıklıkları ile A ve D aksları üzerinde bulunan 1-2 ve 3-4 açıklıklarında ise, kutu profillerden oluşturulmuş çelik çapraz kuşaklar bulunmaktadır. Yapı elemanlarına ait elastisite modülü (E), beton karakteristik basınç dayanımı (f_c), çelik akma dayanımı (f_y) bilgilerini içeren malzeme bilgileri ile boyut bilgileri Tablo 3.1'de bulunmaktadır.

Tablo 3.1: Üst yapı elemanlarına ait malzeme ve kesit bilgileri.

Eleman türü	E **(N/mm²)**	f_c **(N/mm²)**	f_y **(N/mm²)**	**Boyutlar (cm)**	
Betonarme Elemanlar	21707.94	24.52	-	**Kolonlar** **Kirişler**	: 65 × 65 : 35 × 75
Çelik Elemanlar	199947.98	-	248.21	**Çapraz kuşaklar**	: 25 × 25 × 0.8



Şekil 3.12: Kat planı ve izolasyon sistemi planı (Tena - Colunga ve Escamilla-Cruz, 2007'den adapte edilmiştir.).

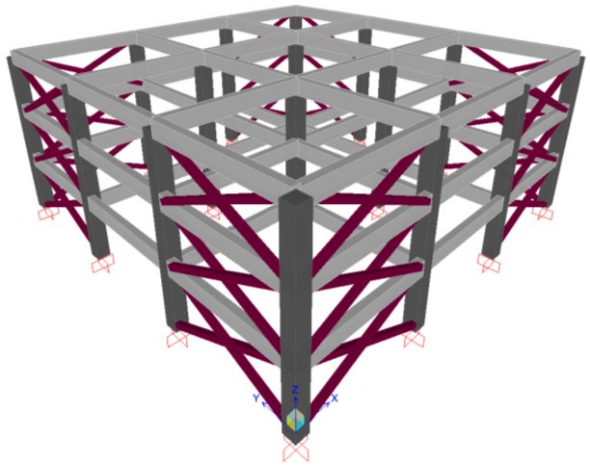


Şekil 3.13: Tipik cephe görünüşü ve üç boyutlu görünüş.

3.3.2. Taban-Ankastre Binanın Modal Analizi

Taban izolasyonlu bina modellerinin oluşturulabilmesi ve analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için; bina, öncelikle 3 normal katlı ve taban-ankastre olarak ele alınmış ve SAP2000 (CSI, 2011) programında Modal Analiz (Serbest Titreşim Analizi) gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analiz için SAP2000 programında oluşturulan taban-ankastre bina modeli, Şekil 3.14'de verilmiştir. Modelde, tüm kat döşemeleri rijit diyafram olarak tanımlanmış olup; her katın iki yatay (X ve Y eksenleri doğrultusunda) ve bir açısal (düşey eksen etrafında) deplasman serbestliğine sahip olacak şekilde tanımlanması suretiyle, toplam 9 mod şekli dikkate alınmıştır. Modelde kat kütlelerinin kat ağırlık merkezinde yığılı olduğu varsayılarak; X ve Y doğrultularındaki ötelenme

kütleleri (m_x, m_y) ve dönel kütle atalet momenti (m_θ) değerleri, her kat için eşit olmak üzere, sırasıyla 330.33 kNs^2/m ve 24279.50 kNs^{2}m alınmıştır. Gerçekleştirilen modal analiz neticesinde, taban-ankastre bina için elde edilen mod şekillerine ait periyot (T), açısal frekans (ω) ve özdeğer (λ) bilgileri Tablo 3.2'deki gibidir. Binanın 1. mod periyodu, Tena-Colunga ve Escamilla-Cruz (2007) çalışmasında elde edilen değer olan $T_1 = 0.187$ s'ye çok yakın olmak üzere $T_1 = 0.183$ s olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.14: Taban-ankastre binanın SAP2000 modeline ait görünüş.

Tablo 3.2: Taban-ankastre binaya ait modal analiz sonuçları.

Mod	Periyot (T) (s)	Açısal frekans (ω) (rad/s)	Özdeğer (λ) (rad^2/s^2)
1	0.183	34.438	1186.0
2	0.183	34.438	1186.0
3	0.113	55.967	3132.3
4	0.060	104.490	10919.0
5	0.060	104.490	10919.0
6	0.038	164.630	27104.0
7	0.037	172.130	29628.0
8	0.037	172.130	29628.0
9	0.024	259.880	67535.0

3.4. ÇALIŞMADA KULLANILAN DEPREM KAYITLARI

Tez çalışmasının birinci ana bölümündeki dinamik analizler, tarihi deprem kayıtları kullanılarak; ikinci ana bölümündeki dinamik analizler ise, ileri-yönelim etkisi içeren

sentetik yakın-fay deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarihi deprem kayıtları hakkındaki bilgiler, Bölüm 3.4.1'de; sentetik deprem kayıt bilgileri ise, Bölüm 3.4.2'de verilmiştir.

3.4.1. Tarihi Deprem Kayıtları

Mevcut tez çalışmasının birinci ana bölümünde oluşturulan tüm taban izolasyon sistemleriyle oluşturulan binalar; bu binaların farklı frekans içeriklerine, farklı en büyük yer ivmelerine ve hızlarına sahip mevcut kuvvetli yer hareketi kayıtları altındaki davranış değişkenliğini görmek amacıyla, Tablo 3.3'de verilmiş olan ve moment büyüklüğü (M_w), 6.5'dan büyük olan 6 tarihsel depremin Tablo 3.4'de verilen ileri - yönelim (forward-directivity) etkisinin bulunduğu 27 kaydına ve Tablo 3.5'de verilen ileri - yönelim etkisinin bulunmadığı 27 kaydına olmak üzere, toplam 54 adet yer hareketi kaydına ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Söz konusu tarihi depremlerin Tablo 3.4'deki bileşenleri, FDi (i = 1, 2,…, 27) kodlarıyla gösterilirken; Tablo 3.5'deki bileşenleri, NFDi (i = 1, 2, …, 27) kodlarıyla gösterilmiştir. Bu tablolarda, tarihsel depremin adı, depreme ait yer hareketi bileşeninin kodu, hareketin kaydedildiği istasyonun numarası, adı ve faya olan en yakın mesafesi (r) ile kayıtların temin edildiği ajans bilgilerinin yanı sıra; yer hareketi bileşeninin yönü, en büyük yer ivmesi (Peak Ground Acceleration: PGA) ve en büyük yer hızı (Peak Ground Velocity: PGV) bilgileri bulunmaktadır. İleri-yönelim etkisi içeren yakın-fay yer hareketlerinin puls içeren yer hareketleri olması sebebiyle, Tablo 3.4'de ayrıca söz konusu FD yer hareketleri için puls periyodu (T_p) bilgileri de verilmiştir. Bu T_p değerleri, Sehhati ve diğ. (2011)'den temin edilmiştir. Tez çalışmasının birinci ana bölümünde oluşturulan tüm taban izolasyon sistemleriyle oluşturulan binalar, X ve Y eksenleri doğrultusunda uygulanmış yer hareketi bileşenlerine maruz bırakılmış olup; Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'de bu yer hareketlerinden sadece X ekseni doğrultusunda uygulanan bileşenlere yer verilmiştir. Söz konusu yer hareketi bileşenleri ile aynı istasyonda kaydedilen ve bu bileşenlere dik doğrultudaki bileşenler ise, binalara Y doğrultusunda uygulanmış olup; yer kısıtı nedeniyle bu bileşenlere ait yön, PGA ve PGV bilgilerine yer verilmemiştir. Mevcut tez çalışması kapsamında kullanılan tarihi depremlerin ve kayıt istasyonlarının seçiminde Sehhati ve diğ. (2011) ile Bray ve Rodriguez-Marek (2004) çalışmalarından yararlanılmış olup; X ve Y olmak üzere her iki eksen doğrultusunda uygulanan tüm tarihi deprem hareketi kayıtlarına ait bilgiler ile ivme

ve hız dataları, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER, 2011) veri tabanından temin edilmiştir.

Tablo 3.3: Çalışmada kullanılan tarihi depremler.

Deprem	Ülke	Tarihi	Moment Büyüklüğü (M_w)
Chi-Chi	Tayvan	20.09.1999	7.6
Kocaeli	Türkiye	17.08.1999	7.4
Düzce	Türkiye	12.11.1999	7.1
Loma Prieta	Amerika	18.10.1989	6.9
Northridge	Amerika	17.01.1994	6.7
Erzincan	Türkiye	13.03.1992	6.9

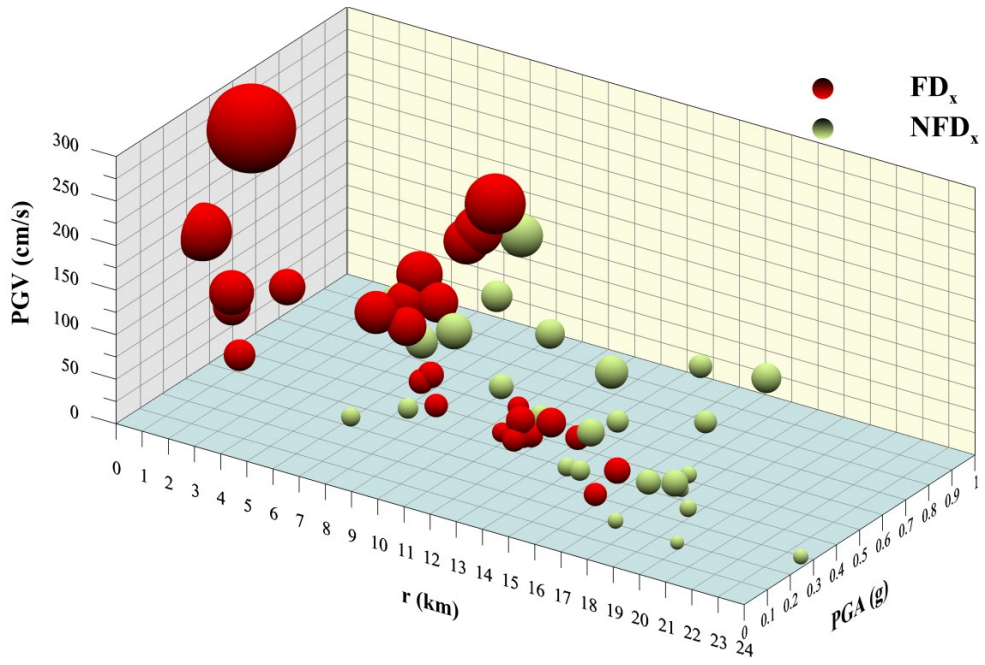
Tablo 3.4: İleri-yönelim etkisi içeren (FD: Forward-Directivity) tarihi yer hareketi bileşenleri.

Kodu	Deprem	İstasyon No	İstasyon Adı	r (km)	Ajans	Yön	PGA (g)	PGV (cm/s)	T_p (s)
FD1$_x$	Chi-Chi	-	TCU052	0.24	CWB	TCU052-W	0.348	159.00	6.12
FD2$_x$	Chi-Chi	-	TCU068	1.09	CWB	TCU068-N	0.462	263.10	4.25
FD3$_x$	Chi-Chi	-	TCU075	1.49	CWB	TCU075-W	0.333	88.30	2.41
FD4$_x$	Chi-Chi	-	TCU101	2.94	CWB	TCU101-W	0.202	67.90	6.86
FD5$_x$	Chi-Chi	-	TCU102	1.79	CWB	TCU102-W	0.298	112.40	9.11
FD6$_x$	Kocaeli	-	Düzce	12.70	ERD	DZC180	0.312	58.80	1.36
FD7$_x$	Kocaeli	-	Arçelik-Kandilli	17.00	KOERI	ARC090	0.149	39.50	7.97
FD8$_x$	Kocaeli	-	Gebze	17.00	ERD	GBZ000	0.244	50.30	5.97
FD9$_x$	Loma Pr.	47006	Gilroy-Gavilan Coll.	11.60	CDMG	GIL067	0.357	28.60	1.80
FD10$_x$	Loma Pr.	57476	Gilroy-Historic Bldg.	12.70	CDMG	GOF090	0.284	42.00	1.80
FD11$_x$	Loma Pr.	47379	Gilroy Array#1	11.20	CDMG	GO1090	0.473	33.90	4.31
FD12$_x$	Loma Pr.	47380	Gilroy Array#2	12.70	CDMG	GO2090	0.322	39.10	1.72
FD13$_x$	Loma Pr.	47381	Gilroy Array#3	14.40	CDMG	GO3090	0.367	44.70	2.32
FD14$_x$	Loma Pr.	16	LGPC	6.10	UCSC	LGP000	0.563	94.80	3.92
FD15$_x$	Loma Pr.	58065	Saratoga-Aloha Ave.	13.00	CDMG	STG090	0.324	42.60	4.47
FD16$_x$	Loma Pr.	58235	Saratoga- W Valley Coll.	13.70	CDMG	WVC270	0.332	61.50	1.40
FD17$_x$	Northridge	655	Jensen Filter Plant	6.20	USGS	JEN022	0.424	106.20	3.36
FD18$_x$	Northridge	24279	Newhall-Fire Sta.	7.10	CDMG	NWH360	0.590	97.20	1.04
FD19$_x$	Northridge	90056	Newhall-W. Pico Can. Rd.	7.10	USC	WPI046	0.455	92.80	2.41
FD20$_x$	Northridge	77	Rinaldi Receiving Sta.	7.10	DWP	RRS228	0.838	166.10	1.50
FD21$_x$	Northridge	74	Sylmar-Converter Sta.	6.20	DWP	SCS052	0.612	117.40	3.48
FD22$_x$	Northridge	75	Sylmar-Converter Sta. E.	6.10	DWP	SCE018	0.828	117.50	3.49
FD23$_x$	Northridge	24514	Sylmar-Olive View FF	6.40	CDMG	SYL360	0.843	129.60	3.11
FD24$_x$	Northridge	24088	Pacoima Kagel Canyon	8.20	CDMG	PKC360	0.433	51.50	0.90
FD25$_x$	Northridge	24087	Arleta-Nordhoff Fire Sta.	9.20	CDMG	ARL090	0.344	40.60	1.23
FD26$_x$	Northridge	24207	Pacoima Dam (downstr.)	8.00	CDMG	PAC175	0.415	45.60	0.59
FD27$_x$	Erzincan	95	Erzincan	2.00	-	ERZ-NS	0.515	83.90	2.65

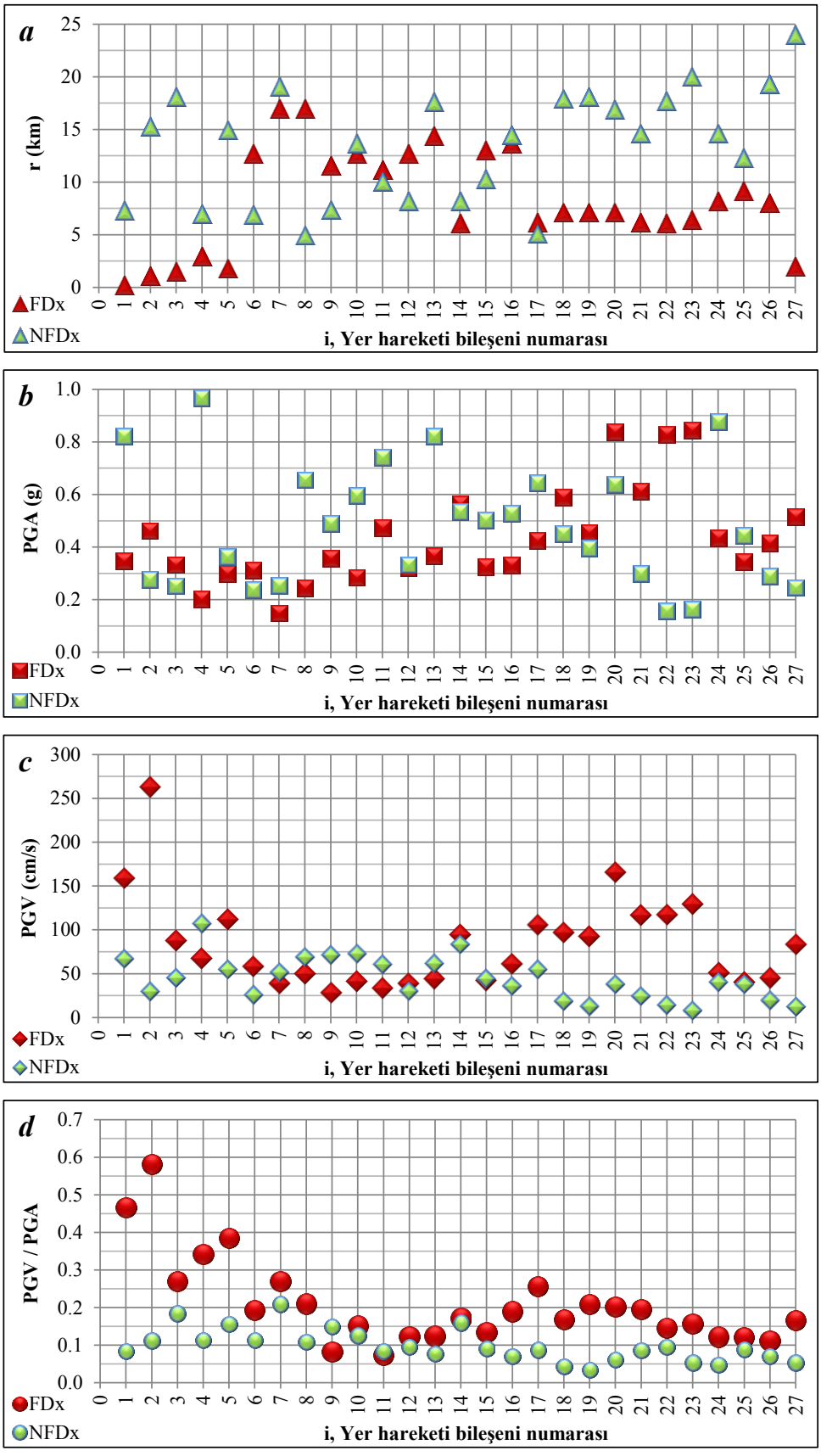
Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'de görülen yer hareketi bileşenlerine ait r, PGA ve PGV değerlerinin dağılımı, üç boyutlu olarak Şekil 3.15'de; bu değerlerin ve ayrıca PGV/PGA oranlarının yer hareketi bileşeni türü ve koduna göre aldığı değerlerin ayrı ayrı gösterimi, sırasıyla Şekil 3.16 (a), (b), (c) ve (d)'de verilmiştir.

Tablo 3.5: İleri-yönelim etkisi içermeyen (NFD: Non Forward-Directivity) tarihi yer hareketi bileşenleri.

Kodu	Deprem	İstasyon No	İstasyon Adı	*r* (km)	Ajans	Yön	PGA (g)	PGV (cm/s)
NFD1$_x$	Chi-Chi	-	CHY028	7.31	CWB	CHY028-N	0.821	67.00
NFD2$_x$	Chi-Chi	-	CHY029	15.28	CWB	CHY029-W	0.277	30.30
NFD3$_x$	Chi-Chi	-	CHY035	18.12	CWB	CHY035-W	0.252	45.60
NFD4$_x$	Chi-Chi	-	CHY080	6.95	CWB	CHY080-W	0.968	107.50
NFD5$_x$	Chi-Chi	-	CHY006	14.93	CWB	CHY006-E	0.364	55.40
NFD6	Chi-Chi	-	TCU055	6.88	CWB	TCU055-W	0.237	26.20
NFD7$_x$	Chi-Chi	-	TCU070	19.10	CWB	TCU070-W	0.255	52.10
NFD8$_x$	Chi-Chi	-	TCU071	4.94	CWB	TCU071-N	0.655	69.40
NFD9$_x$	Chi-Chi	-	TCU072	7.36	CWB	TCU072-W	0.489	71.70
NFD10$_x$	Chi-Chi	-	TCU074	13.67	CWB	TCU074-W	0.597	73.30
NFD11$_x$	Chi-Chi	-	TCU079	10.04	CWB	TCU079-W	0.742	61.20
NFD12$_x$	Chi-Chi	-	TCU089	8.22	CWB	TCU089-W	0.333	30.90
NFD13$_x$	Düzce	-	Bolu	17.60	ERD	BOL-090	0.822	62.10
NFD14$_x$	Düzce	-	Düzce	8.20	ERD	DZC-270	0.535	83.50
NFD15$_x$	Loma Prieta	13	BRAN	10.30	UCSC	BRN-090	0.501	44.60
NFD16$_x$	Loma Prieta	47125	Capitola	14.50	CDMG	CAP-000	0.529	36.50
NFD17$_x$	Loma Prieta	57007	Corralitos	5.10	CDMG	CLS-000	0.644	55.20
NFD18$_x$	Loma Prieta	15	UCSC Lick Observatory	17.90	CDMG	LOB-000	0.450	18.70
NFD19$_x$	Loma Prieta	58135	UCSC	18.10	UCSC	UC2-090	0.396	13.20
NFD20$_x$	Loma Prieta	14	WAHO	16.90	UCSC	WAH-090	0.638	38.00
NFD21$_x$	Northridge	90009	N Hollywood-Coldwater Can.	14.60	USC	CWC-180	0.298	25.00
NFD22$_x$	Northridge	90058	Sunland-Mt Gleason Ave.	17.70	USC	GLE-260	0.157	14.50
NFD23$_x$	Northridge	90059	Burbank-Howard Rd.	20.00	-	HOW-330	0.163	8.50
NFD24$_x$	Northridge	90055	Simi-Valley-Katherine Rd.	14.60	USC	KAT-000	0.877	40.90
NFD25$_x$	Northridge	90006	Sun Valley-Roscoe Blvd.	12.30	USC	RO3-090	0.443	38.20
NFD26$_x$	Northridge	5108	Santa Susana Ground	19.30	USGS	SSU-090	0.290	19.70
NFD27$_x$	Northridge	90061	Big Tujunga, Angeles Nat F.	24.00	USC	TUJ-352	0.245	12.70

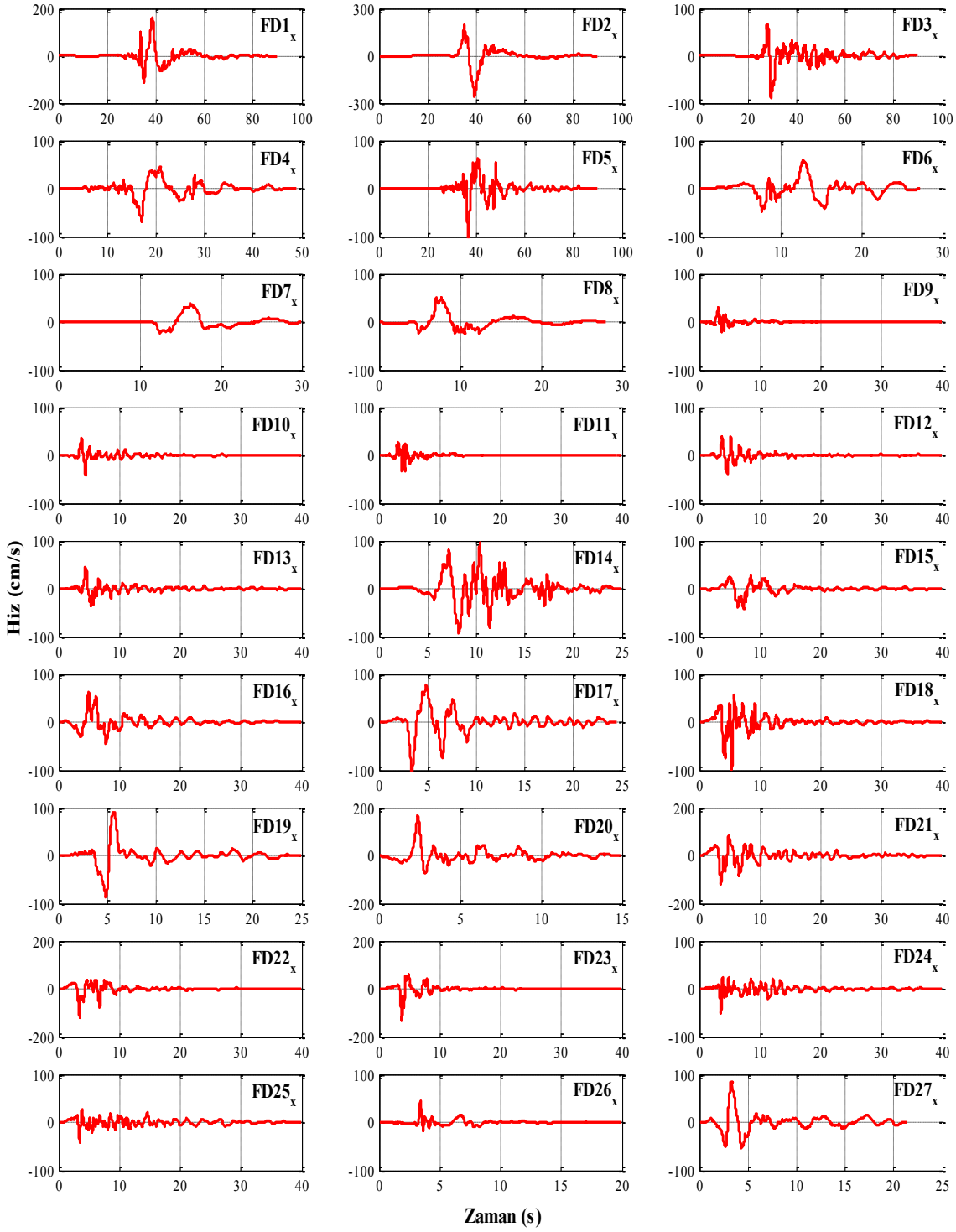


Şekil 3.15: X yönünde uygulanan tarihi deprem bileşenlerinin *r*, PGA, PGV değerleri.

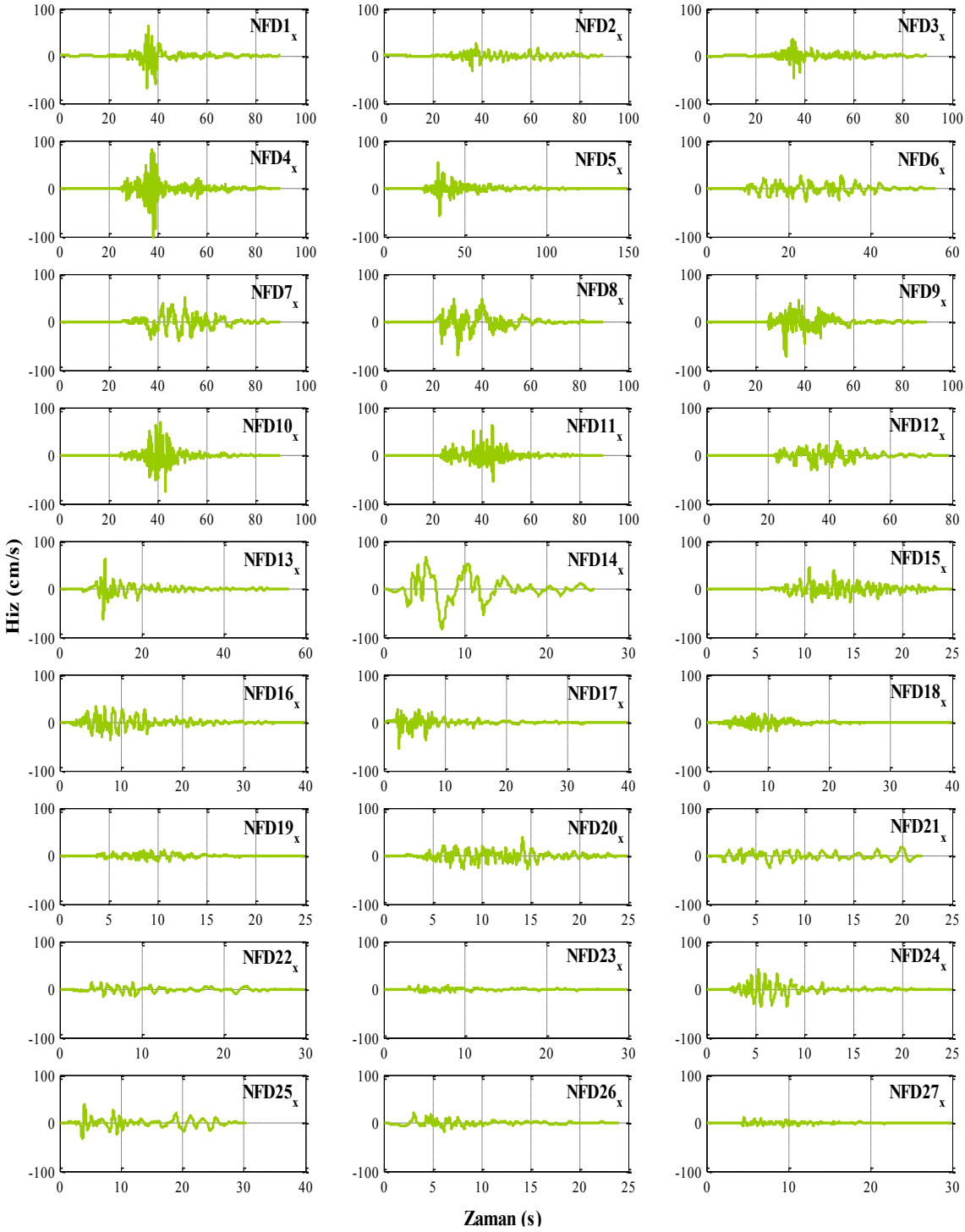


Şekil 3.16: X yönünde uygulanan tarihi deprem bileşenlerinin (a) *r*, (b) PGA, (c) PGV ve (d) PGV/PGA değerlerinin dağılımı.

Söz konusu tarihsel deprem hareketi bileşenlerine ait hız – zaman geçmişi grafikleri, ileri-yönelim etkisi içeren bileşenler için Şekil 3.17'da, ileri-yönelim etkisi içermeyen bileşenler için Şekil 3.18'de verilmiştir.

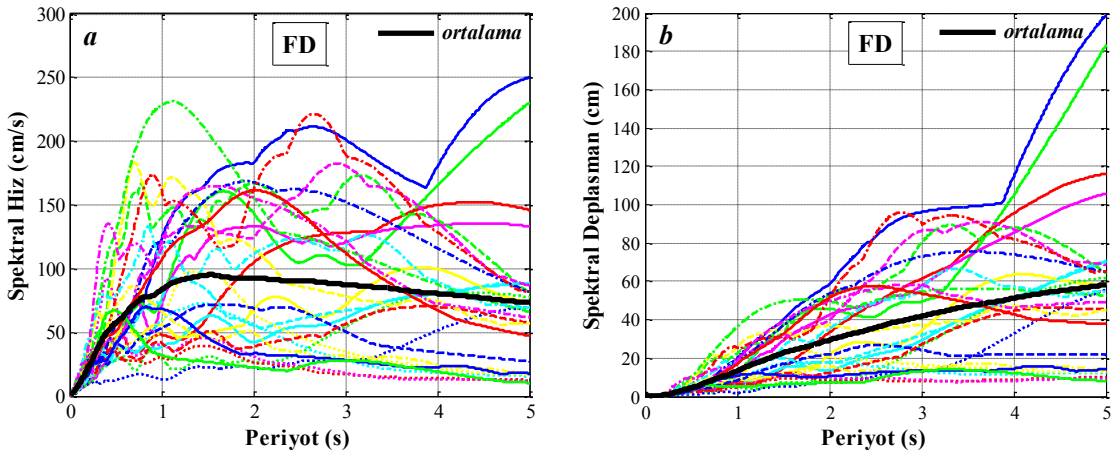


Şekil 3.17: İleri-yönelim etkisi içeren (FD) yer hareketi bileşenlerine ait hız-zaman geçmişi grafikleri.

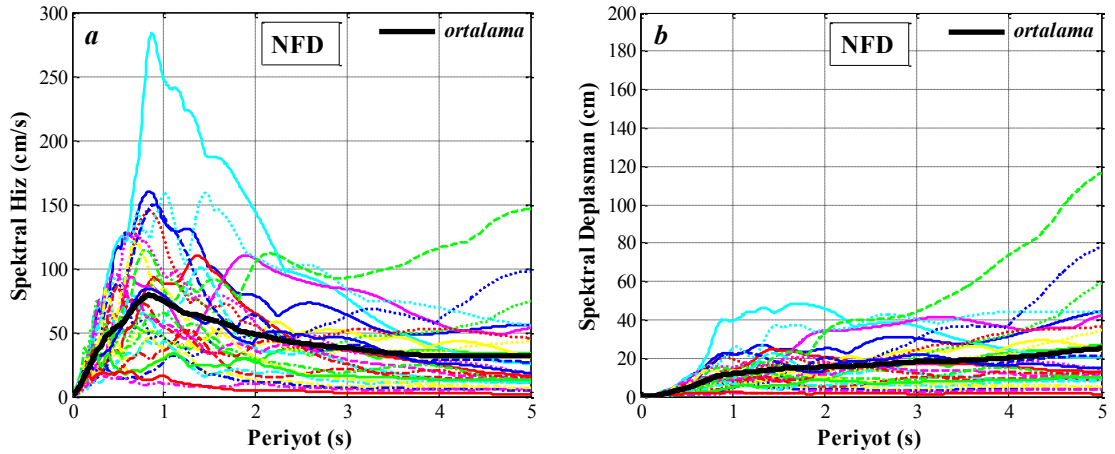


Şekil 3.18: İleri-yönelim etkisi içermeyen (NFD) yer hareketi bileşenlerine ait hız-zaman geçmişi grafikleri.

Bölüm 2.4'de de belirtildiği üzere, ileri-yönelim etkisinden etkilenen (FD) yakın-fay yer hareketleri, kuvvetli, uzun periyotlu (T_p) , yüksek pik yer hızı (PGV) değerlerine ve dolayısıyla yüksek PGV/PGA oranına sahip ve de etkidiği yapıyı hareketin ilk saniyelerinde yüksek enerji girişine ve kalıcı yer hareketlerine maruz bırakan pulslar içerirler. İleri-yönelim etkisinin görülmediği (NFD) yer hareketleri ise, FD yakın-fay yer hareketlerinin aksine puls içermezler ve daha düşük PGV değerlerine ve PGV/PGA oranlarına sahip olurlar. Ayrıca bu yer hareketlerinin faya olan en yakın mesafeleri (r), FD yer hareketlerine göre daha büyüktür. Tablo 3.4'deki FD yer hareketleri ile Tablo 3.5'deki NFD yer hareketlerinin PGV değerlerinin ortalamaları sırasıyla 84.26 cm/s ve 44.51 cm/s'dir. PGV/PGA ortalamaları ise, FD yer hareketleri için 0.208 iken; NFD yer hareketleri için 0.098'dir. Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'de görülen tüm yer hareketi bileşenlerine ait hız ve deplasman spektrumları ise, sönüm oranı ζ=%10 olmak üzere sırasıyla Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verildiği gibidir.

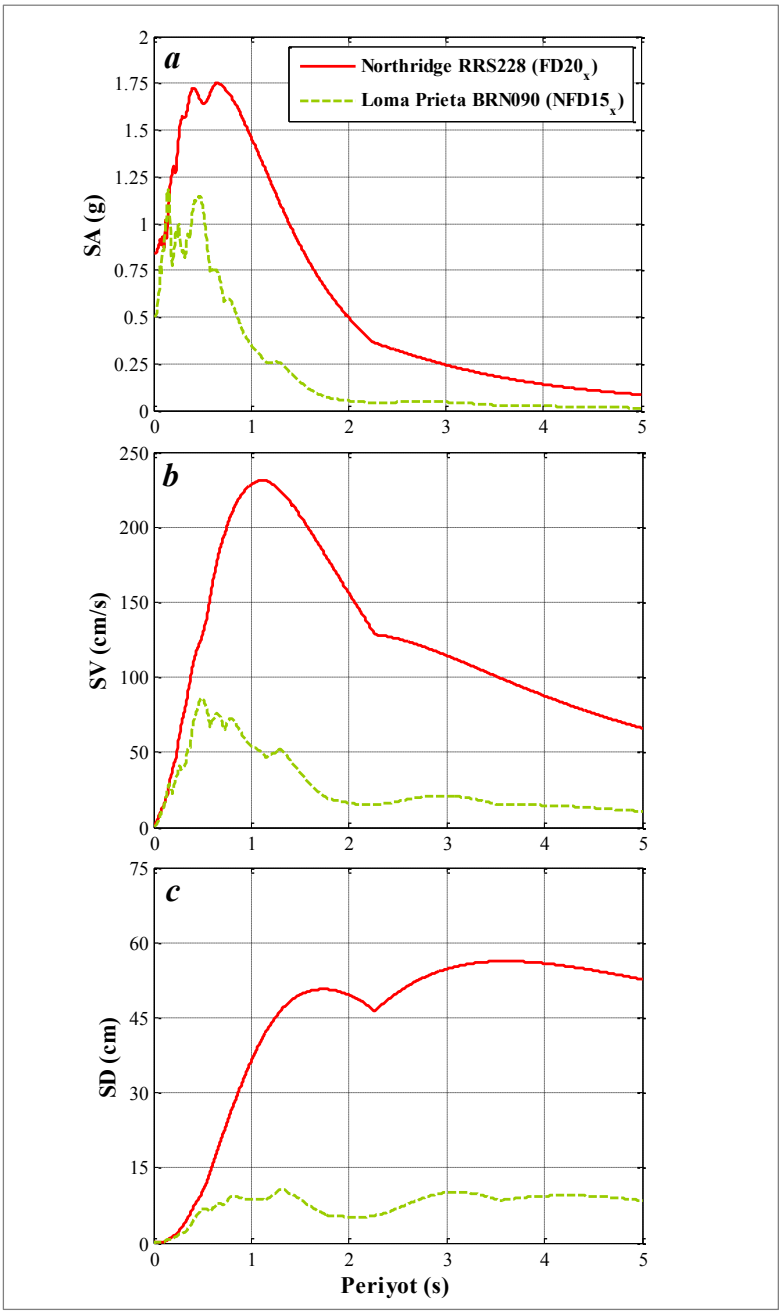


Şekil 3.19: FD yer hareketi bileşenlerine ait spektrumlar:(a) Hız, (b) Deplasman (ζ=%10 için).



Şekil 3.20: NFD yer hareketi bileşenlerine ait spektrumlar:(a) Hız, (b) Deplasman (ζ=%10 için).

Çalışmanın birinci ana bölümünde tüm yer hareketi çiftleri altında gerçekleştirilen dinamik analizlerden Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'den örnek teşkil etmek üzere seçilmiş olan sırasıyla $FD20_x$ ve $NFD15_x$ yer hareketi kayıtları ile bunlara dik yer hareketi kayıtları altında gerçekleştirilen dinamik analizlere ait sonuçlar detaylı olarak sunulduğundan, söz konusu yer hareketleri için elde edilen analiz sonuçlarını değerlendirmek amacıyla Şekil 3.21'de $FD20_x$ ve $NFD15_x$ için sönüm oranı ζ = %10 olmak üzere, sırasıyla ivme (SA), hız (SV) ve deplasman (SD) spektrumlarına yer verilmiştir.



Şekil 3.21: FD20x ve NFD15x yer hareketi bileşenlerine ait (a) ivme, (b) hız ve (c) deplasman spektrumları (ζ = %10 için).

3.4.2. Sentetik Depremler

Tez çalışmasının ikinci ana bölümündeki dinamik analizler, puls içeren sentetik yakın-fay depremler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu depremlerin üretimi için Bölüm 2.4'de de belirtildiği üzere, puls içeren yakın-fay yer hareketlerini sentetik olarak modellemek amacıyla Agrawal ve He (2002) tarafından geliştirilmiş olan puls modeli kullanılmış olup; bu modele ait formülasyon Bölüm 2.4.1.5'de verilmiştir. Söz konusu puls modelini kullanılmak suretiyle elde edilen ve karakteristik parametreleri sabit olan "Nominal Sentetik Depremler" ile bu nominal sentetik depremlere ait bazı karakteristik parametrelerin nominal değerleri etrafında simüle edilmesi yoluyla "Üretilmiş Sentetik Depremler" hakkında detaylı bilgi, Bölüm 3.6'de verilmiştir.

3.5. KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNDEKİ RASTGELE DEĞİŞİMLERİN GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULDUĞU SİSTEMLERİN ÜRETİLMESİ

Mevcut tez çalışmasının birinci ana bölümünde izolasyon sistemi karakteristik parametrelerindeki rastgele değişimlerin, izolasyon sistemi ve üstyapı dahil olmak üzere sismik izolasyonlu bir binanın tüm yapısal sistemi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu ana bölümde ayrıca, söz konusu rastgele değişimlerin etkilerinin farklı frekans içeriklerine sahip deprem hareketleri altında farklı eğilimler gösterip göstermediğinin de incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda; çalışmanın birinci bölümü kapsamında, deprem gibi dinamik yükler altında doğrusal olmayan histeretik davranış sergileyen ve kuvvet – deplasman ilişkisi yumuşak ikili-doğrusal histeretik model (smooth bilinear hysteretic model) ile idealize edilen kauçuk esaslı izolatörler kullanılmış olup; bu izolatörlerin akma öncesi rijitliği (K_1), akma sonrası rijitliği (K_2) ve akma deplasmanı (D_y) parametreleri, normal dağılıma uygun, bağımsız ve rastgele değişkenler olarak seçilmişlerdir. Böylece, izolasyon sistemi elemanlarının söz konusu karakteristik parametrelerinin, sabit izolasyon periyodu (T_0) ve karakteristik kuvvet oranları (Q/W) için sırasıyla Denklem (2.3), (2.2) ve (2.5)'e göre hesaplanan değerlerinden (nominal değerlerinden), Denklem (3.8)'ya yöre hesaplanan belirli varyasyon katsayıları (*c.o.v.*) dahilinde sapmalar göstermesi durumunda, yapısal sistemin dinamik davranışının izolasyon sistemi ve üst yapı seviyelerinde ne ölçüde etkilendiği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Çalışmada, tüm karakteristik özellikleri birbirinin aynı olan izolatörlerden oluşan izolasyon sistemleri, "Referans İzolasyon Sistemleri" olarak isimlendirilmiştir. İzolatör karakteristik parametrelerinin değerleri, ilgili parametrelerin referans izolasyon sistemindeki değerlerinin (nominal değerler) belirli varyasyon katsayısına göre simülasyonlar dahilinde üretilmesiyle elde edilen izolasyon sistemleri ise, "Üretilmiş İzolasyon Sistemleri" olarak isimlendirilmiştir. Yukarıda belirtildiği üzere üretilmiş izolasyon sistemlerindeki izolatörlerin K_1, K_2 ve D_y karakteristik parametreleri, normal dağılıma uygun, bağımsız ve rastgele değişkenler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Bu izolasyon sistemlerinin söz konusu rastgele değişken parametrelerine ait değerlerin üretimi, Bölüm 3.1'de verilmiş olan Monte Carlo Simülasyon Tekniği prosedürlerine göre gerçekleştirilmiş olup; elde edilen parametre değerleri ile bu değerlerin elde edilişi hakkında detaylı bilgi, Bölüm 3.5.2'de verilmiştir. Söz konusu değerler, referans izolasyon sistemleri için belirlenen değerler baz alınarak üretildikleri için öncelikle Bölüm 3.5.1'de referans izolasyon sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada ayrıca, üretilecek yeterli izolasyon sistemi sayısını yani gerçekleştirilecek Monte Carlo simülasyon sayısını (N_{MCA}) tespit etmek amacıyla, bir ara çalışma yapılmış olup; bu çalışma ile ilgili detaylar, Bölüm 3.5.4'de verilmiştir. İzolasyon sistemi karakteristik parametrelerindeki rastgele değişimlerin yapısal sistemlerin dinamik davranışları üzerindeki etkileri ise, söz konusu referans ve üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binaların farklı içeriklere sahip deprem yükleri altındaki (Bölüm 3.4.1) dinamik analizleri neticesinde elde edilen yapısal cevap parametrelerini göz önünde bulundurmak suretiyle Bölüm 4.1'de ortaya konmuştur.

3.5.1. Referans İzolasyon Sistemleri

Çalışmada oluşturulan bir referans izolasyon sisteminde, Şekil 3.12'deki yerleşim planı üzerinde gösterilen 16 adet kauçuk esaslı ve ikili-doğrusal izolatörün her biri aynı karakteristik özelliklere sahiptir. Mevcut tez çalışmasının birinci ana bölümünde doğrusal olmayan davranışa sahip izolatörlerin üretilmesi için bu bölümde 2 adet referans sistem oluşturulmuştur. Bu referans izolasyon sistemlerinin Bölüm 3.3.1'de detayları verilen üstyapı ile entegre edilmesi ile 2 adet "Referans İzolasyonlu Bina" oluşturulmuştur. Referans izolasyon sistemleri, W izolasyonlu bina toplam ağırlığını, $K_{2,s}$ sistemdeki izolatörlerin akma sonrası rijitliklerinin toplamını ve g yerçekimi ivmesini göstermek üzere, Denklem (2.1)'de izolasyonlu bina için tanımlanan rijit cisim mod periyodu (T_0)

değerlerine göre isimlendirilmişlerdir. Birinci ve ikinci referans izolasyonlu bina için rijit cisim mod periyotları sırasıyla T_0 = 2 s ve T_0 = 3.5 s olarak alınmış olup; bu binaların izolasyon sistemleri sırasıyla "I. Referans İzolasyon Sistemi" ve "II. Referans İzolasyon Sistemi" olarak isimlendirilmiştir.

Sismik izolasyonlu binaların tasarım deplasmanındaki efektif periyotları, çoğunlukla 2~3 s aralığında yer almaktadır (Alhan ve Sürmeli, 2011; Alhan ve Gavin, 2004a; Makris, 1997). Mevcut çalışma kapsamında analizleri gerçekleştirilen izolasyonlu yapılara ait üst yapının temin edildiği Tena-Colunga ve Escamilla-Cruz (2007) çalışmasında söz konusu üst yapı ile oluşturulan izolasyonlu binalar için hedef efektif periyot aralığı ise, 1.5 s ≤ T_{eff} ≤ 3.0 s olarak seçilerek; bu aralığın literatürde taban izolasyonunun en uygun olduğu efektif periyot aralığı olarak kabul edildiğini belirtilmiştir. Japonya'daki taban izolasyonlu yapıların en son tasarım ve yapım çalışmaları hakkında istatistiksel bilgiler veren Pan vd. (2005) çalışmasında, BCJ (2002) raporundan temin edilen bilgiler doğrultusunda, 2000 yılında Japonya'daki mevcut izolasyonlu yapı stokunun %3'ünün 0~2.5 s, % 23'ünün 2.5~3.0 s, % 37'sinin 3.0~3.5 s, % 21'inin 3.5~4.0 s ve %16'sının ise 4.0~4.5 s aralığındaki efektif periyot değerlerine göre tasarlandıkları rapor edilmiştir. Aynı çalışmada, Japonya'daki sismik izolasyonlu binalar için maksimum deplasmanın sekantına göre tahmin edilen efektif periyodun 2~3 s değerlerinden son yıllarda 3~4 s değerlerine doğru yavaş yavaş çıktığı belirtilmiştir. Diğer taraftan Alhan ve Gavin (2004a) çalışmasında da rapor edildiği üzere, mevcut sismik izolasyonlu binalardan 5 katlı "Yeni Zelanda Parlamento Binası", 6 katlı "Batı Japonya Bilgisayar Merkezi" binası, Güney Kaliforniya'da bulunan 8 katlı "USC Üniversite Hastanesi" binası ve "San Bernardino Şehir Tıp Merkezi" binası için hedef periyot (T_0) değerleri sırasıyla, 3.5 s, 3.0 s, 2.25 s ve 3.0 s olarak alınmıştır (Clark vd., 1994; Komodromos, 2000; Nagarajaiah ve Xiaohong, 2000; Kelly, 1999). Bu bilgiler doğrultusunda, mevcut tez çalışmasında oluşturulan referans izolasyonlu binaların hedef rijit cisim modu periyot değerleri, T_0 = 2 s ve T_0 = 3.5 s olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu hedef periyot değerlerine göre, her iki referans sistem elemanlarına ait mekanik parametreler belirlenmiş ve Tablo 3.6'da sunulmuştur. Tablo 3.6'daki değerlerden K_2 ve K_1, sırasıyla Denklem (2.2) ve Denklem (2.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (2.3)'de α rijitlikler oranı, her iki referans sistem için de 0.1 alınmıştır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerde tipik olarak elastik rijitlik (K_1), akma sonrası rijitliğin (K_2) 6.5 ila 10 katı aralığında; buna bağlı olarak α

değerleri de 0.100 ile 0.154 arasında değişmektedir. (FEMA 274, 1997; Cheng ve diğ. 2008). Komodromos (2000) ile Naeim ve Kelly (1999)'da yine aynı tip izolatörler için K_1 değerinin genel olarak kabul görmüş bir yaklaşıkla $10K_2$ alındığı belirtilmiştir. Pan ve diğ. (2005) çalışmasında ise, bu izolatörlerde başlangıç rijitliği değerinin, akma sonrası rijitliğin yaklaşık 10~16 katı civarında olduğu rapor edilmiştir. Diğer taraftan, Dicleli ve Buddaram (2006a) ve Dicleli ve Buddaram (2007a) çalışmalarının her ikisinde de izolasyon sistemleri için seçilen α değerleri, LRB tipi izolatörler için 0.025~0.100 aralığında; HDRB tipi izolatörler için 0.133~0.400 aralığında değişmektedir. Bu bilgiler göz önünde bulundurularak, mevcut tez çalışmasında ikili-doğrusal kuvvet-deplasman ilişkisine sahip, histeretik izolatörlerden oluşan her iki referans izolasyon sistemi için de $\alpha = 0.100$ alınmıştır.

Tablo 3.6: Referans İzolasyon Sistemlerindeki izolatörlerin karakteristik parametreleri.

Karakteristik Parametre	Referans İzolasyon Sistemi	
	I.	II.
K_1 (kN/m)	8150.650	2661.440
K_2 (kN/m)	815.065	266.144
D_y (mm)	5.522	16.911
α (-)	0.100	0.100
F_y (kN)	45.008	45.008
Q (kN)	40.507	40.507

Tablo 3.6'daki D_y değerlerinin elde edilmesi için ise, Denklem (2.4)'deki karakteristik kuvvet oranı ($\kappa = Q_s/W$), her iki referans sistem için %5 alınarak; bir izolatör için karakteristik kuvvet (Q) değeri hesaplanmıştır. Sismik izolatörlerin akma kuvveti (F_y) seviyesi genellikle bina ağırlığının yüzdesi olarak tanımlanır ve ikili-doğrusal izolatörlerde bu değer, tipik olarak %5 mertebelerindedir (Komodromos, 2000). Ayrıca, yukarıda belirtilen Dicleli ve Buddaram (2006a) ve Dicleli ve Buddaram (2007a) çalışmalarındaki izolatörlerin κ değerlerinin %2.5~%15 aralığında değiştiği görülmektedir. Bu bilgiler göz önünde bulundurularak hesaplanan Q değerlerine bağlı olarak elde edilen D_y değerleri ise, deneysel data sonuçlarına göre bir izolatördeki toplam kauçuk kalınlığının 0.05~0.10 katı civarındadır (FEMA 274, 1997; Cheng ve diğ. 2008). Bu değerler, genelde 5 mm~30 mm aralığına tekabül etmekte olup; görüldüğü üzere Tablo 3.6'daki D_y değerleri, belirtilen aralık ile uyumludur.

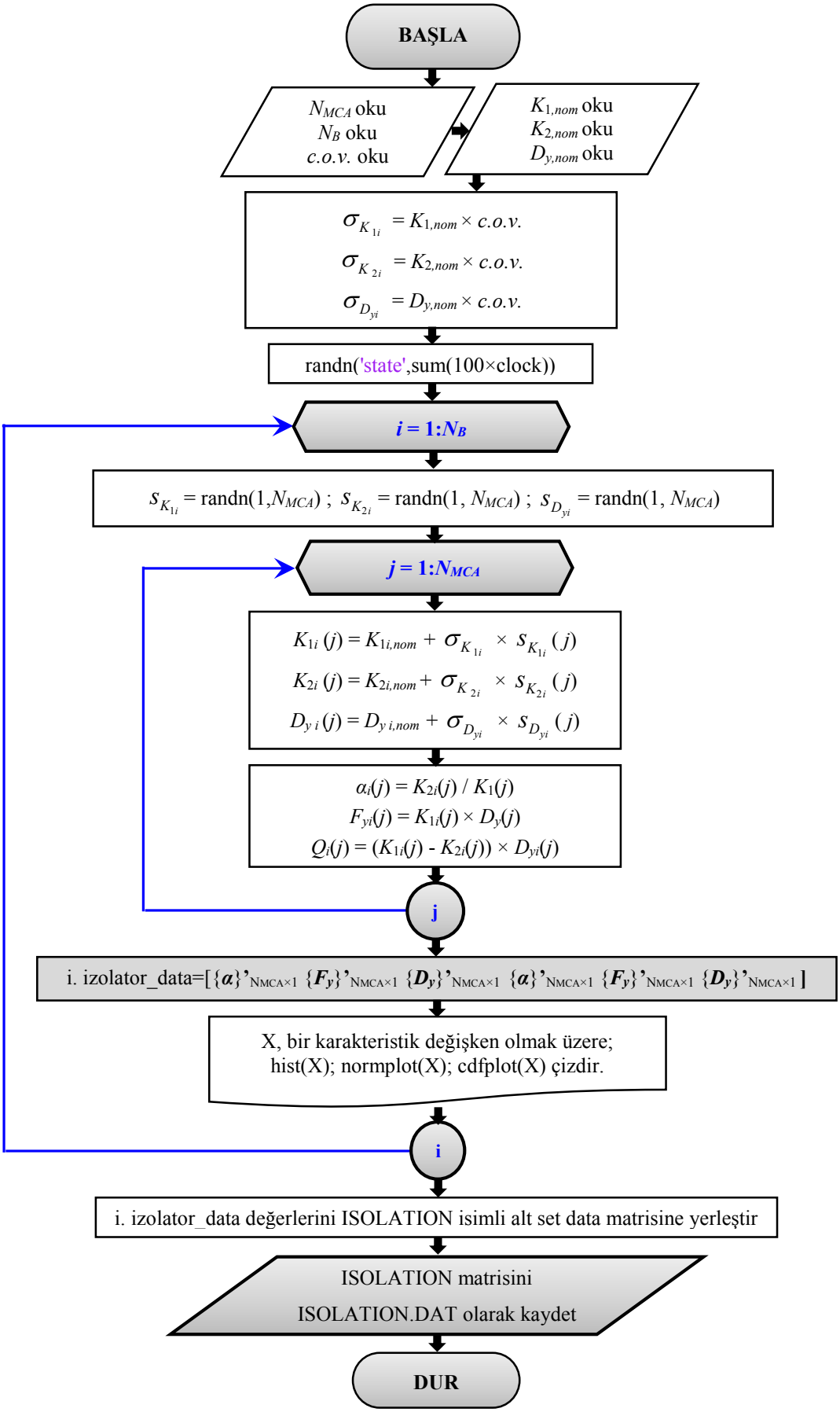
3.5.2. Üretilmiş İzolasyon Sistemleri

Birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında, farklı hedef periyotlarına (T_0 = 2 s ve T_0 = 3.5 s) sahip iki referans sistemin Bölüm 3.5.1'deki gibi oluşturulmasının ardından bu kısımda, "Üretilmiş İzolasyon Sistemleri" oluşturulmuştur. Bölüm 3.5 başlığı altında belirtildiği üzere, üretilmiş izolasyon sistemlerini oluşturabilmek için referans izolasyon sistemleri esas alınmıştır. Bir izolatörün karakteristik parametelerinden K_1, K_2 ve D_y büyüklükleri, normal dağılıma uygun, "bağımsız rastgele değişkenler" olarak kabul edilmiş; üretilmiş sistemlerdeki izolatörlerin bu parametrelere ait değerlerinin, referans sistemlerdeki nominal değerleri (Tablo 3.6) etrafında belirli varyasyon katsayıları (*c.o.v.*) dahilinde değişen aralıkta değerler aldıkları varsayılmıştır. Tablo 3.6'da yer alan diğer parametreler: α, *Fy* ve *Q* ise, çalışmada "bağlı değişkenler" olarak isimlendirilmiş olup; üretilen her bir izolatör için sırasıyla Denklem (2.3), (2.6) ve (2.5) kullanılarak elde edilmiştir.

Söz konusu üretilmiş sistemlerin elde edilmesi amacıyla, rastgele sayı üretiminin ardından Bölüm 3.1'de detayları verilen "Monte Carlo Simülasyon Tekniği" dahilinde bu sayılara karşılık gelen ve belirlenen istatiksel dağılıma uygun olan rastgele bağımsız değişkenleri üretebilen ve de bu değişkenlere bağlı değişkenlerin elde edilmesi işlemlerini gerçekleştirebilen bir MATLAB (MathWorks, 2009) programı kodlanmıştır. Programın akış diyagramı, Şekil 3.22'de verildiği gibi olup; tek hedef periyot değeri ve tek *c.o.v.* değeri için çalışmaktadır. Akış diyagramında görüldüğü üzere, programda öncelikle Monte Carlo simülasyonu sayısı (N_{MCA}) yani üretilecek izolasyon sistemi sayısı, her bir sistemdeki izolatör sayısı (N_B), *c.o.v.* değeri ve üretilecek izolatörler için esas alınacak bağımsız değişkenlerin nominal değerleri ($K_{1,nom}$, $K_{2,nom}$ ve $D_{y,nom}$) okunur. Ardından her bir bağımsız değişken için standart sapma değerleri (σ_{K_1}, σ_{K_2} ve σ_{D_y}) hesaplanır. Programın her çalıştırılmasında üretilecek normal dağılıma uygun rastgele sayıların birbirbirinden farklı olması amacıyla; rastgele sayıların üretimi, üretimin gerçekleştiği andaki bilgisayar saatine bağlanır. Bu hazırlık aşamalarının ardından, izolatör sayısı (N_B) adedince gerçekleştirilecek döngü ile her bir izolatörün her bir bağımsız değişkeni için N_{MCA} adet normal dağılıma uygun rastgele sayılar (s_{K_1}, s_{K_2} ve s_{D_y}) üretilir. Üretilen bu sayılara karşılık olarak, ilgili (i) izolatörü için her bir (j) simülasyonunda kullanılmak üzere, bağımsız değişken ($K_{1i}(j)$, $K_{2i}(j)$, $D_{yi}(j)$) ve bağlı değişken ($\alpha_i(j)$, $F_{yi}(j)$, $Q_i(j)$)

değerleri hesaplanır. (i) izolatörü için tüm simülasyonlarda kullanılacak değişken değerlerinin elde edilmesinin ardından, bu değerlerden 3D-BASIS analizlerinde kullanılacak olan bağlı değişken değerleri; (j) satırı, (j) simülasyonunda kullanılacak değerler olmak üzere, kolon vektörler ($\{\alpha_i\}'$, $\{F_{yi}\}'$ve $\{D_{yi}\}'$) halinde $N_{MCA}\times 6$ boyutlarındaki "i. izolatör data matrisi"ne yerleştirilir. Ardından, (i) izolatörü için üretilen tüm bağımsız değişkenlerin ve hesaplanan bağlı değişkenlerin histogramları, normal olasılık kağıtlarına çizilen grafikleri ve kümülatif dağılım fonksiyonları elde edilir. Son olarak, her bir i. izolatör data matrisindeki değerler, ilgili alt izolasyon sistemleri seti matrisine (ISOLATION) yerleştirilerek ISOLATION.DAT oluşturulur ve program sonlandırılır.

Programın her bir referans izolasyonlu bina hedef periyodu (T_0 = 2 s ve 3.5 s) değeri ve her bir varyasyon katsayısı (*c.o.v.* = %5, %10 ve %15) için ayrı ayrı çalıştırılması neticesinde; 2 ana üretilmiş izolasyon sistem seti ($Set1_{NL}$ ve $Set2_{NL}$) ve her bir ana setin altında üç alt set ($Set1A_{NL}$, $Set1B_{NL}$, $Set1C_{NL}$ ile $Set2A_{NL}$, $Set2B_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$) olmak üzere, simülasyon sayısı (N_{MCA}) adedince izolasyon sisteminden oluşan toplam 6 adet alt izolasyon sistemi seti oluşturulmaktadır. Bu alt setlerdeki N_{MCA} adet izolasyon sisteminin her biri, referans izolasyon sistemlerinde olduğu gibi 16 adet izolatörden oluşmakta olup; 16 izolatörün her birinin her bir mekanik parametresi birbirinden farklıdır. Söz konusu sistemlerden, hedef periyodu T_0 = 2 s olan I. referans izolasyon sistemini esas alarak oluşturulan sistemler "I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri Seti", T_0 = 3.5 s olan II. Referans izolasyon sistemini esas alarak oluşturulan sistemler ise "II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri Seti" altında toplanmış; bu ana setler sırasıyla $Set1_{NL}$ ve $Set2_{NL}$ kodlarıyla gösterilmiştir. $Set1_{NL}$ ana seti altında *c.o.v.* değeri %5, %10, %15 olan alt setler, sırasıyla $Set1A_{NL}$, $Set1B_{NL}$ ve $Set1C_{NL}$; $Set2_{NL}$ ana seti altında *c.o.v.* değeri %5, %10, %15 olan alt setler ise, sırasıyla $Set2A_{NL}$, $Set2B_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$ kodlarıyla gösterilmiştir. Setlerdeki izolatörlerin doğrusal olmayan davranışa sahip olması sebebiyle, ana ve alt setler "NL" (nonlinear) indisli olarak gösterilmiştir. Tez çalışması birinci ana bölümünde oluşturulan tüm bu ana ve alt üretilmiş setler ve bu setlerdeki izolatörlerin parametreleri için esas alınan nominal değerler, Tablo 3.7'de sunulmuştur.



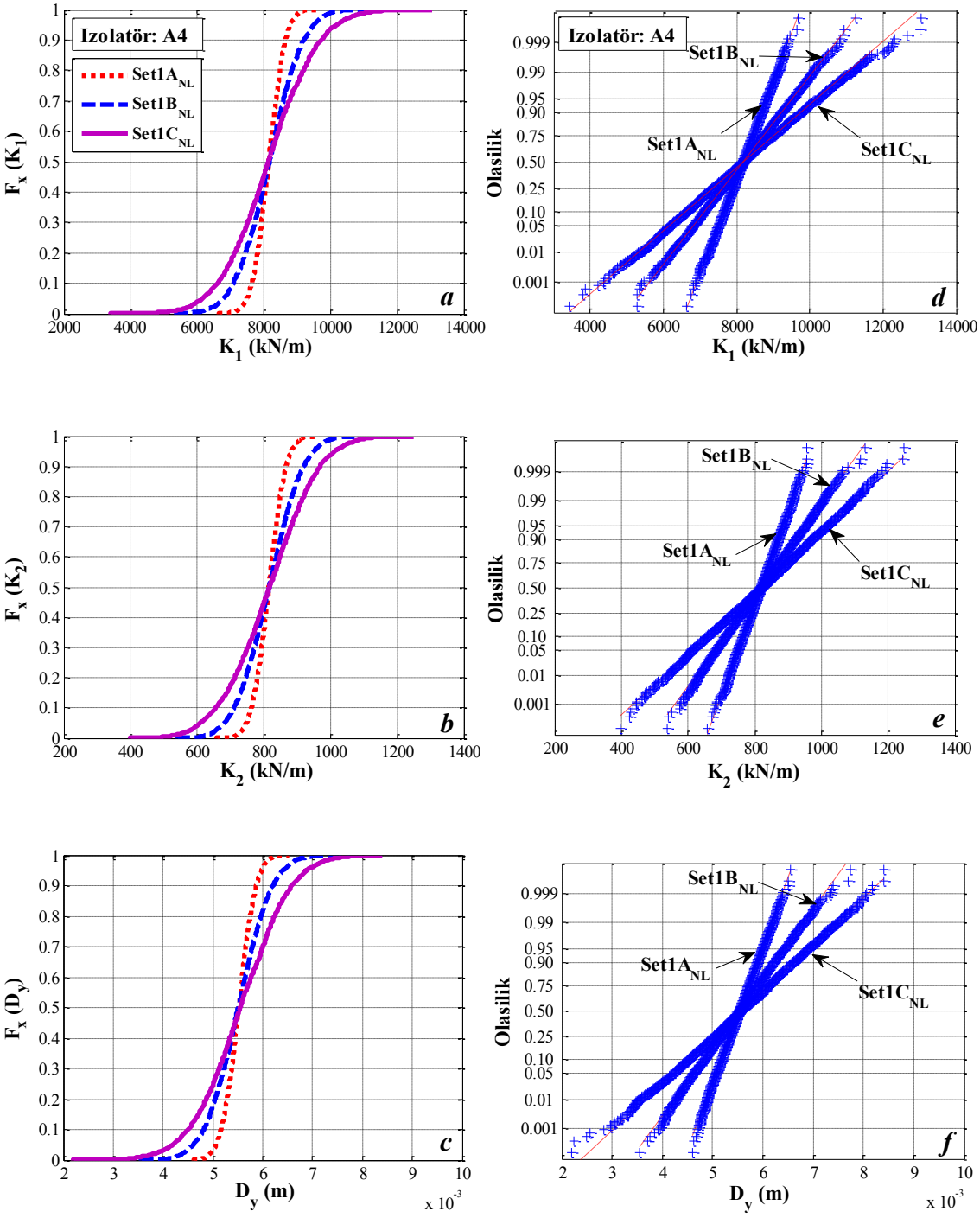
Şekil 3.22: Üretilmiş izolasyon sistemleri için değer üreten programın akış diyagramı.

Tablo 3.7: Üretilmiş İzolasyon Sistemi Setleri.

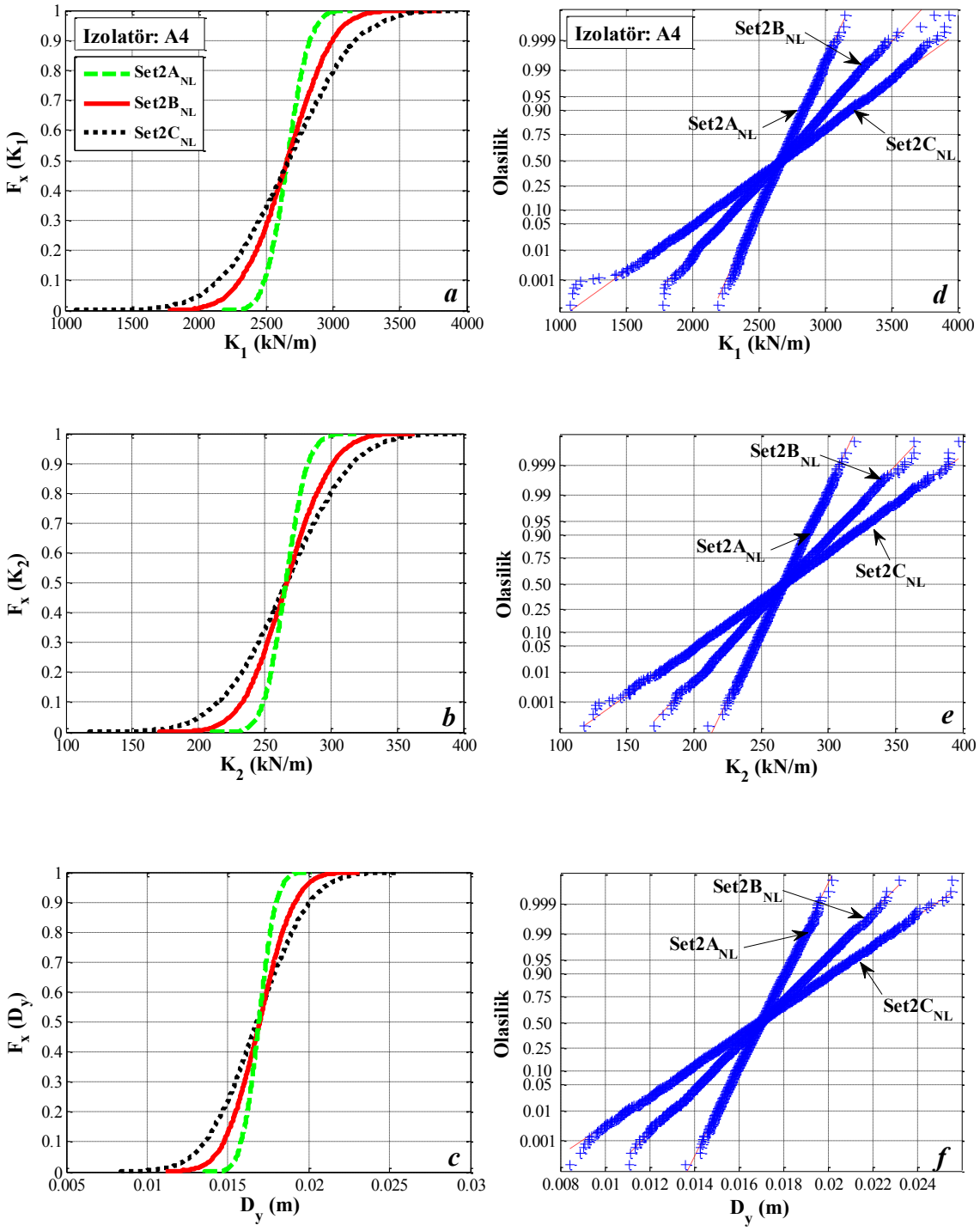
Üretilmiş İzolasyon Sistemi Setleri		$T_{0,nom}$ (s)	*c.o.v.* (%)	Bağımsız Değişkenler			Bağlı Değişkenler		
Ana Set	**Alt set**			$K_{1,nom}$ (kN/m)	$K_{2,nom}$ (kN/m)	$D_{y,nom}$ (mm)	α_{nom} (-)	$F_{y,nom}$ (kN)	Q_{nom} (kN)
Set1$_{NL}$	**Set1A$_{NL}$**	2.0	5	8150.65	815.065	5.522	0.100	45.008	40.507
	Set1B$_{NL}$	2.0	10						
	Set1C$_{NL}$	2.0	15						
Set2$_{NL}$	**Set2A$_{NL}$**	3.5	5	2661.44	266.144	16.911	0.100	45.008	40.507
	Set2B$_{NL}$	3.5	10						
	Set2C$_{NL}$	3.5	15						

Mevcut tez çalışması birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında oluşturulan 6 adet alt setin her birinde N_{MCA}=5,000 alınarak; her biri birbirinden farklı mekanik parametrelere sahip 16 izolatörden oluşan toplam 30,000 adet izolasyon sistemi oluşturulmuştur. Programın ürettiği değerlere örnek teşkil etmesi amacıyla, Set1$_{NL}$ ana seti altındaki her bir alt izolasyon sistemi seti (Set1A$_{NL}$, Set1B$_{NL}$, Set1C$_{NL}$) kapsamında A4 izolatörü (Şekil 3.12) için üretilen 5,000'er adet K_1, K_2 ve D_y bağımsız değişkenlerine ait CDF grafikleri ve normal olasılık kağıdı grafikleri sırasıyla Şekil 3.23 (a) - (c) ve Şekil 3.23 (d) - (f)'de verilmiştir. Aynı izolatör için Set2$_{NL}$ ana seti altındaki her bir alt izolasyon sistemi seti (Set2A$_{NL}$, Set2B$_{NL}$, Set2C$_{NL}$) kapsamında üretilen 5,000'er adet K_1, K_2 ve D_y bağımsız değişkenlerine ait CDF grafikleri ve normal olasılık kağıdı grafikleri ise, sırasıyla Şekil 3.24 (a) - (c) ve Şekil 3.24 (d) - (f)'de verilmiştir. Set1$_{NL}$ ve Set2$_{NL}$ ana setleri altındaki her bir alt izolasyon sistemi seti kapsamında söz konusu izolatör (A4) için hesaplanan α, F_y ve Q bağlı değişkenlerine ait CDF grafikleri ise, sırasıyla Şekil 3.25 (a) - (c) ve Şekil 3.25 (d) - (f)'de verilmiştir. Şekil 3.23 (d) - (f) ve Şekil 3.24 (d) - (f)'de görülen ve bir data setinin istatiksel olarak normal dağılıma uygun olup olmadığını test eden grafiksel bir teknik olan normal olasılık kağıdı grafiklerine göre, üretilen bağımsız değişken değerleri söz konusu kağıtlar üzerindeki referans çizgiler (doğrusal çizgiler) üzerinde değerler almakta; yani normal dağılıma uymaktadır. Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de bulunan grafikler, Şekil 3.12'deki tüm izolatörler için elde edilmiş, tüm izolatörler için üretilen bağımsız değişken değerlerinin normal dağılıma uygun olduğu teyit edilmiş olup; burada örnek teşkil etmesi amacıyla ve yer kısıtı nedeniyle sadece A4 izolatörü için üretilen değerlere yer verilebilmiştir.

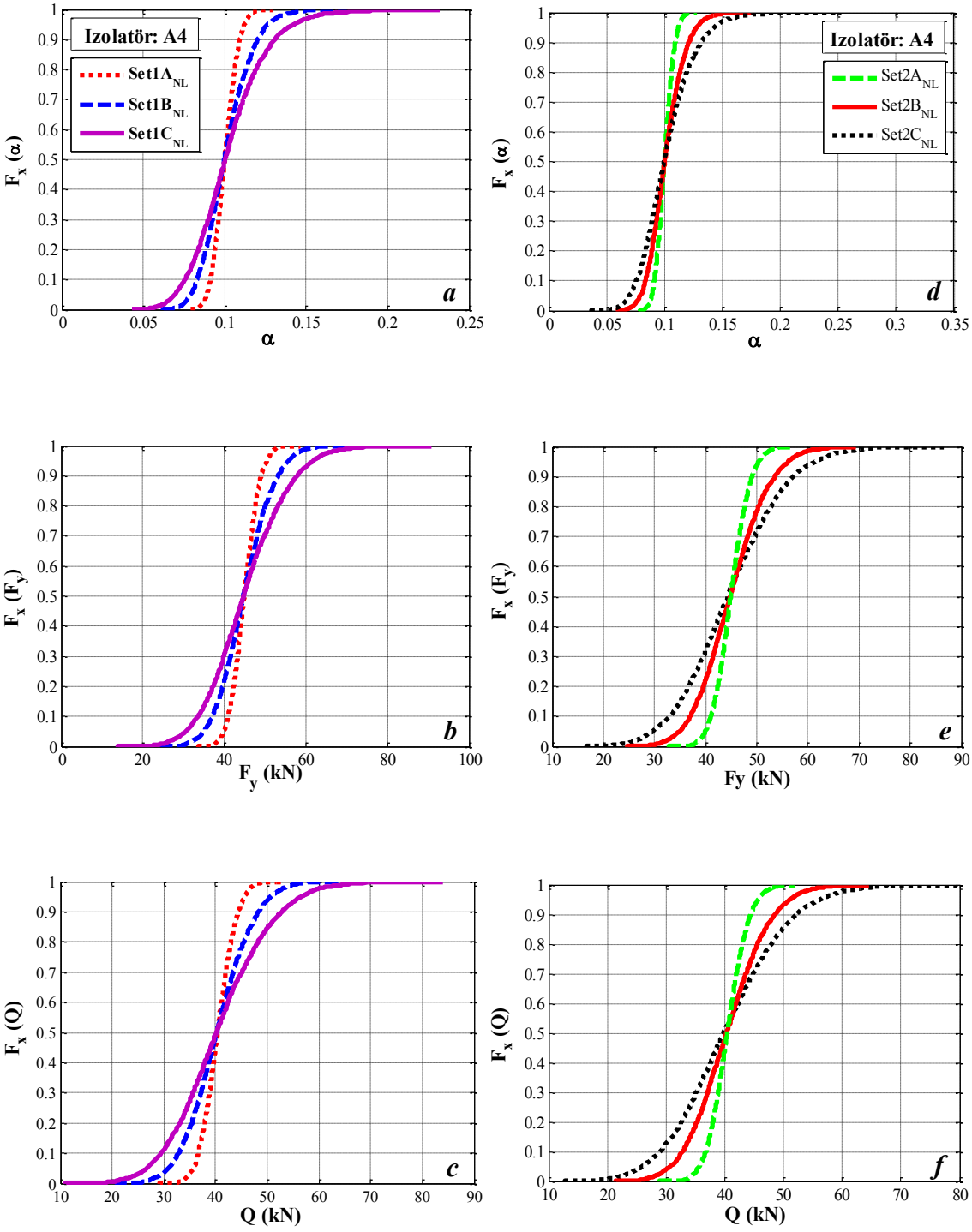
Üretilen bağımsız değişken değerlerinin normal dağılıma uygunluğunu, bir data serisindeki her bir data aralığının tüm data serisi içerisindeki yoğunluğunu gösteren "Yoğunluk" diyagramından da görmek mümkündür. Söz konusu diyagramda, x ekseni belirli ve sabit aralıklarla (A_d) üretilen data değerlerini, y ekseni ise her bir data aralığının üretilen tüm data aralıkları içerisindeki yoğunluğunu (Y_d) göstermekte olup; bir data serisine ait yoğunluk diyagramının toplam alanı 1'e eşittir $\left(\Sigma Y_d \times A_d = 1\right)$. Şekil 3.26'da örnek teşkil etmek amacıyla $T_{0,\text{nom}} = 2$ s ve *c.o.v.* = % 5 olması durumunda yani Set1A_{NL} kapsamında A4 izolatörü için üretilen K_1 değerlerine ait yoğunluk diyagramı verilmiştir. Söz konusu şekil üzerinde, üretilen K_1 değerlerinin normal dağılıma uygunluğu da görülmektedir. "Normal Dağılım" lejantıyla verilen kesikli çizgi, MATLAB (MathWorks, 2009)'da "dfittool" komutuyla çalışan ve üretilen datanın normal, lognormal, gama, rayleigh, weibull (Bölüm 3.1.2) vb. gibi istatiksel dağılımlardan hangisine uygunluk gösterdiğini; mevcut dataya ait yoğunluk (Density: PDF), kümülatif dağılım (Cumulative Distribution: CDF) (Bölüm 3.1.2) veya olasılık kağıdı (probability plot) gibi grafikler üzerinde gösterebilen "Distribution Fitting Tool" ile saptanmıştır.



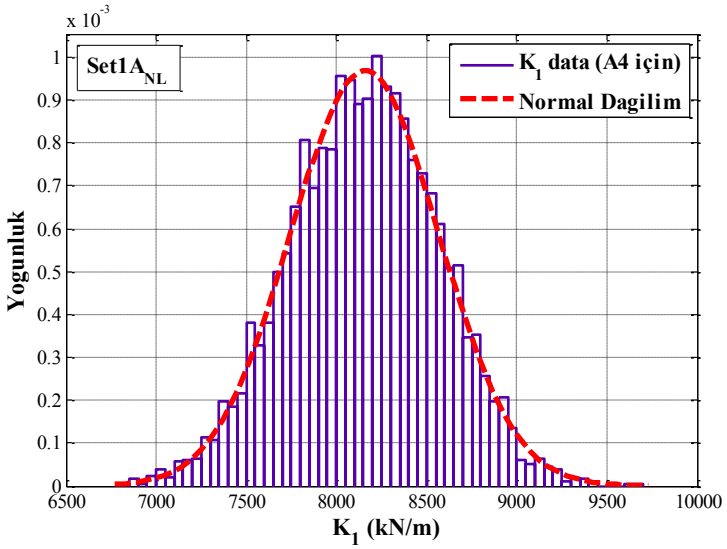
Şekil 3.23: $T_{0,nom}$ = 2 s olması durumunda A4 izolatörü için üretilmiş K_1, K_2 ve D_y parametrelerine ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu (Cumulative Distribution Function: CDF) grafikleri: (a) – (c) ve normal olasılık kağıdı grafikleri: (d) – (f).



Şekil 3.24: $T_{0,nom}$=3.5 s olması durumunda A4 izolatörü için üretilmiş K_1, K_2 ve D_y parametrelerine ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu (Cumulative Distribution Function: CDF) grafikleri: (a) – (c) ve normal olasılık kağıdı grafikleri: (d) – (f).



Şekil 3.25: $T_{0,nom}$ = 2 s (a) – (c) ve $T_{0,nom}$ = 3.5 s (d) – (f) olması durumlarında A4 izolatörü için elde edilen α, F_y, Q parametrelerine ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu (Cumulative Distribution Function: CDF) grafikleri.



Şekil 3.26: Set1A$_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 2 s ve *c.o.v.* = % 5) kapsamında A4 izolatörü için üretilmiş K_1 değerlerine ait yoğunluk (density) diyagramı.

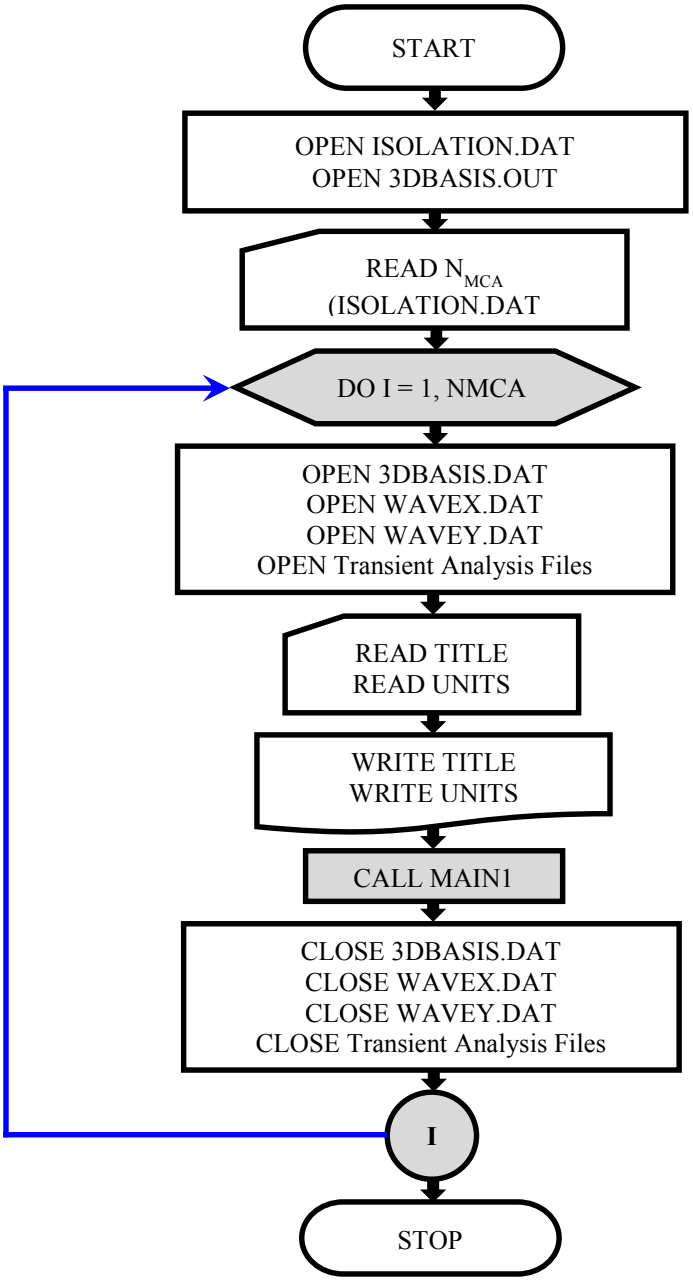
3.5.3. Birinci Ana Bölüm Kapsamında 3D-BASIS Programında Gerçekleştirilen Modifikasyonlar: 3D-BASIS-MONTE

Tez çalışmasının birinci ana bölümü kapsamında, referans izolasyon sistemlerinin Bölüm 3.5.1'deki gibi oluşturulmasının ardından, referans sistemleri baz almak suretiyle, Bölüm 3.5.2'de üretilmiş izolasyon sistemlerindeki izolatörlere ait parametrelerin değerleri elde edilmiştir. Tablo 3.7'de belirtilen her bir alt set için Şekil 3.22'deki program ile üretilen ve her biri birbirinden farklı 16 adet doğrusal olmayan, kauçuk esaslı izolatörden oluşan birbirinden farklı 5,000 farklı izolasyon sistemindeki her bir izolatöre ait α, F_y ve D_y parametreleri, yine aynı program vasıtasıyla ISOLATION.DAT dosyasına sıralı olarak kaydedilmiştir. Birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında, her bir alt set için üretilen ISOLATION.DAT dosyasındaki 5,000 adet izolasyon sisteminin Bölüm 3.3.1'deki üstyapı ile entegre edilmesiyle oluşturulmuş 5,000 adet üç boyutlu sismik izolasyonlu binanın, aynı tarihi yer hareketi çifti altındaki doğrusal olmayan dinamik analizlerinin Monte Carlo simülasyonları dahilinde yapılması planlanmıştır. Bu plan doğrultusunda, detayları Bölüm 3.2'de verilen 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programında, birinci ana bölüm kapsamında göz önünde bulundurulan her bir izolasyon sistemleri alt seti için üretilen izolasyon sistemlerinin karakteristik parametrelerine ait değerleri, ilgili alt sete ait ISOLATION.DAT dosyasından okuyarak; bu sistemlerin her biri için aynı üstyapıyı göz önünde bulundurmak suretiyle oluşturulan N_{MCA} adet sismik izolasyonlu

binanın aynı yer hareketi çifti etkisindeki dinamik analizlerinin, durmaksızın, programın bir kez yürütülmesiyle gerçekleşmesini sağlayacak modifikasyonlar yapılmış ve programın bu modifiye haline 3D-BASIS-MONTE adı verilmiştir. Bu doğrultuda, mevcut tez birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen modifikasyonlar, özetle aşağıdaki gibidir:

- Program kodunda ISOLATION.DAT dosyası açılmıştır.
- İzolasyon sistemlerinde kauçuk esaslı izolatörler için tek eksenli ve iki eksenli histeretik elemanlar kullanılması halinde; bu elemanlara ait bilgileri, 3DBASIS.DAT dosyası yerine ISOLATION.DAT dosyasından okumak üzere, düzenlemeler yapılmıştır.
- Programda analizlerin gerçekleştirildiği MAIN1 programı, DO döngüsü içine alınarak; programın, tüm izolasyon sistemleri için bir yürütme ile durmaksızın, N_{MCA} adet tekrarlı analiz yapması sağlanmıştır. Söz konusu, N_{MCA} simülasyon sayısı ISOLATION.DAT data dosyasının ilk satırında tanımlanmıştır.
- Orijinal programın başında açılan 3DBASIS.DAT, WAVEX.DAT ve WAVEY.DAT dosyaları, yukarıda belirtilen döngü içine alınarak; tüm sismik izolasyonlu binaların aynı üstyapı ile entegre edilmesi ve aynı yer hareketi çifti etkisinde analiz edilmesi sağlanmıştır.
- Ayrıca, tüm analiz sonuçlarının yazdırıldığı 3DBASIS.OUT dosyasının yapısı değiştirilmiş; her bir sismik izolasyonlu yapı için gerçekleştirilen dinamik analiz sonucunda elde edilen tüm yapısal cevap parametrelerinin tek bir satırda, yan yana, sıralı ve formatlı olarak yazdırılmasını sağlayacak düzenlemeler yapılmıştır.

Şekil 3.10'da genel hatlarıyla akış diyagramı verilen orijinal 3D-BASIS programında, yukarıda belirtilen modifikasyonların yapılmasıyla mevcut tez birinci ana bölümü kapsamında söz konusu programın (3D-BASIS-MONTE) akış diyagramı, Şekil 3.27'deki hali almıştır.



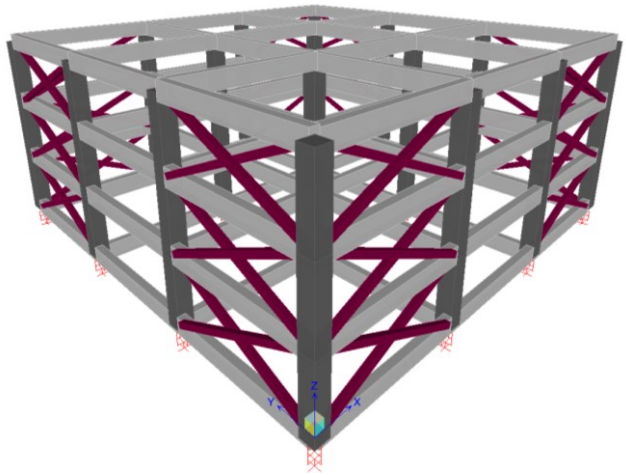
Şekil 3.27: 3D-BASIS-MONTE programının genel hatlarıyla akış diyagramı.

3.5.3.1. 3D-BASIS-MONTE Programının Verifikasyonu

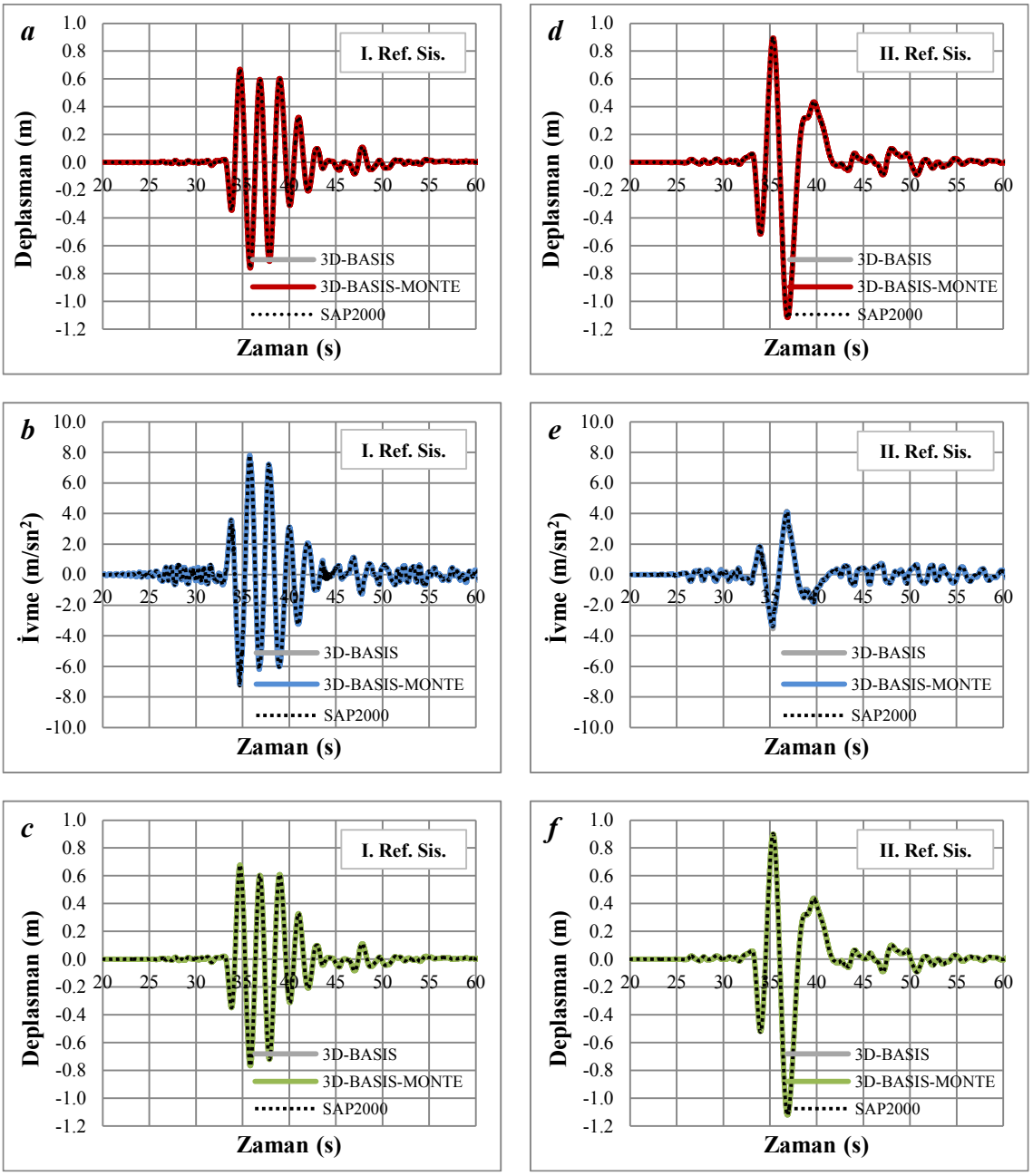
3D-BASIS-MONTE programının doğruluğunu teyit etmek amacıyla bir ara çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu ara çalışmada, özellikleri Bölüm 3.5.1'de verilen iki referans izolasyonlu bina, Tablo 3.4'den ileri yönelim etkisi içeren yer hareketi kayıtlarına örnek teşkil etmek üzere seçilmiş olan $FD1_x$ kodlu TCU052-W ile buna dik doğrultudaki TCU052-N bileşenlerinden oluşan FD1 yer hareketi çiftine ve Tablo 3.5'den yine örnek teşkil etmek üzere seçilmiş olan ileri yönelim etkisi içermeyen yer hareketi kayıtlarına örnek teşkil etmek üzere seçilmiş olan $NFD4_x$ kodlu CHY080-W ile buna dik doğrultudaki CHY080-N bileşenlerinden oluşan NFD4 yer hareketi çiftine ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. x kodlu yer hareketi bileşenleri, söz konusu binalara X doğrultusunda, diğer bileşenler ise binalara Y doğrultusunda uygulanmış; referans binaların üç boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizleri, Zaman-Tanım Alanında Analiz yöntemiyle 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programının orijinal ve tez kapsamında modifiye edilmiş versiyonu (3D-BASIS-MONTE), ve ayrıca SAP2000 (CSI, 2011) programı kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Referans izolasyonlu binaların SAP2000 modellerine ait tipik görünüş, Şekil 3.28'de verilmiştir. Bu analizlerde, her iki referans bina için de tamamen aynı olan üst yapı için modal sönüm oranı, her mod için ζ_s = 0.03 değerinde alınmıştır. 3D-BASIS ve 3D-BASIS-MONTE ile gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde her iki referans bina için elde edilen yapısal cevap parametrelerinin pik değerlerinin aynı olduğu, SAP2000 sonuçlarının ise aynı denilecek mertebede söz konusu pik değerlere yakın olduğu görülmüştür.

Verifikasyon çalışması kapsamında, yapısal cevap parametrelerinin pik değerlerinin yanı sıra, maruz kaldıkları depremler süresince her bir t anındaki değerlerinin değişimi de incelenmiştir. Söz konusu programlarla, I. ve II. referans izolasyonlu binalar için FD1 yer hareketi çifti altında elde edilen izolasyon katı kütle merkezi deplasmanının, en üst kat kütle merkezi toplam ivmesinin ve yine en üst kat kütle merkezi deplasmanının zamana bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 3.29 (a) ve (d), Şekil 3.29 (b) ve (e) ile Şekil 3.29 (c) ve (f)'de verilmiştir. Benzer şekilde, aynı binalar için NFD4 yer hareketi çifti altında elde edilen izolasyon katı kütle merkezi deplasmanın, en üst kat kütle merkezi toplam ivmesinin ve yine en üst kat kütle merkezi deplasmanının zamana bağlı değişimleri ise, sırasıyla Şekil 3.30 (a) ve (d), Şekil 3.30 (b) ve (e) ile Şekil 3.30 (c) ve (f)'de verilmiştir. Bu şekillerdeki tüm yapısal cevap parametreleri, x doğrultusundaki bileşenler olup; yer

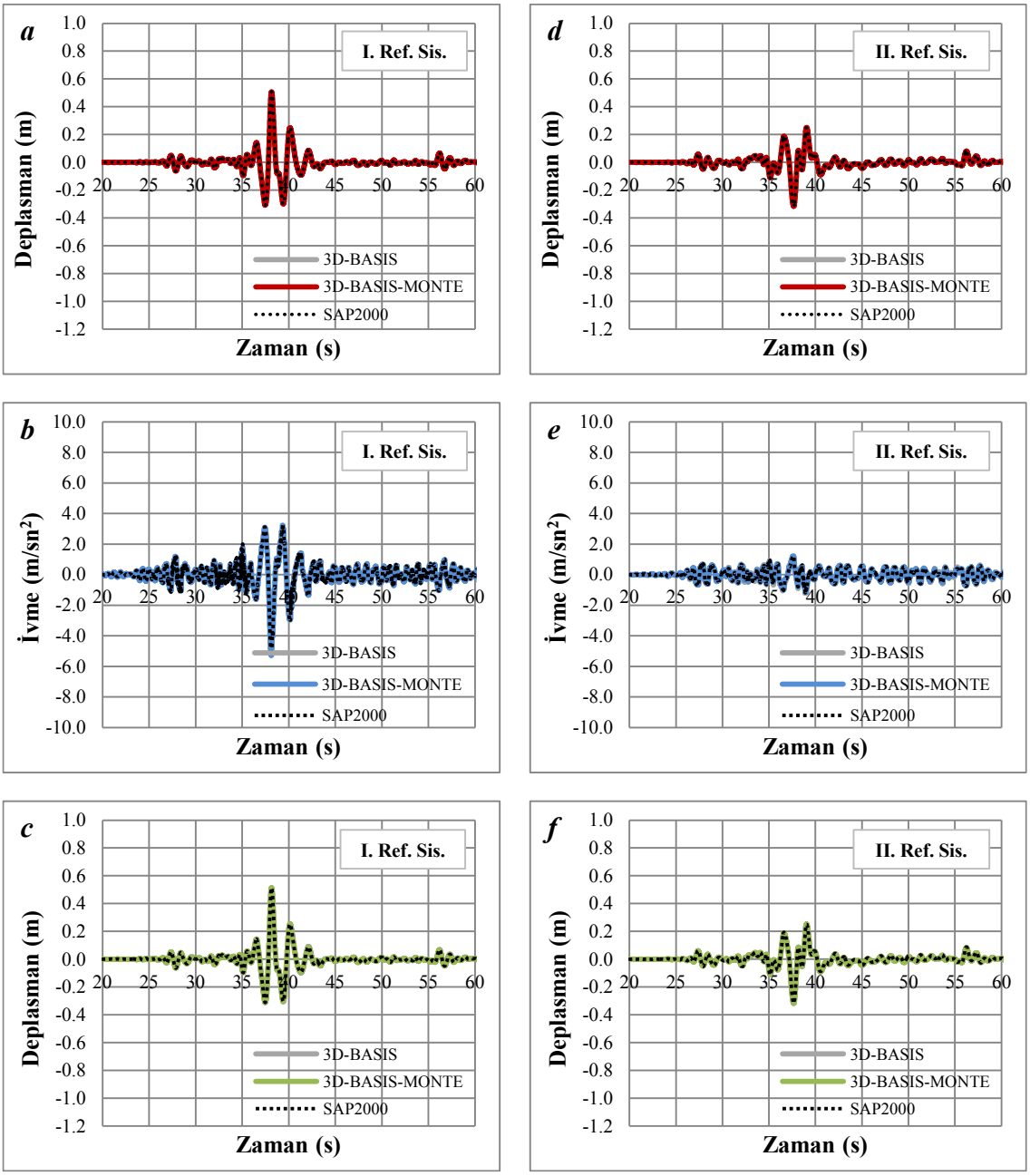
kısıtı nedeniyle y doğrultusundaki bileşenlere yer verilmemiştir. Söz konusu yer hareketi çiftlerinin her biri için I. ve II. referans izolasyonlu binanın analizleri, orijinal 3D-BASIS ve SAP2000 programlarında ayrı ayrı gerçekleştirilirken; 3D-BASIS-MONTE programında ise birlikte gerçekleştirilmiştir. 3D-BASIS-MONTE programı, farklı izolasyon sistemine sahip iki binanın analizini bir kez çalıştırılmak suretiyle durmadan art arda gerçekleştirebilmiştir. Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'den görüldüğü üzere, uygulanan depremlerin her bir *t* anı için üç programla da aynı denilebilecek sonuçlar elde edilmiştir. Böylece, hem 3D-BASIS'te yapılan modellemenin doğruluğu bağımsız SAP2000 modeli ile doğrulanmış hem de 3D-BASIS programında farklı izolasyon sistemlerinin aynı üstyapı ile entegre edilmesiyle oluşan binalar için tek yürütme (run) ile durmadan art arda analiz gerçekleştirebilmesi için yapılan modifikasyonların (3D-BASIS-MONTE) başarılı olduğu teyit edilmiştir.



Şekil 3.28: Referans izolasyonlu binaların SAP2000 modeline ait tipik görünüş.



Şekil 3.29: FD1 etkisiyle oluşan (a), (d): izolasyon katı kütle merkezi deplasmanlanının, (b), (e): üst kat kütle merkezi toplam ivmesinin, (c), (f): üst kat kütle merkezi deplasmanının zamana bağlı değişimi.



Şekil 3.30: NFD4 etkisiyle oluşan (a), (d): izolasyon katı kütle merkezi deplasmanlanının, (b), (e): üst kat kütle merkezi toplam ivmesinin, (c), (f): üst kat kütle merkezi deplasmanının zamana bağlı değişimi.

3.5.4. Uygun Simülasyon Sayısının Tespiti

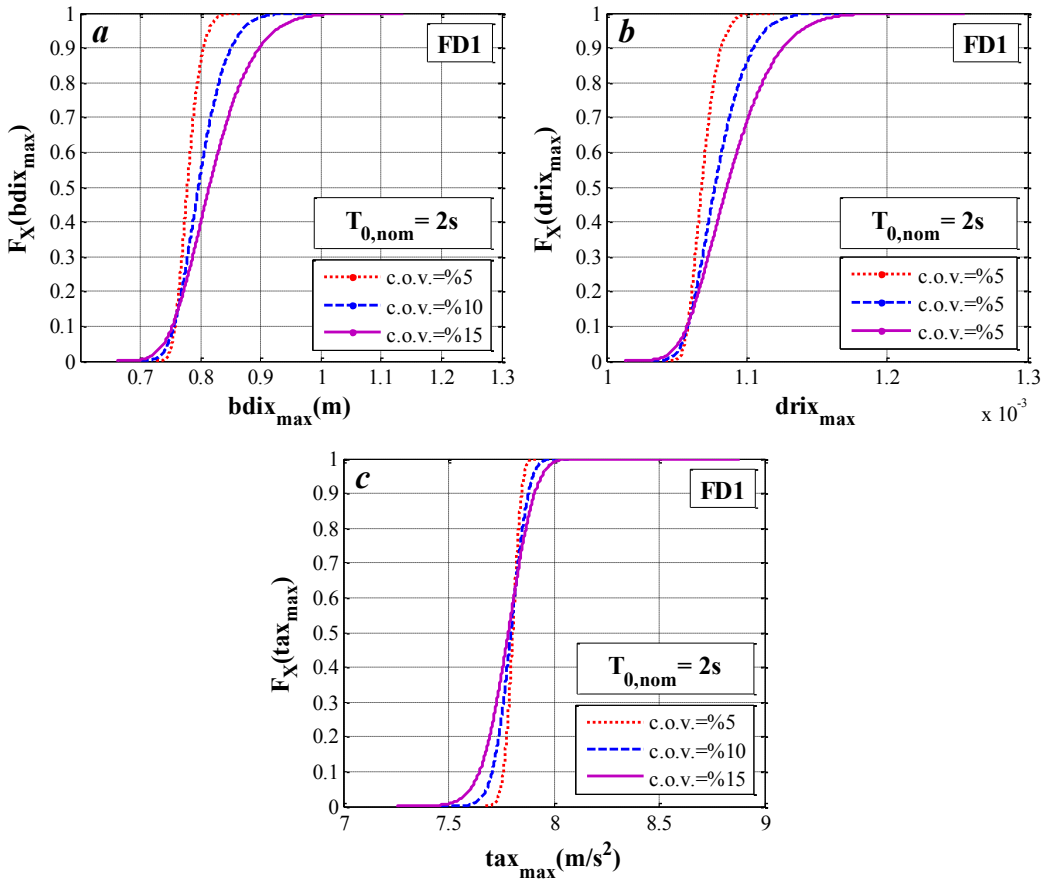
Bölüm 3.5.2'de belirtildiği üzere, mevcut tez çalışması birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında oluşturulan 6 adet alt izolasyon sistemi alt setinin her birinde N_{MCA} = 5,000 alınmış; yani her alt sette 5,000 farklı izolasyon sistemi olmak üzere, toplamda 30000 adet birbirinden farklı izolasyon sistemi oluşturulmuştur. Her bir izolasyon sistemi ise, her biri birbirinden farklı mekanik parametrelere sahip 16 adet kauçuk esaslı izolatörden oluşmaktadır. Söz konusu Monte Carlo simülasyon sayısına (N_{MCA}), burada sunulan bir ara çalışma ile karar verilmiştir. Bu ara çalışma kapsamında, Bölüm 3.5.2'de detayları verilen program ile $T_{0,nom}$ = 2 s, *c.o.v.*=%5, %10 ve %15 değerleri için 3 farklı izolasyon sistemi kombinasyonu oluşturulmuş ve her bir kombinasyon için N_{MCA} = 15,000 alınarak; 15,000 adet birbirinden farklı (toplam 3×15,000=45,000) izolasyon sisteminden oluşan bir izolasyon sistemi seti üretilmiştir. Üretilen bu izolasyon sistemlerinin Bölüm 3.3.1'de detayları verilen üst yapı ile entegre edilmesiyle toplam 45,000 adet sismik izolasyonlu bina oluşturulmuştur.

Mevcut tez çalışması birinci ana bölümü kapsamında 3D-BASIS-MONTE (Bölüm 3.5.3) programı ile oluşturulan tüm binaların doğrusal olmayan üç boyutlu dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu dinamik analizler, Tablo 3.4'den örnek teşkil etmek amacıyla seçilen $FD1_x$ kodlu TCU052-W kayıdı ve bu kayıda dik doğrultudaki TCU052-N kaydının oluşturduğu FD1 yer hareketi çifti etkisinde iki eksenli olarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler neticesinde, her bir kombinasyona ait sette bulunan her bir izolasyon sistemi ile oluşturulan her bir bina için pik yapısal cevap parametreleri elde edilmiştir. Söz konusu ön çalışmada, cevap parametreleri olarak izolasyon katı pik deplasmanlarının maksimumu ($bdix_{max}$), tüm katların merkez ve köşe deplasmanlarına göre hesaplanan pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumu ($drix_{max}$) ve tüm kat kütle merkezlerinde hesaplanan pik toplam ivmelerin maksimumu (tax_{max}) göz önünde bulundurulmuştur. Bu parametrelerin CDF grafikleri ise, sırasıyla Şekil 3.31 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir.

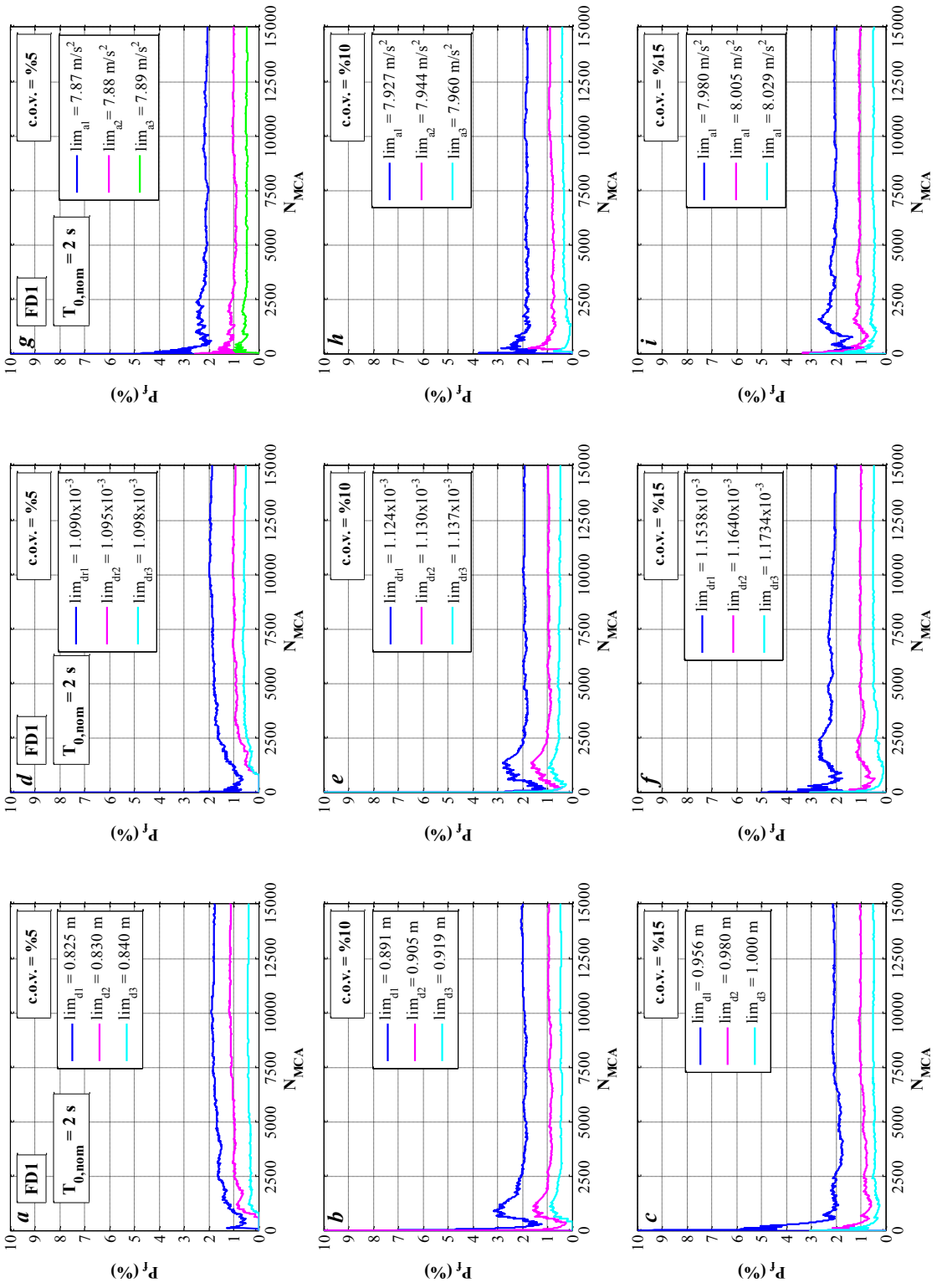
Senaryo-I kapsamında kullanılacak N_{MCA} değerini tespit için her bir kombinasyon için ayrı ayrı olmak üzere; o kombinasyon için elde edilen yapısal cevap parametreleri kullanılarak "güvenilirlik analizi" yapılmıştır. Güvenilirlik analizleri kapsamında dinamik analizler ile N_{MCA} sayısına bağlı olarak elde edilen yapısal cevap parametreleri

için yaklaşık %2, %1 ve %0.5 başarısızlık olasılıklarının (P_f) gerçekleşmesi için aşılması gereken deplasman limit değerleri (lim_{d1}, lim_{d2} ve lim_{d3}) ile deplasman limit değerleri (lim_{a1}, lim_{a2}, lim_{a3}) belirlenmiştir. c.ov. = %5, %10 ve %15 için $bdix_{max}$ için güvenilirlik analizleri sonuçları, sırasıyla Şekil 3.32 (a), (b) ve (c)'de; $drix_{max}$ için güvenilirlik analizleri sonuçları, sırasıyla Şekil 3.32 (d), (e) ve (f)'de ve tax_{max} için güvenilirlik analizleri sonuçları ise, sırasıyla Şekil 3.32 (g), (h) ve (i)'de verilmiştir.

Şekil 3.32'deki grafiklerinden görüldüğü üzere; N_{MCA} = 2,500 simülasyona kadar, göz önünde bulundurulan tüm limit değerleri için her iki yapısal cevap parametresinin de simülasyon sayısına göre başarısızlık olasılıklarında önemli değişiklikler olmakta, simülasyon sayısının artışına paralel olarak bu değişiklikler azalmaktadır. Simülasyon sayısının 2,500~15,000 aralığında olması durumunda önemli değişiklikler olmazken; 5,000 simülasyonun üzerinde ulaşılan başarısızlık olasılık değerleri artık neredeyse sabitlenmektedir. Bu nedenle, mevcut tezin birinci ana bölüm çalışmaları kapsamındaki analizlerde N_{MCA} sayısının 5,000 olarak alınmasının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 3.31: N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarının CDF grafikleri; (a): $bdix_{max}$, (b): $drix_{max}$ ve (c): tax_{max} için.



Şekil 3.32: N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına ait başarısızlık olasılıklarının değişimi; (a)-(c): $bdix_{max}$, (d)-(f): $drix_{max}$, (g)-(i): tax_{max} için.

3.6. PULS İÇEREN YAKIN-FAY YER HAREKETLERİNİN SENTETİK OLARAK ÜRETİLMESİ

Mevcut tezin ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında, izolasyon sistemi karakteristik parametrelerinde çeşitli nedenlerle (Bölüm 2.3.1) meydana gelen değişikliklerin göz önüne alındığı sismik izolasyonlu binaların, puls içeren yakın-fay yer hareketlerine maruz kalması durumunda, dinamik davranışlarının değişimi ve güvenilirlikleri incelenmiştir. Bu bölüm kapsamında izolasyon sistemi parametrelerindeki değişiklikler göz önünde bulundurulduğu gibi, daha kapsamlı bir dinamik davranış analizi gerçekleştirebilmek amacıyla, söz konusu yer hareketlerinin karakteristik parametrelerindeki değişiklikler de göz önünde bulundurulmuş; ve böylece yer hareketlerinin olasılıksal yapısı da dikkate alınmıştır.

Deprem veri tabanlarındaki puls içeren yakın-fay yer hareketi kayıtlarının az sayıda olması ve mevcut çalışmada karakteristik parametreleri farklı değerlere sahip yer hareketlerini göz önünde bulundurarak, istatiksel olarak yeterli sayıda dinamik analiz gerçekleştirilmesinin amaçlanması nedeniyle; göz önünde bulundurulan puls içeren yakın-fay yer hareketleri, sentetik olarak üretilmiştir. Mevcut bölüm kapsamında üretilen tüm yakın-fay sentetik depremleri, Bölüm 2.4.1'de verilen Agrawal ve He (2002) puls modeli kullanılarak üretilmiştir. Üretilen sentetik depremlerin moment büyüklüğü (M_w) ve faya olan en yakın uzaklık (r) parametrelerine göre, mevcut bölüm çalışmaları iki alt başlığa ayrılmış ve iki ayrı senaryo halinde sunulmuştur. M_w ve r parametrelerine ait değerlerin bilinmesi (deterministik olması) durumu "Senaryo-I"; kesin olarak bilinmemesi durumu (rastgele değişken olarak ele alınması) ise "Senaryo-II" olarak incelenmiştir. Senaryo-I dahilinde üretilen depremlere ait detaylar, Bölüm 3.6.1'de; Senaryo-II dahilinde üretilen depremlere ait detaylar ise, Bölüm 3.6.2'de sunulmuş olup; bu bölümlerde ayrıca, ilgili senaryolar kapsamında gerçekleştirilecek dinamik analizler için üretilecek izolasyon sistemlerine ait bilgiler de verilmiştir. Söz konusu senaryolar dahilinde üretilen tüm sentetik depremlere bağlı olarak yapısal cevap parametrelerinin değişimi ve oluşturulan yapısal sistemlerin güvenilirlik analizlerine ait bulgular, Bölüm 4.2'de verilmiştir.

3.6.1. Senaryo-I: Moment Büyüklüğü ve Faya Olan En Yakın Mesafenin Bilinmesi Durumu

Agrawal ve He (2002) puls modeli için verilen Denklem (2.24) - (2.28)'dan görüldüğü üzere; söz konusu modele göre puls içeren yakın-fay depremlerin sentetik olarak üretilebilmesi için kullanılan ana karakteristik deprem parametreleri depremin moment büyüklüğü (M_w), faya olan en yakın uzaklık (r), puls periyodu (T_p), puls hızı (V_p) ve puls sönüm oranı (ζ_p)'dir. Senaryo-I dahilinde üretilen sentetik yakın-fay depremlerin, söz konusu karakteristik deprem parametrelerinden M_w ve r'ye ait değerlerin bilindiği ve bu parametrelerin belirli sabit değerleri aldığı (bu parametrelere göre değerlendirmelerin sınıflandırılabilmesini sağlayacaktır); yer hareketlerinin olasılıksal yapısının V_p, T_p ve ζ_p'den kaynaklandığı varsayılmıştır.

Bölüm 2.4.1.5'de de belirtildiği üzere; puls içeren yakın-fay yer hareketlerine ait V_p ve T_p değerleri, Denklem (2.24)'ye göre hesaplanabilir. Söz konusu denklemler, Somerville (1998) çalışması kapsamında geliştirilmiş olup; Somerville tarafından da belirtildiği üzere, yaklaşık ve ampirik denklemlerdir. Dolayısıyla, Senaryo-I kapsamında değerleri belirli olduğu varsayılan M_w ve r parametrelerine bağlı olarak Denklem (2.24)'deki gibi ifade edilen V_p ve T_p parametrelerinin söz konusu denklemlere göre hesaplanan değerleri kesin değildir. Bu parametrelerin, ilgili denklemlere göre hesaplanan değerler etrafında başka değerler alma olasılığı bulunmaktadır. Bu nedenle, Senaryo-I kapsamında üretilecek sentetik depremler için V_p, T_p ve ζ_p parametrelerinin bağımsız, rastgele değişkenler olduğu varsayılmış; göz önünde bulundurulan her bir deprem kombinasyonu (Tablo 3.9) için tespit edilecek simülasyon sayısı (N_{MCA}) kadar birbirinden farklı V_p, T_p ve ζ_p değerlerine sahip sentetik depremler üretilmiş ve mevcut tez çalışması kapsamında bu depremler "Türev Sentetik Depremler" olarak isimlendirilmiştir. Söz konusu türev sentetik depremleri üretebilmek için mevcut senaryo kapsamında öncelikle, tüm deprem parametrelerinin sabit kabul edildiği "Nominal Sentetik Depremler" üretilmiştir. Nominal sentetik depremler ile türev sentetik depremler hakkındaki detaylar, Bölüm 3.6.1.1'de; bu depremlere maruz bırakılan sismik izolasyonlu binaları oluşturmak için üretilen izolasyon sistemi setleri ile ilgili detaylar, Bölüm 3.6.1.2'de verilmiştir. Bölüm 3.6.1.3'de ise, Senaryo-I kapsamındaki her bir deprem kombinasyonu için üretilecek sentetik deprem sayısı ve aynı zamanda her bir izolasyon sistemi seti için üretilecek izolasyon sistemi sayısını gösteren simülasyon sayısı (N_{MCA}) ile izolasyon sistemlerinin bağımsız

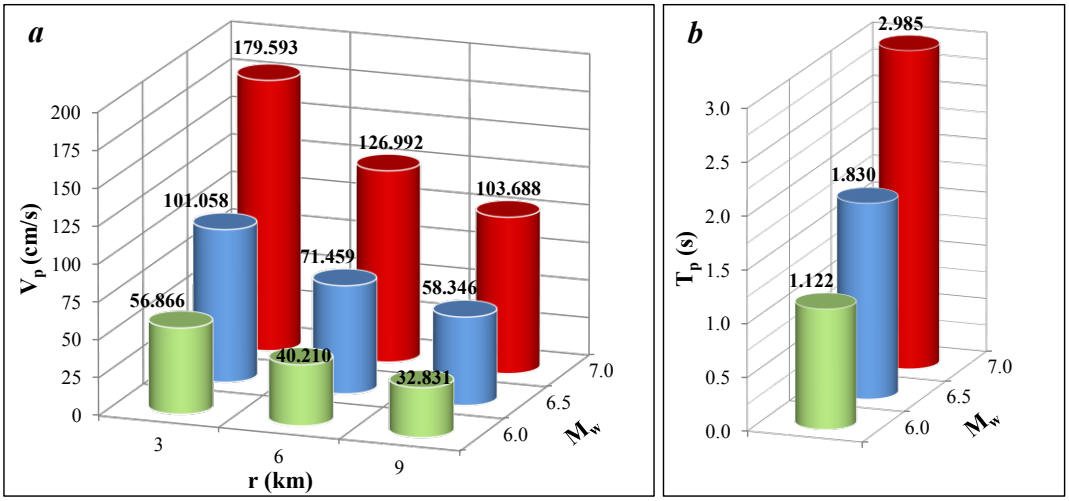
karakteristik değişkenleri için kullanılacak olan varyasyon katsayısı (*c.o.v.*) değerlerinin tespiti için yapılan ön çalışmaya ait detaylar verilmiştir.

3.6.1.1. Sentetik Deprem Parametreleri

Senaryo-I kapsamında, M_w değerleri 6.0, 6.5 ve 7.0; r değerleri ise 3 km, 6 km ve 9 km alınmış ve her bir M_w değerini her bir r değeri ile eşleştirmek suretiyle, toplam 9 adet "M_w – r" kombinasyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan her bir "M_w – r" kombinasyonu için bir nominal deprem olmak üzere; toplam 9 adet nominal sentetik deprem üretilmiştir. V_p, T_p ve ζ_p parametreleri sabit olan söz konusu nominal sentetik depremler için V_p ve T_p değerleri, Denklem (2.24) ile belirlenmiş ve Tablo 3.8'de sunulmuştur. Agrawal ve He (2002) puls modeline göre puls içeren yakın-fay depremlerin sentetik olarak üretilebilmesi için belirlenmesi gereken bir diğer ana parametre, Denklem (2.24) - (2.28) 'dan görüldüğü üzere; puls sönüm oranıdır (ζ_p). Puls sönüm oranı, yer hareketi süresi boyunca meydana gelecek puls sayısını belirlemektedir. Hız- zaman geçmişindeki puls sayısı ise, yapısal tepkiler için önemli bir parametredir (Rodriguez-Marek, 2000; Öncü Davas ve Alhan, 2013). Örneğin, ζ_p'nin %10, %20 ve %40 alınması durumlarında sırasıyla çoklu, ileri – geri ve sadece ileri yönlü hız pulsları meydana gelir; yani ζ_p'nin söz konusu değerleri için sırasıyla sadece üç, iki ve bir adet önemli hız pulsu meydana gelir (Dicleli ve Buddaram, 2007a). Günümüze kadar kaydedilmiş yakın-fay yer hareketlerinin çoğu ise, bir adet ileri – geri tam hız pulsu ya da diğer bir deyişle iki adet yarı çevrim içermektedir (Rodriguez-Marek, 2000). Bu duruma denk gelen puls sönüm oranı ise ζ_p=%20'dir. Bu bilgiler doğrultusunda, mevcut tez ikinci bölüm çalışmaları kapsamında üretilen tüm sentetik depremler için, puls sönüm oranının nominal değeri ($\zeta_{p,nom}$) %20 alınmıştır. Nominal sentetik depremlerin V_p değerlerinin M_w ve r'ye; T_p değerlerinin ise M_w'ya; bağlı değişimi, grafiksel olarak sırasıyla Şekil 3.33 (a) ve (b)'de sunulmuştur. Tablo 3.4'de verilen FD yer hareketlerinin V_p değerleri, Tablo 3.8'de ağırlıklı olarak M_w = 6.5 için verilen değerlere yakındır; yine aynı FD yer hareketlerinin T_p değerleri ise, ilgili r değeri için Denklem (2.24) ile hesaplanan değere yakındır.

Tablo 3.8: Nominal sentetik depremlere ait T_p ve V_p değerleri.

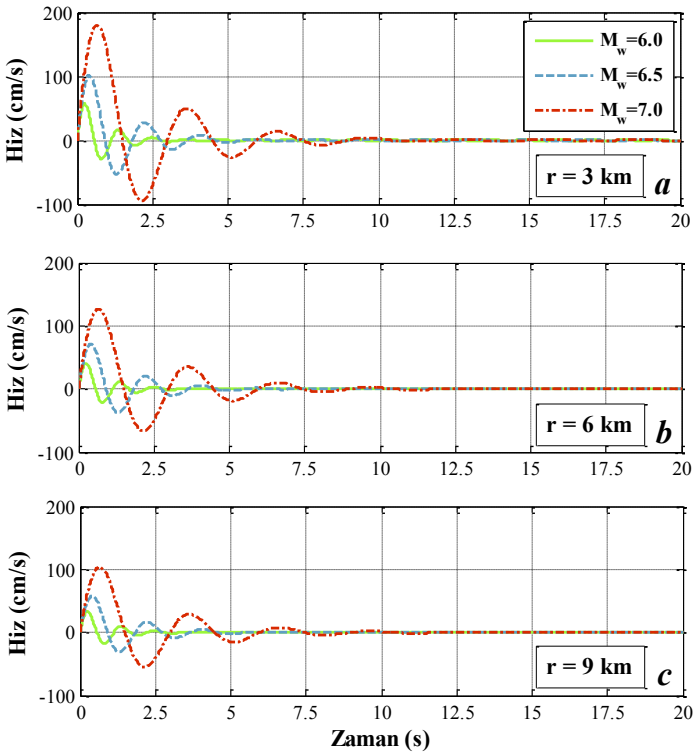
M_w	T_p (s)	V_p (cm/s)		
		r = 3 km	r = 6 km	r = 9 km
6.0	1.122	56.866	40.210	32.831
6.5	1.830	101.058	71.459	58.346
7.0	2.985	179.593	126.992	103.688



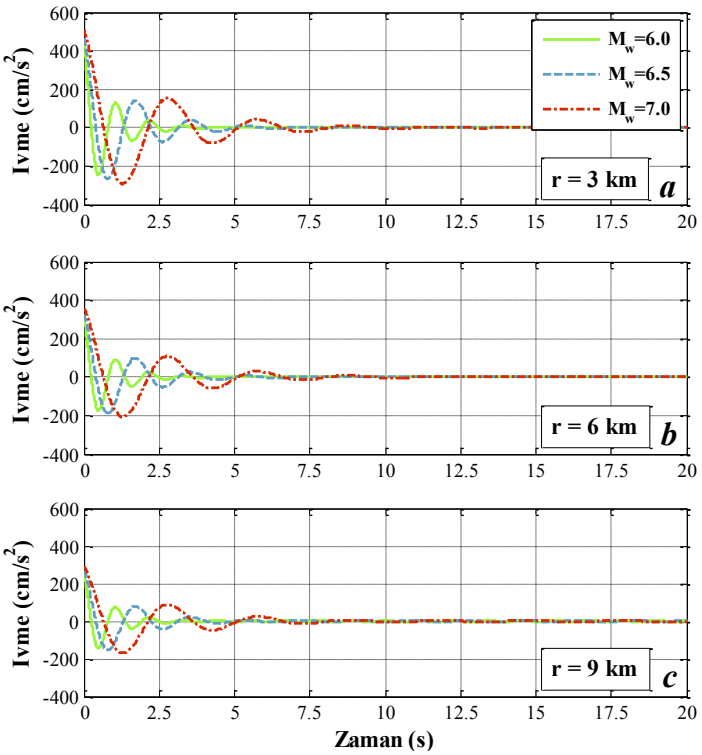
Şekil 3.33: Nominal sentetik depremlere ait (a) V_p ve (b) T_p değerleri.

Nominal sentetik depremlerin her bir 't' anı için Denklem (2.26)'e göre hesaplanan hız değerlerinin zamana bağlı olarak değişimini gösteren hız-zaman geçmişleri, r = 3 km, r = 6 km ve r = 9 km için sırasıyla Şekil 3.34 (a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir. Söz konusu depremlerin Denklem (2.27)'e göre hesaplanan ivme değerlerinin zamana bağlı olarak değişimini gösteren ivme-zaman geçmişleri ise, yine r = 3 km, r = 6 km ve r = 9 km için sırasıyla Şekil 3.35 (a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir. Bu depremlere ait hız-zaman ve ivme-zaman grafiklerinden görüldüğü üzere, tüm depremler için 20 saniyelik kayıtlar üretilmiştir; ancak hız ve ivme değerleri yaklaşık 10. saniyede sıfıra ulaşmaktadır. Bu nedenle 10 saniyeden sonraki değerlerin üretilmesine ihtiyaç duyulmadığı düşünülebilir. Ancak yukarıda da belirtildiği üzere; nominal depremler için ζ_p = %20 alınmıştır; bu nedenle hız-zaman kayıtları, iki önemli puls hareketinden sonra hızla azalarak sönümlenmektedir. Mevcut senaryo kapsamında üretilen türev sentetik depremlerde ise, ζ_p sabit olmayıp; nominal değeri %20 olmak üzere, minimum %5 değerini almaktadır. ζ_p = %5 olması durumunda, Bolt (1973) tarafından bir deprem ivme kaydında 0.05g'ye eşit veya daha fazla ivmelerin ilk ve son olarak meydana geldiği anlar arasında geçen süre olarak tanımlanan etkili deprem süresi (bracketed duration), en uzun süreye denk gelen

$M_w = 7.0 - r = 3$ km kombinasyonu için yaklaşık olarak 20 saniyedir. Bu nedenle, nominal sentetik depremler de dahil olmak üzere, tez çalışması kapsamında üretilen tüm sentetik depremler için toplam deprem süresi 20 saniye alınmıştır.



Şekil 3.34: Nominal sentetik depremlere ait hız –zaman geçmişleri.



Şekil 3.35: Nominal sentetik depremlere ait ivme –zaman geçmişleri.

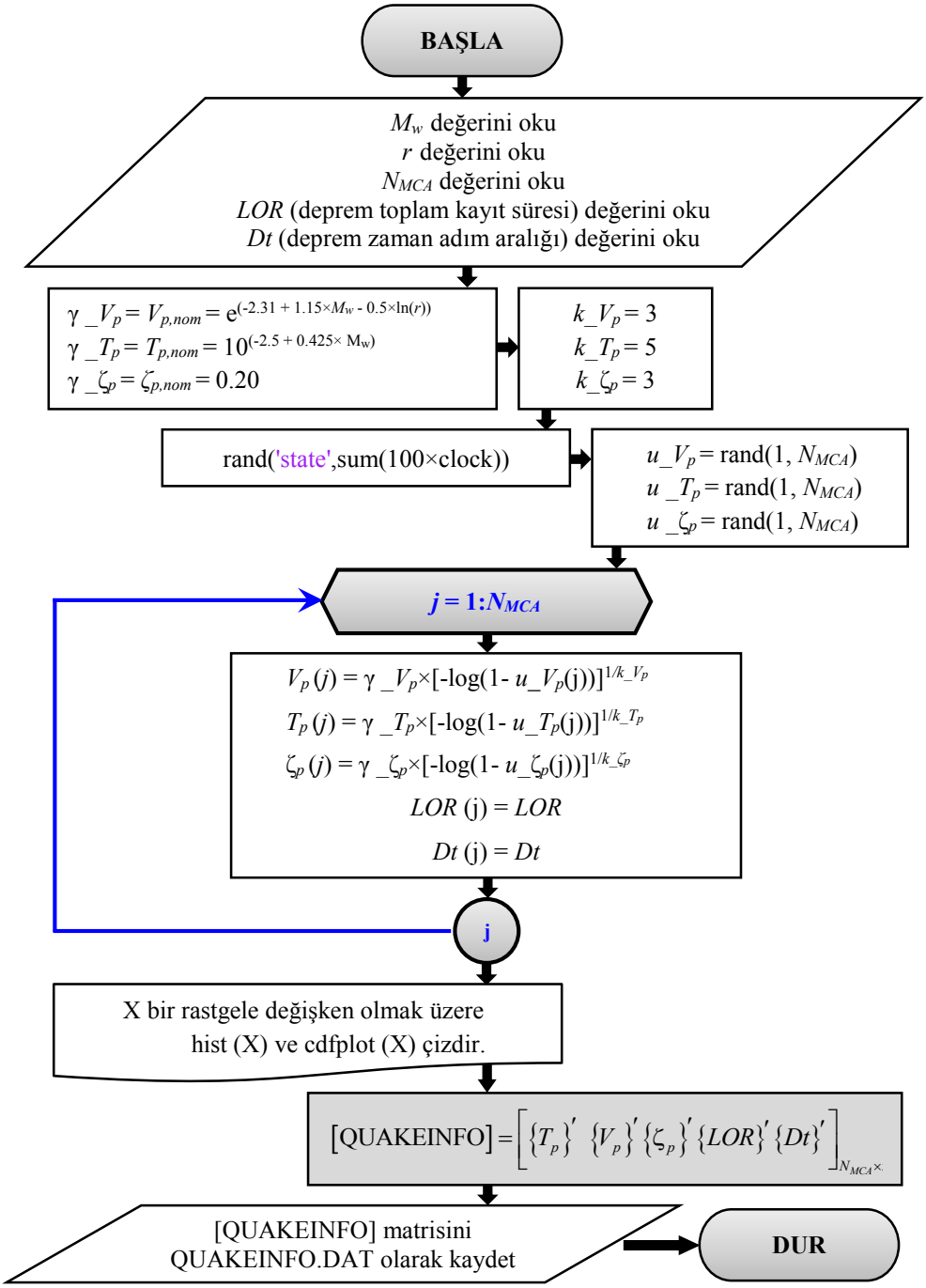
Senaryo-I kapsamında 9 adet nominal sentetik depremin üretilmesinin ardından, her bir nominal deprem için bu depremin karakteristik parametrelerine ait değerlerine göre bir adet türev sentetik depremler seti olmak üzere toplam 9 adet türev sentetik depremler seti üretilmiştir. Üretilen her bir set, gerçekleştirilecek dinamik analiz sayısı (N_{MCA}) adedince birbirinden farklı V_p, T_p ve ζ_p değerlerine sahip sentetik deprem içermekte olup; her bir setteki parametrelerin nominal değerleri, ilgili nominal depremin parametrelerinin değerleridir. Türev depremleri üretebilmek için Bölüm 3.6.1'de belirtildiği üzere; söz konusu V_p, T_p ve ζ_p parametreleri, mevcut çalışmanın bağımsız, rastgele değişkenleri olarak dikkate alınmış olup; bu parametrelerin istatiksel olarak weibull dağılıma (Bölüm 3.1.2.8) uyduğu varsayılmış ve değerleri, weibull dağılıma ait Denklem (3.24)'e göre elde edilmiştir. Söz konusu denkleme göre, Senaryo-I kapsamında üretilen 9 adet türev sentetik depremler setine ait her bir değişken için kullanılan ölçek parametre (γ) ve şekil parametresi (k) değerleri, Tablo 3.9'da verilmiştir. Tablo 3.8 ve Tablo 3.9'un karşılaştırılmasından görüleceği üzere; Tablo 3.8'deki her bir M_w - r kombinasyonu için üretilen nominal sentetik depreme ait V_p ve T_p değerleri ile seçilen ζ_p değerinin, söz konusu kombinasyon için üretilen türev sentetik depremler setinin nominal değerleri olması nedeniyle, bu değerler Tablo 3.9'da ölçek parametre (γ) olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.9: Senaryo-I kapsamında üretilen türev sentetik deprem setleri için üretilen V_p, T_p, ζ_p değerleri için weibull dağılıma ait ölçek (γ) ve şekil (k) parametreleri.

Kombinasyon			**V_p (cm/s)**		**T_p (s)**		**ζ_p (%)**	
M_w	-	**r**	**γ (cm/s)**	***k***	**γ (s)**	***k***	**γ (%)**	***k***
6.0	**-**	**3 km**	56.866		1.122			
6.0	**-**	**6 km**	40.210		1.122			
6.0	**-**	**9 km**	32.831		1.122			
6.5	**-**	**3 km**	101.058		1.830			
6.5	**-**	**6 km**	71.459	3	1.830	5	20	3
6.5	**-**	**9 km**	58.346		1.830			
7.0	**-**	**3 km**	179.593		2.985			
7.0	**-**	**6 km**	126.992		2.985			
7.0	**-**	**9 km**	103.688		2.985			

Denklem (3.24)'deki u_i ise [0, 1] aralığında üniform dağılıma uygun rastgele sayılar olmak üzere (Bölüm 3.1.3); göz önünde bulundurulan değişken için üretilen her bir rastgele sayıya karşılık, bu denklem aracılığıyla bir rastgele değişken değeri hesaplanmıştır. Her bir sentetik deprem seti, N_{MCA} adet depremden oluştuğu için, göz önünde bulundurulan sete ait her bir değişken parametre için N_{MCA} adet rastgele sayı (u_i)

üretilmiş ve Denklem (3.24) ile N_{MCA} adet rastgele değer hesaplanmıştır. Rastgele değişkenler olarak göz önünde bulundurulan V_p, T_p ve ζ_p parametrelerinin her bir sentetik depremler setindeki değerleri, tez çalışması kapsamında MATLAB (MathWorks, 2009) ile kodlanmış bir program ile elde edilmiştir. Programın akış diyagramı, Şekil 3.36'de verilmiştir.



Şekil 3.36: Senaryo-I kapsamındaki her bir sentetik depremler seti için V_p, T_p ve ζ_p değerlerini hesaplayan programın akış diyagramı.

Şekil 3.36'de akış diyagramı verilen program, Tablo 3.9'da verilen her bir "$M_w - r$" kombinasyonu için çalışmakta ve söz konusu kombinasyonlardan ele alınan kombinasyon için birbirinden farklı N_{MCA} adet V_p, T_p ve ζ_p değerleri üreterek; birbirinden farklı N_{MCA} adet sentetik deprem için data seti oluşturmakta ve bu seti QUAKEINFO matrisine depolayarak, QUAKEINFO.DAT olarak kaydetmektedir. Söz konusu programın Tablo 3.9'da verilen her bir "$M_w - r$" kombinasyonu için çalıştırılması ile her biri birbirinden farklı V_p, T_p ve ζ_p değerlerine sahip N_{MCA} adet sentetik deprem datası içeren 9 adet birbirinden farklı QUAKEINFO.DAT dosyası elde edilmiştir.

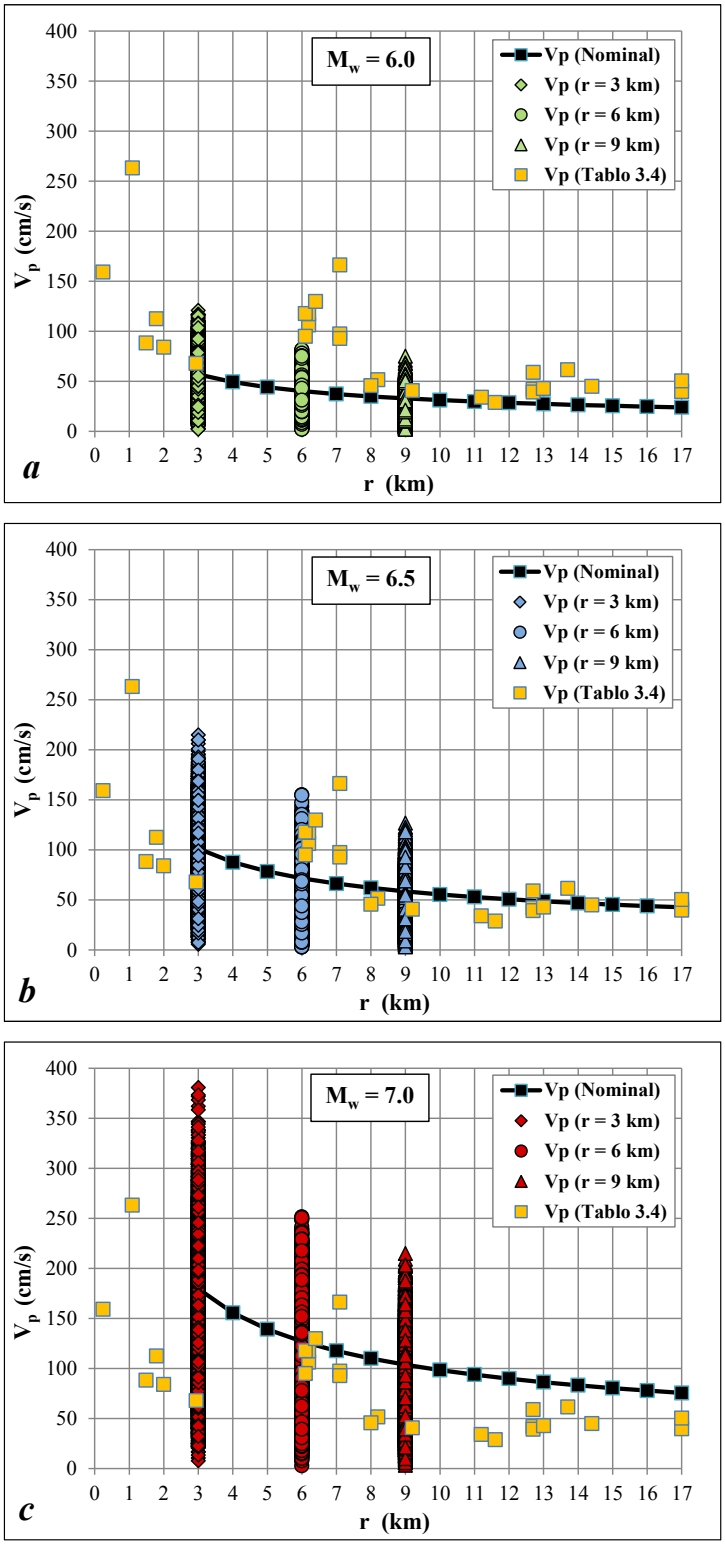
Mevcut senaryo kapsamındaki dinamik analizleri gerçekleştirmeden önce, bu analizlerde kullanılacak deprem setlerindeki sentetik deprem sayısının ve aynı zamanda yine mevcut senaryo kapsamında oluşturulacak her bir izolasyon sistemleri setindeki izolasyon sistemi sayısının (N_{MCA}) tespit edilmesi için bir ön çalışma yapılmıştır. İzolasyon sistemi setlerindeki izolatörlerin rastgele değişken karakteristik parametrelerinin varyasyon katsayısının (*c.o.v.*) da tespit edildiği bu ön çalışmanın detayları, Bölüm 3.6.1.3 verilmiş olup; söz konusu ara çalışma sonucunda her bir deprem seti için N_{MCA} = 10,000 adet sentetik deprem üretilmesinin yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Bu nedenle, bu bölümde N_{MCA} = 10,000 alınması halinde Tablo 3.9'daki verilere göre oluşturulan 9 sentetik deprem seti için üretilen V_p, T_p ve ζ_p değerlerine ait grafiklere (Şekil 3.37 - Şekil 3.42) yer verilmiştir.

M_w değerinin 6.0, 6.5 ve 7.0 olması hallerinde oluşturulan kombinasyonlar için üretilen V_p değerleri, sırasıyla Şekil 3.37 (a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, mevcut tezin birinci bölüm çalışmaları kapsamındaki dinamik analizlerde kullanılan, ileri-yönelim (FD) etkisi içeren tarihi yakın-fay yer hareketlerine (Tablo 3.4) ait V_p değerleri de M_w'dan bağımsız olarak, her üç grafik üzerinde de gösterilmiştir. Tablo 3.9'daki kombinasyonlar için üretilen V_p değerlerinin CDF grafikleri ise, M_w'nun 6.0, 6.5 ve 7.0 olması halinde sırasıyla Şekil 3.38 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Her bir kombinasyondaki V_p değerleri için histogramlar da elde edilmiştir. Örnek teşkil etmesi amacıyla, bu histogramlardan r = 3 km olması halinde üretilen setlerdeki V_p değerlerine ait olanlar, Şekil 3.38 (d), (e) ve (f)'de verilmiştir.

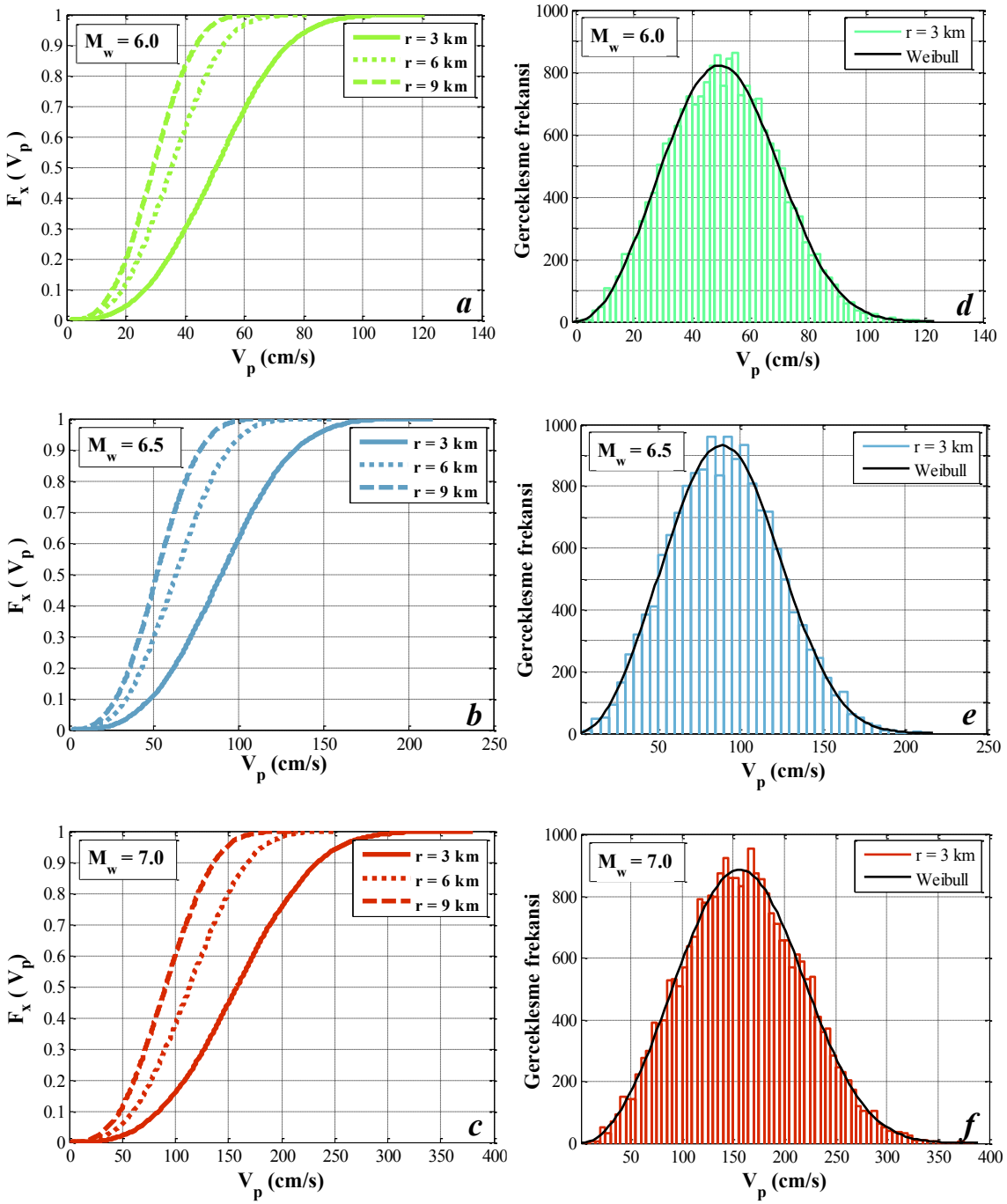
Şekil 3.37'den görüldüğü üzere; V_p değerleri, artan r değerleri için azalmakta; artan M_w değerleri için ise artmaktadır. Üretilen puls hızları, en yüksek değerlerini M_w = 7.0 - r = 3 km kombinasyonunda almakta olup; mevcut senaryo kapsamında üretilen maksimum V_p değeri 380.64 cm/s'dir. Günümüze kadar kaydı alınabilmiş 143 depremin 1557 kaydına ait verilerin bulunduğu, PEER Kuvvetli Yer Hareketleri Veri Tabanı'nda (PEER, 2011) tespit edilen maksimum PGV değeri ise, 263.10 cm/s olup; bu değer, 20.09.1999 tarihinde Tayvan'da meydana gelen 7.6 büyüklüğündeki Chi-Chi depremi sırasında TCU068 istasyonunda (r = 1.09 km) kaydedilmiştir. Görüldüğü üzere; söz konusu değer, Senaryo-I kapsamında üretilen maksimum V_p değerinden düşüktür. Ancak, mevcut tez çalışması olasılıksal bir çalışmadır ve günümüze kadar kaydedilebilmiş maksimum PGV değerinden daha büyük hız değerlerinin de gerçekleşmiş olması ve gelecekte de gerçekleşmesi olasılık dahilindedir. Bu nedenle, M_w = 7.0 - r = 3 km kombinasyonunda üretilen yüksek puls hızı değerlerinin de dikkate alınması uygun görülmüştür.

Mevcut senaryo kapsamında üretilen T_p değerleri Şekil 3.39'de; bu değerlere ait CDF grafikleri Şekil 3.40'de; histogramlar ise M_w'nun 6.0, 6.5 ve 7.0 olması halleri için sırasıyla, Şekil 3.41 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Şekil 3.39'de görüldüğü üzere, V_p grafiklerinde (Şekil 3.37 (a), (b) ve (c))olduğu gibi, mevcut tezin birinci bölüm çalışmaları kapsamındaki dinamik analizlerde kullanılan, ileri-yönelim (FD) etkisi içeren tarihi yakın-fay yer hareketlerine (Tablo 3.4) ait T_p değerleri de gösterilmiştir.

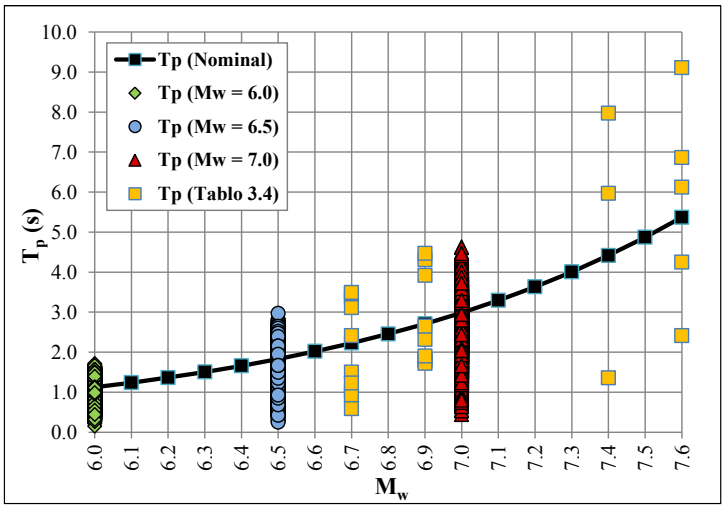
Denklem (2.24)'de görüldüğü üzere, T_p sadece M_w'ya bağlıdır; r'den bağımsızdır ve dolayısıyla Tablo 3.9'dan da görüldüğü üzere, aynı M_w değeri için farklı r değerleri ile oluşturulan kombinasyonlarda T_p'nin ölçek parametresi (γ) yani nominal değeri aynıdır. Ancak, söz konusu kombinasyonların her birinin kendi içindeki T_p değerleri farklı olduğu gibi, farklı kombinasyonların aynı simülasyon sırasına sahip T_p değerleri de birbirinde farklıdır. Çünkü Şekil 2.3'de akış diyagramı verilen program, rastgele sayıları bilgisayar saatine bağlı olarak üretmekte olup; her bir parametre için her bir kombinasyonda farklı rastgele değerler üretmektedir.



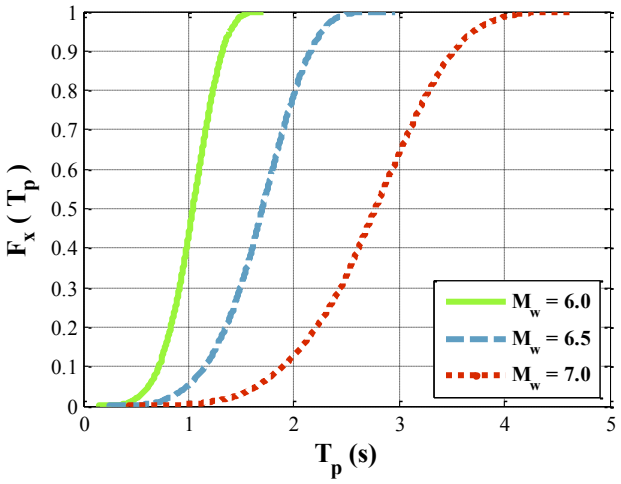
Şekil 3.37: Türev sentetik depremler için üretilen V_p değerleri; (a) $M_w = 6.0$, (b) $M_w = 6.5$ ve (c) $M_w = 7.0$ için (Tablo 3.4'deki depremler ile karşılaştırmalı olarak).



Şekil 3.38: Türev sentetik depremler için üretilen V_p değerlerine ait CDF grafikleri: (a) – (c) ve Histogramlar: (d) – (f).

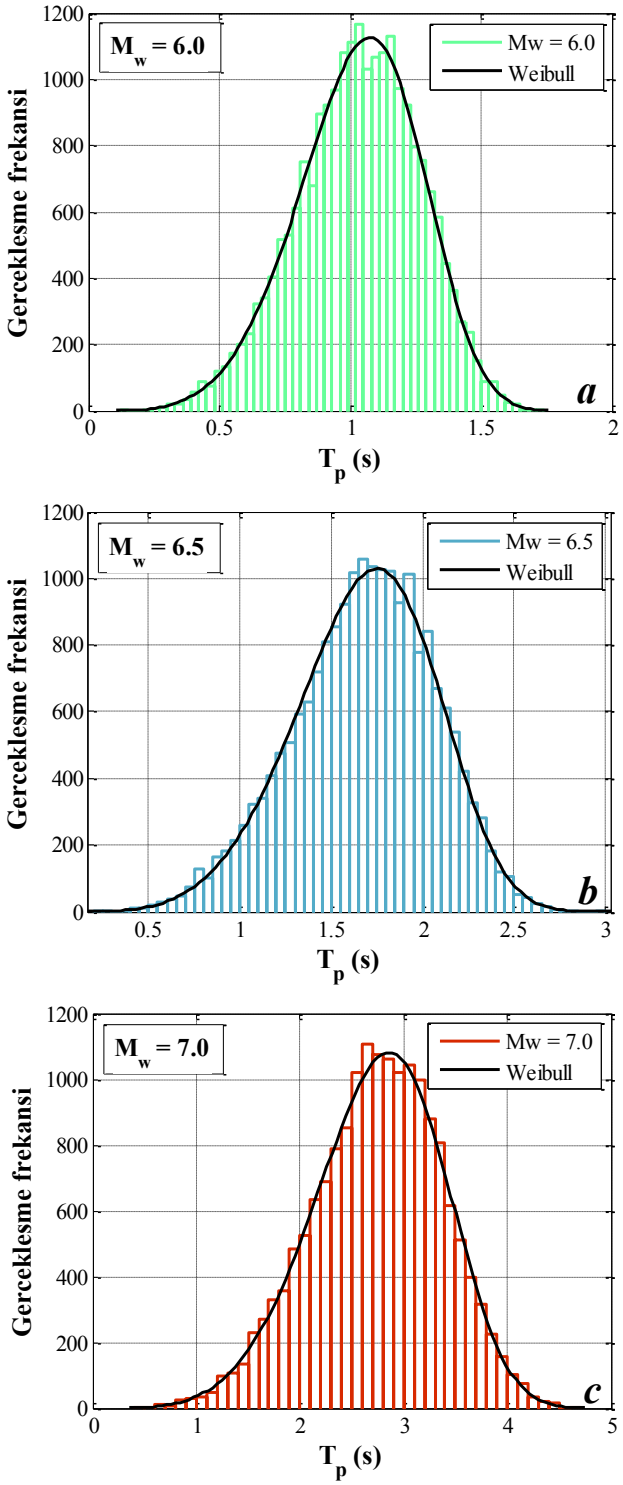


Şekil 3.39: Türev sentetik depremler için üretilen T_p değerleri (Tablo 3.4'deki depremler ile karşılaştırmalı olarak).

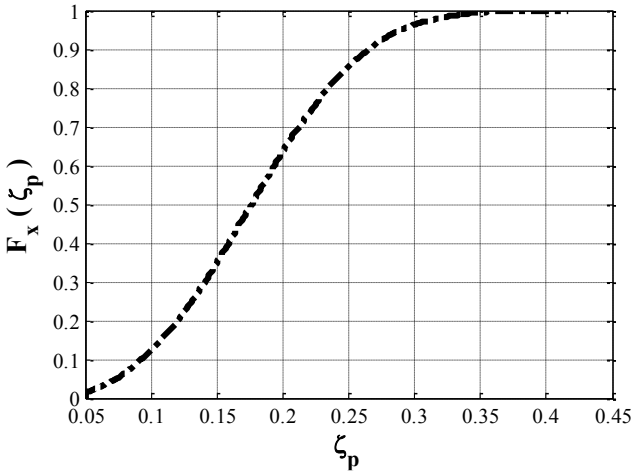


Şekil 3.40: Türev sentetik depremler için üretilen T_p değerlerine ait CDF grafikleri.

Senaryo-I kapsamında üretilen ζ_p değerlerine ait tipik bir CDF grafiği, Şekil 3.42'de verilmiştir. ζ_p parametresi, M_w ve r parametrelerinden bağımsız olduğu için ve Tablo 3.9'da görüldüğü üzere, tüm kombinasyonlar için üretilen ζ_p değerlerinin ölçek parametresi aynı ve nominal değer olan 0.20'ye eşit olduğundan, oluşturulan her kombinasyon için geçerli olmak üzere tipik CDF grafiği Şekil 3.42'deki gibidir. Ancak, V_p ve T_p parametreleri için geçerli olduğu gibi, ζ_p parametresi için de tüm kombinasyonlarda üretilen değerler birbirinden farklıdır. Çünkü yukarıda belirtildiği üzere; bu değerleri üreten program, rastgele sayıları bilgisayar saatine bağlı üretmektedir. Bu nedenle her kombinasyon için üretilen rastgele sayılar ve dolayısıyla rastgele ζ_p değerleri de birbirinden farklı olmaktadır.



Şekil 3.41: Türev sentetik depremler için üretilen T_p değerlerine ait histogramlar; (a) $M_w = 6.0$, (b) $M_w = 6.5$ ve (c) $M_w = 7.0$ için.



Şekil 3.42: Türev sentetik depremler için üretilen ζ_p değerlerine ait tipik CDF grafiği.

3.6.1.2. İzolasyon Sistemi Parametreleri

Senaryo-I kapsamında gerçekleştirilen dinamik analizlerde kullanılmak üzere üretilen nominal ve türev sentetik deprem setlerinin Bölüm 3.6.1.1'deki gibi elde edilmesinin ardından, bu bölümde söz konusu deprem setlerine maruz kalan binaların izolasyon sistemleri oluşturulmuştur. Mevcut tez birinci ana bölümünde olduğu gibi, ikinci ana bölüm kapsamındaki izolasyon sistemleri de doğrusal olmayan histeretik davranışa sahip, kauçuk esaslı 16 izolatörden oluşmaktadır ve Şekil 3.12'de verilen izolasyon sistemi planına sahiptir. Ayrıca, yine birinci ana bölümde olduğu gibi, mevcut bölümde de izolatörlerin akma öncesi rijitliği (K_1), akma sonrası rijitliği (K_2) ve akma deplasmanı (D_y) parametreleri, rastgele değişken parametreler olarak seçilmiş; ve Monte Carlo Simülasyon Tekniği (Bölüm 3.1) dahilinde söz konusu değişken parametrelere sahip "Üretilmiş İzolasyon Sistemleri" elde edilmiştir. Ancak öncelikle, söz konusu sistemleri üretebilmek için tüm izolatör parametrelerinin sabit olduğu, yani sistemde bulunan 16 izolatör için de aynı olduğu "Referans İzolasyonlu Sistemler" oluşturulmuştur.

Tez çalışmasının birinci ana bölümünde, $T_0 = 2$ s ve $T_0 = 3.5$ s hedef periyodu değerlerine sahip iki referans izolasyonlu yapının her ikisi için de izolasyon sistemi karakteristik kuvvet oranı (Q_s/W) %5 alınarak; birer adet referans izolasyon sistemi oluşturulmuştu (Tablo 3.6). İkinci bölümde ise, izolasyon sistemlerinin performansında Q_s/W oranının da etkisini göz önünde bulundurmak amacıyla, bu oran için Bölüm 3.5.1'de verilen tipik aralığa da uyacak şekilde, sırasıyla %5, %7.5 ve %10 değerleri dikkate alınarak; her bir hedef periyodu için üç farklı Q_s/W oranına sahip üçer adet referans izolasyonlu yapı

(toplam 2 × 3 = 6 adet) oluşturulmuştur. Söz konusu izolasyonlu yapıların üst yapıları, mevcut tez kapsamında oluşturulan tüm izolasyonlu yapılarda olduğu gibi Bölüm 3.3.1'de tarif edilen üst yapı olup; bu yapıların izolasyon sistemi parametrelerinin değerleri ise, Bölüm 2.3'de verilen denklemler (Denklem (2.1) - Denklem (2.6)) ile hesaplanmış ve Tablo 3.10'da sunulmuştur.

Tablo 3.10: İkinci ana bölüm kapsamında oluşturulan referans izolasyon sistemlerindeki izolatörlere ait karakteristik parametrelerin değerleri.

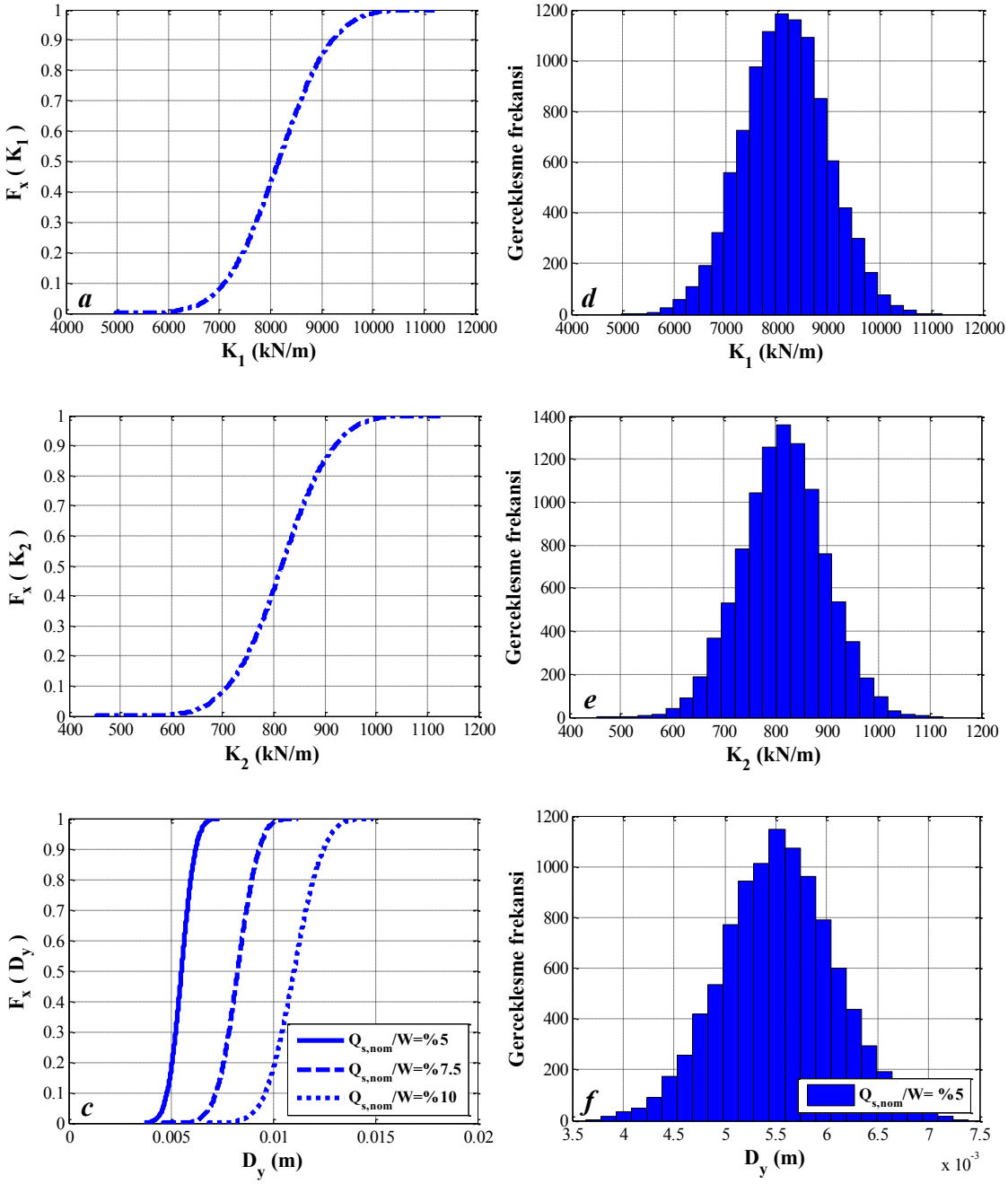
T_0 (s)	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	Q_s/W (%)	Q (kN)	F_y (kN)	D_y (mm)
2.0	8150.646	815.065	**5.0**	40.507	45.008	5.522
			7.5	60.761	67.512	8.283
			10.0	81.014	90.016	11.044
3.5	2661.440	266.144	**5.0**	40.507	45.008	16.911
			7.5	60.761	67.512	25.367
			10.0	81.014	90.016	33.822

Altı adet referans izolasyon sisteminin Tablo 3.10'daki karakteristik parametre değerlerine sahip olacak şekilde oluşturulmasının ardından, her bir referans sisteme bağlı olarak, N_{MCA} adet birbirinden farklı izolasyon sisteminden oluşan bir üretilmiş izolasyon sistemleri seti oluşturulmuştur. Bölüm 3.6.1.1'de de belirtildiği üzere, mevcut senaryo kapsamında oluşturulacak her bir üretilmiş izolasyon sistemleri setindeki izolasyon sistemi sayısının (N_{MCA}) ve söz konusu setlerdeki izolatörlerin rastgele değişken karakteristik parametrelerinin varyasyon katsayısının (*c.o.v.*) tespiti için bir ön çalışma yapılmış olup; detayları Bölüm 3.6.1.3'deki verilen bu çalışma sonucunda N_{MCA} = 10,000 ve *c.o.v.* = %10 alınmasının uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle ikinci ana bölüm kapsamında oluşturulan altı adet izolasyon sistemleri setindeki izolatörlerin *c.o.v.* katsayısı %10 alınarak, her bir set için 10,000 adet izolasyon sistemi üretilmiştir. Bu sistemlerin her biri ise; karakteristik parametre değerleri birbirinden farklı olan 16 adet doğrusal olmayan, kauçuk esaslı izolatörden oluşmaktadır. Söz konusu sistemlerin üretimi, birinci ana bölümde olduğu gibi Şekil 3.22'de akış diyagramı verilen programla gerçekleştirilmiş olup; programın bir kere çalışması sonucunda, bir T_0 - Q_s/W kombinasyonu (Tablo 3.10) için N_{MCA} adet birbirinden farklı izolasyon sisteminden oluşan bir üretilmiş izolasyon sistemleri seti ve bu sete ait izolasyon sistemi data dosyası (ISOLATION.DAT) elde edilmektedir. Programın Tablo 3.10'daki altı adet T_0 - Q_s/W

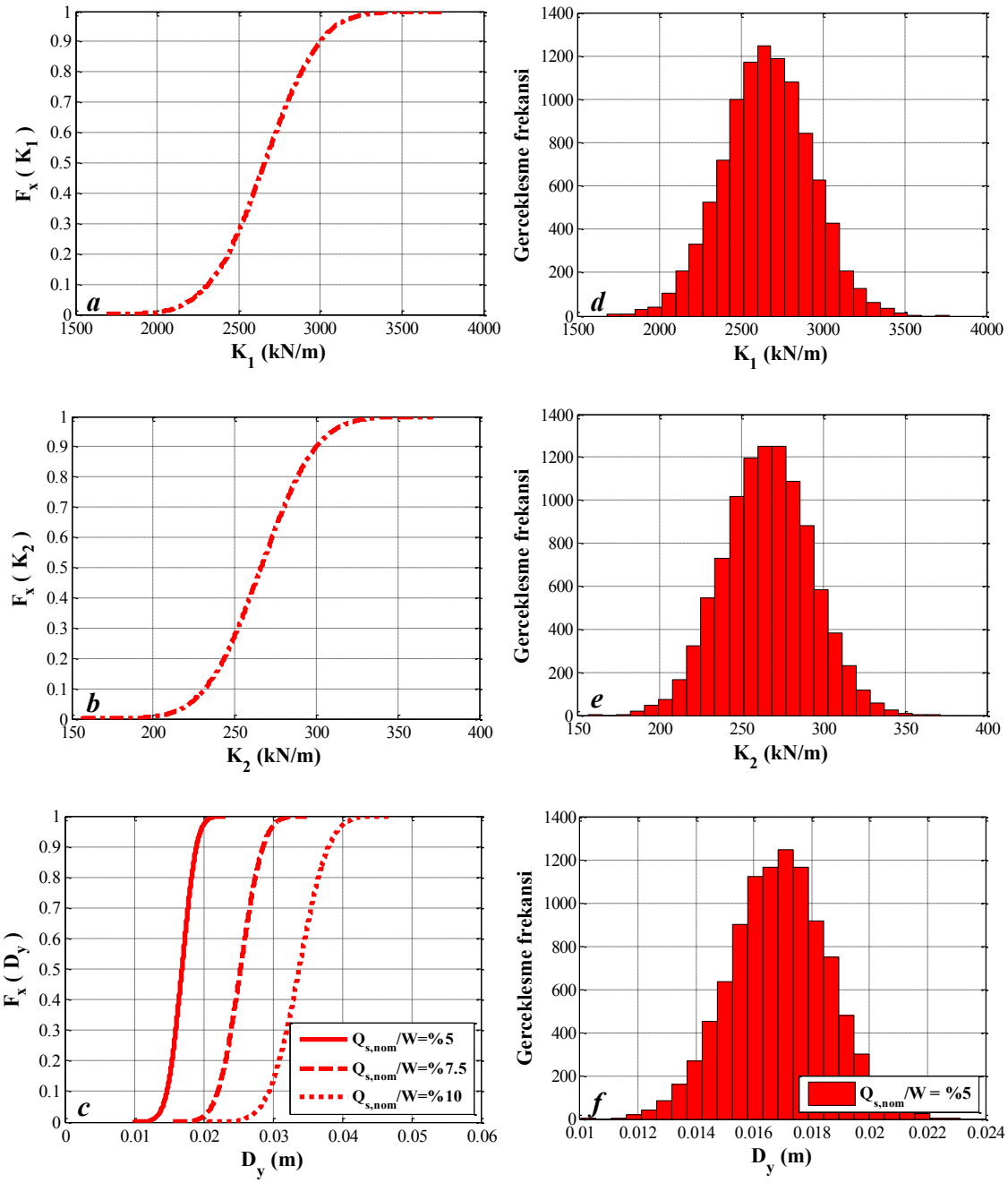
kombinasyonu için ayrı ayrı çalıştırılması ile mevcut senaryo kapsamında kullanılacak tüm izolasyon sistemi setlerindeki tüm izolatör parametreleri elde edilmektedir.

Örnek teşkil etmesi amacıyla seçilmiş A4 izolatörü için söz konusu programla üretilmiş bağımsız rastgele değişkenlere (K_1, K_2 ve D_y) ait grafikler, hedef periyodunun nominal değerinin ($T_{0,nom}$) 2.0 s ve 3.5 s olması durumlarında sırasıyla Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'da verilmiştir. Tablo 3.10'dan görüldüğü üzere; izolasyon sistemlerin K_1 ve K_2 parametreleri, sadece T_0 değerine bağlı olup; Q_s/W oranından bağımsızdır. Bu nedenle, A4 izolatörü için üretilmiş K_1 ve K_2 değerleri, Şekil 3.43 (a), (b), (d) ve (e) ile Şekil 3.44 (a), (b), (d) ve (e)'den görüldüğü üzere Q_s/W oranından bağımsız olarak verilmiştir. Ancak, tüm izolatörler için olduğu gibi söz konusu A4 izolatörü için de K_1 ve K_2 parametrelerine ait olmak üzere, aynı $T_{0,nom}$ ve farklı karakteristik kuvvet oranı nominal değerine ($Q_{s,nom}/W$) sahip üretilmiş sistem setleri için birbirinden farklı değerler üretilmektedir. Çünkü izolatörlere ait parametreler için rastgele değerler üreten program (Şekil 3.22), türev sentetik depremlerin parametreleri için değerler üreten programda da (Şekil 3.36) olduğu gibi, rastgele sayıları bilgisayar saatine göre üretmektedir. Ancak yine de söz konusu parametrelerin nominal değerleri ($K_{1,nom}$ ve $K_{2,nom}$), aynı $T_{0,nom}$ ve farklı $Q_{s,nom}/W$'a sahip kombinasyonlar için aynı olduğundan ve dolayısıyla bu kombinasyonlar için üretilen değerler birbirine yakın olduğundan, bu parametrelerin CDF grafikleri ve histogramları Q_s/W'dan bağımsız sunulmuştur. D_y ise, Tablo 3.10'dan görüldüğü üzere; Q_s/W'a bağlı olup; $T_{0,nom}$ = 2 s ve $T_{0,nom}$ = 3.5 s olması durumunda tüm kombinasyonlar için CDF grafikleri, sırasıyla Şekil 3.43(c) ve Şekil 3.44 (c)'de verilmiştir. A4 izolatörü için söz konusu parametrenin tüm kombinasyonlarda aldığı değerlere ait histogramlar da elde edilmiştir. Ancak, örnek teşkil etmesi amacıyla Şekil 3.43(f) ve Şekil 3.44 (f)'de sadece $Q_{s,nom}/W$ = %5 olması durumundaki histograma yer verilmiştir.

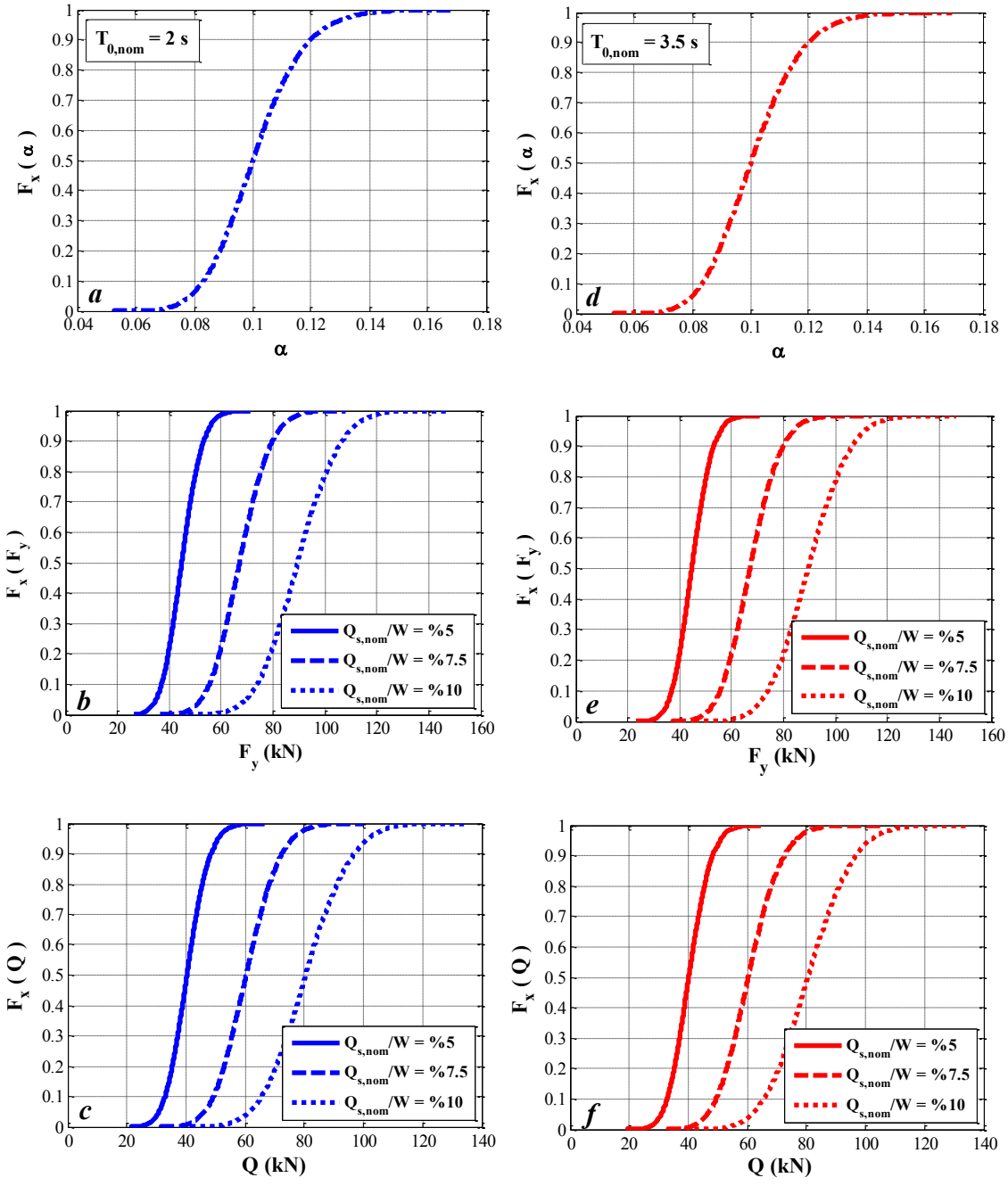
A4 izolatörü için aynı programla hesaplanmış bağlı değişkenlere (α, F_y ve Q) ait CDF grafikleri ise, $T_{0,nom}$ = 2.0 s ve $T_{0,nom}$ = 3.5 s olması durumlarında Şekil 3.45'deki gibi verilmiştir. F_y ve Q parametreleri, Tablo 3.10'da görüldüğü üzere; Q_s/W'a bağlı olup; söz konusu şekillerde bu orana bağlı olarak ayrı ayrı gösterilmiştir. Rijitlikler oranı olan α ise, K_1 ve K_2 gibi Q_s/W'dan bağımsız olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.43: A4 izolatörü bağımsız değişken parametreleri için üretilmiş rastgele değerlerin CDF ve histogram grafikleri; K_1: (a) ve (d), K_2: (b) ve (e), D_y: (c) ve (f) [$T_{0,nom}$ = 2.0 s – *c.o.v.* = %10].



Şekil 3.44: A4 izolatörü bağımsız değişken parametreleri için üretilmiş rastgele değerlerin CDF ve histogram grafikleri; K_1: (a) ve (d), K_2: (b) ve (e), D_y: (c) ve (f) [$T_{0,nom}$ = 3.5 s – *c.o.v.* = %10].



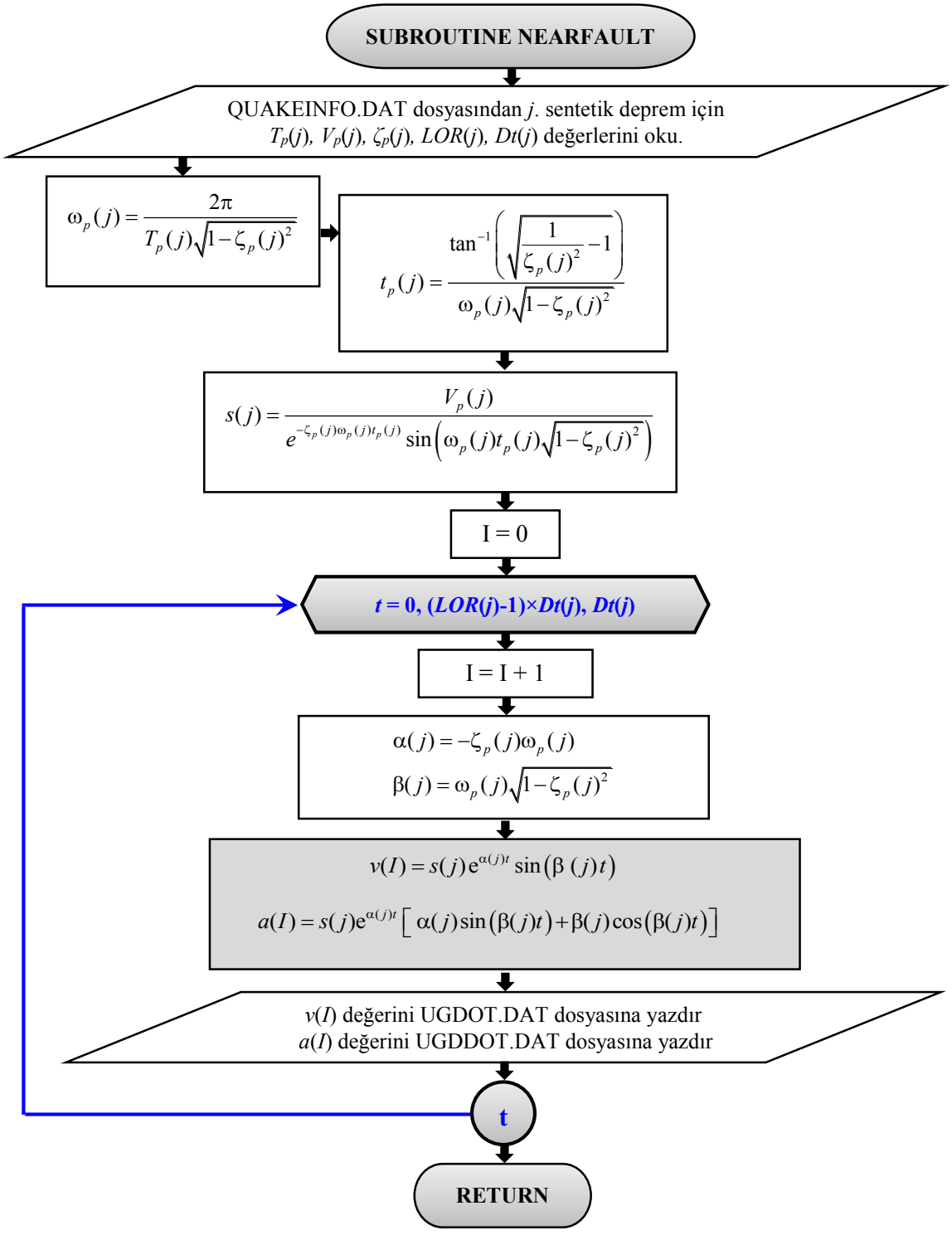
Şekil 3.45: A4 izolatörü bağlı değişken parametreleri için hesaplanan değerlerin CDF grafikleri; $T_{0,nom}$ = 2 s: (a) - (c), $T_{0,nom}$ = 3.5 s: (d) - (f) [*c.o.v.* = %10].

3.6.1.3. İkinci Ana Bölüm Kapsamında 3D-BASIS Programında Gerçekleştirilen Modifikasyonlar: 3D-BASIS-MONTEQ

Mevcut senaryo kapsamında gerçekleştirilen dinamik analizlerde kullanılmak üzere, 9 adet "M_w - r" kombinasyonu (Tablo 3.9) için üretilen 9 adet puls içeren sentetik yakın-fay depremleri setine ait parametreler, Bölüm 3.6.1.1'deki gibi elde edilmiştir. Söz konusu deprem setlerine maruz kalacak binalara ait olmak üzere 6 adet "T_0 - Q_s/W" kombinasyonu (Tablo 3.10) için üretilen 6 adet izolasyon sistemleri seti ise, Bölüm 3.6.1.2'deki gibi elde edilmiştir. Söz konusu üretilen sistemlerini ve sentetik depremleri kullanarak mevcut bölüm kapsamında gerçekleştirilecek olan dinamik analizlerde, bir "T_0 - Q_s/W" kombinasyonu için üretilen N_{MCA} adet izolasyon sisteminin bulunduğu ISOLATION.DAT isimli dosyada j. izolasyon sistemi, bir "M_w - r" kombinasyonu için üretilmiş N_{MCA} adet sentetik depreme ait verileri içeren QUAKEINFO.DAT dosyasındaki j. sentetik depremin parametreleri ile üretilmiş ivme kaydına maruz bırakılacaktır. Bir izolasyon sistemleri setinin bir sentetik depremler setine maruz kalması durumunda N_{MCA} adet doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi gerçekleştirilecektir. Bu analizlerde, 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programından yararlanılacaktır.

3D-BASIS programı, mevcut tez birinci ana bölüm çalışmaları dahilinde Bölüm 3.5.3'de belirtildiği üzere; N_{MCA} adet izolasyon sistemi ile oluşturulmuş N_{MCA} adet sismik izolasyonlu binanın dinamik analizlerini her yeni sistem için durmaksızın, tekrarlı analizlerini yapabilecek şekilde (3D-BASIS-MONTE) modifiye edilmiştir. Ancak birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında; 3D-BASIS-MONTE'nin bir kez çalıştırılması halinde tüm binalar aynı yer hareketi kaydına maruz kalmakta, yer hareketine ait ivme kaydını içeren data dosyaları da (WAVEX.DAT ve WAVEY.DAT), programdan bağımsız olarak oluşturulmakta ve programa dosya olarak tanıtılmaktadır. Bundan farklı olarak, mevcut bölüm kapsamında ise her bir j. izolasyonlu binanın maruz kalacağı j. sentetik deprem kaydının 3D-BASIS programı dahilinde oluşturulması planlanmıştır. Bu nedenle, 3D-BASIS-MONTE programında ilâve modifikasyonların gerçekleştirilmesi gerekmiştir. Bu modifikasyonlar kapsamında, N_{MCA} adet satırdan oluşan ve her bir satırı farklı bir sentetik depreme ait T_p, V_p, ζ_p, LOR ve D_t değerlerini içeren QUAKEINFO.DAT dosyasındaki verileri okuyarak; Agrawal ve He (2002) puls modeline göre bu verilere sahip puls içeren sentetik yakın-fay sentetik depremlerin hız-zaman ve ivme-zaman kayıtlarını oluşturan NEARFAULT.FOR isimli bir alt program, FORTRAN programlama diliyle

kodlanmıştır. Programın akış diyagramı, Şekil 3.46'de verilmiş olup; bu program, 3D-BASIS-MONTE programının bir alt programı olarak çalışmaktadır.



Şekil 3.46: NEARFAULT.FOR isimli altprograma ait akış diyagramı.

NEARFAULT.FOR alt programında *j*. simülasyon için gerekli olan sentetik deprem parametreleri QUAKEINFO.DAT dosyasının *j*. satırından okutulmakta ve Şekil 3.46'deki akış diyagramında görüldüğü üzere toplam deprem süresinin her bir *t* anı için hız (v(I)) ve ivme (a(I)) değerleri hesaplanarak ilgili *j*. simülasyonun kayıtları oluşturulmaktadır. NEARFAULT.FOR ile bir simülasyon için hesaplanan ivme değerleri, ana programda zaman tanım alanı analizlerinde kullanılacak değişkene karşılık gelmekte olup; oluşturulan hız ve ivme kayıtları, sırasıyla mevcut bölüm modifikasyonları kapsamında programa eklenmiş olan UGDOT.DAT ve UGDDOT.DAT dosyalarına kaydedilmektedir.

İkinci ana bölüm çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen modifikasyonlar ile mevcut tez kapsamındaki son halini alan 3D-BASIS programı (3D-BASIS-MONTEQ), tek yürütme ile N_{MCA} adet sismik izolasyonlu binanın hem WAVEX.DAT ve/veya WAVEY.DAT dosyalarından okuma yapılarak aynı deprem altındaki dinamik analizlerini gerçekleştirebilir hem de N_{MCA} adet birbirinden farklı sentetik yakın-fay depremlerine ait kayıtları bir alt program (NEARFAULT.FOR) vasıtasıyla kendi bünyesinde oluşturabilir ve söz konusu N_{MCA} adet sismik izolasyonlu binanın her birinin aynı simülasyon sırasına sahip sentetik deprem altındaki dinamik analizlerini gerçekleştirebilir hâle getirilmiştir.

3D-BASIS-MONTEQ ile yapılan dinamik analizlerin doğruluğunu teyit etmek amacıyla, Bölüm 3.5.3'deki gibi bir verifikasyon çalışması yapılmıştır. Söz konusu verifikasyon çalışması kapsamında, T_0 = 2 s ve *c.o.v.* = %10 olması durumunda üç farklı Q_s/W oranı (%5, %7.5 ve %10) için Tablo 3.10'daki değerlere göre 3 adet referans izolasyon sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemler, r = 3 km olması durumunda üç farklı M_w değeri (6.0, 6.5 ve 7.0) ile oluşturulan üç "M_w – r" kombinasyonu için üretilen nominal sentetik depremlere maruz bırakılmıştır. Üç referans izolasyon sistemine ait datalar, aynı ISOLATION.DAT dosyasında artarda girilmiştir. Söz konusu üç sentetik depremin parametreleri ise, aynı QUKEINFO.DAT dosyasına üç ayrı satırda girilmiştir. 3D-BASIS-MONTEQ kullanılarak tek yürütme ile üç dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Aynı analizler, orijinal 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) ve SAP2000 (CSI, 2011) ile de gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.5.3'deki gibi, üç ayrı program ile elde edilen yapısal cevap parametrelerinden izolasyon katı kütle merkezi deplasmanının, en üst kat kütle merkezi toplam ivmesinin ve yine en üst kat kütle merkezi deplasmanının zamana bağlı

değişimleri karşılaştırılmış; ve söz konusu parametreler için üç programla ayrı ayrı elde edilen zaman grafiklerinin Bölüm 3.5.3'deki gibi aynı olduğu görülmüştür. Yer kısıtı nedeniyle burada söz konusu grafiklere yer verilmemiştir.

3.6.1.4. Uygun Simülasyon Sayısı ve İzolasyon Sistemi Parametreleri Varyasyon Katsayısı Tespiti İçin Yapılan Ön Çalışma

Bu bölümde, mevcut senaryo kapsamında gerçekleştirilecek dinamik analizlerde kullanılacak türev sentetik deprem setlerindeki deprem sayısının ve aynı zamanda bu depremlere maruz kalacak sismik izolasyonlu binalar için oluşturulacak her bir izolasyon sistemleri setindeki izolasyon sistemi sayısının (N_{MCA}) tespit edilmesi için yapılan ön çalışmanın detayları verilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, izolasyon sistemi setlerindeki izolatörlerin rastgele değişken karakteristik parametrelerinin varyasyon katsayısı (*c.o.v.*) da tespit edilmiştir.

Ön çalışma kapsamında N_{MCA} = 20,000 alınarak; en büyük pik yer hızlarının (PGV) ve deplasmanlarının (PGD) oluştuğu ve en büyük spektral ivme (SA), deplasman (SD) ve hızlara (SV) sebep olan $M_w = 7.0 - r = 3$ km kombinasyonu için Tablo 3.9'daki nominal değerlere göre, Şekil 3.36'de akış diyagramı verilen program aracılığıyla 20,000 adet türev sentetik depremden oluşan bir deprem seti üretilmiştir. Söz konusu set için üretilen T_p, V_p ve ζ_p değerlerine ait CDF grafikleri, sırasıyla Şekil 3.47 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. İzolasyon sistemlerini oluşturmak için ise; $T_0 = 3.5$ s için $Q_{s,nom}/W$ oranının sırasıyla %5, %7.5 ve %10 olması durumlarında, Tablo 3.10'daki nominal değerlere göre üç ana kombinasyon oluşturulmuş ve her ana kombinasyon altında, izolasyon sistemi setlerindeki izolatörler için *c.o.v.* değerini %5, %10 ve %15 almak suretiyle üçer alt kombinasyon oluşturulmuştur. Dolayısıyla, Senaryo-I kapsamındaki bu ön çalışma için toplamda 9 adet izolasyon sistemi kombinasyonu oluşturulmuştur. Bölüm 3.6.1.3'de belirtildiği üzere, bir deprem setindeki *j*. sentetik deprem, bir izolasyon sistemi setindeki *j*. sistem ile oluşturulmuş binaya uygulanacağı için söz konusu setlerdeki deprem ve izolasyon sistemi sayısı aynı olması gerektiğinden, oluşturulan izolasyon sistemi kombinasyonlarının da her biri için, Şekil 3.22'da akış diyagramı verilen program ile 20,000 adet izolasyon sisteminden oluşan bir set üretilmiştir. Bu setlerde, örnek teşkil etmesi amacıyla seçilmiş A4 izolatörü için üretilen bağımsız rastgele değişken parametreler K_1, K_2 ve D_y için üretilen değerlere ait CDF grafikleri, sırasıyla Şekil 3.48 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Aynı izolatöre ait bağlı değişken parametreler α, F_y ve Q için

hesaplanan değerlerin CDF grafikleri ise, sırasıyla Şekil 3.48 (d), (e) ve (f)'de verilmiştir. Bölüm 3.6.1.2'de de belirtildiği üzere K_1, K_2 ve α parametreleri Q_s/W oranından bağımsızdır; bu nedenle söz konusu şekillerde bu orandan bağımsız olarak gösterilmiştir. Söz konusu parametreler, tüm parametrelerde olduğu gibi nominal değerleri aynı olmak üzere farklı *c.o.v.* değerleri için farklı değerler aldığı için, *c.o.v.* değerine bağlı olarak gösterilmiştir.

Yukarıda özetlendiği gibi oluşturulan ve her biri N_{MCA} = 20,000 adet birbirinden farklı izolasyon sistemi içeren 9 adet izolasyon sistemleri setinin, N_{MCA} = 20,000 adet birbirinden farklı sentetik deprem içeren bir türev sentetik depremler setine ($M_w = 7.0 - r$ = 3 km) maruz bırakılması suretiyle, her birinde 20,000 doğrusal olmayan dinamik analizin yapıldığı 9 yürütme (toplam 9×20,000=180,000 analiz) ile ön çalışma kapsamındaki dinamik analizler tamamlanmıştır. Bu analizler, 3D-BASIS-MONTEQ programı ile yapılmıştır. $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin %5, %7.5 ve %10 olması durumlarında *c.o.v.* = %5 için üretilen izolasyon sistemleri ile oluşturulan binaların, ön çalışma kapsamında oluşturulan deprem setine ayrı ayrı maruz kalması durumunda gerçekleştirilen her bir simülasyon için izolasyon katı pik deplasmanlarının maksimumu ($bdix_{max}$), tüm katların merkez ve köşe deplasmanlarına göre hesaplanan pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumu ($drix_{max}$) ile tüm kat kütle merkezlerinde hesaplanan pik toplam ivmelerin maksimumu (tax_{max}) hesaplanmış; CDF grafikleri ise, sırasıyla Şekil 3.49 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Bu analizler, *c.o.v.* değerinin %10 ve %15 olması durumları için de gerçekleştirilmiş ve ilgili CDF grafikleri sırasıyla Şekil 3.49 (d)-(f) ile Şekil 3.49 (g)-(i)'de verilmiştir.

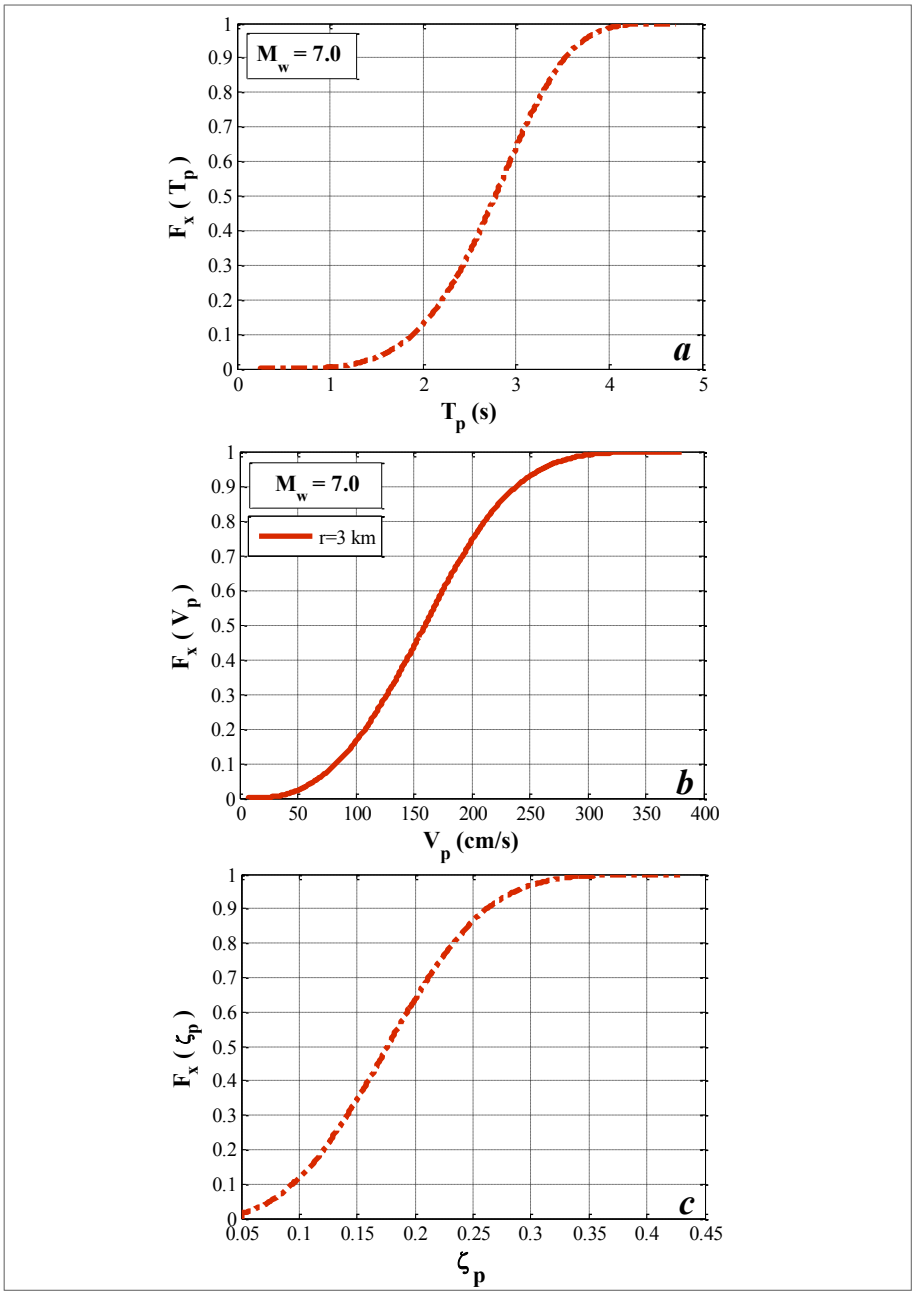
Aynı $Q_{s,nom}/W$ fakat farklı *c.o.v.* değerleri için üretilen sistemlerle oluşturulan binaların aynı deprem setine maruz kalması durumunda elde edilen CDF grafiklerinin karşılaştırılmasından görülmüştür ki; göz önünde bulundurulan üç yapısal cevap parametre için de birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmektedir. Dolayısıyla, bu ön çalışma sonucunda görülmüştür ki; izolasyon sistemi elemanlarının karakteristik parametrelerinin varyasyon katsayısının (*c.o.v.*) yapısal tepilerin CDF dağılımlarına etkisi, oldukça azdır. Bu nedenle, *c.o.v.* için farklı değerlerin göz önünde bulundurulmasının büyük bir etkisinin olmadığı, analizler için tek *c.o.v.* değerinin yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Bölüm 2.3'de de belirtildiği üzere; LRB tipi izolatörlerin

düşey ve yanal özelliklerindeki değişim %20'lere ulaşabilirken, HDRB tipi izolatörlerin aynı özelliklerindeki değişim ise %20~%25 civarında olabilmektedir (Pan ve diğ., 2005; AS 5100.4, 2004). Söz konusu özelliklerin değişiminin mevcut çalışmada olduğu gibi normal dağılıma uyduğu varsayılırsa, "üç sigma kuralı" gereğince; göz önünde bulundurulan değişken parametrenin aldığı değerlerin neredeyse tamamı (%99.73), nominal değerin +3σ üstünde ve -3σ olmalıdır. Burada σ, standart sapma yüzdesi olup; mevcut çalışmada *c.o.v.* değerine karşılık gelmektedir. Kauçuk esaslı izolatörlerin yanal rijitliklerinin yukarıda belirtildiği üzere, nominal değerinden %20~%25 civarında sapma olasılığını göz önünde bulundurursak; *c.o.v.* değeri yaklaşık olarak %6.5~%8.5 aralığında değişir. Ön çalışma kapsamında izolatörler için kullanılan *c.o.v.* değerlerinden bu aralığa en uygun olanı %10 olduğundan ve bununla uyumlu olarak %30 kadar bir sapma olasılığı da göz önünde bulundurulabileceğinden; Senaryo-I kapsamında, izolatörler için *c.o.v.* değerinin %10 olarak alınması uygun görülmüştür.

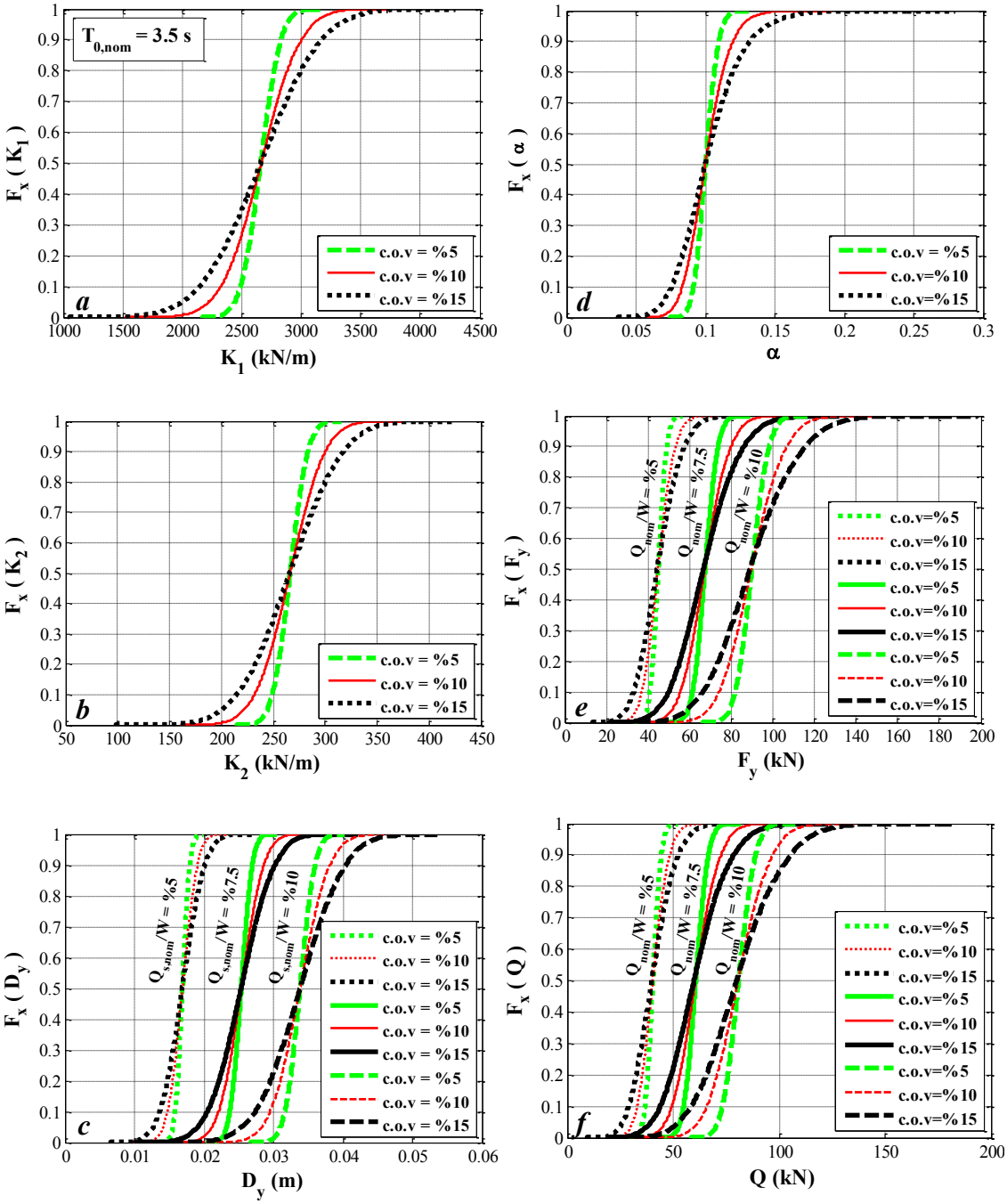
Senaryo-I kapsamında kullanılacak N_{MCA} değerini tespit için ise; ön çalışma kapsamında üretilen izolasyon sistemlerinden, *c.o.v.* değerinin yukarıda tespit edildiği üzere sadece %10 olması durumunda üretilenlerin kullanıldığı dinamik analiz sonuçlarına göre bir "güvenilirlik analizi" yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, *c.o.v.* = %10 olması durumunda üç farklı $Q_{s,nom}/W$ oranı için üretilen üç izolasyon sistemi setinin her birinin, yine ön çalışma kapsamında üretilen sentetik depremler setine maruz kalması durumunda gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçları (Şekil 3.49 (d)-(f)) kullanılmıştır. Söz konusu analizler sonucunda, N_{MCA} sayısına bağlı olarak elde edilen yapısal cevap parametreleri için yaklaşık %2, %1 ve %0.5 başarısızlık olasılıklarının (P_f) gerçekleşmesi için aşılması gereken deplasman limit değerleri (lim_{d1}, lim_{d2} ve lim_{d3}) ile deplasman limit değerleri (lim_{a1}, $lim_{a2,}$ lim_{a3}) belirlenmiştir. $Q_{s,nom}/W$ oranının %5, %7.5 ve %10 olması durumlarında üretilen izolasyon sistemi setlerinin $M_w = 7.0$ - $r = 3$ km için üretilen deprem setine maruz kalması durumunda, $bdix_{max}$ için güvenilirlik analizleri sonuçları, sırasıyla Şekil 3.50 (a), (b) ve (c)'de; $drix_{max}$ için güvenilirlik analizleri sonuçları, sırasıyla Şekil 3.50 (d), (e) ve (f)'de tax_{max} için güvenilirlik analizleri sonuçları ise, sırasıyla Şekil 3.50 (g), (h) ve (i)'de verilmiştir.

Şekil 3.50'daki grafiklerinden görüldüğü üzere; N_{MCA} = 5,000 simülasyona kadar, göz önünde bulundurulan tüm limit değerleri için her iki yapısal cevap parametresinin de

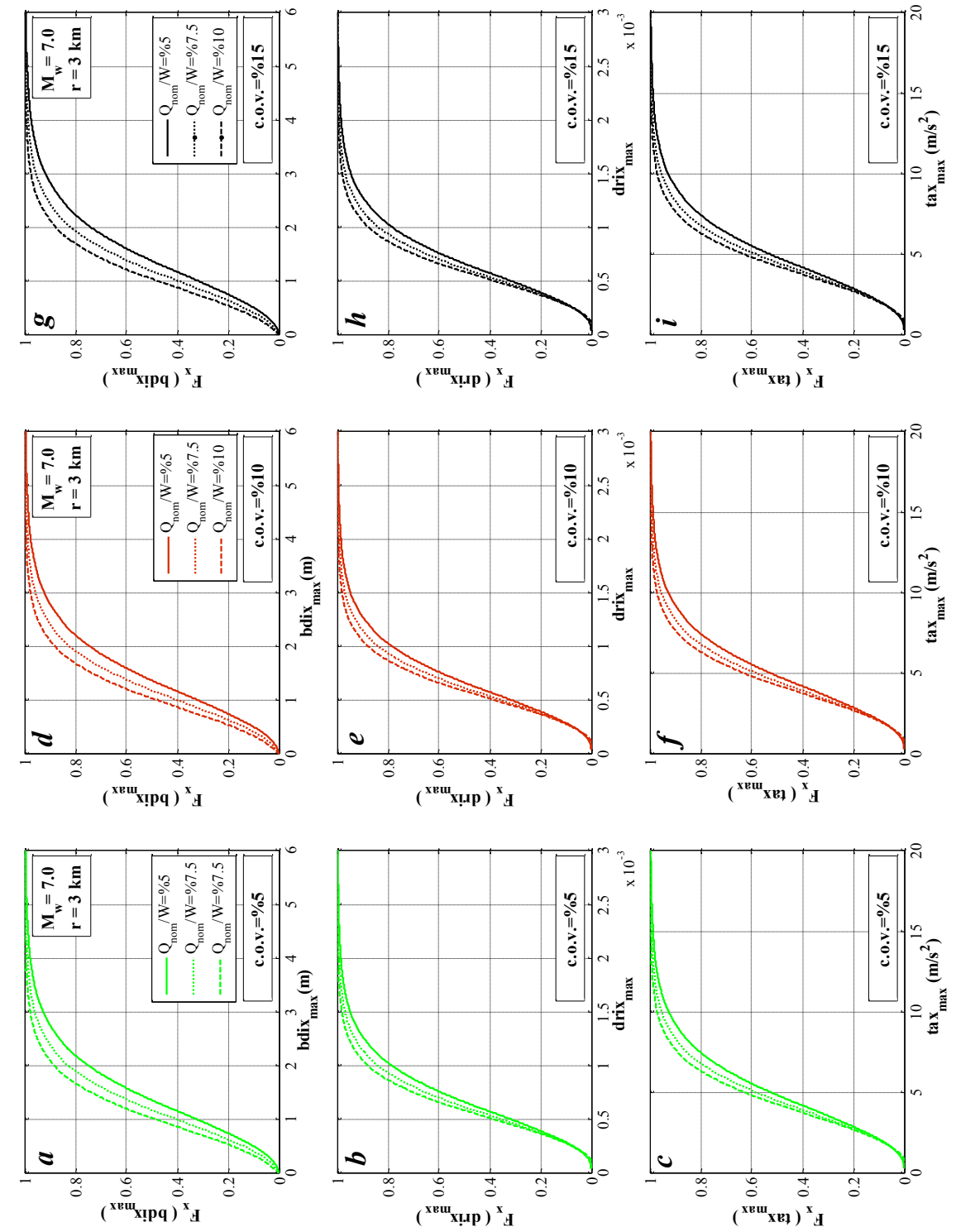
simülasyon sayısına göre başarısızlık olasılıklarında önemli değişiklikler olmakta, simülasyon sayısının artışına paralel olarak bu değişiklikler azalmaktadır. Simülasyon sayısının 5,000~10,000 aralığında olması durumunda önemli değişiklikler olmazken; 10,000 simülasyonun üzerinde ulaşılan başarısızlık olasılık değerleri artık neredeyse sabitlenmektedir. Bu nedenle, Senaryo-I kapsamındaki analizlerde kullanılacak N_{MCA} sayısının 10,000 olarak alınmasının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.



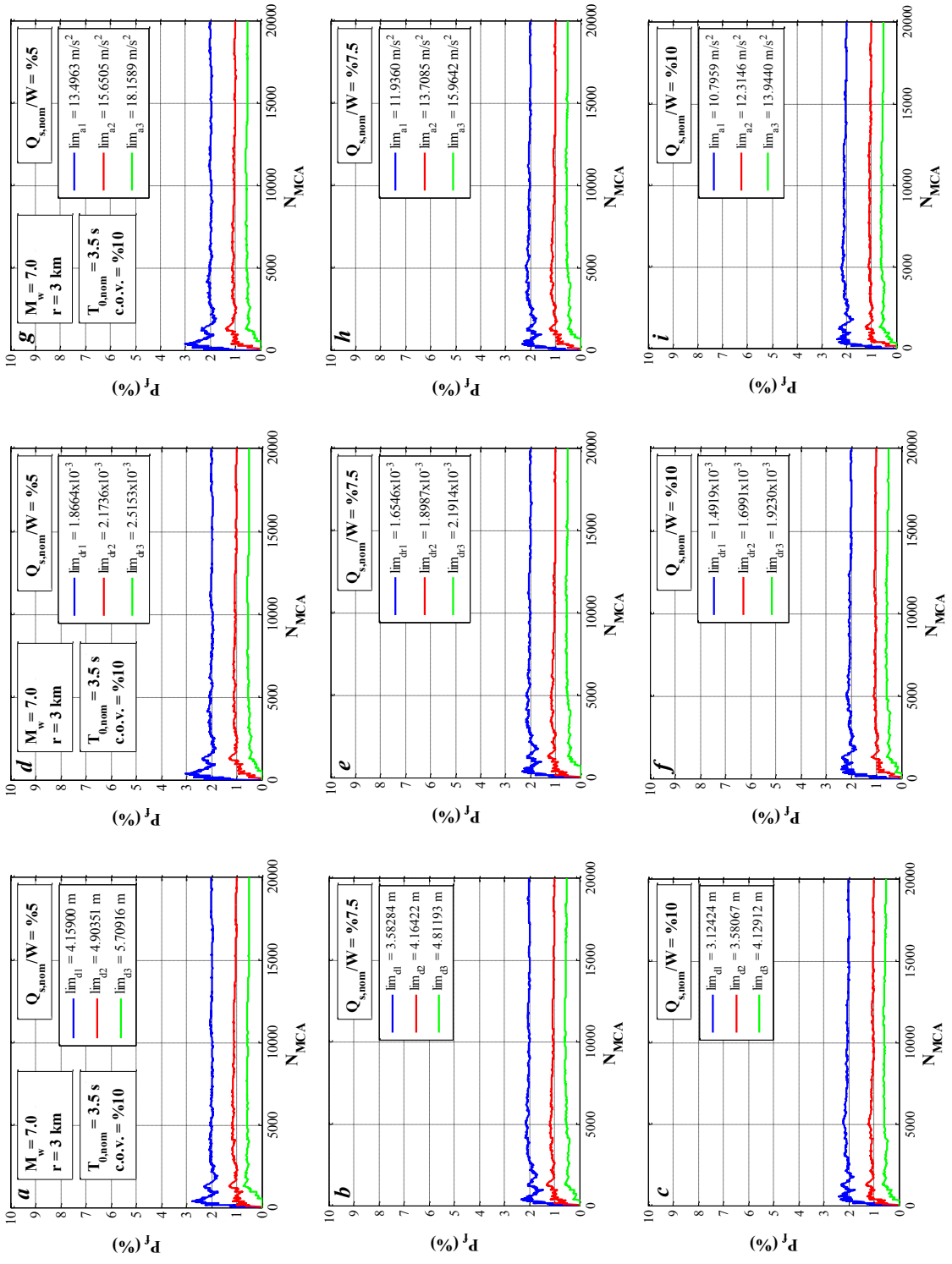
Şekil 3.47: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için üretilen deprem setine ait parametrelerin CDF grafikleri.



Şekil 3.48: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için üretilen izolasyon sistemi setlerindeki A4 izolatörü parametrelerine ait CDF grafikleri [$T_{0,nom}$ = 3.5 s].



Şekil 3.49: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarının CDF grafikleri; *c.o.v.* = %5: (a)-(c), *c.o.v.* = %10: (d)-(f), *c.o.v.* = %15: (g)-(i).



Şekil 3.50: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına ait başarısızlık olasılıklarının N_{MCA}'ya göre değişimi; $bdix_{max}$ için: (a)-(c), $drix_{max}$ için: (d)-(f), tax_{max} için: (g)-(i).

3.6.2. Senaryo-II: Moment Büyüklüğü ve Faya Olan En Yakın Mesafenin Bilinmemesi Durumu

Senaryo-II kapsamında, M_w ve r parametrelerinin değerlerinin kesin olarak bilinmediği, bu değerlerin sadece nominal değerlerinin bilindiği varsayılarak; türev sentetik depremler üretilmiştir. Söz konusu depremler hakkında detaylı bilgi, Bölüm 3.6.2.1'de; bu depremlere maruz kalacak binalar için üretilecek sismik izolasyon sistemleri hakkındaki bilgi, Bölüm 3.6.2.2'de verilmiştir. Senaryo-I için yapıldığı gibi, mevcut senaryo kapsamında da göz önünde bulundurulan her bir deprem kombinasyonu için üretilecek sentetik deprem sayısı ve aynı zamanda her bir izolasyon sistemi seti için üretilecek izolasyon sistemi sayısını gösteren simülasyon sayısı (N_{MCA}) için bir ön çalışma yapılmış ve bu çalışmanın detayları, Bölüm 3.6.2.3'de sunulmuştur.

3.6.2.1. Sentetik Deprem Parametreleri

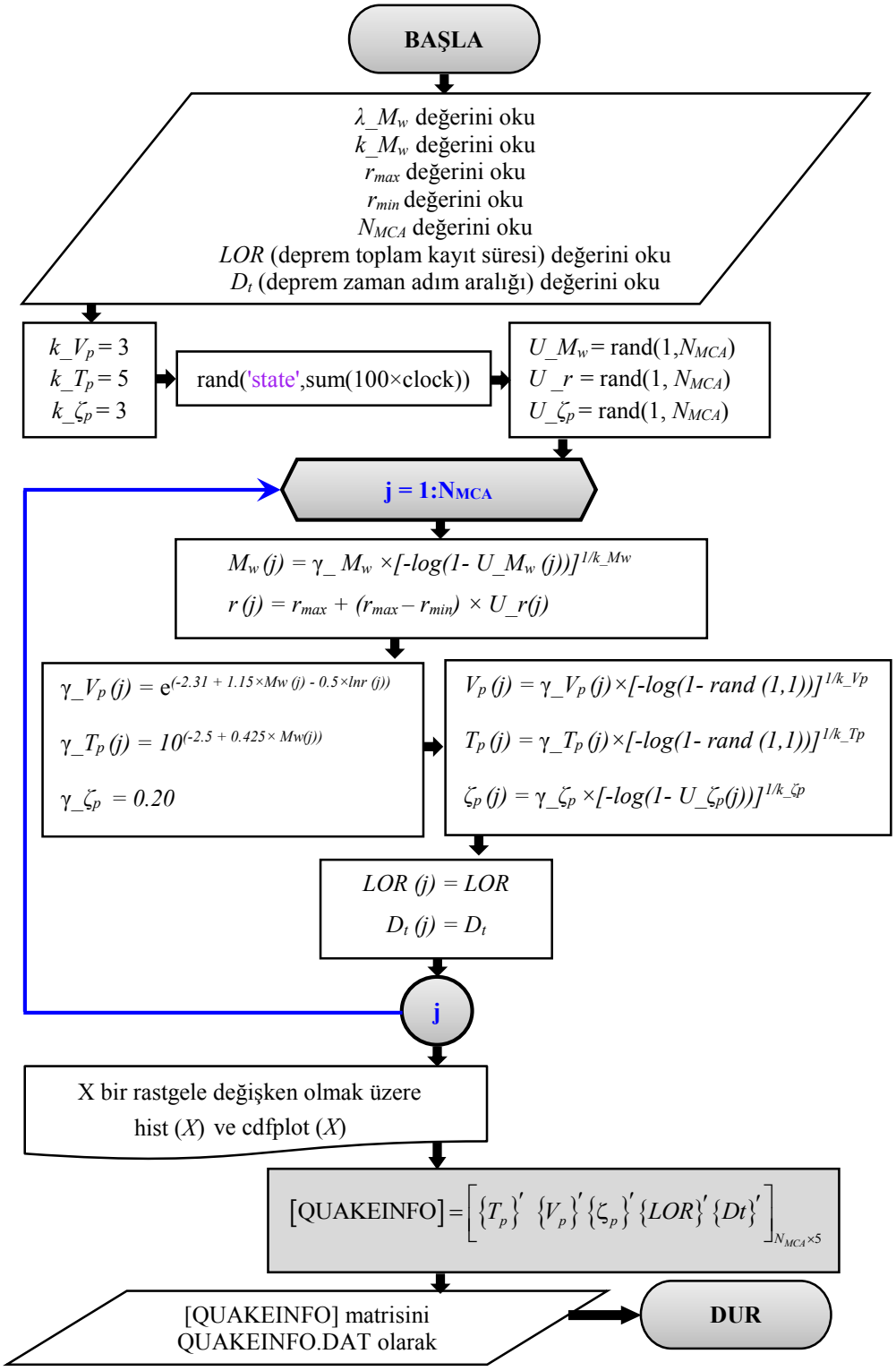
Senaryo-II kapsamında, M_w parametresinin nominal değerlerine bağlı olarak, her birinde 10,000 adet birbirinden farklı sentetik deprem bulunan 4 adet türev sentetik depremler seti üretilmiştir. Bu setleri üretebilmek için M_w ve r parametrelerinin de diğer sentetik deprem parametreleri V_p, T_p ve ζ_p gibi rastgele değişken oldukları varsayılmıştır. Bu parametrelerden V_p, T_p ve ζ_p Senaryo I'de olduğu gibi weibull dağılıma uygun değişkenler olarak kabul edilirken; bunlara ek olarak M_w, nominal değerleri 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 olan weibull dağılıma uygun rastgele değişken; r ise, 3~10 km arasında değerler alan üniform dağılıma uygun rastgele değişken olarak göz önünde bulundurulmuştur. Senaryo-II kapsamında üretilen 4 deprem seti için söz konusu sentetik deprem parametrelerine ait bilgiler, Tablo 3.11'deki özetlenmiştir. Bu tablodaki değerlere göre deprem setlerinin üretimi, Şekil 3.51'de akış diyagramı verilen ve mevcut çalışma kapsamında MATLAB (MathWorks, 2009) ile kodlanmış program ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.11: Senaryo-II kapsamında üretilen türev sentetik deprem setleri için rastgele değişken deprem parametrelerine ait değerler.

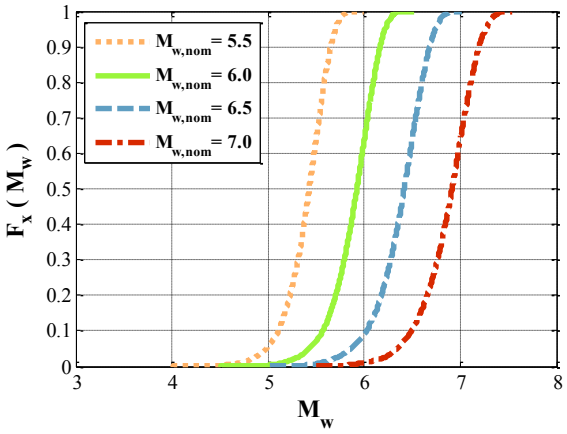
M_w		r (km)			V_p	T_p	ζ_p
γ	k	r_{alt}		$r_{üst}$	k	k	k
5.5 6.0 6.5 7.0	30	3	~	10	3	5	3

Bir kez çalıştırılması halinde N_{MCA} adet birbirinden farklı depremden oluşan bir adet sentetik depremler seti oluşturan programda, deprem parametreleri için Tablo 3.11'deki bilgiler okunduktan sonra, M_w, r ve ζ_p parametreleri için her bir j. simülasyonda kullanmak üzere [0, 1] aralığında üniform dağılıma uygun N_{MCA} adet rastgele sayı (u_i) üretilir. Ardından her bir j. simülasyona ait olan M_w ve r değerleri, sırasıyla Denklem (3.24) ve Denklem (3.15)'e göre; V_p ve T_p parametrelerinin ilgili simülasyondaki ölçek parametreleri (λ) ise, bu simülasyon için hesaplanan M_w ve r değerleri kullanılarak, Denklem (2.24) ile hesaplanır. Ardından, Senaryo I'de olduğu gibi, söz konusu denklemlerin yaklaşık denklemler olması sebebiyle, V_p ve T_p parametrelerinin her bir simülasyon için hesaplanan nominal (ölçek parametre: γ) değerlerinden sapabileceği de göz önünde bulundurularak; hesaplanan γ değerlerine bağlı olarak, j. simülasyonda kullanılmak üzere V_p ve T_p parametreleri için Denklem (3.24)'e göre weibull dağılıma uygun birer adet rastgele değer üretilir. Mevcut senaryo kapsamında kullanılan ζ_p parametrelerine ait değerlerin elde edilişi ise, Senaryo I'deki gibi olup; bu parametreye ait ölçek ve şekil parametresi değerleri de yine Senaryo I'deki gibidir.

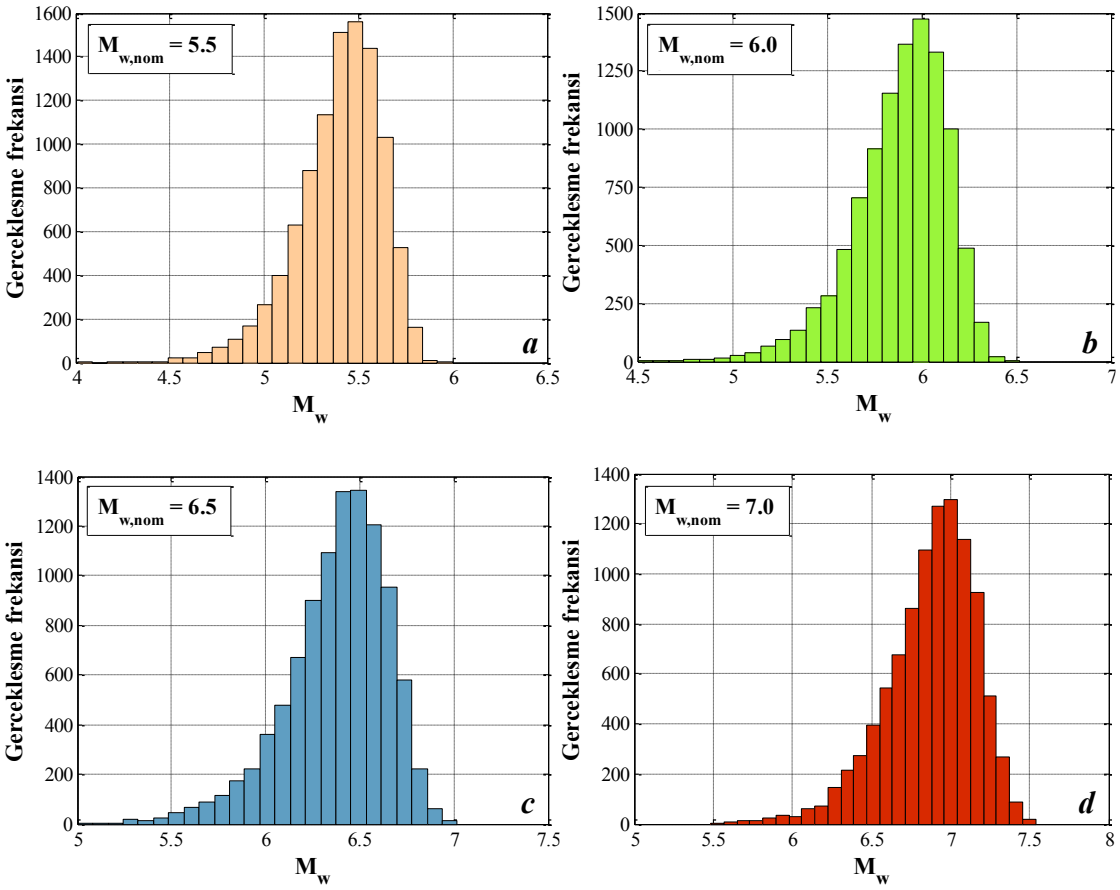
N_{MCA} = 10,000 alınarak; söz konusu programın M_w'nun Tablo 3.11'deki dört farklı nominal değeri (γ) için ayrı ayrı çalıştırılması sonucunda elde edilen deprem setlerindeki M_w değerlerine ait CDF grafikleri, Şekil 3.52'de; histogramlar ise her bir set için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 3.53'de verilmiştir. Bu CDF grafiklerinden ve histogramlardan görüldüğü üzere; M_w parametresi, bu parametre için şekil parametresini k = 30 almak suretiyle, $M_{w,nom}$ değerlerinin 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 olması durumlarında sırasıyla 4.0~6.0, 4.5~6.5, 5.0~7.0 ve 5.5~7.5 aralığında değişen değerler almaktadır.



Şekil 3.51: Senaryo-II kapsamındaki her bir sentetik depremler seti için V_p, T_p ve ζ_p değerlerini hesaplayan programın akış diyagramı.

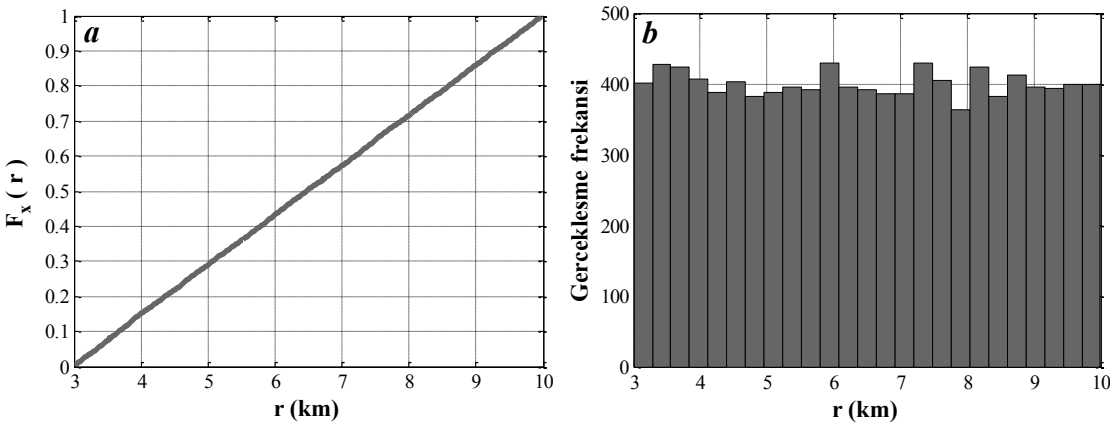


Şekil 3.52: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki M_w değerlerine ait CDF grafikleri.



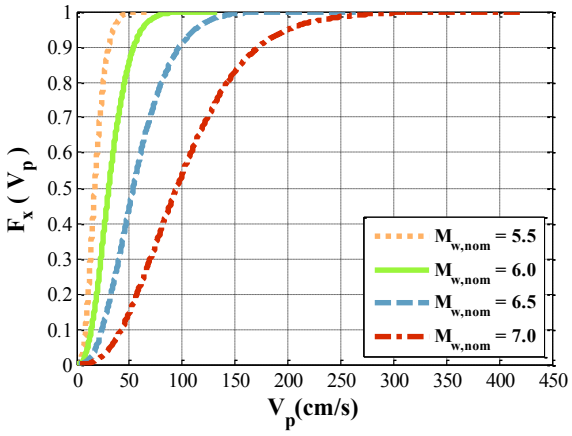
Şekil 3.53: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki M_w değerlerine ait histogramlar.

Mevcut senaryo kapsamında oluşturulan dört farklı deprem seti için üretilen *r* değerlerine ait tipik CDF grafiği ve tipik histogramı, sırasıyla Şekil 3.54 (a) ve (b)'de verilmiştir. Tablo 3.11'de görüldüğü üzere; tüm deprem setleri için *r*, 3~10 km aralığında üniform dağılıma uygun değişen bir parametredir. Deprem parametrelerinin her bir setteki değerlerini üreten Şekil 3.51'deki programın bilgisayar saatine bağlı olarak rastgele sayılar üretmesi sebebiyle, her deprem seti için üretilen *r* değerleri birbirinden farklıdır.

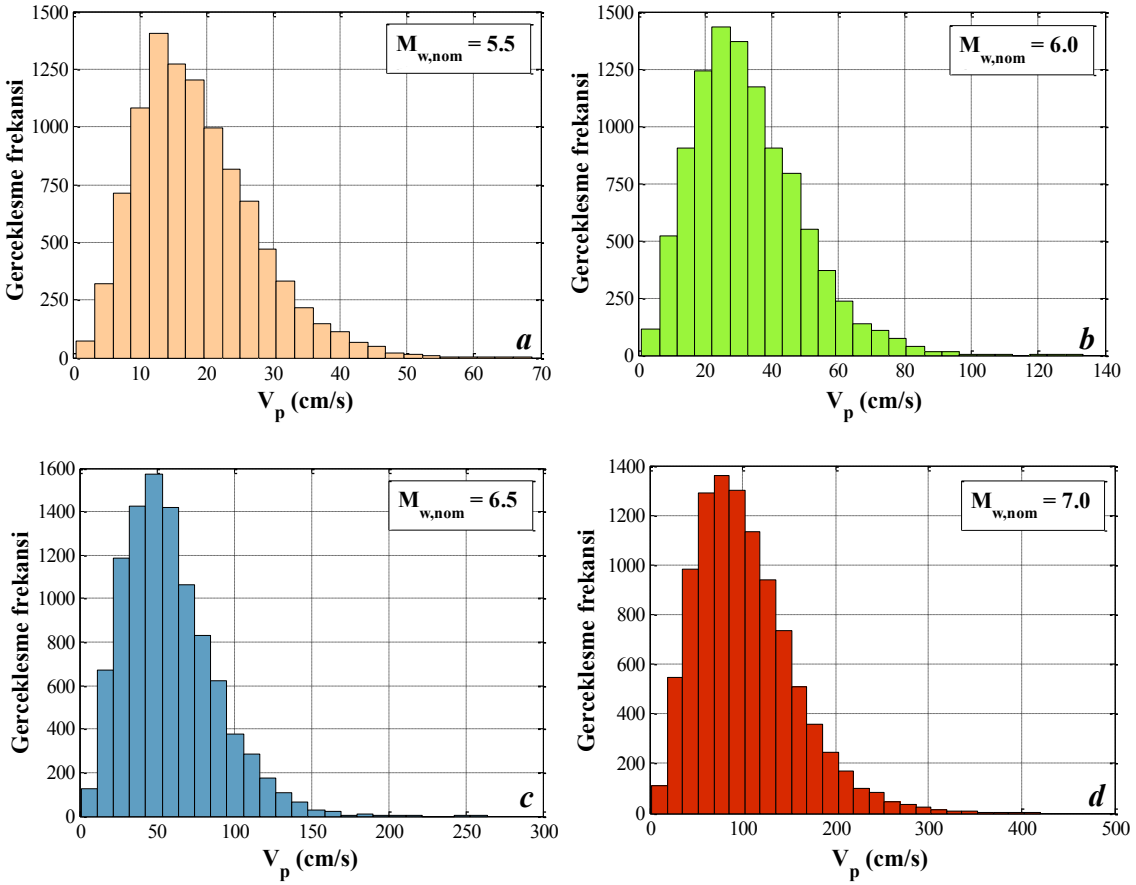


Şekil 3.54: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki *r* değerlerine ait (a) tipik CDF grafiği ve (b) tipik histogram.

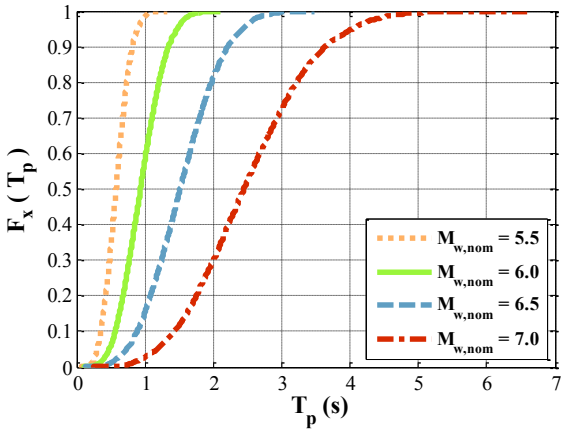
Söz konusu dört farklı deprem seti için üretilen V_p değerlerine ait CDF grafikleri, Şekil 3.55'de; histogramlar ise her bir set için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 3.56'de verilmiştir. Benzer şekilde mevcut senaryo kapsamında üretilen T_p değerlerine ait CDF grafikleri, Şekil 3.57'de; histogramlar ise her bir set için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 3.58'de verilmiştir. Senaryo-II kapsamında oluşturulan tüm setler için üretilen ζ_p değerleri ise, Senaryo I'de üretilen ζ_p değerleri ile aynı ölçek ve şekil parametrelerine sahiptir. Bu nedenle, bu parametre için tüm deprem setlerinde geçerli olmak üzere tipik CDF grafiği Şekil 3.42'deki gibidir. Tüm parametreler için olduğu gibi, bu parametre için de üretilen rastgele sayılar, bilgisayar saatine göre üretilmektedir ve programın her set için çalıştırılması halinde bu parametre için de birbirinden farklı rastgele sayılar üretilmektedir.



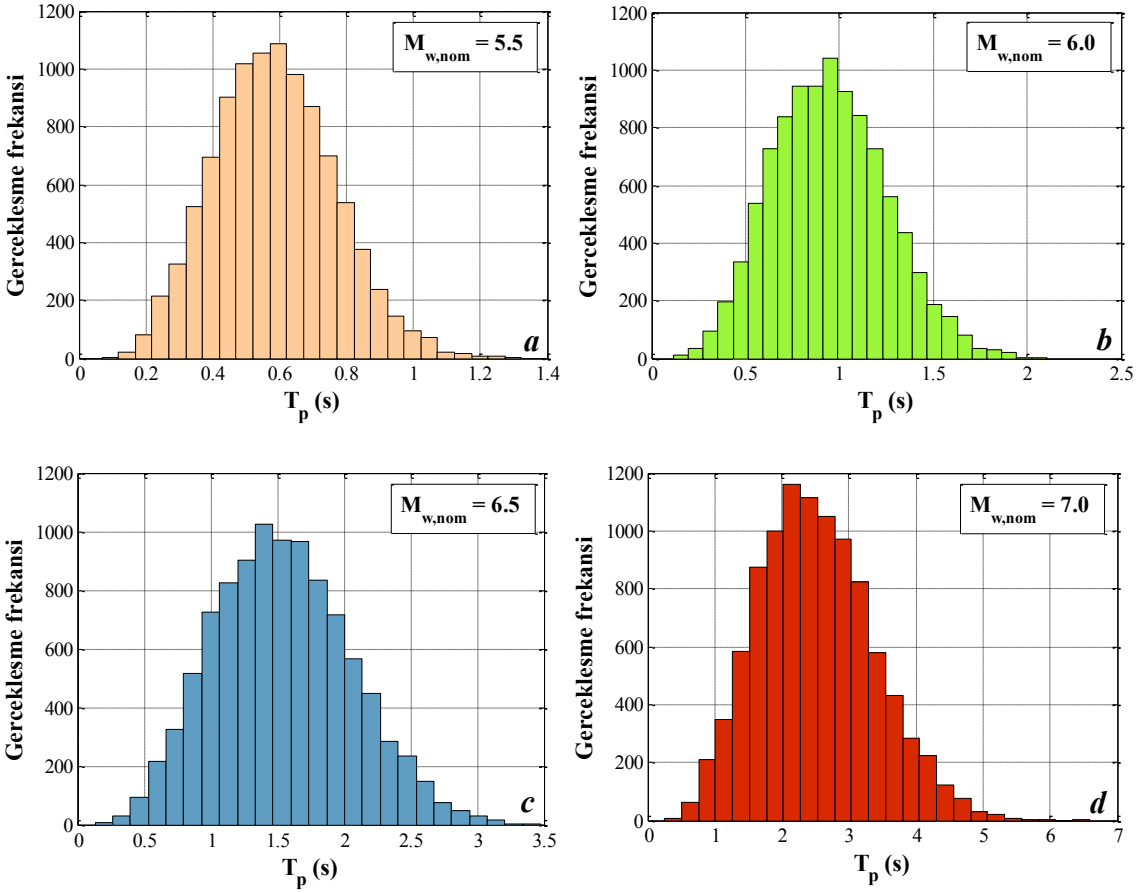
Şekil 3.55: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki V_p değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 3.56: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki V_p değerlerine ait histogramlar.



Şekil 3.57: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki T_p değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 3.58: Senaryo-II kapsamında üretilen deprem setlerindeki T_p değerlerine ait histogramlar.

3.6.2.2. İzolasyon Sistemi Parametreleri

Senaryo-II kapsamında gerçekleştirilen dinamik analizlerde, Senaryo-I için üretilen izolasyon sistemi setleri kullanılmıştır. Söz konusu setler hakkında detaylı bilgi, Bölüm 3.6.1.2'de verilmiş olup; izolasyon sistemi elemanlarının karakteristik parametrelerinin varyasyon katsayısı *c.o.v.* = %10 alınarak, Tablo 3.10'da verilen nominal değerlere göre üretilen ve birbirinden farklı 10,000 adet izolasyon sisteminden oluşan bu 6 setin her biri, mevcut senaryo kapsamında Bölüm 3.6.2.1'deki gibi üretilen 4 sentetik deprem setinin her birine maruz bırakılmış ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

3.6.2.3. Uygun Simülasyon Sayısı Tespiti İçin Yapılan Ön Çalışma

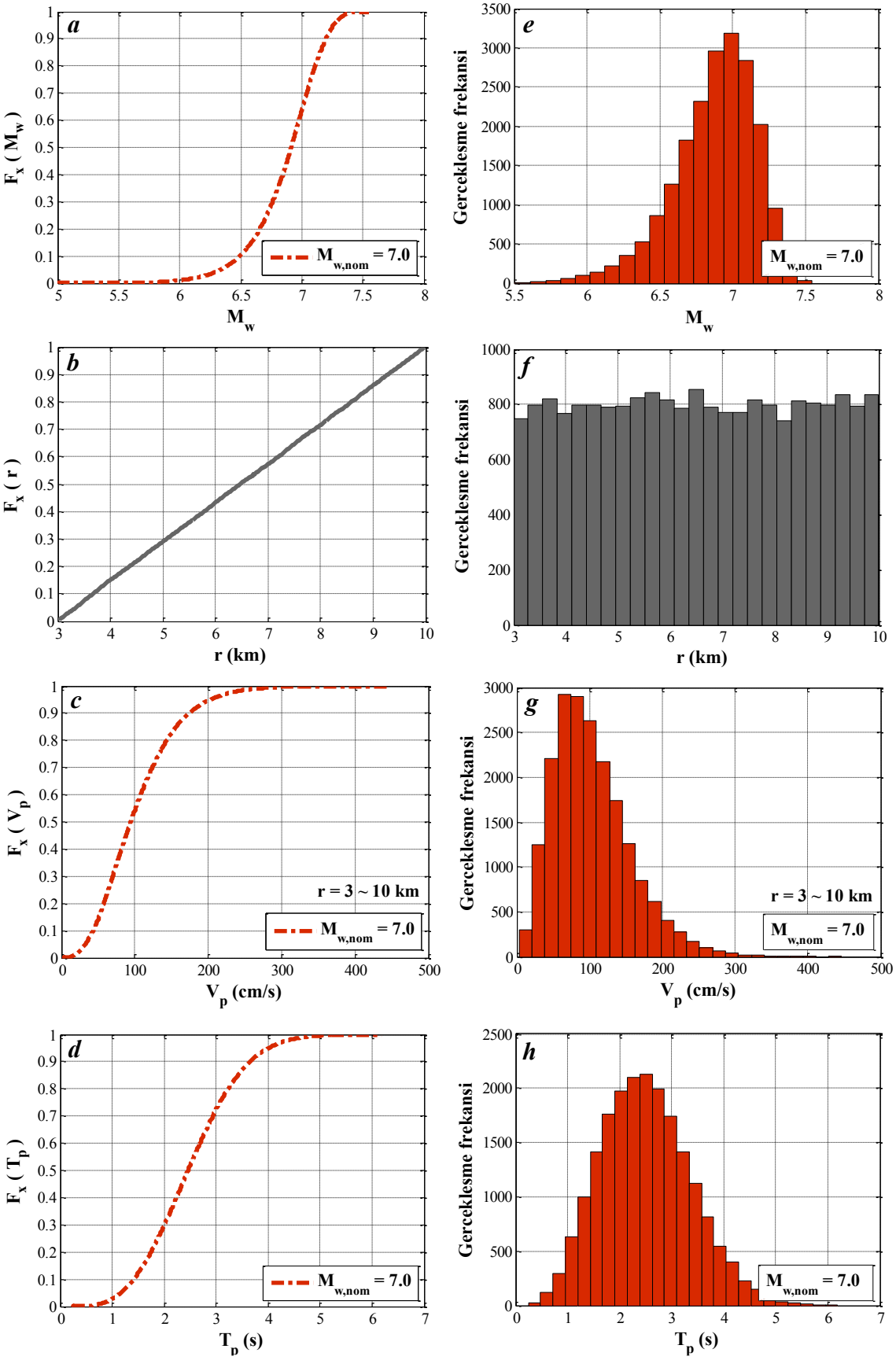
Senaryo-I kapsamında olduğu gibi, mevcut senaryo kapsamında da gerçekleştirilecek dinamik analizlerde kullanılacak türev sentetik deprem setlerindeki deprem sayısının ve aynı zamanda bu depremlere maruz kalacak sismik izolasyonlu binalar için oluşturulacak her bir izolasyon sistemleri setindeki izolasyon sistemi sayısının (N_{MCA}) tespit edilmesi için bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışma kapsamında, N_{MCA} = 20,000 alınarak; M_w = 7.0 için Tablo 3.11'deki değerlere göre, Şekil 3.51'de akış diyagramı verilen program aracılığıyla 20,000 adet birbirinden farklı türev sentetik depremden oluşan bir set üretilmiştir. Söz konusu set için üretilen M_w ve r değerleri ile bu değerlere bağlı olarak üretilen T_p ve V_p değerlerine ait CDF grafikleri, sırasıyla Şekil 3.59 (a), (b), (c) ve (d)'de verilmiştir. Üretilen tüm bu parametrelere ait histogramlar ise, sırasıyla Şekil 3.59 (e), (f), (g) ve (h)'da verilmiştir. Söz konusu deprem seti için ölçek parametresi 0.20 ve şekil parametresi de, Tablo 3.11'de görüldüğü üzere 3 olacak şekilde ζ_p parametresine ait değerler de üretilmiştir. Mevcut senaryo kapsamında N_{MCA} = 20,000 alınarak üretilen ζ_p değerleri, Senaryo-I kapsamında Bölüm 3.6.1.4'de aynı parametre için üretilen değerler ile aynı olmamakla birlikte; söz konusu iki senaryo için üretilen ζ_p değerlerinin ölçek ve şekil parametrelerinin aynı olması sebebiyle, CDF grafikleri de birbirine benzemektedir. Bu nedenle, mevcut senaryoda N_{MCA} sayısını tespit için üretilen ζ_p değerlerine ait CDF grafiği, Şekil 3.47 (c)'den görülebilir.

Mevcut senaryo kapsamındaki N_{MCA} sayısını tespit için kullanılan izolasyon sistemleri için ise; Senaryo-I kapsamındaki N_{MCA} sayısını tespit için Bölüm 3.6.1.4'de $T_{0,nom}$=3.5 s, $Q_{s,nom}/W$=%5, %7.5 ve %10, *c.o.v.*=%5, %10 ve %15 değerleri için oluşturulan 9 izolasyon sistemleri setinden *c.o.v.*=%10 için üretilen 3 set kullanılmıştır. $Q_{s,nom}/W$

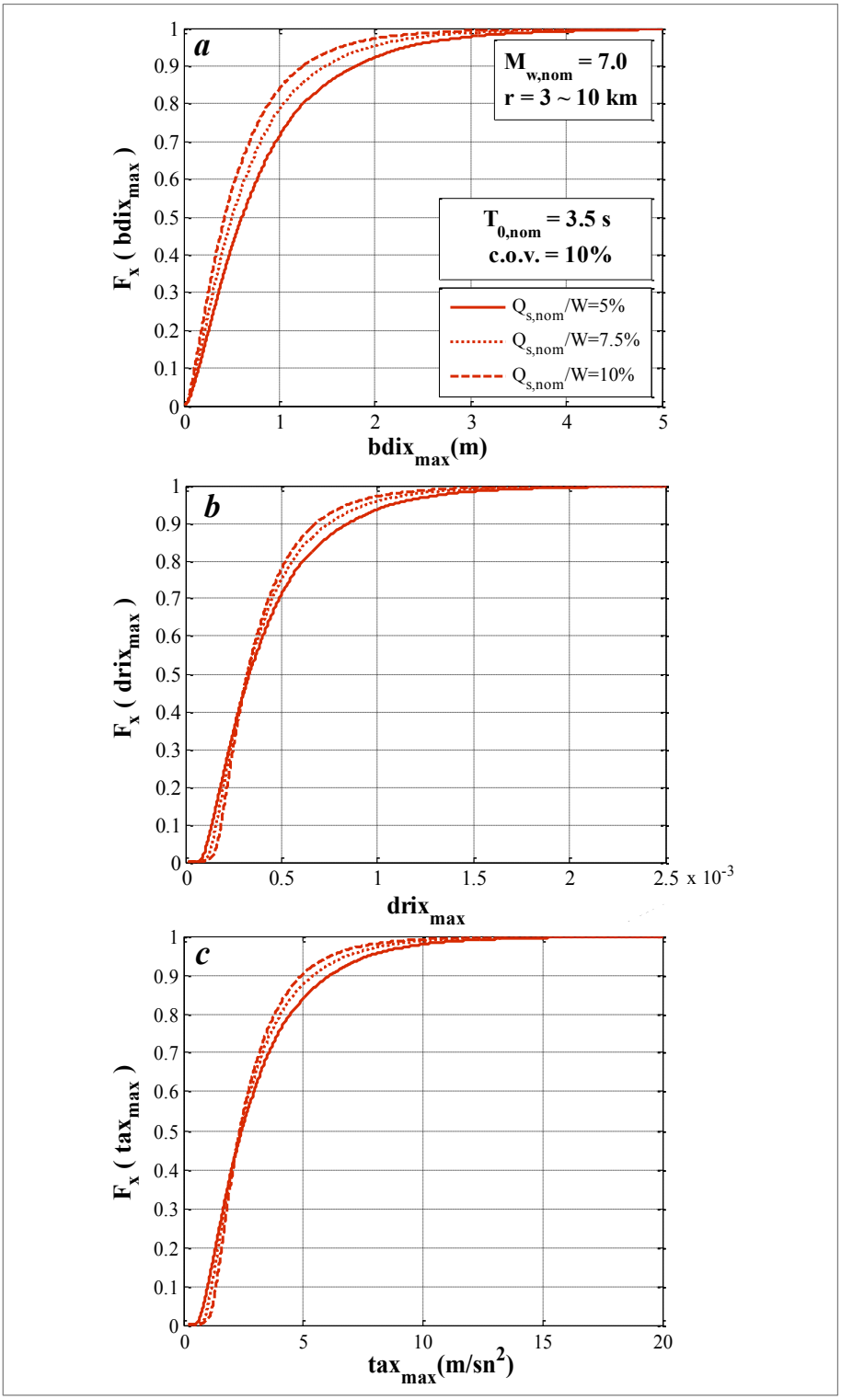
oranının sırasıyla %5, %7.5 ve %10 olması durumlarında, Tablo 3.10'daki nominal değerlere göre üretilen ve her biri 20,000 adet birbirinden farklı izolasyon sisteminden oluşan söz konusu 3 setin bağımsız ve bağlı değişken parametreleri için CDF grafikleri, Şekil 3.48'da *c.o.v.*=%10 lejantı ile verilen grafiklerdir.

Yukarıda özetlendiği gibi oluşturulan ve her biri N_{MCA} = 20,000 adet birbirinden farklı izolasyon sistemi içeren 3 adet izolasyon sistemleri setinin her biri, N_{MCA} = 20,000 adet birbirinden farklı sentetik deprem içeren türev sentetik depremler setine maruz bırakılması suretiyle, her birinde 20,000 doğrusal olmayan dinamik analizin yapıldığı 3 yürütme ile ön çalışma kapsamındaki dinamik analizler tamamlanmıştır. Bu analizler, 3D-BASIS-MONTEQ programı ile yapılmıştır. Senaryo-I için Bölüm 3.6.1.4'de yapıldığı gibi, mevcut senaryo için de $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin %5, %7.5 ve %10 olması durumlarında üretilen izolasyon sistemleri ile oluşturulan binaların, ön çalışma kapsamında oluşturulan deprem setine ayrı ayrı maruz kalması durumunda gerçekleştirilen her bir simülasyon için izolasyon katı pik deplasmanlarının maksimumu ($bdix_{max}$), tüm katların merkez ve köşe deplasmanlarına göre hesaplanan pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumu ($drix_{max}$) ile tüm kat kütle merkezlerinde hesaplanan pik toplam ivmelerin maksimumu (tax_{max}) hesaplanmış; CDF grafikleri ise, sırasıyla Şekil 3.60 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir.

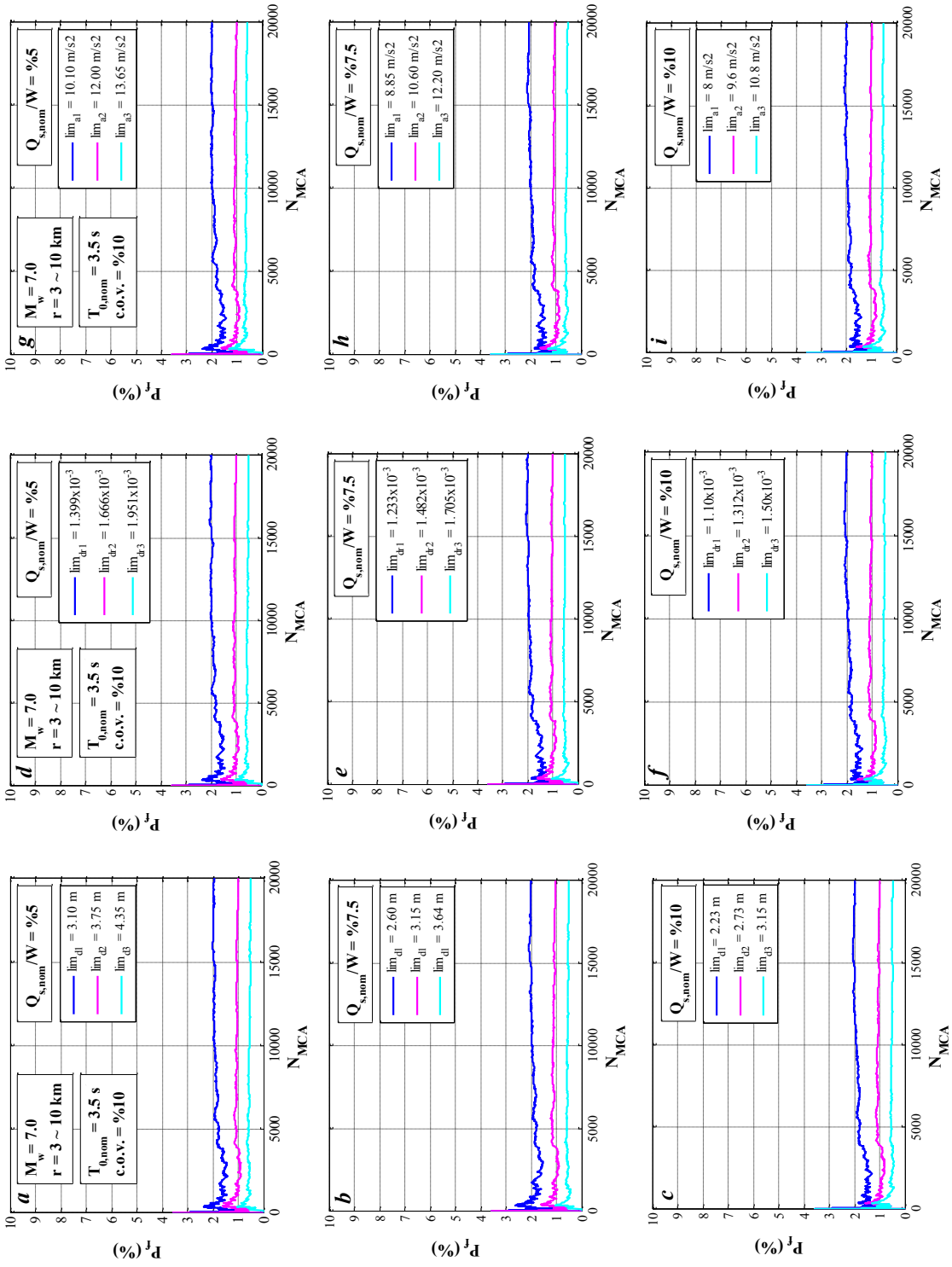
Senaryo-I için Bölüm 3.6.1.4'de yapıldığı gibi, mevcut senaryo kapsamında da N_{MCA} değerini tespit amacıyla ön çalışma kapsamında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına göre de bir "güvenilirlik analizi" yapılmıştır. $Q_{s,nom}/W$ oranının %5, %7.5 ve %10 olması durumlarında üretilen izolasyon sistemi setlerinin mevcut çalışma kapsamında üretilen deprem setine ayrı ayrı maruz kalması durumunda, $bdix_{max}$ için güvenilirlik analizleri sonuçları, sırasıyla Şekil 3.61 (a), (b) ve (c)'de; $drix_{max}$ için güvenilirlik analizleri sonuçları, sırasıyla Şekil 3.61 (d), (e) ve (f)'de tax_{max} için güvenilirlik analizleri sonuçları ise, sırasıyla Şekil 3.61 (g), (h) ve (i)'de verilmiştir. Bu grafiklerinden görüldüğü üzere; her üç yapısal cevap parametresinin de simülasyon sayısına bağlı değişimleri, Bölüm 3.6.1.4'de gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerindeki gibidir. Bu nedenle, Senaryo-II kapsamındaki analizlerde de N_{MCA} sayısının 10,000 olarak alınmasının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır



Şekil 3.59: Senaryo-II kapsamında kullanılacak N_{MCA} sayısını tespit için üretilen deprem seti parametrelerinin değerleri.



Şekil 3.60: Senaryo-I kapsamında N_{MCA} ve *c.o.v.* değerlerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarının CDF grafikleri; (a) $bdix_{max}$, (b) $drix_{max}$ (c) tax_{max} için.



Şekil 3.61: Senaryo-II kapsamında N_{MCA} değerinin tespiti için gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına ait başarısızlık olasılıklarının değişimi; (a)-(c): $bdix_{max}$, (d)-(f): $drix_{max}$, (g)-(i): tax_{max} için.

4. BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçları ve değerlendirmelere yer verilmiştir. Tez çalışmalarının birinci ana bölümü kapsamında gerçekleştirilen analizlerin sonuçları, Bölüm 4.1'de; ikinci ana bölümü kapsamında gerçekleştirilen dinamik analizlerin sonuçları ise, Bölüm 4.2'de verilerek değerlendirilmiştir.

4.1. İZOLASYON SİSTEMİ KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNDEKİ RASTGELE DEĞİŞİMİN YAPISAL SİSTEMİN DİNAMİK DAVRANIŞI VE GÜVENİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, mevcut tez birinci ana bölümü kapsamında yapılan çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Bölüm 3.5'de de belirtildiği üzere, söz konusu birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında izolasyon sistemi karakteristik parametrelerindeki rastgele değişimlerin, izolasyon sistemi ve üstyapı dahil olmak üzere sismik izolasyonlu bir binanın tüm yapısal sistemi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle Bölüm 3.5.1'deki gibi iki farklı izolasyonlu hedef periyoduna (T_0 = 2 s ve T_0 = 3.5 s) sahip olacak şekilde, her biri karakteristik özellikleri birbirinin aynı olan 16 adet doğrusal olmayan kauçuk esaslı izolatörden oluşan 2 adet referans izolasyon sistemi oluşturulmuştur. Ardından nominal hedef periyotları $T_{0,nom}$ = 2 s ve $T_{0,nom}$ = 3.5 s olmak üzere söz konusu iki sistemi referans alan iki ana üretilmiş izolasyon sistemleri seti ($Set1_{NL}$ ve $Set2_{NL}$) Bölüm 3.5.2'deki gibi oluşturulmuştur. Bu iki ana setin her biri için üç farklı izolatör karakteristik parametreleri varyasyon katsayısı (*c.o.v.* = %5, %10 ve %15) göz önünde bulundurularak üçer adet alt izolasyon sistemi setleri ($Set1A_{NL}$, $Set1B_{NL}$, $Set1C_{NL}$, $Set2A_{NL}$, $Set2B_{NL}$, $Set2C_{NL}$) oluşturulmuştur. Böylece mevcut tez birinci ana bölümü kapsamında, 6 adet doğrusal olmayan alt izolasyon sistemi seti Tablo 3.7'deki karakteristik parametrelere sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Bölüm 3.5.4'de yapılan yeterli simülasyon sayısı (N_{MCA}) tespit çalışması neticesinde, her bir alt set için Monte Carlo simülasyonlarında kullanılmak üzere, her biri kendi içinde birbirinden farklı karakteristik parametrelere sahip 16 adet izolatörden oluşmakta olan

5,000 adet birbirinden farklı izolasyon sistemi üretilmiştir. Her bir alt izolasyon sistemi için üretilen izolasyon sistemlerinin her biri, detayları Bölüm 3.3'de verilen aynı üst yapı ile entegre edilmiş ve birinci bölüm çalışmaları kapsamında dinamik davranışları incelenecek olan 30,000 adet sismik izolasyonlu bina oluşturulmuştur.

Birinci ana bölümde ayrıca, izolatör parametrelerindeki söz konusu rastgele değişimlerin etkilerinin farklı frekans içeriklerine sahip deprem hareketleri altında farklı eğilimler gösterip göstermediğinin de incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, mevcut bölüm kapsamında Tablo 3.3'de verilmiş olan ve moment büyüklüğü (M_w), 6.5'dan büyük olan 6 tarihsel depremin, Tablo 3.4'de verilen ileri-yönelim etkisinin bulunduğu 27 kaydı ve Tablo 3.5'de verilen ileri-yönelim etkisinin bulunmadığı 27 kaydı olmak üzere, toplam 54 adet yer hareketi kaydı göz önünde bulundurulmuştur. Söz konusu yer hareketi kayıtlarının oluşturulan binalara X yönünde uygulanması ve bu yer hareketi bileşenlerine dik bileşenlerin ise Y yönünde uygulanması suretiyle; her bir sismik izolasyonlu bina, toplam 54 adet yer hareketi çiftine maruz bırakılmıştır.

Birinci ana bölüm kapsamında yukarıda anlatıldığı gibi oluşturulan, birbirinden farklı toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu binanın her biri için 54 adet yer hareketi çifti etkisinde 54 adet iki yönlü, doğrusal olmayan, üç boyutlu zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir (toplam 30,000×54=1,620,000 analiz). Bu analizleri gerçekleştirebilmek için orijinal halinde bir sismik izolasyonlu bina için bir yer hareketi etkisinde tek veya çift yönlü dinamik analiz gerçekleştirebilen 3D-BASIS (Nagarajaiah ve diğ., 1991a) programından yararlanılmıştır. Söz konusu program, mevcut tez kapsamında gerçekleştirilen ve Bölüm 3.5.3'de detayları verilen modifikasyonlar ile bir yürütmede N_{MCA} adet (mevcut bölüm kapsamında N_{MCA} = 5,000'dir.) sismik izolasyonlu binanın bir yer hareketi çifti altında tekrarlı ve durmaksızın dinamik analizlerini yapabilir hâle getirilmiştir. Böylece 5,000 adet izolasyon sisteminden oluşan bir üretilmiş izolasyon sistemleri alt seti ile oluşturulan 5,000 adet sismik izolasyonlu binanın bir yer hareketi çifti etkisindeki dinamik analizleri, 1 yürütme ile gerçekleştirilmiş olup; söz konusu alt set ile oluşturulan binaların 54 yer hareketi çifti etkisindeki dinamik analizleri için modifiye 3D-BASIS programı (3D-BASIS-MONTE) ile 54 yürütme gerçekleştirilmiştir. Tüm alt izolasyon sistemi setlerinin tüm yer hareketleri altındaki dinamik analizleri için ise, söz konusu program ile toplam 324 yürütme gerçekleştirilmiştir. Böylece mevcut tez

birinci ana bölümü kapsamında, 324 ayrı yürütme ile 1,620,000 adet iki yönlü, doğrusal olmayan, üç boyutlu zaman tanım alanı analizi gerçekleştirilmiştir.

Mevcut bölümde, gerçekleştirilen söz konusu dinamik analizlerin sonuçları ve bu sonuçların değerlendirilmesine yer verilmiş olup; Bölüm 4.1.1'de dinamik analizler neticesinde elde edilen yapısal cevap parametrelerine ait CDF grafiği örnekleri; Bölüm 4.1.2'de bu yapısal cevap parametrelerinin önemli yüzdelik değerleri ve bu yüzdelik değerlerin ilgili cevap parametresi nominal değerlerinden sapma yüzdeleri; Bölüm 4.1.3'de her bir alt set için her bir yer hareketi çifti altında elde edilen pik izolatör deplasmanlarının maksimumu ve ilgili referans sistemin aynı yer hareketi çifti etkisindeki pik izolatör deplasmanına göre hesaplanan burulma büyütmeleri; Bölüm 4.1.4'de ise, tüm izolasyon sistemleri setleriyle oluşturulan binalar için tüm yer hareketi çiftleri etkisinde elde edilen bazı yapısal cevap parametreleri için belirlenen limit değerlerine göre başarısızlık olasılıkları hesaplanarak gerçekleştirilen güvenilirlik analizleri sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1.1. Yapısal Cevap Parametrelerine Ait CDF Grafikleri

Mevcut tez birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında izolasyon sistemi karakteristik parametrelerindeki rastgele değişimlerin, izolasyon sistemi ve üstyapı dahil olmak üzere sismik izolasyonlu bir binanın tüm yapısal sistemi üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde elde edilen yapısal cevap parametrelerinin değişkenliği incelenmiştir. Söz konusu inceleme için her bir sismik izolasyonlu binanın her bir yer hareketi çifti etkisinde elde edilen izolasyon katı kütle merkezi pik deplasmanı (Base Displacement at Center - bdc), köşe izolatörleri pik deplasmanları (Base Displacement at i^{th} corner isolator – bdi; örn: bd1, bd2), en üst kat kütle merkezi pik deplasmanı (Top Floor Displacement at center - tfd), en üst kat kütle merkezi pik toplam ivmesi (Top Floor Acceleration at center - tfa), üstyapı pik kesme kuvveti (Structural Shear - ss) ve pik taban kesme kuvveti (Base Shear - bs) yapısal cevap parametreleri olarak göz önünde bulundurulmuştur.

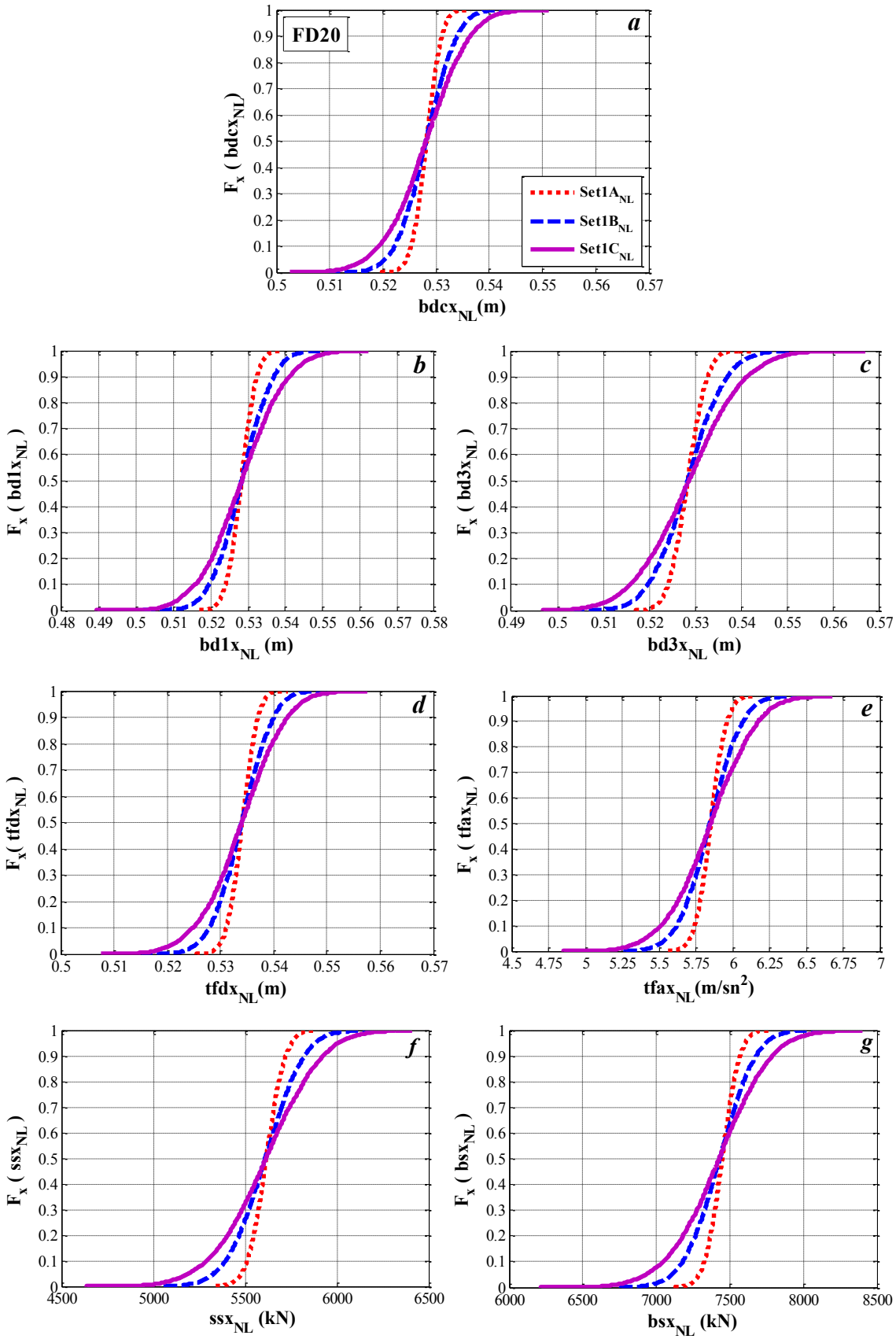
Mevcut çalışmada, Şekil 3.12'de görülen A4 izolatörü, 1. köşe izolatörü; D4 izolatörü, 2. köşe izolatörü; A1 izolatörü, 3. köşe izolatörü ve D1 izolatörü, 4. köşe izolatörü olarak göz önünde bulundurulmuş olup; yapısal cevap parametrelerinden bd1, A4 izolatörüne;

bd2, D4 izolatörüne; bd3, A1 izolatörüne ve bd4 ise, D1 izolatörüne aittir. İki doğrultulu yer hareketine maruz bırakılarak analizi yapılan yapı sisteminin aynı X yönü aksı üzerinde bulunan izolatörlerinin X yönü deplasmanları; aynı Y yönü aksı üzerinde bulunan izolatörlerin ise Y yönü deplasmanları aynı değerde elde edilmektedir. Farklı seviyedeki akslar üzerindeki izolatör deplasmanlarının değeri ise, izolasyon katı kütle merkezinden olan düşey (X yönü için) veya yatay (Y yönü için) mesafeye göre artmaktadır. Bu nedenle pik izolatör deplasmanlarının maksimum değerleri, X yönü için 1 veya 4 aksı üzerindeki sırasıyla A1 veya A4 izolatöründen elde edilmiştir. Söz konusu 1 ve 4 aksları üzerindeki diğer köşe izolatörleri D1 ve D4'e ait X yönü deplasmanlarının sırasıyla A1 ve A4 izolatörleri X yönü deplasmanları ile aynı olması sebebiyle, analiz sonuçlarında sadece A4 ve A1 izolatörleri X yönü deplasmanlarına yer verilmiş olup; bu deplasmanlar sırasıyla bd1x ve bd3x olarak isimlendirilmiştir. Benzer şekilde Y yönü için en büyük izolatör deplasmanları ise, A veya D aksı üzerindeki sırasıyla A4 veya D4 izolatöründen elde edilmiştir. Söz konusu A ve D aksları üzerindeki diğer köşe izolatörleri A1 ve D1'e ait Y yönü deplasmanlarının sırasıyla A4 ve D4 izolatörleri Y yönü deplasmanları ile aynı olması sebebiyle, analiz sonuçlarında sadece A4 ve D4 izolatörlerinin Y yönü deplasmanları göz önünde bulundurulmuş ve bu deplasmanlar sırasıyla bd1y ve bd2y olarak isimlendirilmiştir. Ancak, yer kısıtı nedeniyle Şekil 4.1 - Şekil 4.4 arasında sadece X yönü deplasmanları sunulmuştur.

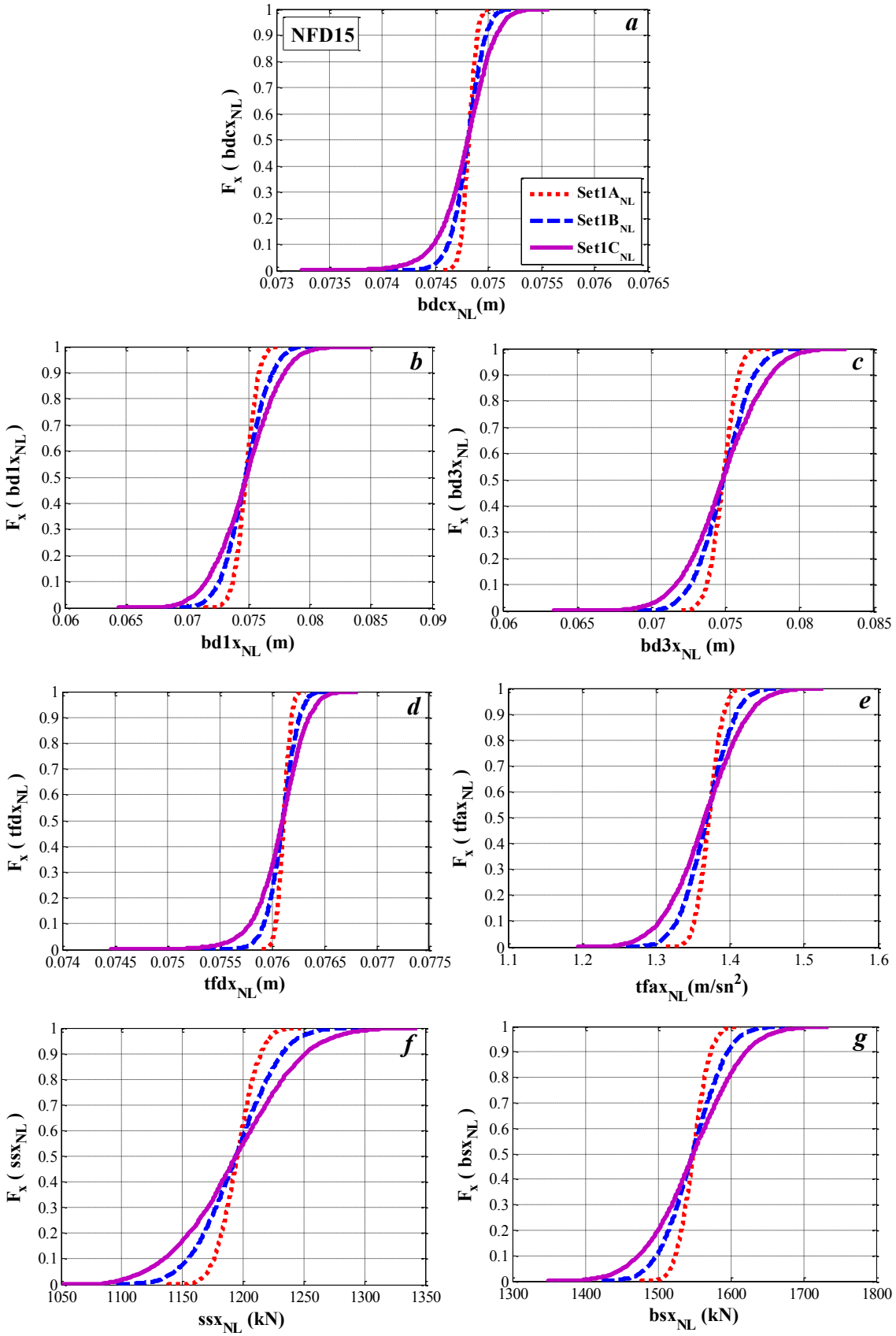
3D-BASIS-MONTE ile yapılan analizler neticesinde, nominal hedef periyotları ($T_{0,nom}$) 2 s ve izolatör parametreleri varyasyon katsayıları (*c.o.v.*) %5, %10 ve %15 olan (sırasıyla $Set1A_{NL}$, $Set1B_{NL}$ ve $Set1C_{NL}$), "Üretilmiş 1. Grup İzolasyon Sistemleri" ($Set1_{NL}$) ile oluşturulan 5,000'er adet sismik izolasyonlu binanın, Tablo 3.4'den örnek teşkil etmek üzere seçilmiş olan FD20 yer hareketi çiftine maruz kalması halinde elde edilen X yönü pik yapısal cevap parametrelerine ait kümülatif dağılım fonksiyonları (CDF) Şekil 4.1'de verilmiştir. FD20 yer hareketi çifti etkisinde elde edilen söz konusu yapısal cevap parametrelerinden bdcx, bd1x, bd3x, tfdx, tfax, ssx ve bsx'e ait CDF grafikleri sırasıyla, Şekil 4.1 (a), (b), (c), (d), (e), (f) ve (g)'de verilmiştir. Benzer şekilde, aynı izolasyon sistemi setleri ile oluşturulmuş binaların Tablo 3.5'den örnek teşkil etmek üzere seçilmiş olan NFD15 yer hareketi çiftine maruz kalması halinde elde edilen X yönü pik yapısal cevap parametrelerine ait CDF grafikleri, yine aynı sırasıyla Şekil 4.2'de verilmiştir.

Nominal hedef periyotları ($T_{0,nom}$) 3.5 s ve izolatör parametreleri varyasyon katsayıları (*c.o.v.*) %5, %10 ve %15 olan (sırasıyla $Set2A_{NL}$, $Set2B_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$) "Üretilmiş 2. Grup İzolasyon Sistemleri" ($Set2_{NL}$) ile oluşturulan 5,000'er adet sismik izolasyonlu binanın, örnek teşkil etmek üzere seçilmiş olan söz konusu FD20 ve NFD15 yer hareketi çiftlerine maruz kalması halinde elde edilen X yönü pik yapısal cevap parametrelerine ait CDF grafikleri ise sırasıyla, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. Mevcut çalışma kapsamında üretilen tüm izolasyon sistemi setleri ile oluşturulan binaların FD20 ve NFD15 yer hareketi çiftlerine maruz kalması halinde elde edilen yapısal cevap parametreleri için Şekil 4.1 - Şekil 4.4 arasında verildiği gibi elde edilen CDF grafikleri, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'de X yönü bileşenlerine ait bilgiler bulunan tüm yer hareketi çiftleri için elde edilmiştir. Ancak yer kısıtı nedeniyle, 54 yer hareketi çifti altında iki ayrı nominal hedef periyoda sahip sistemler için elde edilen tüm grafikler burada sunulamamış; tüm yer hareketleri arasından örnek teşkil etmek üzere seçim yapılarak, sadece FD20 ve NFD15 kodlu yer hareketi çiftleri altındaki dinamik analiz sonuçlarına yer verilebilmiştir.

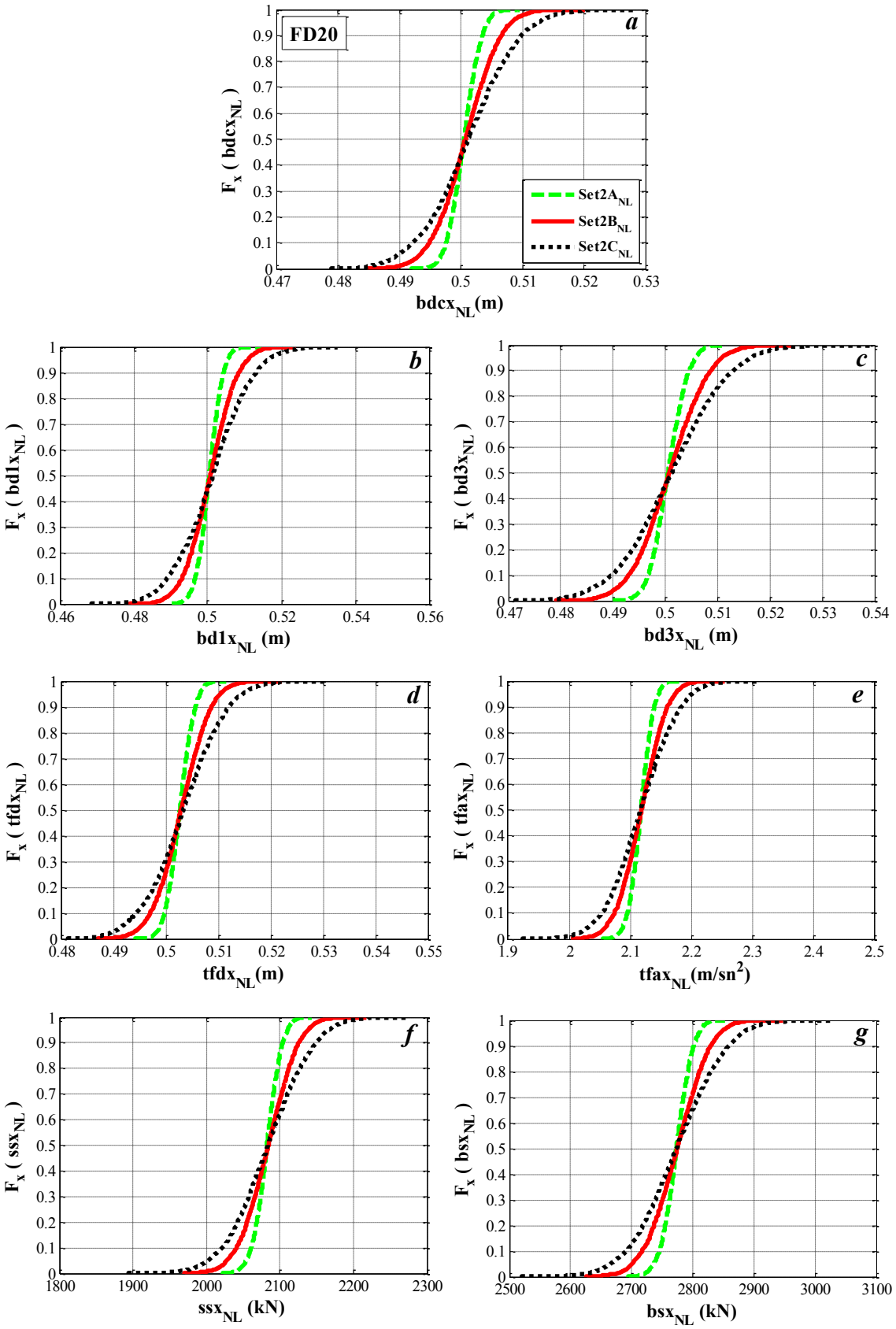
Şekil 4.1 - Şekil 4.4 arasında verilen CDF grafiklerden görüldüğü üzere, bir üretilmiş izolasyon sistemler grubu ($Set1_{NL}$ veya $Set2_{NL}$) altındaki setler için elde edilmiş her bir yapısal cevap parametresinin aldığı değerlerin değişim aralığı, *c.o.v.* değerinin artmasıyla artmaktadır. Örneğin, Üretilmiş 1. Grup İzolasyon Sistemleri ($Set1_{NL}$) için FD20 altında X yönünde elde edilen bdcx cevap parametresinin nominal değerleri yaklaşık olarak 0.528 m olup; bu parametrenin aldığı değerler, *c.o.v.* değerinin %5 olması halinde 0.520 m~0.535 m aralığında; *c.o.v.* değerinin %10 olması halinde 0.510 m~0.545 m aralığında; *c.o.v.* değerinin %15 olması halinde ise, yaklaşık olarak 0.500 m~0.550 m aralığında değişmektedir (Şekil 4.1 (a)). Görüldüğü üzere, *c.o.v.* değerinin artmasıyla alt limit değerleri azalırken, üst limit değerleri de artmakta ve böylece yapısal cevap parametrelerinin aldığı değerlerin değişim aralığı artmaktadır. Bu durum, söz konusu şekillerde görüldüğü üzere tüm yapısal cevap parametreleri için benzer şekildedir.



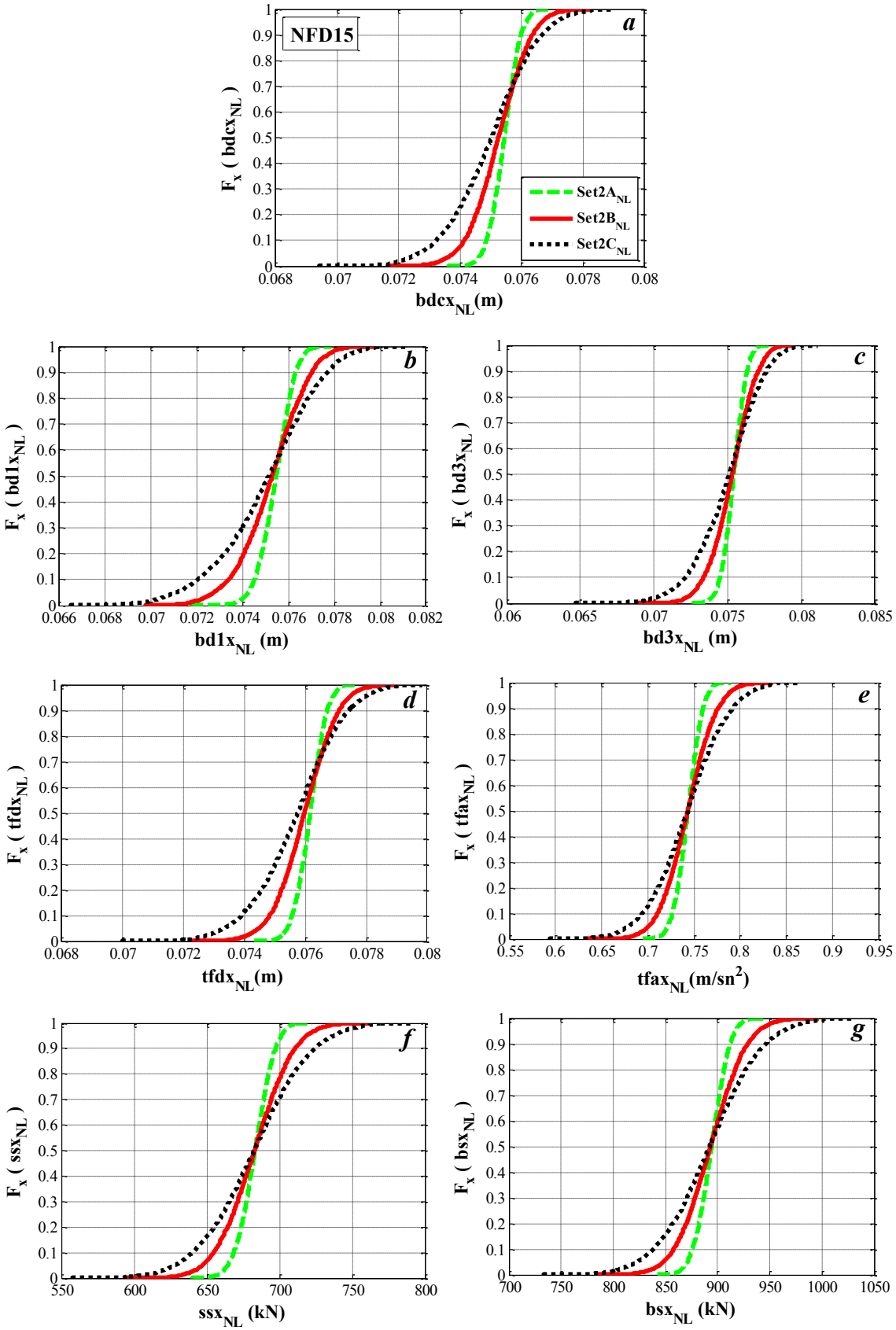
Şekil 4.1: Üretilmiş 1. Grup Sistemlerin ($Set1_{NL}$) FD20 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü).



Şekil 4.2: Üretilmiş 1. Grup Sistemlerin (Set1$_{NL}$) NFD15 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü).



Şekil 4.3: Üretilmiş 2. Grup Sistemlerin ($Set2_{NL}$) FD20 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü).



Şekil 4.4: Üretilmiş 2. Grup Sistemlerin ($Set2_{NL}$) NFD15 yer hareketi etkisinde CDF dağılımları (X yönü).

4.1.2. Yapısal Cevap Parametrelerine Ait Önemli Yüzdelik Değerleri

Üretilmiş tüm izolasyon sistemlerinin her birinin Tablo 3.4'de verilen ileri yönelim etkisi içeren (FD) ve Tablo 3.5'de verilen ileri yönelim etkisi içermeyen (NFD) tüm yer hareketi bileşenleri ile bu bileşenlere dik doğrultudaki yer hareketi bileşenleri etkisindeki iki yönlü, doğrusal olmayan, üç boyutlu dinamik analizlerinin Bölüm 4.1.1'deki gibi gerçekleştirilerek; göz önünde bulundurulan yapısal cevap parametrelerine ait CDF grafiklerinin her bir izolasyon sistemi alt seti için her bir yer hareketi çifti altında ayrı ayrı elde edilmesinin ardından; bu bölümde, söz konusu yapısal cevap parametreleri için her bir yer hareketi çifti etkisindeki her bir izolasyon sistemi alt setinden elde edilen önemli yüzdelik değerleri (*P*) sunulmuştur.

Mevcut bölüm kapsamında elde edilen yapısal cevap parametreleri için de her bir yer hareketi çifti etkisindeki her bir izolasyon sistemi alt setinden elde edilen değerlerin %80, %85, %90, %95 ve %100 gibi önemli yüzdelerinin altında kalacağı sırasıyla 80., 85., 90., 95., ve 100. yüzdelik değerleri ($P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$) Bölüm 3.1.5.2'de belirtildiği gibi hesaplanmış olup; FD ve NFD kodlu yer hareketli çiftleri arasından örnek teşkil etmek amacıyla seçilmiş FD20 ve NFD15 yer hareketi çiftleri etkisindeki Üretilmiş 1. Grup İzolasyon Sistemleri ($Set1A_{NL}$, $Set1B_{NL}$ ve $Set1C_{NL}$) için sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'deki gibi; Üretilmiş 2. Grup İzolasyon Sistemleri ($Set2A_{NL}$, $Set2B_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$) için ise sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'deki gibi verilmiştir.

Bölüm 3.1.5'de belirtildiği üzere; rastgele değişken değerler alan bir değişken için bir P. yüzdelik değeri ayrıca, söz konusu değişkene ait kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) grafiğinde kümülatif dağılım değerinin (*P*/100) olması halinde değişkenin aldığı değerdir. Bu nedenle, yukarıda belirtildiği gibi elde edilen yüzdelik değerlerinin CDF grafikleri ile kontrolünü yapmak mümkündür. Örneğin, Şekil 4.1 (a)'dan görüldüğü üzere; $Set1A_{NL}$ için $F_x(bdcx) = 0.9$ değerine karşılık x ekseni üzerindeki deplasman değeri yaklaşık bdcx ≈ 0.53 m'dir. Buna karşılık olarak, ilgili yer hareketi çiftine maruz, söz konusu $Set1A_{NL}$ alt seti için bdcx deplasmanına ait $P_{0.90}$ = 0.5311 m'dir (Tablo 4.1). $P_{0.90}$ için CDF grafiğinden okunan değer ile ilgili tablodan okunan değer görüldüğü üzere aynı olup; söz konusu değerler, FD20 yer hareketi çiftine maruz $Set1A_{NL}$ alt izolasyon seti ile oluşturulan binalar için yapılan analizler neticesinde, izolasyon katı kütle merkezinde elde edilen X yönü deplasman bileşenleri için elde edilen 5,000 adet değerin % 90'ının

(4500'ünün) $P_{0.90}$ = 0.5311 m değerinden daha düşük değerler aldığını, %10'unun (500'ünün) ise söz konusu yüzdelik değerinden daha büyük değerler aldığını göstermektedir.

Mevcut bölüm kapsamında ayrıca, her bir alt izolasyon sistemi için dinamik analizlerden elde edilen her bir yapısal cevap parametresi için hesaplanan yüzdelik değerlerinin, ilgili referans sistemdeki ilgili yapısal cevap parametresine ait nominal değerden ne kadar saptığı da yüzde olarak hesaplanmış ve bu sapma yüzdeleri, tablolarda $P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$ yüzdelik değerlerine karşılık gelecek şekilde sırasıyla, $e_{0.80}$, $e_{0.85}$, $e_{0.90}$, $e_{0.95}$ ve $e_{1.00}$ başlıklı sütunlarda verilmişlerdir. Bir *P.* yüzdelik değerine karşılık gelen sapma yüzdesi, $e_{P/100}$ = 100 × [($P_{P/100}$ – Nominal Değer) / Nominal Değer] bağıntısı ile elde edilmiştir. Örneğin, FD20 yer hareketi çiftine maruz Set1A$_{NL}$ alt seti için bdcx deplasmanına ait $P_{0.90}$ = 0.5311 m'dir (Tablo 4.1). Bu cevap parametresi için ilgili referans izolasyonlu yapı olan 1. Referans İzolasyonlu Yapı'nın söz konusu yer hareketi çiftine maruz kalması halinde elde edilen Nominal Değer = 0.5283 m'dir (Tablo 4.1). Söz konusu deplasman parametresine ait $P_{0.90}$ değerinin, nominal değerden sapma yüzdesi $e_{0.90}$ = %0.5416'dır (Tablo 4.1). Yani elde edilen 5,000 adet bdcx değerinin %90 kadarı nominal bdcx değerinden sadece %0.5416 veya daha az miktarda sapmıştır.

Tablo 4.1 - Tablo 4.4'den görüldüğü üzere; tüm yapısal cevap parametrelerinin tüm ana setlerdeki P ve e değerleri, *c.o.v.* değerinin artmasına paralel olarak artmaktadır. Ancak, Tablo 4.1 ve Tablo 4.3'ün karşılaştırılmasından görüleceği üzere FD20 etkisindeki setler için; $T_{0,nom}$ değerinin artması halinde e sapma yüzdeleri, genel olarak deplasman terimleri (bdcx, bd1x ve tfdx) için artarken, diğer yapısal cevap parametreleri için azalmaktadır. Diğer taraftan, Tablo 4.2 - Tablo 4.4'ün karşılaştırılmasından görüleceği üzere ise NFD15 etkisindeki setler için; $T_{0,nom}$ değerinin artması halinde *e* sapma yüzdeleri, izolatör deplasmanları (bd1x ve bd3x) için azalırken, diğer yapısal cevap parametreleri için artmaktadır. Bu tablolardan anlaşıldığı üzere; yapısal cevap parametreleri, *c.o.v.* değerine bağlı olarak farklı yer hareketleri etkisinde aynı eğilimi gösterirken; $T_{0,nom}$'un değişmesi halinde yer hareketine bağlı olarak farklı eğilimler göstermektedir.

Tablo 4.1: FD20 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 1. Grup Sistemler için yüzdelik (*P*) ve nominal değerden sapma yüzdesi (*e*) değerleri.

YER HAREKETİ ÇİFTİ: FD20

Yapısal cevap para-metresi	Nominal değer	Alt Set	$P_{0.80}$	$e_{0.80}$ (%)	$P_{0.85}$	$e_{0.85}$ (%)	$P_{0.90}$	$e_{0.90}$ (%)	$P_{0.95}$	$e_{0.95}$ (%)	$P_{1.00}$	$e_{1.00}$ (%)
bdcx (m)	0.5283	**Set1A$_{NL}$**	0.5302	0.3599	0.5306	0.4337	0.5311	0.5416	0.5319	0.6887	0.5366	1.5689
	0.5283	**Set1B$_{NL}$**	0.5320	0.7101	0.5330	0.8890	0.5340	1.0904	0.5355	1.3675	0.5447	3.1178
	0.5283	**Set1C$_{NL}$**	0.5337	1.0245	0.5350	1.2717	0.5365	1.5507	0.5389	2.0041	0.5512	**4.3418**
bd1x (m)	0.5283	**Set1A$_{NL}$**	0.5310	0.5187	0.5316	0.6408	0.5324	0.7828	0.5337	1.0241	0.5393	2.0938
	0.5283	**Set1B$_{NL}$**	0.5341	1.1036	0.5354	1.3488	0.5370	1.6530	0.5392	2.0677	0.5523	4.5521
	0.5283	**Set1C$_{NL}$**	0.5365	1.5566	0.5386	1.9579	0.5412	2.4414	0.5448	3.1210	0.5624	**6.4689**
bd3x (m)	0.5283	**Set1A$_{NL}$**	0.5311	0.5416	0.5318	0.6633	0.5327	0.8333	0.5339	1.0593	0.5429	2.7791
	0.5283	**Set1B$_{NL}$**	0.5340	1.0767	0.5353	1.3285	0.5370	1.6448	0.5395	2.1272	0.5517	4.4275
	0.5283	**Set1C$_{NL}$**	0.5367	1.5969	0.5387	1.9805	0.5413	2.4717	0.5451	3.1906	0.5670	**7.3284**
tfdx (m)	0.5342	**Set1A$_{NL}$**	0.5361	0.3667	0.5365	0.4402	0.5371	0.5536	0.5379	0.7039	0.5427	1.5983
	0.5342	**Set1B$_{NL}$**	0.5380	0.7201	0.5390	0.9046	0.5401	1.1074	0.5416	1.3948	0.5510	3.1546
	0.5342	**Set1C$_{NL}$**	0.5398	1.0516	0.5411	1.3044	0.5426	1.5783	0.5450	2.0401	0.5576	**4.3860**
tfax (m/sn^2)	5.8522	**Set1A$_{NL}$**	5.9242	1.2312	5.9417	1.5300	5.9640	1.9118	5.9965	2.4670	6.1441	4.9888
	5.8522	**Set1B$_{NL}$**	5.9928	2.4037	6.0275	2.9965	6.0700	3.7219	6.1335	4.8071	6.4614	10.4104
	5.8522	**Set1C$_{NL}$**	6.0683	3.6939	6.1160	4.5084	6.1753	5.5224	6.2570	6.9185	6.6749	**14.0584**
ssx (kN)	5616.34	**Set1A$_{NL}$**	5685.14	1.2250	5702.26	1.5298	5722.54	1.8909	5753.27	2.4381	5891.78	4.9043
	5616.34	**Set1B$_{NL}$**	5749.03	2.3626	5783.84	2.9824	5825.32	3.7209	5884.95	4.7827	6200.49	10.4009
	5616.34	**Set1C$_{NL}$**	5821.94	3.6607	5868.25	4.4853	5926.85	5.5287	6008.21	6.9773	6411.59	**14.1596**
bsx (kN)	7452.91	**Set1A$_{NL}$**	7527.41	0.9996	7548.00	1.2759	7570.09	1.5723	7605.22	2.0436	7762.84	4.1585
	7452.91	**Set1B$_{NL}$**	7593.15	1.8817	7630.84	2.3874	7679.19	3.0361	7745.40	3.9245	8121.96	8.9770
	7452.91	**Set1C$_{NL}$**	7667.88	2.8844	7722.87	3.6222	7791.38	4.5414	7888.39	5.8431	8401.32	**12.7254**

Tablo 4.2: NFD15 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 1. Grup Sistemler için yüzdelik (*P*) ve nominal değerden sapma yüzdesi (*e*) değerleri.

YER HAREKETİ ÇİFTİ: NFD15

Yapısal cevap para-metresi	Nominal değer	Alt Set	$P_{0.80}$	$e_{0.80}$ (%)	$P_{0.85}$	$e_{0.85}$ (%)	$P_{0.90}$	$e_{0.90}$ (%)	$P_{0.95}$	$e_{0.95}$ (%)	$P_{1.00}$	$e_{1.00}$ (%)
bdcx (m)	0.0748	**Set1A$_{NL}$**	0.0749	0.0561	0.0749	0.0727	0.0749	0.0918	0.0749	0.1212	0.0750	0.2940
	0.0748	**Set1B$_{NL}$**	0.0749	0.1264	0.0749	0.1592	0.0750	0.2021	0.0750	0.2667	0.0753	0.6055
	0.0748	**Set1C$_{NL}$**	0.0750	0.2055	0.0750	0.2558	0.0751	0.3302	0.0751	0.4286	0.0756	**1.0040**
bd1x (m)	0.0748	**Set1A$_{NL}$**	0.0755	0.9239	0.0757	1.1363	0.0759	1.4136	0.0762	1.8229	0.0777	3.8916
	0.0748	**Set1B$_{NL}$**	0.0762	1.8335	0.0766	2.3089	0.0770	2.8886	0.0776	3.7013	0.0804	7.4916
	0.0748	**Set1C$_{NL}$**	0.0769	2.7730	0.0774	3.3902	0.0780	4.2123	0.0788	5.2972	0.0850	**13.6186**
bd3x (m)	0.0748	**Set1A$_{NL}$**	0.0756	0.9657	0.0757	1.1623	0.0759	1.4484	0.0762	1.8655	0.0781	4.4096
	0.0748	**Set1B$_{NL}$**	0.0763	1.9260	0.0766	2.3036	0.0769	2.8346	0.0776	3.6953	0.0814	8.7184
	0.0748	**Set1C$_{NL}$**	0.0769	2.8332	0.0775	3.5095	0.0781	4.3185	0.0789	5.4643	0.0832	**11.1670**
tfdx (m)	0.0761	**Set1A$_{NL}$**	0.0762	0.0501	0.0762	0.0649	0.0762	0.0839	0.0762	0.1115	0.0763	0.2511
	0.0761	**Set1B$_{NL}$**	0.0762	0.1117	0.0762	0.1429	0.0763	0.1830	0.0763	0.2429	0.0766	0.5687
	0.0761	**Set1C$_{NL}$**	0.0763	0.1866	0.0763	0.2369	0.0764	0.2984	0.0764	0.3982	0.0768	**0.9163**
tfax (m/sn^2)	1.3722	**Set1A$_{NL}$**	1.3847	0.9124	1.3878	1.1384	1.3916	1.4204	1.3977	1.8591	1.4259	3.9136
	1.3722	**Set1B$_{NL}$**	1.3954	1.6922	1.4012	2.1193	1.4083	2.6316	1.4190	3.4129	1.4847	8.2039
	1.3722	**Set1C$_{NL}$**	1.4060	2.4677	1.4148	3.1090	1.4263	3.9456	1.4420	5.0891	1.5255	**11.1737**
ssx (kN)	1195.12	**Set1A$_{NL}$**	1207.70	1.0526	1210.68	1.3020	1214.61	1.6308	1220.42	2.1169	1247.81	4.4088
	1195.12	**Set1B$_{NL}$**	1219.72	2.0584	1225.54	2.5454	1232.22	3.1043	1243.11	4.0155	1302.89	9.0175
	1195.12	**Set1C$_{NL}$**	1232.77	3.1503	1241.65	3.8933	1251.80	4.7426	1268.15	6.1107	1343.81	**12.4414**
bsx (kN)	1548.69	**Set1A$_{NL}$**	1564.48	1.0196	1568.21	1.2604	1573.08	1.5749	1580.17	2.0327	1614.68	4.2610
	1548.69	**Set1B$_{NL}$**	1580.42	2.0488	1587.52	2.5073	1595.86	3.0458	1609.45	3.9233	1677.76	8.3341
	1548.69	**Set1C$_{NL}$**	1597.38	3.1439	1607.98	3.8284	1620.99	4.6685	1642.99	6.0890	1734.27	**11.9830**

Tablo 4.3: FD20 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 2. Grup Sistemleri için yüzdelik (*P*) ve nominal değerden sapma yüzdesi (*e*) değerleri.

YER HAREKETİ ÇİFTİ: FD20

Yapısal cevap parametresi	Nominal değer	Alt Set	$P_{0.80}$	$e_{0.80}$ (%)	$P_{0.85}$	$e_{0.85}$ (%)	$P_{0.90}$	$e_{0.90}$ (%)	$P_{0.95}$	$e_{0.95}$ (%)	$P_{1.00}$	$e_{1.00}$ (%)
bdcx (m)	0.5005	**Set2A$_{NL}$**	0.5025	0.4036	0.5030	0.5031	0.5036	0.6204	0.5044	0.7889	0.5095	1.8046
	0.5005	**Set2B$_{NL}$**	0.5047	0.8446	0.5055	1.0119	0.5066	1.2291	0.5082	1.5530	0.5201	3.9292
	0.5005	**Set2C$_{NL}$**	0.5070	1.3068	0.5084	1.5786	0.5099	1.8931	0.5127	2.4416	0.5280	**5.4958**
bd1x (m)	0.5005	**Set2A$_{NL}$**	0.5031	0.5237	0.5036	0.6314	0.5044	0.7801	0.5054	0.9901	0.5147	2.8546
	0.5005	**Set2B$_{NL}$**	0.5058	1.0726	0.5069	1.2872	0.5085	1.6109	0.5110	2.1023	0.5239	4.6919
	0.5005	**Set2C$_{NL}$**	0.5089	1.6819	0.5108	2.0647	0.5132	2.5515	0.5166	3.2307	0.5353	**6.9623**
bd3x (m)	0.5005	**Set2A$_{NL}$**	0.5032	0.5579	0.5038	0.6666	0.5045	0.8109	0.5057	1.0550	0.5108	2.0637
	0.5005	**Set2B$_{NL}$**	0.5060	1.1160	0.5072	1.3396	0.5087	1.6511	0.5109	2.0799	0.5241	4.7257
	0.5005	**Set2C$_{NL}$**	0.5089	1.6785	0.5106	2.0374	0.5131	2.5223	0.5163	3.1701	0.5395	**7.7977**
tfdx (m)	0.5026	**Set2A$_{NL}$**	0.5046	0.4020	0.5051	0.5005	0.5057	0.6170	0.5066	0.7856	0.5116	1.7870
	0.5026	**Set2B$_{NL}$**	0.5068	0.8411	0.5077	1.0040	0.5087	1.2206	0.5104	1.5415	0.5222	3.8903
	0.5026	**Set2C$_{NL}$**	0.5091	1.2978	0.5105	1.5607	0.5121	1.8794	0.5148	2.4203	0.5300	**5.4557**
tfax (m/sn^2)	2.1163	**Set2A$_{NL}$**	2.1318	0.7286	2.1349	0.8770	2.1390	1.0707	2.1460	1.4019	2.1802	3.0165
	2.1163	**Set2B$_{NL}$**	2.1467	1.4364	2.1530	1.7318	2.1604	2.0819	2.1731	2.6810	2.2543	6.5169
	2.1163	**Set2C$_{NL}$**	2.1606	2.0932	2.1709	2.5780	2.1833	3.1654	2.2012	4.0083	2.3128	**9.2816**
ssx (kN)	2081.92	**Set2A$_{NL}$**	2096.72	0.7109	2099.71	0.8545	2103.82	1.0519	2110.71	1.3829	2143.85	2.9747
	2081.92	**Set2B$_{NL}$**	2112.21	1.4549	2118.31	1.7479	2125.72	2.1038	2138.52	2.7186	2218.22	6.5468
	2081.92	**Set2C$_{NL}$**	2126.84	2.1576	2136.97	2.6442	2149.24	3.2336	2166.33	4.0544	2274.55	**9.2525**
bsx (kN)	2773.34	**Set2A$_{NL}$**	2792.13	0.6775	2796.18	0.8236	2801.49	1.0150	2810.52	1.3406	2853.66	2.8961
	2773.34	**Set2B$_{NL}$**	2811.30	1.3687	2819.52	1.6651	2829.22	2.0149	2845.49	2.6016	2948.48	6.3151
	2773.34	**Set2C$_{NL}$**	2829.69	2.0318	2843.30	2.5226	2859.61	3.1107	2881.94	3.9159	3026.35	**9.1229**

Tablo 4.4: NFD15 yer hareketi çiftine maruz Üretilmiş 2. Grup Sistemleri için yüzdelik (*P*) ve nominal değerden sapma yüzdesi (*e*) değerleri.

YER HAREKETİ ÇİFTİ: NFD15

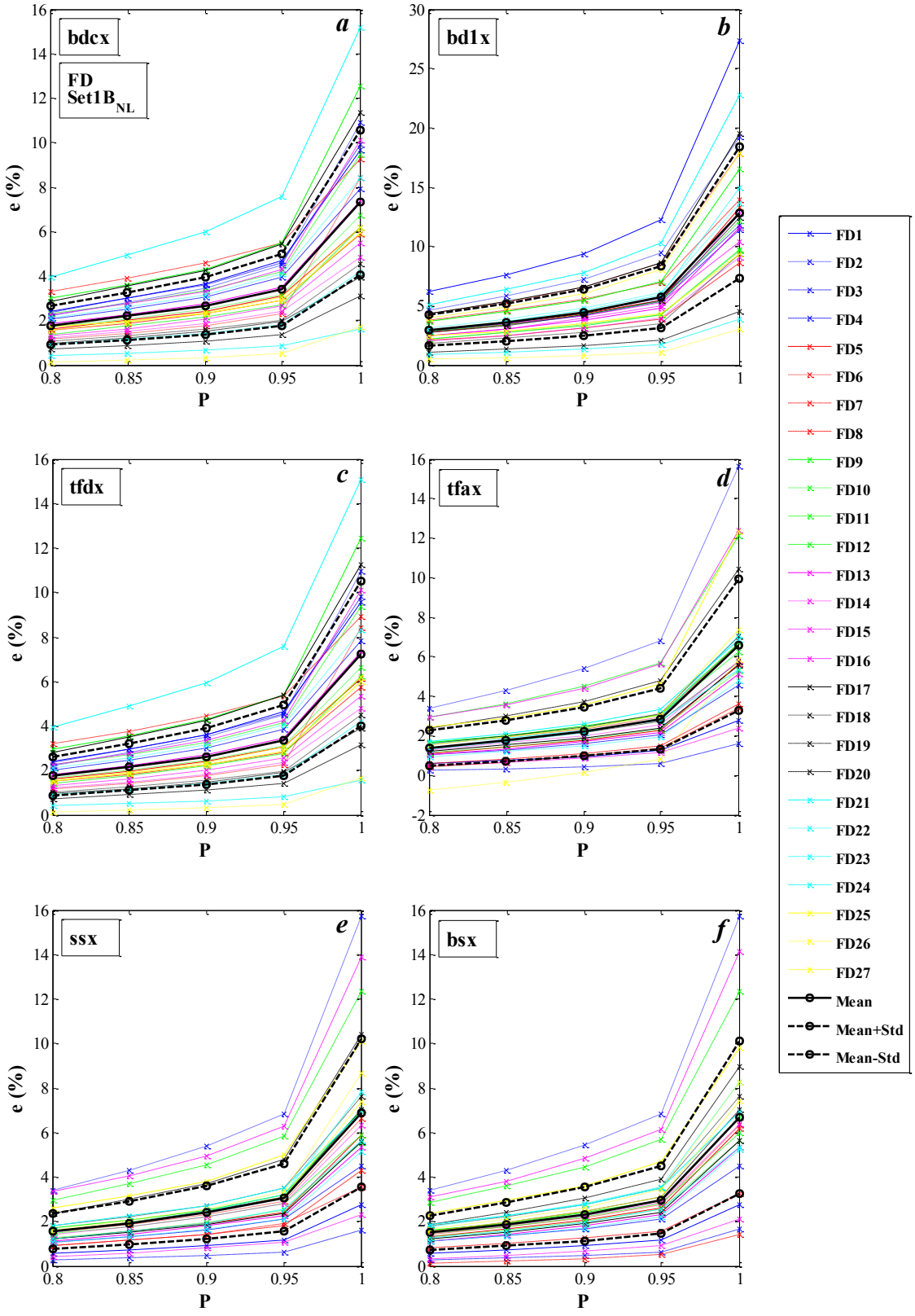
Yapısal cevap parametresi	Nominal değer	Alt Set	$P_{0.80}$	$e_{0.80}$ (%)	$P_{0.85}$	$e_{0.85}$ (%)	$P_{0.90}$	$e_{0.90}$ (%)	$P_{0.95}$	$e_{0.95}$ (%)	$P_{1.00}$	$e_{1.00}$ (%)
bdcx (m)	0.0755	**Set2A$_{NL}$**	0.0758	0.4305	0.0759	0.5235	0.0760	0.6610	0.0761	0.8840	0.0769	1.8248
	0.0755	**Set2B$_{NL}$**	0.0760	0.6749	0.0761	0.8894	0.0763	1.1575	0.0767	1.5874	0.0783	3.6880
	0.0755	**Set2C$_{NL}$**	0.0761	0.8118	0.0763	1.1365	0.0767	1.5728	0.0771	2.1930	0.0790	**4.6735**
bd1x (m)	0.0755	**Set2A$_{NL}$**	0.0760	0.7491	0.0762	0.9052	0.0763	1.1111	0.0766	1.4255	0.0779	3.1651
	0.0755	**Set2B$_{NL}$**	0.0765	1.3257	0.0767	1.6442	0.0770	2.0462	0.0774	2.6088	0.0798	5.7407
	0.0755	**Set2C$_{NL}$**	0.0769	1.8303	0.0772	2.3291	0.0777	2.9559	0.0783	3.7420	0.0812	**7.5331**
bd3x (m)	0.0755	**Set2A$_{NL}$**	0.0760	0.7283	0.0762	0.9178	0.0763	1.1455	0.0766	1.4421	0.0779	3.2424
	0.0755	**Set2B$_{NL}$**	0.0765	1.3322	0.0767	1.6766	0.0771	2.1399	0.0775	2.7351	0.0796	5.4383
	0.0755	**Set2C$_{NL}$**	0.0768	1.7779	0.0772	2.2700	0.0777	2.8869	0.0783	3.7174	0.0811	**7.5148**
tfdx (m)	0.0762	**Set2A$_{NL}$**	0.0765	0.4412	0.0766	0.5344	0.0767	0.6745	0.0769	0.8986	0.0776	1.8616
	0.0762	**Set2B$_{NL}$**	0.0767	0.6969	0.0769	0.9120	0.0771	1.1902	0.0774	1.6192	0.0791	3.7660
	0.0762	**Set2C$_{NL}$**	0.0768	0.8415	0.0771	1.1725	0.0774	1.6198	0.0779	2.2537	0.0798	**4.7771**
tfax (m/sn^2)	0.7433	**Set2A$_{NL}$**	0.7546	1.5134	0.7571	1.8546	0.7601	2.2594	0.7648	2.8894	0.7908	6.3782
	0.7433	**Set2B$_{NL}$**	0.7652	2.9332	0.7699	3.5757	0.7761	4.4041	0.7864	5.7877	0.8357	12.4306
	0.7433	**Set2C$_{NL}$**	0.7741	4.1428	0.7821	5.2081	0.7921	6.5640	0.8076	8.6417	0.8669	**16.6231**
ssx (kN)	683.26	**Set2A$_{NL}$**	692.59	1.3665	694.73	1.6789	697.41	2.0708	701.39	2.6541	722.64	5.7642
	683.26	**Set2B$_{NL}$**	701.49	2.6683	705.35	3.2338	710.79	4.0303	719.04	5.2373	761.98	11.5220
	683.26	**Set2C$_{NL}$**	709.37	3.8218	716.33	4.8409	724.83	6.0850	737.68	7.9660	791.59	**15.8551**
bsx (kN)	894.42	**Set2A$_{NL}$**	906.13	1.3097	908.76	1.6032	912.12	1.9787	917.41	2.5711	943.53	5.4914
	894.42	**Set2B$_{NL}$**	917.15	2.5410	921.99	3.0823	929.18	3.8864	939.58	5.0493	996.83	11.4506
	894.42	**Set2C$_{NL}$**	927.43	3.6903	935.86	4.6332	946.41	5.8132	963.05	7.6738	1031.48	**15.3242**

Üretilmiş tüm alt izolasyon sistemlerinin FD20 ve NFD15 yer hareketi çiftlerine maruz kalmaları durumunda elde edilen P ve e değerleri, Bölüm 3.4.1'de verilen toplam 54 adet yer hareketi çiftinin her biri için ayrı grafiksel olarak da elde edilmiştir. Ancak, burada oluşturulmuş tüm alt izolasyon sistemi setleri arasından örnek teşkil etmesi amacıyla $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ alt setleri seçilmiş ve bu alt setler ile oluşturulmuş binaların tüm FD ve NFD yer hareketi çiftlerine maruz kalması durumunda elde edilen *P* ve *e* değerlerine ait grafikler, Şekil 4.5 - Şekil 4.8' de sunulmuştur. 27 adet FD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ alt izolasyon sistemleri seti ile oluşturulan 5,000 adet sismik izolasyonlu binanın yapısal cevap parametreleri göz önünde bulundurularak elde edilen $P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$ yüzdelik değerlerine karşılık, söz konusu yüzdelik değerlerin ilgili referans sistemdeki yapısal cevap parametrelerin nominal değerlerinden sapma yüzdelerini gösteren $e_{0.80}$, $e_{0.85}$, $e_{0.90}$, $e_{0.95}$ ve $e_{1.00}$ değerleri, her bir yapısal cevap parametresi için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 4.5'de verilmiştir. Söz konusu $Set1B_{NL}$ alt seti ile oluşturulan binalar için 27 adet NFD yer hareketi çifti etkisinde elde edilen $P - e$ grafikleri ise, Şekil 4.6'da verilmiştir. Benzer şekilde, $Set2B_{NL}$ alt seti ile oluşturulmuş binalar için 27 adet FD ve 27 adet NFD yer hareketi çifti etkisinde hesaplanan yapısal cevap parametrelerine göre elde edilen $P - e$ grafikleri ise, sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.

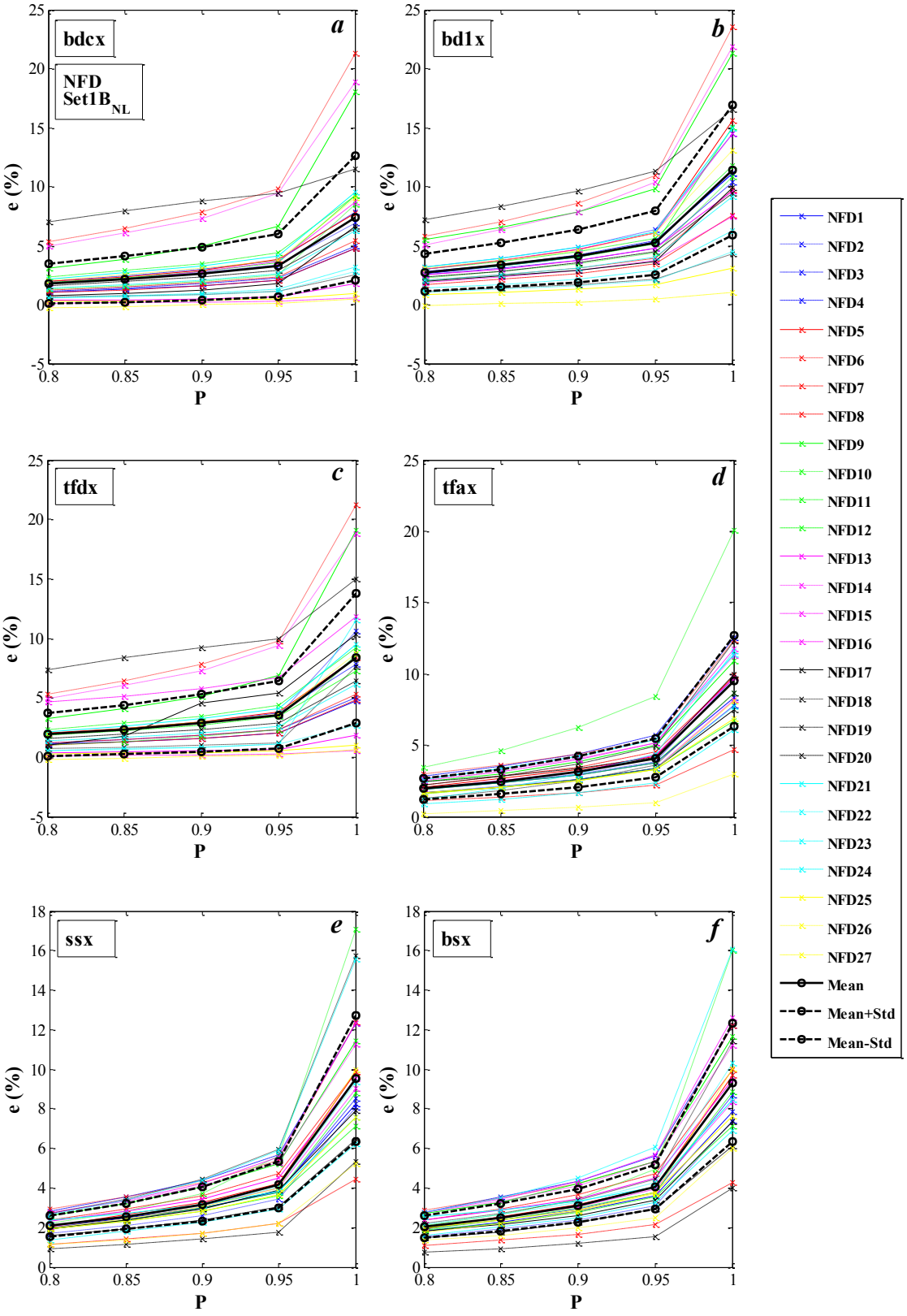
Bir yer hareketi çifti etkisindeki bir bina seti için elde edilen yapısal cevap parametrelerinin aldığı maksimum değeri gösteren $P_{1.0}$ değerlerinin, ilgili referans sistemdeki nominal değerlerinden sapma yüzdelerini gösteren $e_{1.0}$ değerleri, Şekil 4.5'den görüldüğü üzere FD yer hareketleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ alt seti için bd1x hariç olmak üzere diğer cevap parametreleri için %2~%16 aralığında değişmekte olup; bd1x için bu değerler, %2~%30 aralığında değişmektedir. Aynı yer hareketi çiftleri etkisinde $Set2B_{NL}$ alt seti için ise söz konusu $e_{1.0}$ değerleri, Şekil 4.7'den görüldüğü üzere tüm deplasman terimleri için önemli bir artış göstererek %2~%40 aralığında değerler almaktadır. İvme ile ilgili yapısal cevap parametreleri (tfax, ssx ve bsx) için ise, bir miktar artış gerçekleşmekte olup; söz konusu $e_{1.0}$ değerleri %2~%18 aralığında değişmektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.7'nin karşılaştırılmasından görüldüğü üzere, $T_{0,nom}$ değerindeki artış, ileri-yönelim etkisi içeren yakın-fay (FD) yer hareketleri etkisinde ivme ve kuvvet yapısal cevap parametrelerinde belirgin bir değişime yol açmazken, deplasman parametrelerinde önemli ölçüde artışa sebep olmaktadır. NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ alt

seti için tüm yapısal cevap parametrelerinden elde edilen $e_{1.0}$ değerleri ise Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere, aynı setin FD yer hareketleri etkisinde değişim gösterdiği aralığa (Şekil 4.5) yakın aralıklarda değerler almakta olup; bütün deplasman terimleri için maksimum $e_{1.0}$ değeri, %25'ler seviyesindedir. Yani, $T_{0,nom} = 2$ s olan binalar için yer hareketi türünün değişimi, yapısal cevap parametrelerinin sapma yüzdelerinde önemli bir etki oluşturmamaktadır. NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set2B_{NL}$ alt seti için tüm deplasman terimlerinden (bdcx, bd1x ve tfdx) elde edilen $e_{1.0}$ değerleri (Şekil 4.8), aynı yer hareketleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ alt setinde ilgili parametreler için elde edilen değerlere (Şekil 4.6) yakın değerler almakta iken; tfax, ssx ve bsx cevap parametreleri için elde edilen maksimum $e_{1.0}$ değerlerinde ise, $Set1B_{NL}$ alt setinde ilgili parametreler için elde edilen değerlere göre düşüş gerçekleşmiştir. Yani $T_{0,nom}$ değerindeki artış, ileri-yönelim etkisi içermeyen NFD yer hareketleri etkisinde deplasman terimlerinin *e* sapma yüzdelerinde belirgin bir değişime yol açmazken; özellikle tfax için olmak üzere diğer cevap parametrelerinde düşüşe sebep olmaktadır.

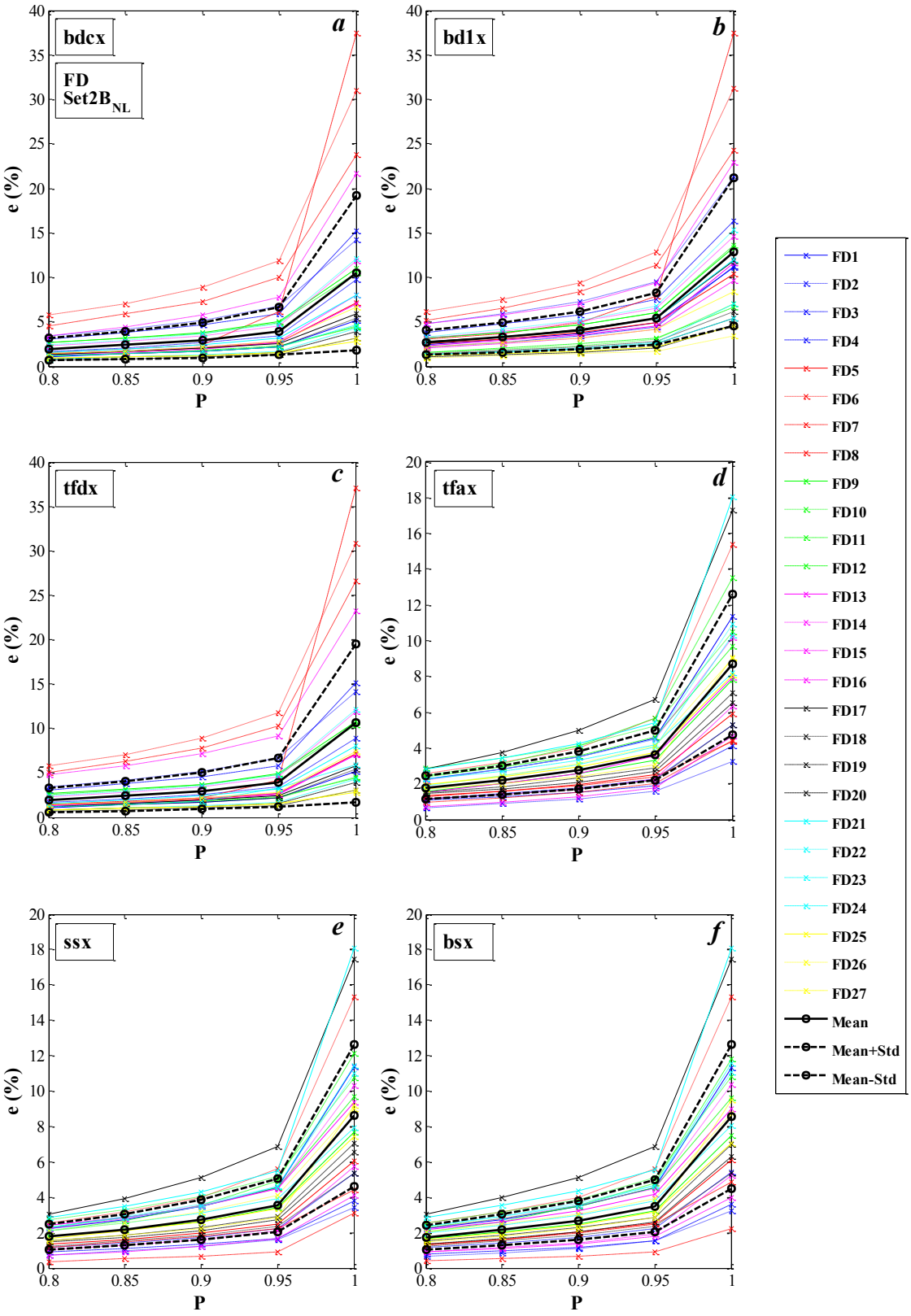
P – *e* değerlerine ait grafiklerden görüldüğü üzere, $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ alt setlerinin her ikisi için de FD ve NFD yer hareketleri için elde edilen $e_{0.80}$, $e_{0.85}$, $e_{0.90}$, $e_{0.95}$ değerleri, $e_{1.00}$ değerlerine göre nispeten birbirine daha yakın aralıkta değişen değerler almaktadır. Ancak yine de tüm seviyelerdeki e değerleri, her yer hareketi çifti için farklı değerler almaktadır ve bu değerler belirli aralıklarda değişmektedir. Bu nedenle ve farklı nominal hedef periyotlarına sahip izolasyon sistemi setlerinin bir yer hareketi türü altındaki genel davranışını görmek amacıyla, Şekil 4.5 - Şekil 4.8'den görüldüğü üzere, tüm yapısal cevap parametreleri için tüm yer hareketleri altında elde edilen *e* değerlerinin ortalamaları (e_{Mean}) ve standart sapmaları (σ_e) da hesaplanmıştır. Ortalama *e* değerleri, söz konusu şekillerde "Mean" olarak; "$e_{Mean} + \sigma_e$" değerleri "Mean+Std." olarak; "$e_{Mean} - \sigma_e$" değerleri ise "Mean-Std." olarak gösterilmiştir. Böylece FD ve NFD olmak üzere iki farklı yer hareketi türü etkisindeki söz konusu alt setteki yapısal cevap parametrelerine ait göz önünde bulundurulan tüm *P* yüzdelik değerleri için *e* sapma değerlerinin ortalama değişim aralıkları tespit edilmiştir. Bu işlem, tüm alt setler için aynı şekilde tekrarlanmıştır.



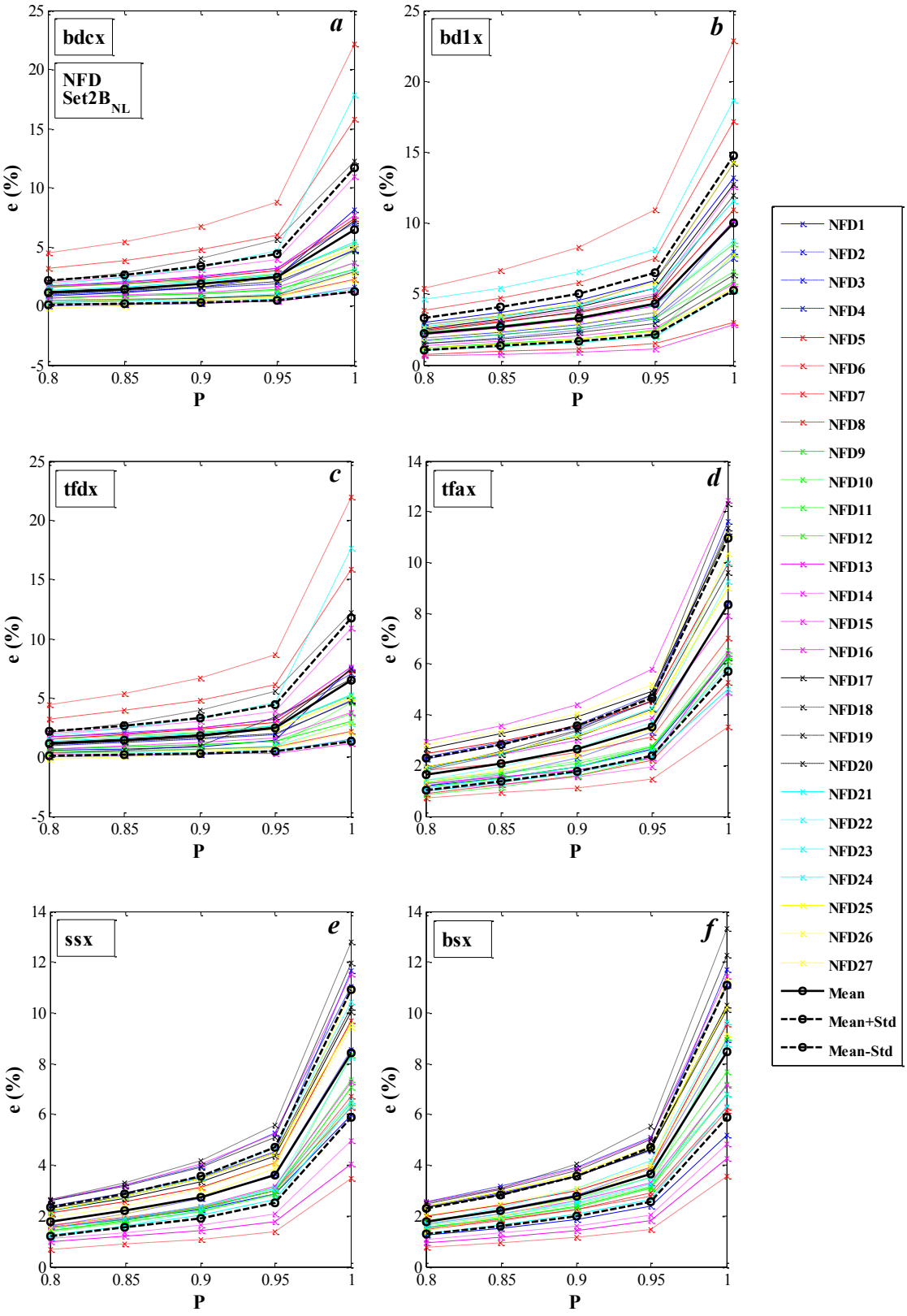
Şekil 4.5: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki Set1B$_{NL}$ ($T_{0,nom}$=2 s *c.o.v.*=%10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri.



Şekil 4.6: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki Set1B$_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 2 s *c.o.v.*= %10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri.



Şekil 4.7: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki Set2B$_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 3.5 s *c.o.v.*= %10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri.



Şekil 4.8: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set2B_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 3.5 s, *c.o.v.*= %10) sistemleri için yapısal cevap parametrelerine ait *P* (yüzdelik değer) - *e* (nominal değerden sapma) grafikleri.

Şekil 4.5 - Şekil 4.8'de görüldüğü üzere; bu şekillerde, mevcut çalışma kapsamında oluşturulmuş tüm alt izolasyon sistemi setleri arasından örnek teşkil etmesi amacıyla seçilmiş olan $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ alt setleri ile oluşturulmuş binaların tüm FD ve NFD yer hareketi çiftlerine maruz kalması durumunda elde edilen *P* ve *e* değerlerine yer verilmiştir. Söz konusu çalışma, birinci ana bölüm kapsamında oluşturulan 6 adet üretilmiş alt izolasyon sistemleri setinin her biri için her bir FD ve NFD yer hareketi etkisinde gerçekleştirilmiş olup; diğer alt izolasyon sistemi setleri için de her bir yer hareketi etkisinde Şekil 4.5 - Şekil 4.8'deki grafiklerle benzer eğilimler gösteren grafikler elde edilmiştir. Ancak, yer kısıtı sebebiyle tüm grafikler burada sunulamamıştır. Buna karşılık, tüm üretilmiş alt izolasyon sistemlerinin yapısal cevap parametreleri için FD ve NFD türü yer hareketleri etkisinde elde edilen önemli yüzdelik değerlerinin (*P*) referans sistemlerdeki nominal değerlerinden sapma yüzdelerinin (*e*) genel davranışını görebilmek amacıyla, Şekil 4.5 - Şekil 4.8'de olduğu gibi diğer üretilmiş alt izolasyon sistemi setleri için de 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik seviyeleri için aynı tür yer hareketleri altında ortalama sapma (Mean), ortalama sapma + standart sapma (Mean+Std.) ve maksimum sapma (Max.) yüzdeleri hesaplanmış ve tüm cevap parametreleri için ayrı ayrı olmak üzere Tablo 4.5 - Tablo 4.10'da sunulmuştur. Bu tablolarda görüldüğü üzere, $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$'de olduğu gibi tüm alt setler için varyasyon katsayısının (*c.o.v.*) artması halinde, *e* sapma yüzdeleri de artmaktadır. Ancak, yine söz konusu tablolardan görüldüğü üzere; tüm yapısal cevap parametrelerinin 95. yüzdelik değerlerine kadar ortalama sapma yüzdeleri birbirine çok yakın olup; bu yüzdelik değerine kadar varyasyon katsayısının artışının etkisi de azdır. Tüm yapısal cevap parametreleri için söz konusu varyasyon katsayısının artışının etkisi, 100. yüzdelik değere karşılık gelen sapma yüzdelerinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, 100. yüzdelik seviyesinde yer hareketlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi halinde elde edilen maksimum sapma yüzdeleri (Max.), *c.o.v.* = %15 olması halinde çok büyük değerlere ulaşmaktadır. Ancak, yine aynı tür yer hareketleri altında ortalama sapma değerleri (Mean) göz önünde bulundurulduğunda, tüm yüzdelik seviyelerinde sapmaların daha makul değerlere indiği görülmektedir. Yine bu tablolardan görüldüğü üzere, yer hareketi türü ve periyot farkı gözetilmeksizin aynı yüzdelik değere karşılık gelen ortalama sapma yüzdeleri de birbirlerine yakın değerler almaktadır.

Tablo 4.5: bdcx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri.

İzolasyon Sistemi Ana Seti	İzolasyon Sistemi Alt Seti	Yer Hareketi Türü	$e_{0.80}$			$e_{0.85}$			$e_{0.90}$			$e_{0.95}$			$e_{1.00}$		
			Mean	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**
Set1 ($T_{0,nom}$ = 2 s)	**Set1A$_{NL}$**	**FD**	**0.85**	1.28	1.86	**1.05**	1.57	2.26	**1.30**	1.94	2.84	**1.67**	2.48	3.62	**3.76**	5.44	8.02
	Set1B$_{NL}$		**1.79**	2.66	3.96	**2.19**	3.26	4.92	**2.66**	3.94	5.98	**3.39**	4.99	7.60	**7.31**	10.57	15.18
	Set1C$_{NL}$		**2.53**	3.75	5.56	**3.13**	4.61	6.94	**3.87**	5.72	8.76	**4.93**	7.23	10.94	**11.73**	17.89	25.78
	Set1A$_{NL}$	**NFD**	**0.85**	1.63	3.47	**1.05**	2.01	4.27	**1.31**	2.51	5.36	**1.67**	3.17	6.59	**3.68**	6.68	11.77
	Set1B$_{NL}$		**1.78**	3.44	7.02	**2.17**	4.11	7.95	**2.63**	4.88	8.74	**3.30**	5.99	9.81	**7.34**	12.65	21.34
	Set1C$_{NL}$		**2.57**	4.78	8.18	**3.10**	5.67	9.41	**3.81**	6.87	11.61	**4.82**	8.57	14.32	**10.97**	18.59	31.17
Set2 ($T_{0,nom}$ = 3.5 s)	**Set2A$_{NL}$**	**FD**	**0.91**	1.43	2.68	**1.13**	1.79	3.32	**1.41**	2.25	4.15	**1.82**	2.94	5.37	**4.72**	8.09	14.14
	Set2B$_{NL}$		**1.92**	3.17	5.83	**2.36**	3.91	7.07	**2.91**	4.86	8.89	**3.93**	6.60	11.81	**10.48**	19.19	37.45
	Set2C$_{NL}$		**3.00**	5.12	9.50	**3.81**	6.50	12.02	**4.89**	8.48	15.08	**6.50**	11.56	19.94	**17.00**	32.70	68.52
	Set2A$_{NL}$	**NFD**	**0.60**	1.10	2.20	**0.76**	1.37	2.65	**0.96**	1.73	3.31	**1.25**	2.26	4.27	**2.95**	5.29	10.34
	Set2B$_{NL}$		**1.13**	2.14	4.48	**1.43**	2.65	5.44	**1.83**	3.35	6.74	**2.43**	4.40	8.74	**6.44**	11.68	22.13
	Set2C$_{NL}$		**1.61**	3.20	6.99	**2.08**	3.99	8.57	**2.69**	5.04	10.71	**3.64**	6.67	13.80	**9.04**	16.24	32.12

Tablo 4.6: bd1x için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri.

İzolasyon Sistemi Ana Seti	İzolasyon Sistemi Alt Seti	Yer Hareketi Türü	$e_{0.80}$			$e_{0.85}$			$e_{0.90}$			$e_{0.95}$			$e_{1.00}$		
			Mean	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**
Set1 ($T_{0,nom}$ = 2 s)	**Set1A$_{NL}$**	**FD**	**1.42**	2.07	3.06	**1.75**	2.55	3.70	**2.17**	3.16	4.66	**2.79**	4.06	5.92	**6.28**	9.41	15.73
	Set1B$_{NL}$		**2.92**	4.20	6.18	**3.60**	5.18	7.57	**4.44**	6.39	9.38	**5.74**	8.31	12.22	**12.85**	18.38	27.32
	Set1C$_{NL}$		**4.29**	6.13	9.00	**5.28**	7.58	11.28	**6.52**	9.39	14.05	**8.44**	12.22	18.45	**20.26**	29.94	42.01
	Set1A$_{NL}$	**NFD**	**1.32**	2.09	3.74	**1.62**	2.54	4.49	**2.00**	3.13	5.48	**2.55**	4.00	6.97	**5.56**	8.47	13.05
	Set1B$_{NL}$		**2.73**	4.32	7.15	**3.33**	5.21	8.36	**4.10**	6.33	9.67	**5.22**	7.95	11.31	**11.42**	16.95	23.54
	Set1C$_{NL}$		**3.99**	6.22	8.82	**4.88**	7.52	10.42	**6.00**	9.13	12.65	**7.68**	11.61	16.19	**18.56**	27.79	42.51
Set2 ($T_{0,nom}$ = 3.5 s)	**Set2A$_{NL}$**	**FD**	**1.26**	1.88	2.90	**1.56**	2.33	3.59	**1.94**	2.88	4.33	**2.51**	3.74	5.65	**7.07**	11.45	17.87
	Set2B$_{NL}$		**2.64**	3.99	6.13	**3.25**	4.93	7.51	**4.04**	6.15	9.43	**5.35**	8.26	12.86	**12.85**	21.17	37.45
	Set2C$_{NL}$		**4.22**	6.56	10.31	**5.20**	8.09	12.69	**6.56**	10.32	15.88	**8.76**	14.25	21.91	**22.01**	38.19	73.50
	Set2A$_{NL}$	**NFD**	**1.11**	1.67	2.61	**1.37**	2.05	3.27	**1.70**	2.55	4.07	**2.19**	3.27	5.21	**5.27**	8.14	13.70
	Set2B$_{NL}$		**2.19**	3.30	5.41	**2.70**	4.06	6.64	**3.34**	5.02	8.26	**4.33**	6.52	10.92	**9.99**	14.75	22.90
	Set2C$_{NL}$		**3.23**	4.98	8.75	**4.00**	6.12	10.76	**4.98**	7.56	13.24	**6.45**	9.81	17.32	**15.08**	22.66	37.99

Tablo 4.7: tfdx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri.

İzolasyon Sistemi Ana Seti	İzolasyon Sistemi Alt Seti	Yer Hareketi Türü	$e_{0.80}$			$e_{0.85}$			$e_{0.90}$			$e_{0.95}$			$e_{1.00}$		
			Mean	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**
Set1 ($T_{0,nom}$ = 2 s)	**Set1A$_{NL}$**	**FD**	**0.84**	1.27	1.85	**1.04**	1.56	2.25	**1.29**	1.92	2.82	**1.65**	2.45	3.60	**3.72**	5.38	7.97
	Set1B$_{NL}$		**1.76**	2.63	3.94	**2.16**	3.22	4.89	**2.63**	3.90	5.95	**3.35**	4.94	7.56	**7.24**	10.49	15.09
	Set1C$_{NL}$		**2.49**	3.69	5.53	**3.08**	4.55	6.91	**3.82**	5.66	8.71	**4.86**	7.14	10.87	**11.53**	17.69	25.70
	Set1A$_{NL}$	**NFD**	**0.96**	1.94	3.79	**1.16**	2.30	4.47	**1.42**	2.78	5.60	**1.78**	3.43	6.90	**3.92**	7.03	11.67
	Set1B$_{NL}$		**1.90**	3.68	7.38	**2.31**	4.37	8.35	**2.87**	5.25	9.21	**3.56**	6.38	9.96	**8.33**	13.77	21.18
	Set1C$_{NL}$		**2.83**	5.19	8.84	**3.38**	6.10	9.50	**4.10**	7.28	11.51	**5.19**	9.01	14.23	**12.17**	19.91	30.88
Set2 ($T_{0,nom}$ = 3.5 s)	**Set2A$_{NL}$**	**FD**	**0.92**	1.47	2.67	**1.18**	1.94	3.31	**1.46**	2.41	4.14	**1.87**	3.10	5.35	**4.74**	8.11	14.09
	Set2B$_{NL}$		**1.98**	3.35	5.81	**2.41**	4.09	7.04	**2.97**	5.06	8.87	**3.94**	6.68	11.77	**10.60**	19.50	37.10
	Set2C$_{NL}$		**3.05**	5.30	9.46	**3.83**	6.62	11.98	**4.93**	8.50	15.06	**6.54**	11.49	19.88	**17.15**	33.07	67.94
	Set2A$_{NL}$	**NFD**	**0.60**	1.10	2.18	**0.76**	1.37	2.62	**0.96**	1.73	3.29	**1.25**	2.25	4.23	**3.03**	5.38	10.26
	Set2B$_{NL}$		**1.12**	2.14	4.45	**1.42**	2.64	5.40	**1.81**	3.34	6.69	**2.47**	4.44	8.68	**6.52**	11.69	21.96
	Set2C$_{NL}$		**1.59**	3.19	6.93	**2.06**	3.97	8.50	**2.68**	5.01	10.62	**3.67**	6.68	13.69	**9.12**	16.22	31.85

Tablo 4.8: tfax için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri.

İzolasyon Sistemi Ana Seti	İzolasyon Sistemi Alt Seti	Yer Hareketi Türü	$e_{0.80}$			$e_{0.85}$			$e_{0.90}$			$e_{0.95}$			$e_{1.00}$		
			Mean	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**
Set1 ($T_{0,nom}$ = 2 s)	**Set1A$_{NL}$**	**FD**	**0.72**	1.24	1.74	**0.91**	1.49	2.16	**1.14**	1.80	2.70	**1.48**	2.29	3.53	**3.21**	4.78	7.67
	Set1B$_{NL}$		**1.39**	2.28	3.39	**1.76**	2.80	4.28	**2.21**	3.45	5.39	**2.86**	4.38	6.82	**6.60**	9.92	15.64
	Set1C$_{NL}$		**2.02**	3.33	4.92	**2.57**	4.10	6.21	**3.23**	5.05	7.74	**4.19**	6.46	9.88	**9.38**	13.95	19.43
	Set1A$_{NL}$	**NFD**	**1.03**	1.38	1.55	**1.30**	1.71	2.02	**1.63**	2.15	2.78	**2.13**	2.79	3.84	**4.76**	6.21	9.05
	Set1B$_{NL}$		**1.94**	2.65	3.48	**2.47**	3.32	4.66	**3.13**	4.20	6.25	**4.11**	5.49	8.40	**9.47**	12.66	20.06
	Set1C$_{NL}$		**2.80**	3.94	5.67	**3.56**	4.90	7.40	**4.52**	6.16	9.60	**5.92**	7.97	12.64	**12.96**	17.48	28.10
Set2 ($T_{0,nom}$ = 3.5 s)	**Set2A$_{NL}$**	**FD**	**0.89**	1.19	1.41	**1.10**	1.47	1.77	**1.37**	1.83	2.16	**1.78**	2.39	2.80	**3.96**	5.48	6.66
	Set2B$_{NL}$		**1.77**	2.43	2.86	**2.21**	3.03	3.76	**2.75**	3.80	4.96	**3.60**	5.01	6.70	**8.69**	12.61	18.04
	Set2C$_{NL}$		**2.65**	3.70	4.73	**3.33**	4.65	6.07	**4.21**	5.88	7.86	**5.56**	7.88	10.65	**12.88**	18.79	29.04
	Set2A$_{NL}$	**NFD**	**0.95**	1.33	1.72	**1.18**	1.61	1.97	**1.46**	1.97	2.34	**1.90**	2.56	2.92	**4.16**	5.51	6.38
	Set2B$_{NL}$		**1.66**	2.29	2.93	**2.10**	2.83	3.58	**2.66**	3.55	4.40	**3.53**	4.68	5.79	**8.33**	10.94	12.43
	Set2C$_{NL}$		**2.26**	3.15	4.14	**2.95**	3.98	5.21	**3.84**	5.08	6.56	**5.18**	6.79	8.64	**11.53**	14.75	16.80

Tablo 4.9: ssx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri.

İzolasyon Sistemi Ana Seti	İzolasyon Sistemi Alt Seti	Yer Hareketi Türü	$e_{0.80}$			$e_{0.85}$			$e_{0.90}$			$e_{0.95}$			$e_{1.00}$		
			Mean	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**
Set1 ($T_{0,nom}$ = 2 s)	**Set1A$_{NL}$**	**FD**	**0.79**	1.18	1.76	**0.98**	1.46	2.17	**1.22**	1.82	2.72	**1.57**	2.33	3.54	**3.36**	4.91	7.72
	Set1B$_{NL}$		**1.55**	2.35	3.41	**1.94**	2.91	4.30	**2.40**	3.59	5.40	**3.08**	4.60	6.84	**6.89**	10.20	15.71
	Set1C$_{NL}$		**2.31**	3.56	5.10	**2.87**	4.37	6.27	**3.56**	5.38	7.79	**4.53**	6.80	9.91	**9.77**	14.28	19.62
	Set1A$_{NL}$	**NFD**	**1.07**	1.35	1.50	**1.33**	1.68	1.87	**1.65**	2.09	2.39	**2.12**	2.69	3.11	**4.58**	5.88	6.68
	Set1B$_{NL}$		**2.08**	2.62	2.96	**2.57**	3.23	3.55	**3.18**	4.04	4.45	**4.15**	5.31	5.97	**9.53**	12.74	17.10
	Set1C$_{NL}$		**3.13**	3.92	4.39	**3.88**	4.87	5.30	**4.79**	6.07	6.94	**6.18**	7.94	9.97	**12.85**	17.10	25.16
Set2 ($T_{0,nom}$ = 3.5 s)	**Set2A$_{NL}$**	**FD**	**0.89**	1.23	1.46	**1.09**	1.51	1.79	**1.35**	1.89	2.21	**1.76**	2.45	2.97	**3.88**	5.48	6.82
	Set2B$_{NL}$		**1.77**	2.48	3.03	**2.18**	3.07	3.95	**2.72**	3.84	5.14	**3.55**	5.04	6.88	**8.63**	12.66	18.08
	Set2C$_{NL}$		**2.65**	3.72	4.90	**3.32**	4.68	6.27	**4.18**	5.92	8.07	**5.53**	7.92	10.83	**12.90**	19.02	29.15
	Set2A$_{NL}$	**NFD**	**0.94**	1.25	1.48	**1.16**	1.53	1.78	**1.44**	1.89	2.22	**1.87**	2.47	2.95	**4.07**	5.30	6.22
	Set2B$_{NL}$		**1.77**	2.32	2.67	**2.20**	2.86	3.28	**2.75**	3.58	4.19	**3.61**	4.71	5.59	**8.40**	10.91	12.78
	Set2C$_{NL}$		**2.51**	3.29	3.82	**3.20**	4.15	4.84	**4.08**	5.28	6.08	**5.39**	6.98	8.06	**11.69**	15.02	16.53

Tablo 4.10: bsx için 80., 85., 90., 95. ve 100. yüzdelik değerlerine karşılık gelen sapma yüzdelerinin özel değerleri.

İzolasyon Sistemi Ana Seti	İzolasyon Sistemi Alt Seti	Yer Hareketi Türü	$e_{0.80}$			$e_{0.85}$			$e_{0.90}$			$e_{0.95}$			$e_{1.00}$		
			Mean	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**	**Mean**	**Mean+Std.**	**Max.**
Set1 ($T_{0,nom}$ = 2 s)	**Set1A$_{NL}$**	**FD**	**0.76**	1.13	1.77	**0.95**	1.40	2.18	**1.18**	1.76	2.72	**1.53**	2.28	3.54	**3.28**	4.89	7.76
	Set1B$_{NL}$		**1.50**	2.28	3.42	**1.87**	2.84	4.31	**2.33**	3.54	5.42	**2.98**	4.52	6.86	**6.70**	10.13	15.75
	Set1C$_{NL}$		**2.24**	3.49	4.98	**2.79**	4.31	6.27	**3.44**	5.30	7.79	**4.42**	6.74	9.97	**9.63**	14.20	19.75
	Set1A$_{NL}$	**NFD**	**1.04**	1.32	1.53	**1.28**	1.63	1.91	**1.59**	2.03	2.43	**2.05**	2.61	3.13	**4.40**	5.65	6.85
	Set1B$_{NL}$		**2.05**	2.60	2.91	**2.52**	3.19	3.53	**3.12**	3.96	4.51	**4.05**	5.17	6.07	**9.33**	12.33	16.07
	Set1C$_{NL}$		**3.12**	3.94	4.36	**3.84**	4.85	5.37	**4.74**	6.00	6.58	**6.10**	7.80	9.13	**12.80**	16.97	23.85
Set2 ($T_{0,nom}$ = 3.5 s)	**Set2A$_{NL}$**	**FD**	**0.87**	1.20	1.44	**1.07**	1.48	1.81	**1.33**	1.85	2.23	**1.73**	2.41	2.97	**3.82**	5.41	6.80
	Set2B$_{NL}$		**1.74**	2.44	3.03	**2.15**	3.03	3.95	**2.68**	3.80	5.14	**3.51**	5.00	6.88	**8.55**	12.64	18.08
	Set2C$_{NL}$		**2.61**	3.69	4.91	**3.28**	4.65	6.27	**4.14**	5.91	8.09	**5.47**	7.90	10.83	**12.78**	18.99	29.19
	Set2A$_{NL}$	**NFD**	**0.94**	1.21	1.32	**1.15**	1.48	1.61	**1.43**	1.84	2.02	**1.86**	2.41	2.65	**4.08**	5.28	6.06
	Set2B$_{NL}$		**1.79**	2.30	2.55	**2.21**	2.84	3.18	**2.78**	3.57	4.05	**3.64**	4.71	5.52	**8.49**	11.08	13.32
	Set2C$_{NL}$		**2.55**	3.33	3.73	**3.25**	4.19	4.74	**4.15**	5.33	5.98	**5.47**	7.06	8.37	**12.01**	15.53	16.96

FD ve NFD yer hareketleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ alt setlerinin yapısal cevap parametreleri için Şekil 4.5 - Şekil 4.8'de görüldüğü şekilde elde edilen ortalama *e* değerleri (e_{Mean}), aynı yer hareketi çiftleri etkisindeki diğer alt izolasyon sistemi setleri $Set1A_{NL}$, $Set1C_{NL}$, $Set2A_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$ için de elde edilmiştir. Tüm alt izolasyon sistemi setleri için tüm FD yer hareketi çiftleri etkisinde elde edilen X yönü yapısal cevap parametreleri için $P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$ yüzdelik değerlerine karşılık gelen e_{Mean} değerleri, Şekil 4.9'da verilmiştir. Aynı izolasyon sistemi setlerinin yine FD yer hareketi çiftleri etkisinde elde edilen Y yönü yapısal cevap parametreleri için söz konusu yüzdelik değerlerine karşılık gelen e_{Mean} değerleri ise, Şekil 4.10'da verilmiştir. Benzer şekilde, yine tüm alt izolasyon sistemi setleri için tüm NFD yer hareketi çiftleri etkisinde elde edilen X ve Y yönü yapısal cevap parametreleri için hesaplanan yüzdelik değerlerine karşılık gelen e_{Mean} değerleri, sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.

Bir yer hareketi çifti etkisindeki bir izolasyon sistemleri alt seti için her bir yapısal cevap parametreye ait olmak üzere hesaplanan bir *P*. yüzdelik değeri, ilgili yapısal cevap parametre için alt set kapsamındaki 5,000 farklı izolasyon sisteminden elde edilen değerlerinin %*P* kadarının altında kalacağı değeri göstermesi sebebiyle, söz konusu *P*. yüzdelik değerleri aynı zamanda ilgili cevap parametresi için "%*P* Güvenlik Seviyesi" olarak da isimlendirilebilir. Söz konusu yüzdelik değerleri, güvenlik seviyeleri olarak değerlendirilerek Şekil 4.9 - Şekil 4.12'deki grafiklere bakılacak olursa, aşağıdaki tespitlere ulaşmak mümkündür.

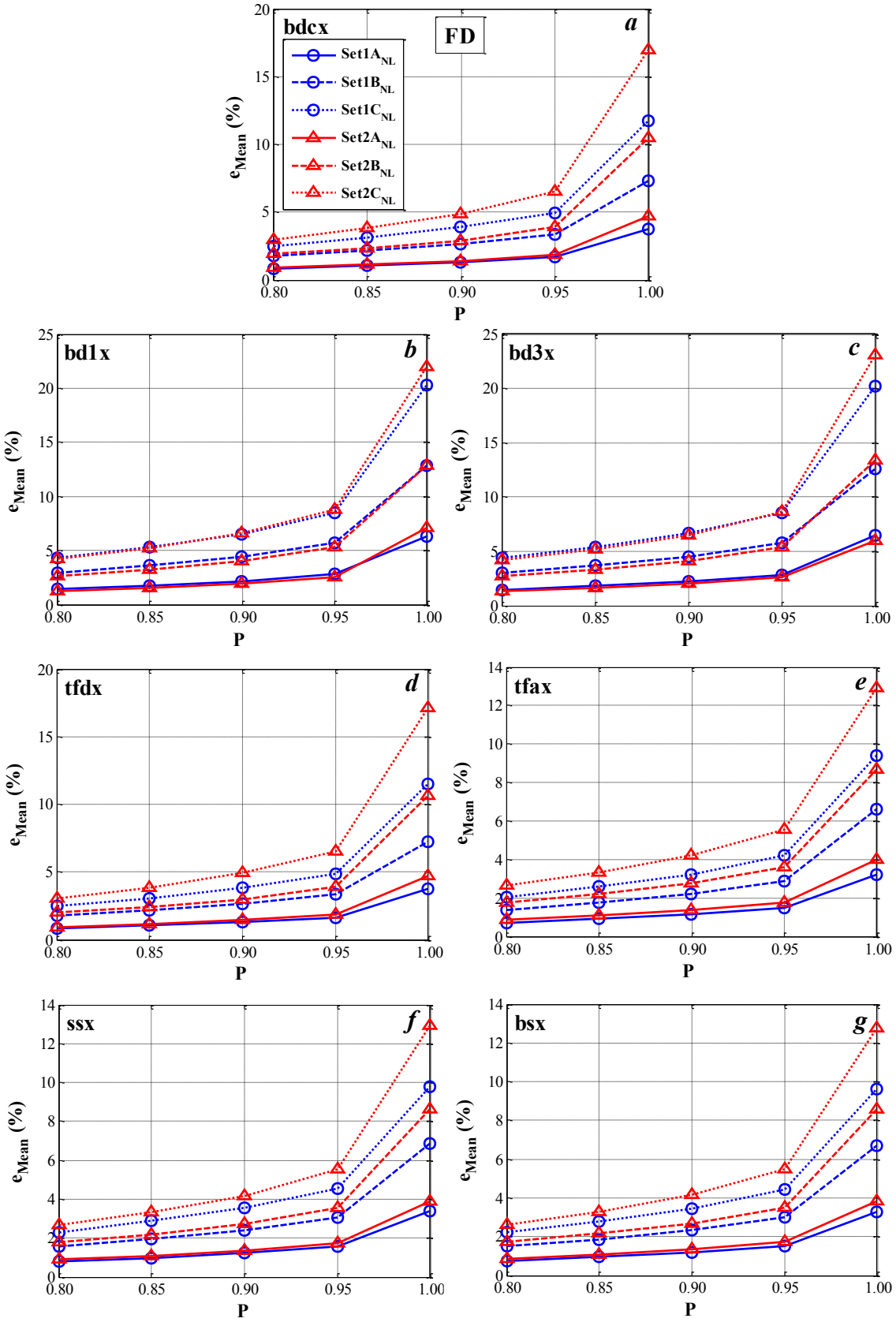
Şekil 4.9'dan görüldüğü üzere, FD yer hareketleri etkisindeki tüm alt setlere ait tüm yapısal cevap parametrelerinin X yönü bileşenleri için %95 güvenlik seviyesi durumunda *c.o.v.* değerinin %15 alınması halinde dahi, e_{Mean} sapma değerleri, %10'un altında kalmaktadır. %100 güvenlik değeri için ise, tüm yapısal cevap parametreleri için e_{Mean} ortalama sapma yüzdelerinin maksimumları ($P_{1.00}$'a karşılık gelen değerler), *c.o.v.* = %15 ve $T_{0,nom}$ = 3.5 s olması halinde ($Set2C_{NL}$) gerçekleşmekte olup; deplasman değerleri haricindeki diğer yapısal cevap parametreleri için %12~%15 mertebelerinde iken; deplasman parametreleri için söz konusu sapmalar, %20~%25 mertebelerindedir.

FD yer hareketleri etkisindeki tüm alt setlere ait tüm yapısal cevap parametrelerinin Y yönü bileşenleri için e_{Mean} değerlerinin verildiği Şekil 4.10'daki grafiklerden görüldüğü üzere; *c.o.v.* değerinin %15 alınması halinde %95 güvenlik durumu için izolatör

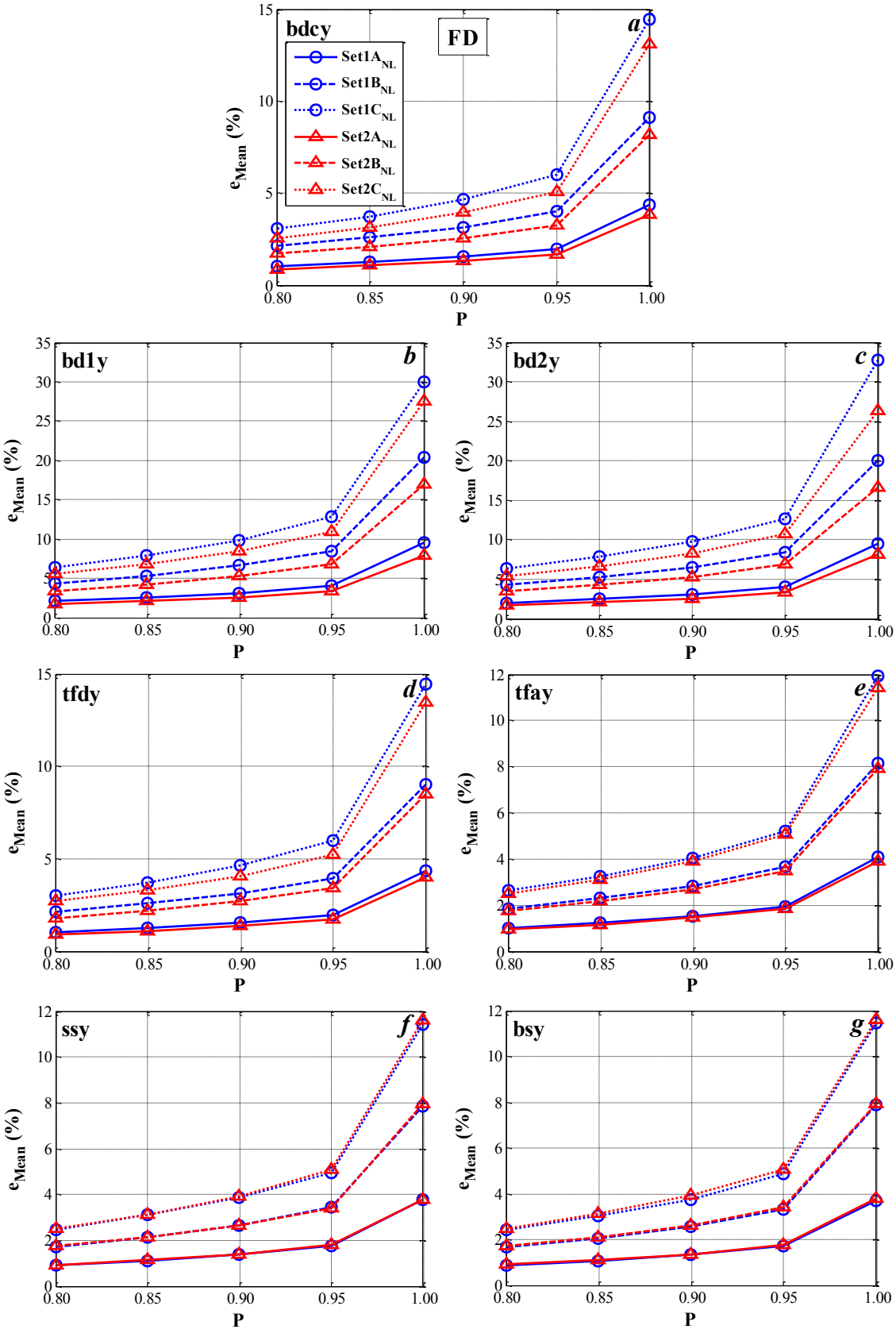
deplasmanları hariç diğer parametrelere ait e_{Mean} değerleri, X yönüne benzer şekilde %10'un altında kalmaktadır. İzolatör deplasmanlarına ait söz konusu değerlerin ise, *c.o.v.* değerinin %15 alınması halinde %95 güvenlik durumu için %15'in altında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.10 (b) ve (c)). %100 güvenlik durumu için ise; yine izolatör deplasmanları hariç diğer tüm cevap parametreleri için e_{Mean} değerlerinin maksimumları, %15'in altında değerler almaktadır. Söz konusu sapmalar, izolatör deplasmanları için ise, %30~% 35 mertebelerindedir.

Şekil 4.11'den görüldüğü üzere, tüm alt setlerin NFD yer hareketi çiftlerine maruz kalmaları halinde de tüm yapısal cevap parametrelerinin X yönü bileşenleri için %95 güvenlik durumunda *c.o.v.* değerinin %15 alınması halinde dahi, e_{Mean} değerleri %10'un altında kalmaktadır. %100 güvenlik değeri için ise, izolatör deplasman değerleri haricindeki diğer tüm yapısal cevap parametreleri için e_{Mean} değerlerinin maksimumları, $Set2C_{NL}$ için gerçekleşmekte olup; FD yer hareketi çiftleri için olduğu gibi değerleri, ortalama %12~%15 mertebelerindedir. Aynı güvenlik seviyesi için izolatör deplasman değerlerindeki sapmaların maksimumları ise, yine $Set2C_{NL}$ için gerçekleşmekte olup; değerleri, %18~%20 mertebelerindedir.

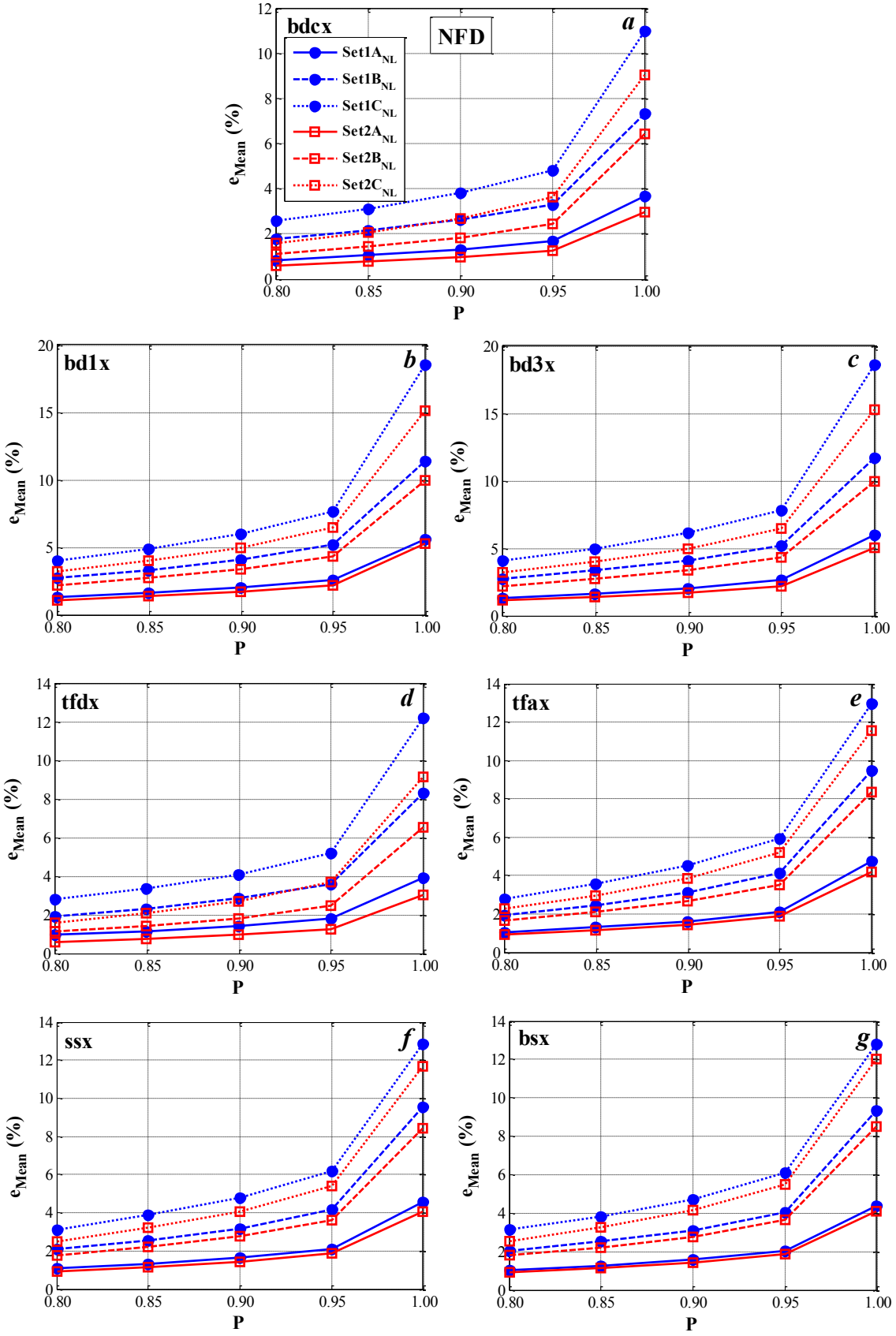
NFD yer hareketleri etkisindeki tüm alt setlere ait tüm yapısal cevap parametrelerinin Y yönü bileşenleri için e_{Mean} değerlerinin verildiği Şekil 4.12'deki grafiklerden görüldüğü üzere; %95 güvenlik durumunda *c.o.v.* değerinin %15 alınması halinde, tüm yapısal cevap parametrelere ait e_{Mean} değerlerinin %10'un altında kaldığı görülmektedir. %100 güvenlik durumu için ise; ortalama sapma yüzdelerinin maksimumları, izolatör deplasmanları hariç diğer tüm cevap parametreleri için %15'in altında değerler alırken, izolatör deplasmanları için bu sapmalar, %20~ %25 mertebelerindedir.



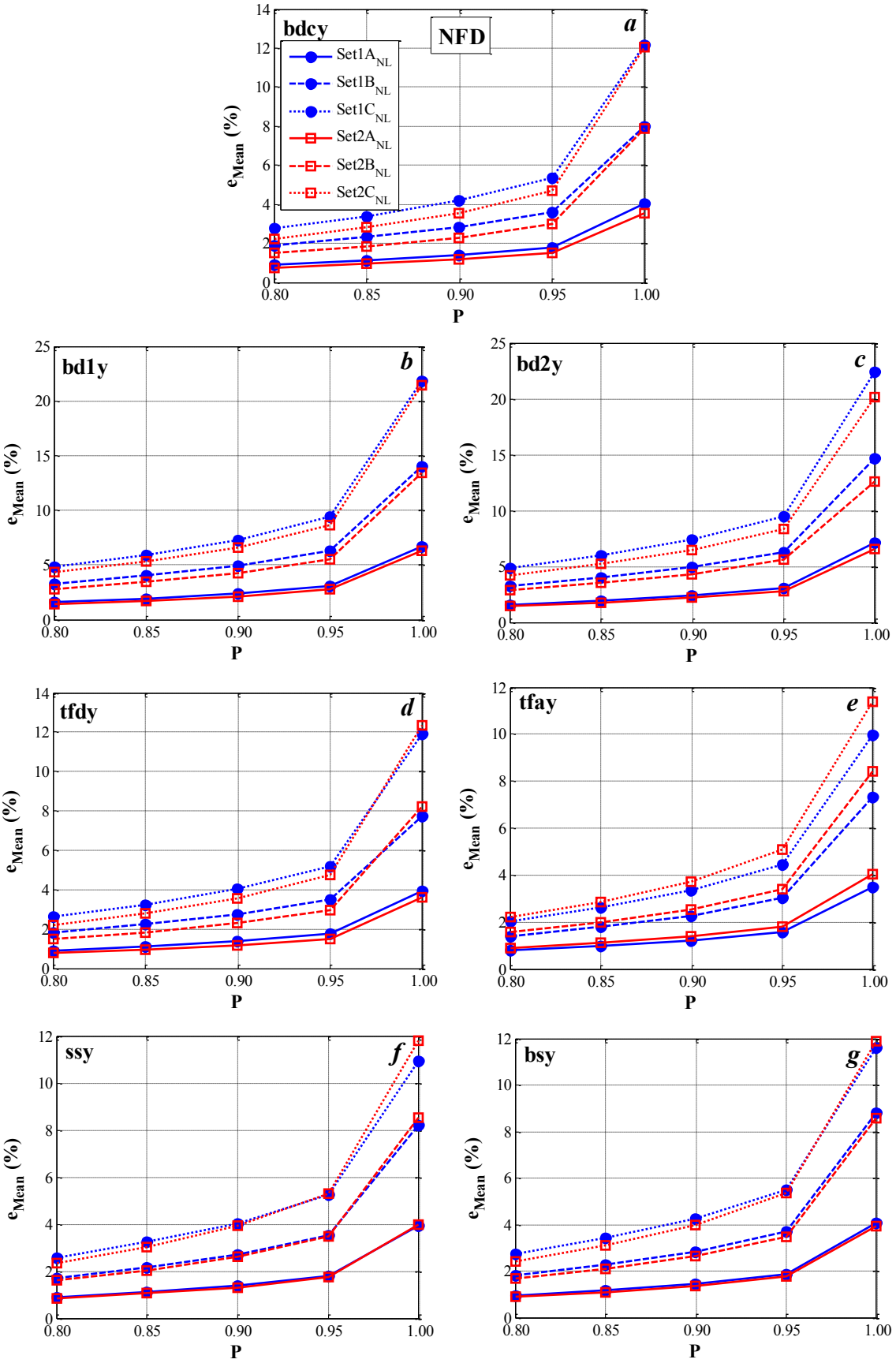
Şekil 4.9: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin P'ye göre değişimi (X yönü).



Şekil 4.10: FD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin P'ye göre değişimi (Y yönü).

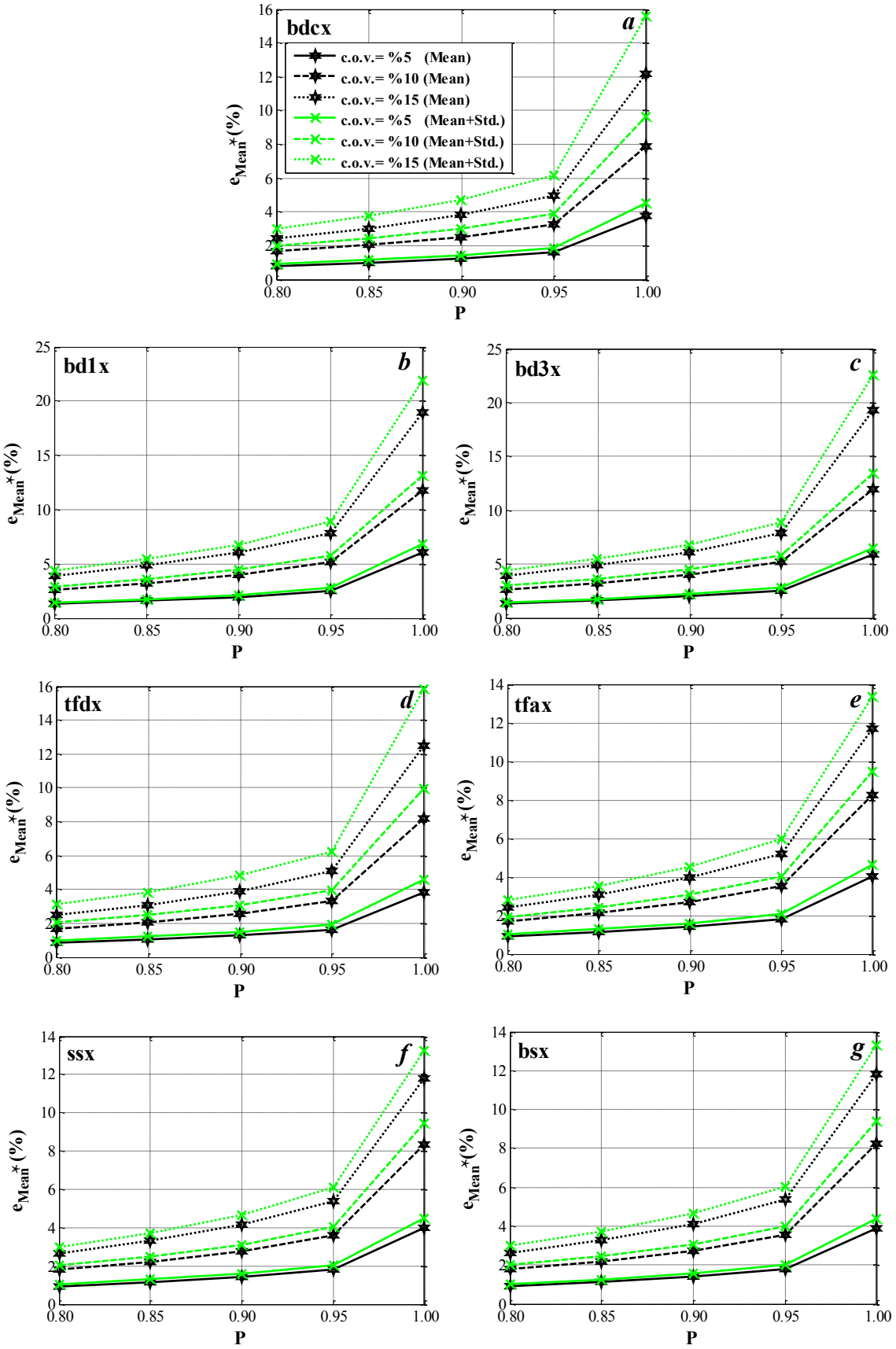


Şekil 4.11: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin P'ye göre değişimi (X yönü).

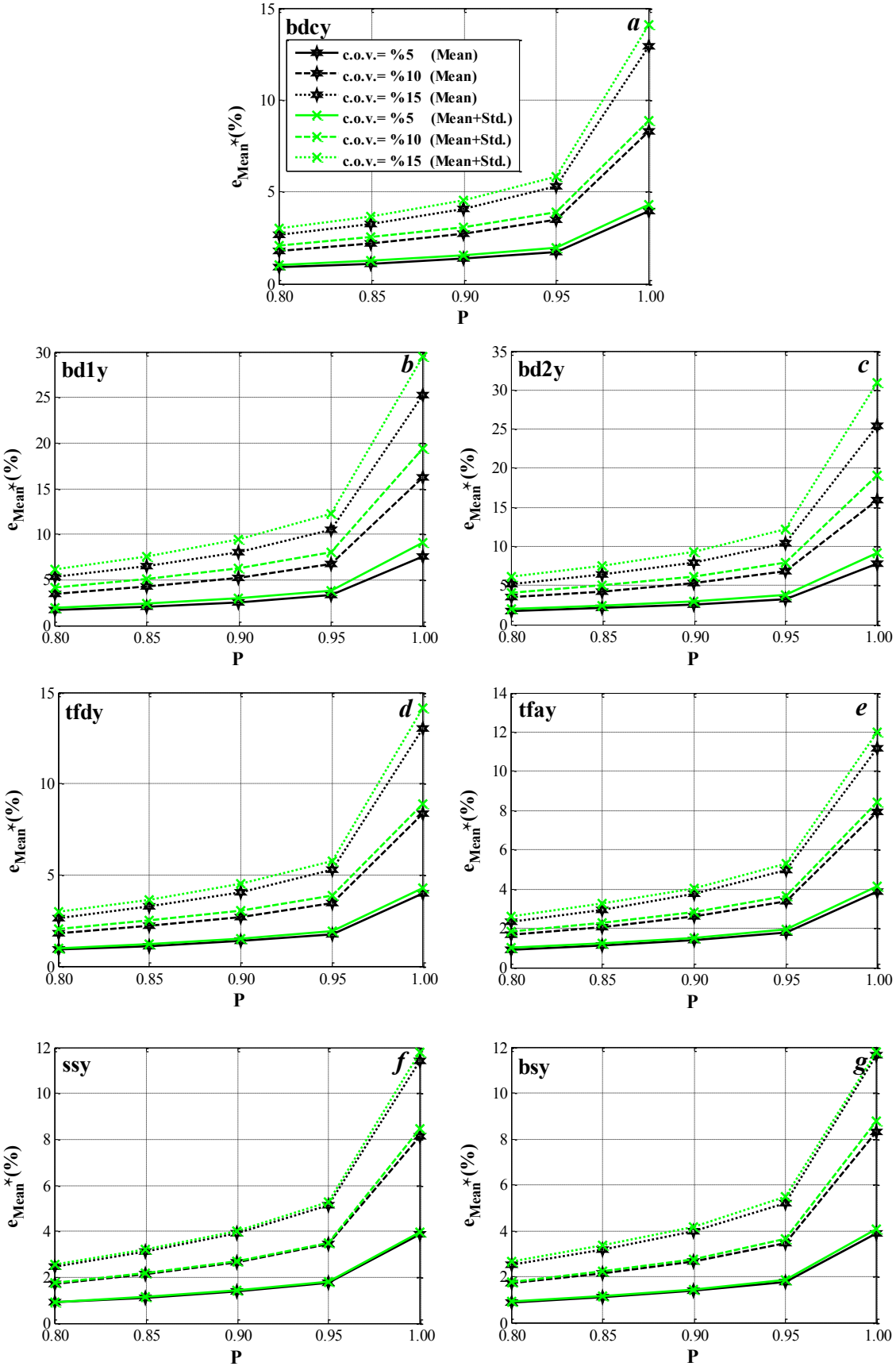


Şekil 4.12: NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm üretilmiş izolasyon sistemi setleri için e_{Mean} değerlerinin P'ye göre değişimi (Y yönü).

Şekil 4.9 – Şekil 4.12'den görüldüğü üzere, FD kodlu yer hareketi çiftleri etkisi altında elde edilen X yönü yapısal cevap parametreleri için hesaplanan e_{Mean} değerleri; 2. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemlerde ($T_{0,nom}$ = 3.5 s), 1. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemlere ($T_{0,nom}$ = 2 s) göre daha büyük değerler alırken; Y yönü yapısal cevap parametreleri için hesaplanan e_{Mean} değerlerinde bu durum tersine dönmektedir. NFD kodlu yer hareketleri etkisi altında yapısal cevap parametreleri için elde edilen e_{Mean} değerleri ise; genelde X ve Y yönü için de 2. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemlerde, 1. Grup Sistemlere göre daha düşük değerler almaktadır. Ancak her iki tür yer hareketine maruz her iki grup üretilmiş izolasyon sistemlerinde gerek yer hareketi türü, gerekse hedef periyodu farkına bağlı olarak tespit edilen bu farklılıklar, fazla olmayıp; elde edilen e_{Mean} değerleri birbirine çok yakın mertebelerdedir ve P değerlerine bağlı olarak benzer eğilimler göstermektedir. Bu nedenle ve mevcut tez birinci ana bölüm çalışmaları kapsamındaki dinamik analizler için kullanılan 54 adet yer hareketi çifti altındaki genel eğilimi görmek amacıyla; Şekil 4.9 - Şekil 4.12'deki gibi hesaplanan e_{Mean} değerlerinin ortalamaları (e_{Mean}^{*}), yer hareketi türü (FD veya NFD) ve izolasyonlu yapı nominal hedef periyodu ($T_{0,nom}$) farkı gözetilmeksizin, sadece izolasyon sistemi karakteristiklerine ait varyasyon katsayısı (*c.o.v.*) farklılığı göz önünde bulundurularak hesaplanmış; X ve Y yönü için ayrı ayrı olmak üzere, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir. Şekil 4.13'de görüldüğü üzere, cevap parametrelerinin X yönü bileşenleri için %95 güvenlik durumunda *c.o.v.* = %15 alınması halinde dahi, e_{Mean}^{*} değerleri %10'un altında kalmaktadır. %100 güvenlik değeri için ise, tüm cevap parametreleri için e_{Mean}^{*} değerlerinin maksimumları, *c.o.v.*=%15 olması halinde gerçekleşmekte olup; deplasman parametreleri haricindeki diğer parametreler için bu değerler, %12~%15 mertebelerinde iken; deplasman parametreleri için ise, %20~%25 mertebelerindedir. Şekil 4.14'deki grafiklerden görüldüğü üzere; %95 güvenlik için *c.o.v.* = %15 olması halinde, izolatör deplasmanları hariç diğer parametrelere ait sapma değerlerinin X yönüne benzer şekilde %10'un altında kaldığı görülmektedir. İzolatör deplasmanlarına ait e_{Mean}^{*} değerleri ise, Şekil 4.14 (b) ve (c)'den görüldüğü üzere, %95 güvenlik durumunda %15'den düşük değerler almaktadır. %100 güvenlik durumu için ise; yine izolatör deplasmanları hariç diğer tüm cevap parametreleri için e_{Mean}^{*} değerlerinin maksimumları, %15'in altında değerler almaktadır. İzolatör deplasmanları için hesaplanan e_{Mean}^{*} değerlerinin maksimumları ise, Şekil 4.14 (b) ve (c)'den görüldüğü üzere %30~%35 mertebelerindedir.



Şekil 4.13: Yer hareketi türü ve hedef periyodu gözetilmeksizin yapısal cevap parametrelerinin X yönü bileşenlerine ait e_{Mean} değerlerinin ortalamaları (e_{Mean}^{*}).



Şekil 4.14: Yer hareketi türü ve hedef periyodu gözetilmeksizin yapısal cevap parametrelerinin Y yönü bileşenlerine ait e_{Mean} değerlerinin ortalamaları (e_{Mean}^{*}).

4.1.3. Burulma Büyütmeleri

Tasarımı gerçekleştirilecek bir izolasyon sistemi için "tasarım deplasmanı" (D_D), 50 yılda gerçekleşme olasılığı %10 olarak tanımlanan Tasarım Depremi (Design-Basis Earthquake) seviyesinde gerçek ve rastlantısal burulmadan kaynaklanan ilave deplasmanları dikkate almadan hesaplanan yatay deplasmandır. Bir izolasyon sistemi, yapının ana yatay akslarının her birinde meydana gelen minimum yatay deprem deplasmanları olan bu tasarım deplasmanlarına göre tasarlanmalı ve inşa edilmelidir (UBC, 1997). Burulmadan kaynaklanan ilave deplasmanların dikkate alınması halinde elde edilen yatay deplasmanlar ise, "toplam tasarım deplasmanı" (D_{TD}) olarak tanımlanmaktadır. UBC (1997), FEMA 273 (1997) yönetmeliklerinde bilinen jeolojik çerçeve içerisinde beklenebilecek en kuvvetli yer hareketi ve 100 yılda bir gerçekleşme olasılığı %10 olan deprem olarak dikkate alınan Maksimum Deprem (Maximum Capable Earthquake) seviyesinde burulma etkilerinin dikkate alınmadığı ve alındığı durumlar için izolasyon sistemi deplasmanları ise, sırasıyla "maksimum deplasman" (D_M) ve "toplam maksimum deplasman" (D_{TM}) olarak tanımlanmaktadır.

UBC (1997) yönetmeliğine göre, izolasyon sisteminin elemanlarının toplam tasarım deplasmanı (D_{TD}) ve toplam maksimum deplasmanı (D_{TM}), izolasyon sisteminin yatay rijitliğinin uzaysal dağılımını ve kütle eksantrisitesinin en elverişsiz konumunu dikkate alarak hesaplanan gerçek ve rastlantısal burulmadan kaynaklanan ilave deplasmanları da kapsamalıdır. Ayrıca, yatay rijitlikleri üniform uzaysal yerleşime sahip olan bir izolasyon sisteminin elemanlarının söz konusu D_{TD} ve D_{TM} deplasmanları, sırasıyla Denklem (4.1) ve (4.2)'de hesaplanan değerlerden daha düşük alınmamalıdır. Söz konusu denklemlerde Ψ, izolasyon sisteminde bulunan izolatörlerden izolasyon katı kütle merkezine en uzak olan izolatörün söz konusu merkeze olan mesafesini; δ, deprem doğrultusuna dik doğrultudaki bina plan boyutunun %5'ine göre hesaplanan eksantrisite miktarını, L_X ve L_Y ise binanın sırasıyla X ve Y eksenleri doğrultusundaki boyutlarını göstermekte olup; bu denklemlerde tasarım ve maksimum deplasmanlarına eklenen kısımlar, rastlantısal olarak ortaya çıkan izolasyon sistemi elemanları rijitliklerindeki farklılıklar ve kütle merkezi eksantrisitesine bağlı olarak hesaplanan burulmadan kaynaklanan ilave deplasmanları göstermektedir. Dolayısıyla, söz konusu denklemlerde köşeli parantez içerisindeki ifadeler, D_D ve D_M deplasmanları için "burulma büyütmelerini" göstermekte olup; mevcut çalışmada Denklem (4.3)'deki gibi A_{UBC} değişkeni ile ifade edilmişlerdir.

$$D_{TD} = D_D + D_D\left(\Psi\frac{12\delta}{{L_X}^2+{L_Y}^2}\right) \Rightarrow D_{TD} = D_D\left[1+\Psi\frac{12\delta}{{L_X}^2+{L_Y}^2}\right] \geq (1.10)D_D \qquad (4.1)$$

$$D_{TM} = D_M + D_M\left(\Psi\frac{12\delta}{{L_X}^2+{L_Y}^2}\right) \Rightarrow D_{TM} = D_M\left[1+\Psi\frac{12\delta}{{L_X}^2+{L_Y}^2}\right] \geq (1.10)D_M \qquad (4.2)$$

$$\mathrm{A}_{UBC} = 1+\Psi\frac{12\delta}{{L_X}^2+{L_Y}^2} \qquad (4.3)$$

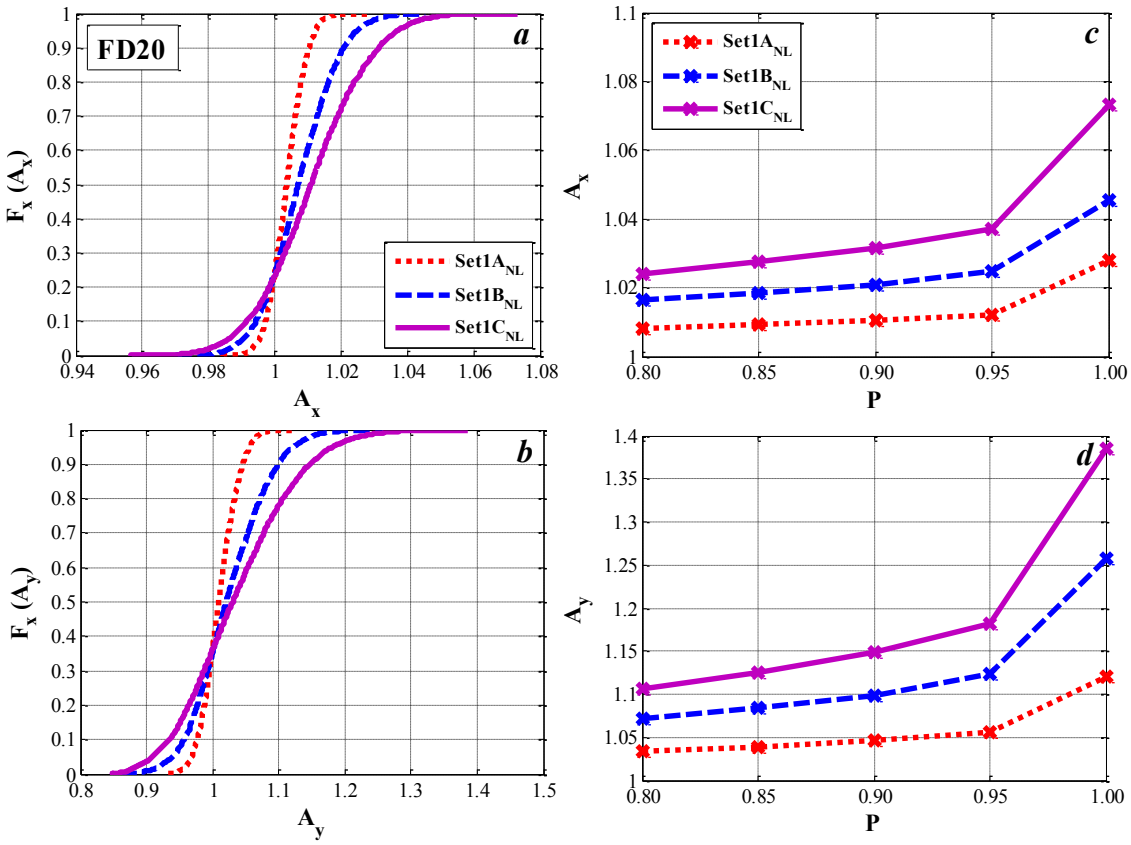
UBC (1997) yönetmeliğine göre ayrıca, söz konusu D_{TD} ve D_{TM} deplasmanları, sırasıyla D_D ve D_M deplasmanlarının 1.10 katından daha düşük alınamamaktadır. Dolayısıyla, bir izolasyon sistemindeki elemanlara ait deplasmanların burulma büyütmeleri için iki alt limit ortaya çıkmaktadır. Denklem (4.1) ve (4.2)'de parantez içinde görüldüğü gibi her zaman 1.10'dur. İkincisi ise, Denklem (4.3)'e göre hesaplanan değerdir. Mevcut tez çalışmasında, analizi gerçekleştirilen sismik izolasyonlu yapılar için L_X = 21 m, L_Y = 21 m, Ψ = 21 / 2 = 10.5 m ve δ = 0.05 × 21 = 1.05 m olması sebebiyle, A_{UBC} = 1.15 olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışmada, UBC (1997) yönetmeliğinden tespit edilen söz konusu alt limitler, sırasıyla "UBC limit$_1$" ve "UBC limit$_2$" olarak isimlendirilmiştir ve burada sırasıyla 1.10 ve 1.15 değerlerinin almaktadırlar.

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda, mevcut tez birinci ana bölüm çalışmaları kapsamında dinamik analizleri gerçekleştirilen binalar için burulma büyütmeleri değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu değerlendirme, çeşitli nedenlerle (Bölüm 2.3.1) izolatör karakteristik parametrelerinde meydana gelebilecek olası değişiklikleri ve dolayısıyla söz konusu değişikliklerin sebep olabileceği burulma etkilerini dikkate alarak üretilen tüm izolasyon sistemleriyle oluşturulan binalardaki pik izolatör deplasmanlarının (bdix), ilgili referans izolasyonlu bina pik izolatör deplasmanlarından ne kadar farklı olabileceğini ortaya koymak; ve yukarıda burulma büyütmeleri için belirtilen limitlerin aşılıp aşılmadığını kontrol etmek için yapılmıştır. Bu doğrultuda, birinci ana bölüm kapsamında üretilen tüm izolasyon sistemleriyle oluşturulan binaların tüm depremler etkisindeki dinamik analiz sonuçları kullanılarak; her bir üretilmiş izolasyon sistemi alt seti ile oluşturulan 5,000 izolasyonlu bina için her bir yer hareketi çifti etkisinde elde edilen pik izolatör deplasmanlarının maksimumları ($\mathrm{bdix}_{\max}$) hesaplanmıştır. Çalışmada ayrıca, Bölüm 3.5.1'de tarif edilen iki referans izolasyonlu binanın tüm yer hareketi çiftleri etkisindeki pik izolatör deplasmanları (bdix) hesaplanmıştır. Üretilmiş 6 adet alt

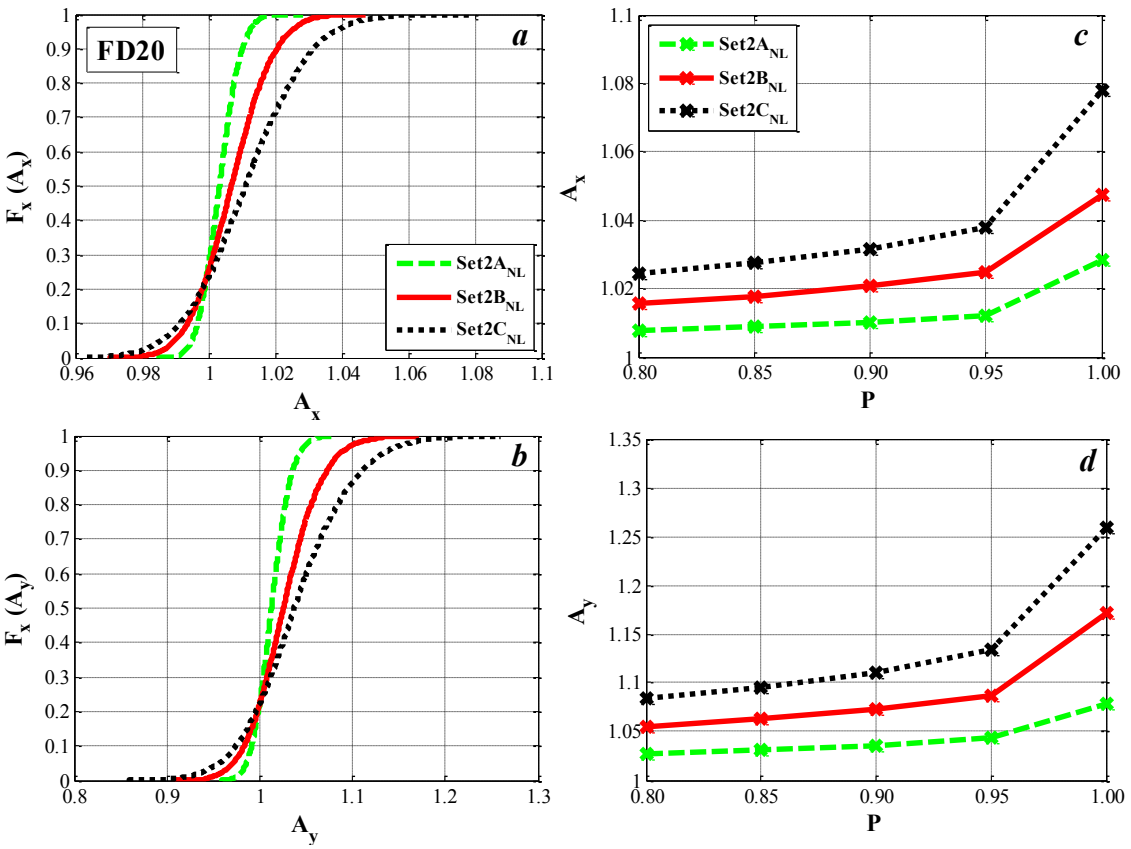
izolasyon sisteminin her biri için elde edilen 5,000 adet $bdix_{max}$ değerleri, ilgili referans izolasyonlu bina bdix değerlerine bölünerek, her set için her bir yer hareketi çifti altında 5,000 adet burulma büyütme katsayısı (A) hesaplamıştır. Bu işlemler, tüm alt setlerle oluşturulmuş binalar için tüm yer hareketi göz önünde bulundurularak yapılmış olup; izolatör deplasmanlarının X ve Y yönlerinde farklı olması sebebiyle; söz konusu burulma büyütme katsayıları, her durum için X ve Y yönlerinde ayrı ayrı hesaplanmıştır ve sırasıyla A_x ve A_y olarak isimlendirilmiştir.

FD kodlu yer hareketi çiftleri arasından örnek teşkil etmesi amacıyla seçilmiş olan FD20 yer hareketi çifti etkisindeki 1. Grup Üretilmiş Sistem Setleri ($Set1_{NL}$) ile oluşturulan binalar için elde edilen A_x ve A_y katsayılarına ait CDF grafikleri, sırasıyla Şekil 4.15 (a) ve (b)'de verilmiştir. Bu grafiklere göre, $Set1_{NL}$ dahilindeki üç alt set için elde edilen $P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$ yüzdelik değerleri ise, yine X ve Y yönü için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 4.15 (c) ve (d)'de verilmiştir. Aynı yer hareketi çifti etkisindeki 2. Grup Üretilmiş Sistem Setleri ($Set2_{NL}$) ile oluşturulan binalar için elde edilen A_x ve A_y katsayılarına ait CDF grafikleri ile bu katsayıların $P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$ yüzdelik değerlerine ait grafikler ise, Şekil 4.16'da verilmiştir.

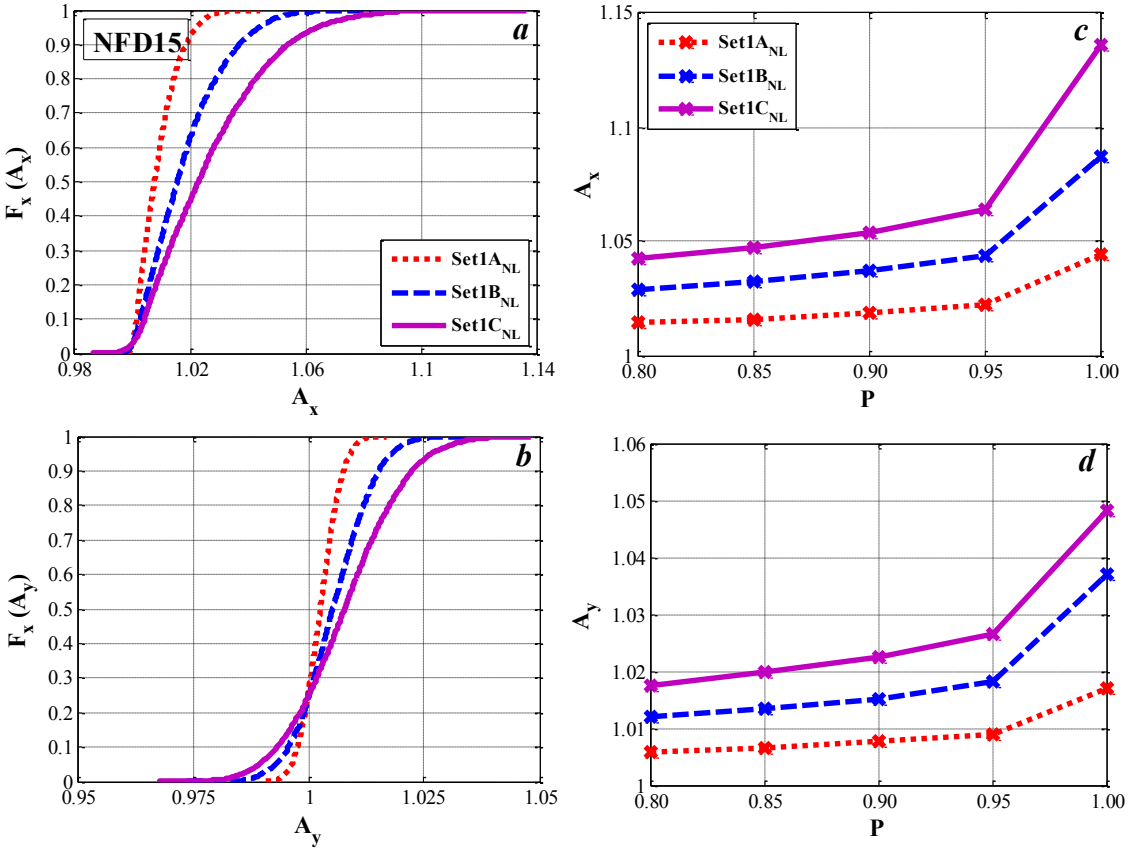
Benzer şekilde, NFD kodlu yer hareketi çiftleri arasından örnek teşkil etmesi amacıyla seçilmiş olan NFD15 yer hareketi çifti etkisindeki 1. ve 2. Grup Üretilmiş Sistem Setleri ($Set1_{NL}$ ve $Set2_{NL}$) ile oluşturulan binalar için elde edilen A_x ve A_y katsayılarına ait CDF grafikleri ile bu katsayıların $P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$ yüzdelik değerlerine ait grafikler ise, sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.



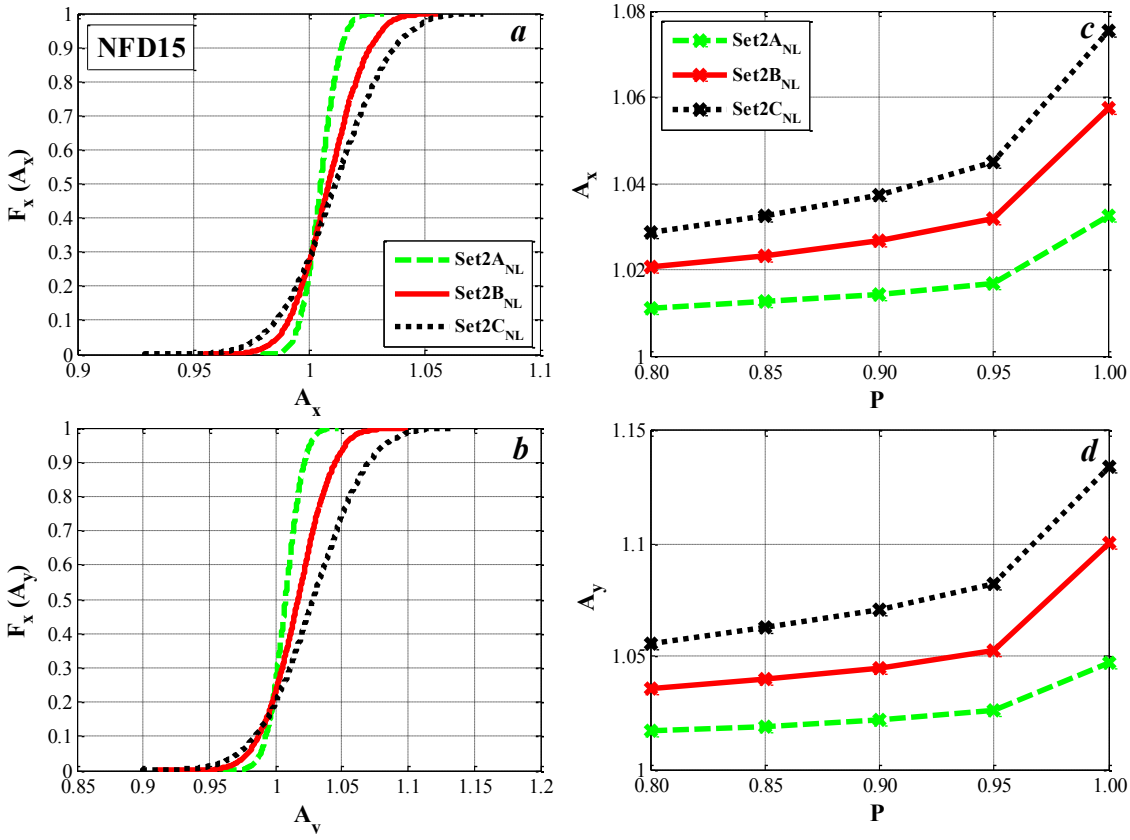
Şekil 4.15: FD20 etkisindeki $Set1_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri.



Şekil 4.16: FD20 etkisindeki $Set2_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri.



Şekil 4.17: NFD15 etkisindeki $Set1_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri.



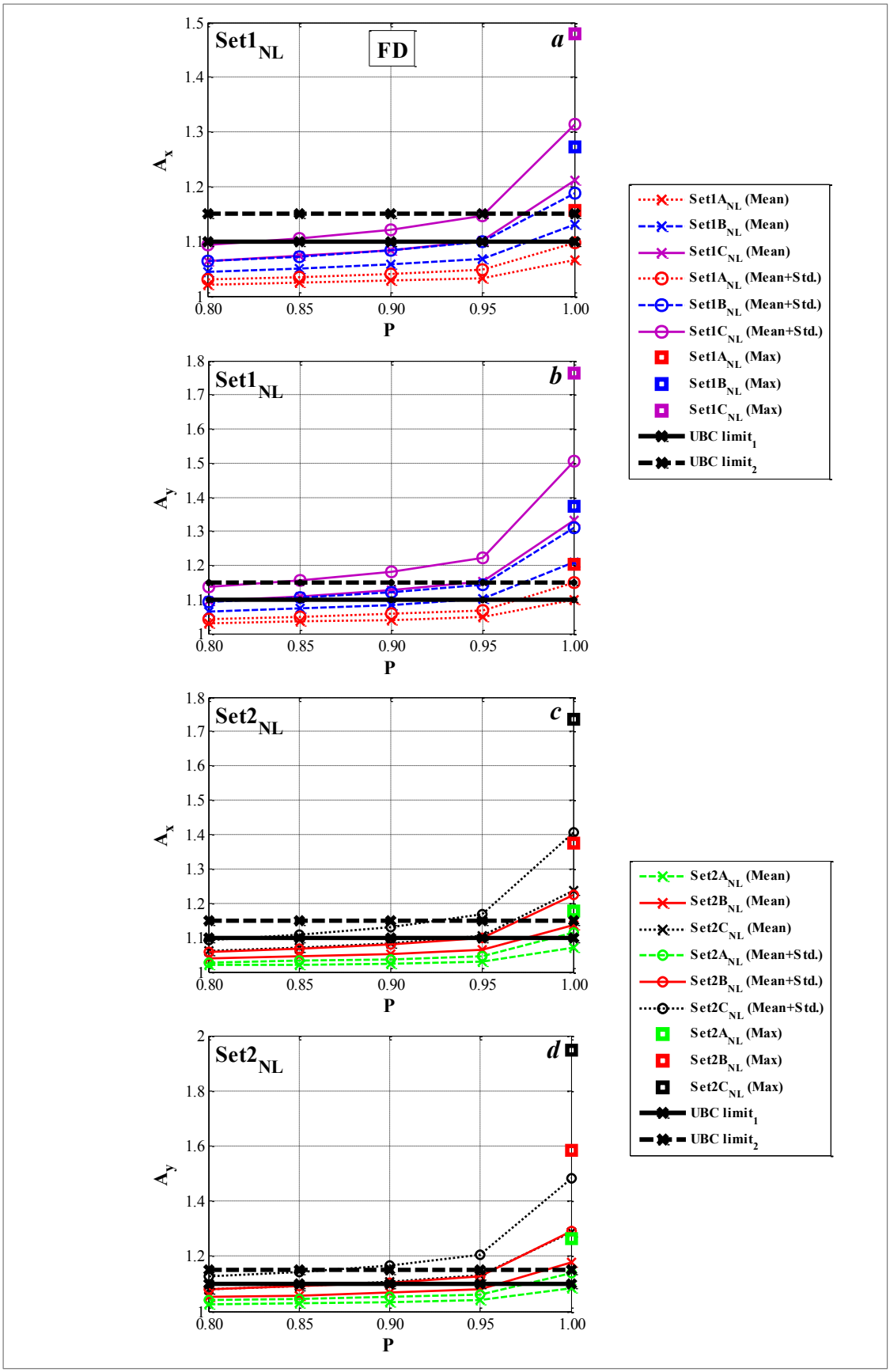
Şekil 4.18: NFD15 etkisindeki $Set2_{NL}$ için burulma büyütme katsayıları ve önemli *P* değerleri.

Deprem hareketi türüne göre burulma büyütmeleri (A_x ve A_y) katsayılarının değişimini görmek amacıyla, tüm alt izolasyon sistemi setleri için tüm FD ve NFD kodlu yer hareketi çiftleri etkisinde elde edilen $P_{0.80}$, $P_{0.85}$, $P_{0.90}$, $P_{0.95}$ ve $P_{1.00}$ yüzdelik değerlerinin ayrı ayrı ortalamaları hesaplanmıştır. 1. Grup İzolasyon Sistemi Setleri ($Set1_{NL}$) ile oluşturulan binaların FD kodlu yer hareketi çiftleri etkisinde hesaplanan P yüzdelik değerlerinin ortalamaları, X ve Y yönü için sırasıyla Şekil 4.19 (a) ve (b)'de verilmiştir. 2. Grup İzolasyon Sistemi Setleri ($Set2_{NL}$) ile oluşturulan binaların yine FD kodlu yer hareketi çiftleri etkisinde hesaplanan P yüzdelik değerlerinin ortalamaları ise, X ve Y yönü için sırasıyla Şekil 4.19 (c) ve (d)'de verilmiştir. Benzer şekilde NFD kodlu yer hareketi çiftleri etkisindeki 1. Grup İzolasyon Sistemi Setleri ile oluşturulan binaların yüzdelik değerlerinin ortalamaları, X ve Y yönü için sırasıyla Şekil 4.20 (a) ve (b)'de; 2. Grup İzolasyon Sistemi Setleri ile oluşturulan binaların yüzdelik değerlerinin ortalamaları ise, X ve Y yönü için sırasıyla Şekil 4.20 (c) ve (d)'de verilmiştir. Söz konusu burulma büyütmeleri ortalamalarının standart sapmaları (σ) da hesaplanmış, her set için elde edilen ortalama büyütme katsayılarının pozitif yönde 1σ sapması halinde elde edilen değerler ise, aynı grafikler üzerinde ilgili setler için "Mean+Std." lejantları ile gösterilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca, burulma büyütme katsayıları için yukarıda belirtildiği şekilde tespit edilen UBC $limit_1$ (1.10 limiti) ve UBC $limit_2$ (1.15 limiti) sınırları da gösterilmiştir.

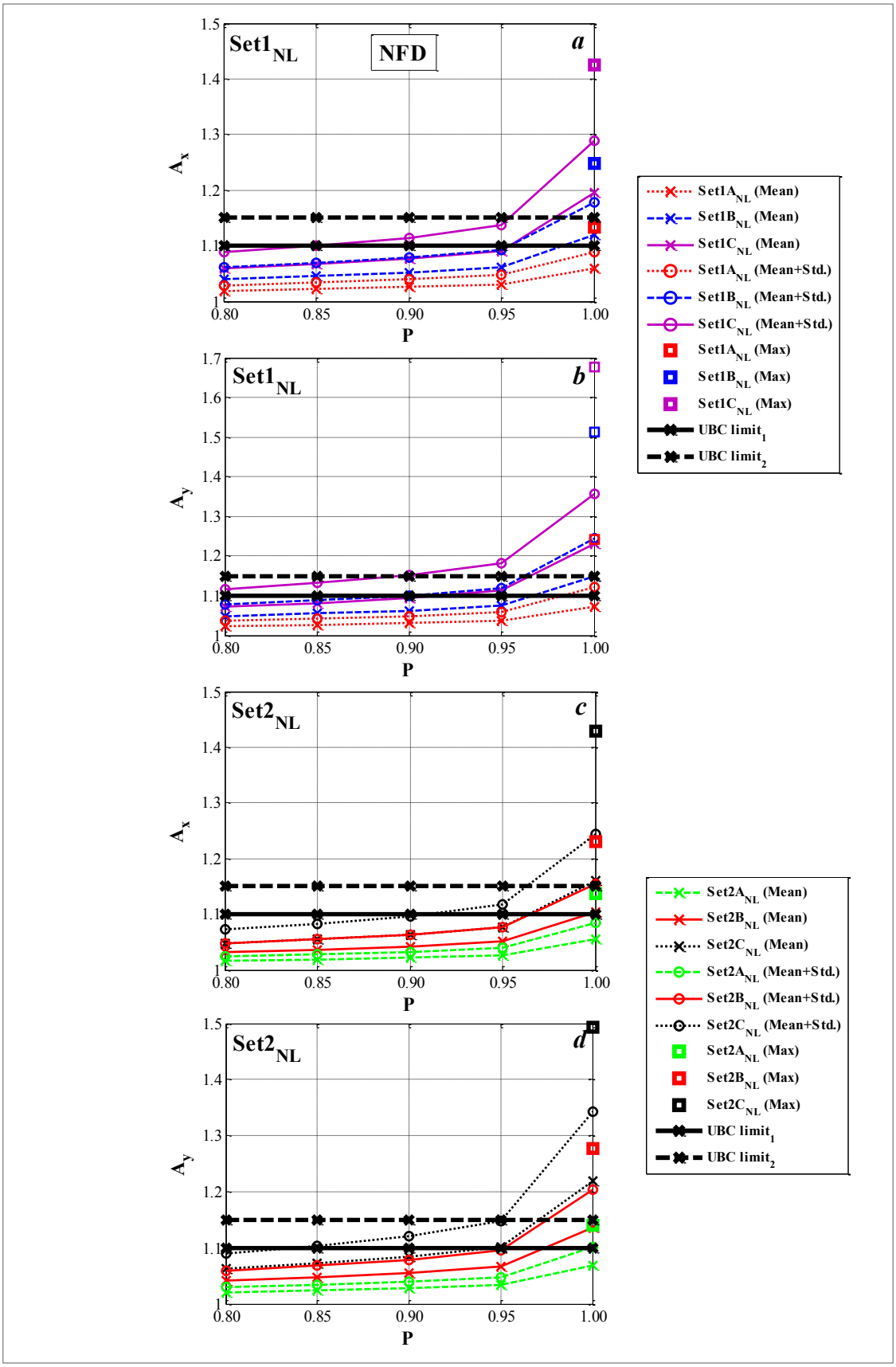
Şekil 4.20'de NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki tüm alt setler için her iki yönde hesaplanan burulma büyütmelerinin ortalamaları, FD yer hareketi çiftleri etkisinde elde edilen ortalamalara yakın değerlerde çıkmaktadır ve aynı güvenlik seviyeleri için benzer eğilimlerde elde edilmiştir. Söz konusu grafiklerden görüldüğü üzere, söz konusu ortalama burulma büyütme katsayıları, *c.o.v.* değerinin artışıyla artışlar göstermekte; izolasyon sistemleri nominal hedef periyotları ve yer hareketi türüne göre çok büyük farklılıklar göstermemektedir. Bu nedenle, tüm yer hareketlerine maruz bırakılan üretilmiş izolasyon sistemi setleri için elde edilen ortalama katsayıların, yer hareketi türü ve hedef periyodu farkı gözetilmeksizin sadece *c.o.v.* değerlerinin farklı olması durumunda davranışlarını görmek amacıyla; Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de farklı *c.o.v.*, farklı $T_{0,nom}$ ve farklı yer hareketi türü için ayrı ayrı hesaplanan ortalama burulma büyütmelerinin sadece *c.o.v.* değerleri farklı olmak üzere ortalamaları hesaplanmış; ve bu ortalamalara ait grafikler X ve Y yönü için sırasıyla Şekil 4.21 (a) ve (b)'de verilmiştir.

Şekil 4.21'de görüldüğü üzere, yer hareketi türü ve hedef periyodu farkı gözetilmeksizin sadece *c.o.v.* değerlerine bağlı olarak elde edilen ortalama büyütme katsayıları, göz önünde bulundurulan tüm güvenlik seviyeleri için *c.o.v.* değerinin artması ile artmakta ve aynı güvenlik seviyeleri için X ve Y yönlerinde yakın değerler almaktadırlar. Ayrıca;

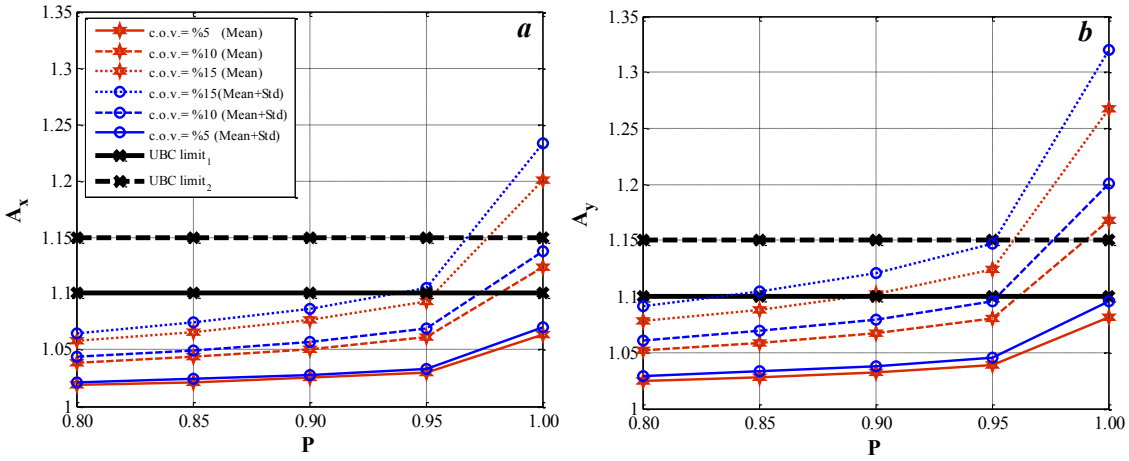
- %90 güvenlik seviyesine kadar tüm c.o.v değerleri için X ve Y yönlerinin her ikisinde de her iki limit de sağlanmaktadır. Ancak standart sapmaların da göz önünde bulundurulması durumunda, X yönünde yine %90 güvenlik seviyesine kadar her iki limit de sağlanırken; Y yönünde %85 güvenlik seviyesinde 1.10 limiti (UBC $limit_1$) aşılmaktadır.
- %95 güvenlik seviyesinde X yönünde yine tüm sistemler için her iki limit de sağlanırken, standart sapmaların da göz önünde bulundurulması durumunda, *c.o.v.* = %15 için 1.10 limiti aşılmaktadır. Diğer taraftan, standart sapmalar göz önüne alınsa da alınmasa da Y yönü için *c.o.v.* = %15 olması durumunda, 1.10 limiti aşılırken; *c.o.v.* = %5 ve *c.o.v.* = %10 olan sistemlerde bu limit aşılmamaktadır.
- %100 güvenlik seviyesinde ise, *c.o.v.* = %5 olması durumunda standart sapmalar göz önünde bulundurulsa da her iki yönde de 1.10 limiti sağlanmakta; *c.o.v.* = %10 olması durumunda standart sapmalar göz önünde bulundurulmasa da X yönünde 1.10 limiti aşılırken, Y yönünde ise her iki limit de aşılmaktadır. Aynı güvenlik seviyesinde, *c.o.v.* = %15 olan sistemler için X ve Y yönlerinde hesaplanan ortalama büyütme katsayılarının her ikisi de 1.15 limitini (UBC $limit_1$) aşmaktadır.



Şekil 4.19: Tüm FD yer hareketi etkisinde tüm alt izolasyon sistemi setleri için hesaplanan burulma büyütmelerinin önemli yüzdelik değerlerinin ortalamaları; (a) ve (b): $Set1_{NL}$, (c) ve (d): $Set2_{NL}$.



Şekil 4.20: Tüm NFD yer hareketi etkisinde tüm alt izolasyon sistemi setleri için hesaplanan burulma büyütmelerinin önemli yüzdelik değerlerinin ortalamaları; (a) ve (b): $Set1_{NL}$, (c) ve (d): $Set2_{NL}$.



Şekil 4.21: Yer hareketi türü ve hedef periyodu farkı gözetilmeksizin önemli yüzdelik değerleri için hesaplanan ortalama burulma büyütmeleri; (a) A_x, (b) A_y.

4.1.4. Güvenilirlik Analizleri

Mevcut tez çalışmasının birinci ana bölümü kapsamında gerçekleştirilen bu kısımda, Tablo 3.7'de belirtilen her bir alt izolasyon sistemi setleri ($Set1A_{NL}$, $Set1B_{NL}$, $Set1C_{NL}$, $Set2A_{NL}$, $Set2B_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$) dahilinde üretilen her bir izolasyon sisteminin Bölüm 3.4.1'de belirtilen tüm yer hareketi çiftlerine maruz kalması halinde gerçekleştirilen dinamik analizlerinden elde edilen en üst kat kütle merkezi pik toplam ivmeleri (tfax), pik izolatör deplasmanlarının maksimumları ($bdix_{max}$) ve pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumlarına ($drix_{max}$) göre güvenilirlik analizleri yapılmıştır.

Bu analizler kapsamında öncelikle, söz konusu tfax, $bdix_{max}$ ve $drix_{max}$ parametreleri için "limit adımları" belirlenmiştir. tfax için limit adımları ($Limit_a$), 0.025g~1.000g aralığında 0.025g artımlarla; $bdix_{max}$ için limit adımları ($Limit_d$), 0.025m~1.000 m aralığında 0.025 m artımlarla ve $drix_{max}$ için limit adımları ($Limit_{dr}$), 5×10^{-5}~1.5×10^{-3} aralığında 5×10^{-5} artımlarla belirlenmiştir. Söz konusu limit adımlarının üst sınırları, tüm dinamik analizler neticesinde elde edilen maksimum değerleri kapsayacak şekilde belirlenmiştir.

Bir alt izolasyon sistemi setinin bir yer hareketi çiftine maruz kalması durumunda, bir cevap parametresi için elde edilen N_{MCA} adet değerden ilgili cevap parametresi için belirlenen bir limit adımını aşan değerlerin yüzdesi, yani göz önünde bulundurulan setin söz konusu limit adımına göre başarısızlık olasılığı (P_f – Probability of failure), Bölüm 3.1.5'de tarif edildiği gibi hesaplanmıştır. Bu işlemler, tfax, $bdix_{max}$ ve $drix_{max}$ parametreleri için tüm yer hareketi çiftleri etkisinde her bir alt setten elde edilen değerlere

göre, ilgili cevap parametresinin tüm limit adımlarında aynı şekilde tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, Set1A_{NL}, Set1B_{NL}, Set1C_{NL}, Set2A_{NL}, Set2B_{NL} ve Set2C_{NL} ile oluşturulmuş 6 bina setinin 54 yer hareketi çifti etkisinde elde edilen tfax, $bdix_{max}$ ve $drix_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Söz konusu setlerin tfax parametresine göre elde edilen P_f değerleri Bölüm 4.1.4.1'de; $bdix_{max}$ parametresine göre elde edilen P_f değerleri Bölüm 4.1.4.2'de ve $drix_{max}$ parametresine göre elde edilen P_f değerleri ise, Bölüm 4.1.4.3'de sunulmuştur. Bu bölümlerin her birinde, her bir yapısal cevap parametresi için elde edilen P_f değerleri, (i) limit değerlerinin aşılma olasılığına, (ii) binalara X yönünde uygulanan yer hareketi bileşenlerinin faya olan uzaklık mesafelerine (r) ve (iii) PGA/PGV oranlarına bağlı olmak üzere 3 farklı açıdan değerlendirilmiştir.

4.1.4.1. Pik En Üst Kat Kütle Merkezi Toplam İvmeleri İçin

Bu bölümde, her bir yer hareketi çifti etkisindeki her bir üretilmiş alt izolasyon sistemleri setiyle oluşturulmuş 5,000 adet sismik izolasyonlu binanın en üst kat kütle merkezlerinde elde edilen pik toplam ivmeleri (tfax) için belirlenen her bir limit adımlarında Denklem (3.27)'ya göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (P_f) sunulmuştur. Bu olasılıkları hesaplayabilmek için 0.025g artımla 0.025g~1.000g aralığında limit adımları oluşturulmuştur.

(i) Limit Değerlerinin Aşılma Olasılığına Göre

Set1B_{NL} alt setiyle oluşturulmuş binaların FD yer hareketi çiftinin her birine maruz kalması halinde, belirtilen limit adımları ($Limit_a$) için Denklem (3.27)'ya göre hesaplanan P_f değerleri, Şekil 4.22 (a)'daki gibi elde edilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere; söz konusu yer hareketleri, aşılan ivme limit değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanmıştır. Yine bu şekilden görüldüğü üzere; örneğin FD1 yer hareketi çifti etkisinde Set1B_{NL} için tfax değerleri, 0.825g seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Bu set için söz konusu yer hareketi için elde edilen P_f değerleri, 0.775g seviyesine kadar %100 iken; 0.800g için P_f değeri, yaklaşık %20'dir. Yani Set1B_{NL} ile oluşturulan 5,000 binanın FD1 çiftine maruz kalması halinde tamamı 0.775g limitini aşarken; yaklaşık 1,000 tanesi, 0.800g limitini aşmaktadır. Yine aynı şekilden görüldüğü üzere, 0.825g limiti için P_f = %0 olup; söz konusu 1,000 adet binanın hiçbirinde 0.825g ivme limitinin aşılamadığı anlaşılmaktadır.

$Set1B_{NL}$ ile oluşturulmuş binaların NFD yer hareketlerine maruz kalması halinde, her bir yer hareketi çifti için aynı ivme limit adımlarında elde edilen P_f değerleri ise, Şekil 4.22 (c)'de verilmiştir. Bu şekilde de söz konusu yer hareketleri de, tfax değerlerinin aştığı ivme limit değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanmıştır. Görüldüğü üzere, NFD yer hareketleri etkisindeki $Set1B_{NL}$ için tfax değerleri, aynı setin FD yer hareketlerine maruz kalması halinde elde edilen değerlerden daha düşük olup; NFD yer hareketleri etkisinde bu set için tfax değerleri, maksimum 0.600g seviyelerine kadar ulaşmaktadır.

$Set2B_{NL}$ ile oluşturulan binaların sırasıyla FD ve NFD yer hareketi çiftlerine maruz kalması halinde aşılan limit değerleri ve bunlara karşılık elde edilen P_f değerleri ise, sırasıyla Şekil 4.22 (b) ve (d)'de sunulmuştur. Söz konusu şekillerde sırasıyla Şekil 4.22 (a) ve (c)'deki deprem sıraları korunmuş olup; görüldüğü üzere, her iki tür yer hareketi grubu için de izolasyon sistemi hedef periyodunun artması halinde, aşılan limit değerleri düşmekte; aşılan maksimum ivme limitleri, FD yer hareketleri için 0.450g seviyelerine, NFD yer hareketleri için ise 0.175g seviyelerine gerilemektedir.

(ii) Faya Olan En Yakın Mesafeye Göre

$Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ setleri için aşılan ivme limitleri ve bunlara karşılık hesaplanan P_f değerleri, göz önünde bulundurulan yer hareketi çiftlerinden binalara X yönünde uygulanan bileşenlerin faya olan en yakın mesafelerine (r) (Tablo 3.4) göre de değerlendirilmiştir. $Set1B_{NL}$ setiyle oluşturulmuş binalarda, FD ve NFD yer hareketleri etkisinde elde edilen tfax değerlerinin aştığı limit değerleri ve bu limitleri aşan bina yüzdeleri yani P_f değerleri, sırasıyla Şekil 4.23 (a) ve (b)'de söz konusu depremlerin r mesafelerine göre sıralanmıştır. Şekil 4.23 (a)'dan görüldüğü üzere, FD yer hareketleri için $r < 8$ km olması halinde, aşılan ivme değerleri oldukça yüksek iken; $r > 8$ km olması durumunda genel olarak 0.250g seviyelerine kadar gerilemektedir Şekil 4.23 (b)'de ise NFD yer hareketleri için r'den bağımsız bir dağılım oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.23 (c)'de ise söz konusu $Set1B_{NL}$ ile oluşturulan binaların FD ve NFD bir arada olmak üzere tüm yer hareketi çiftleri etkisinde elde edilen P_f değerleri sunulmuştur. r mesafesine bağlı olarak aşılabilen maksimum tfax limitlerinin dağılımı, bu şekilde daha net bir şekilde görülmektedir. $r \approx 8$ km'nin belirgin bir sınır olduğu, bu sınırın altındaki r değerlerine sahip yer hareketleri arasından birkaç yer hareketinde istisnai olarak yaklaşık 0.200 g seviyelerinde tfax değerleri elde edilse de genel olarak, 0.600 g seviyelerine ulaşılabildiği görülmektedir.

Benzer çalışma, $Set2B_{NL}$ setiyle oluşturulan binalar için de yapılmıştır ve sonuçları, Şekil 4.24'de sunulmuştur. Şekil 4.24 (a)'dan görüldüğü üzere; $T_{0,nom}$ değerinin artmasına bağlı olarak her iki tür yer hareketi etkisinde de aşılan ivme limit değerleri daha azalsa da, $Set2B_{NL}$ setinin maruz kaldığı FD yer hareketleri için $r < 8$ km olması halinde aşılan ivme limitleri, $Set1B_{NL}$ için (Şekil 4.23 (a)) olduğu gibi daha yüksektir. r'nin tfax değerlerine olan etkisi, Şekil 4.24 (c)'den daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

(iii) PGA/PGV Oranına Göre

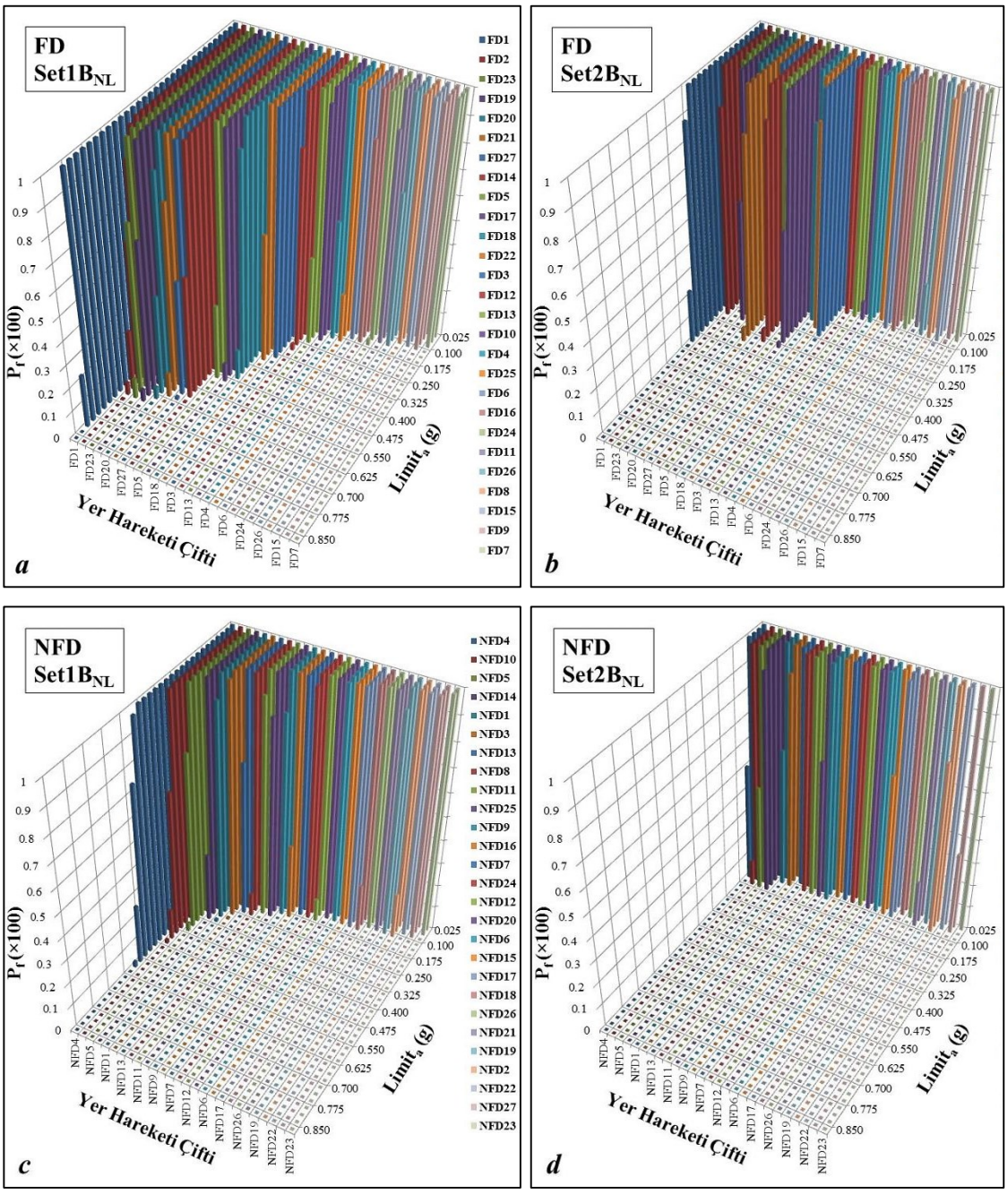
$Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ setleri için aşılan ivme limitleri ve bu limitlere karşılık hesaplanan P_f değerleri, göz önünde bulundurulan yer hareketi çiftlerinden binalara X yönünde uygulanan bileşenlerin PGA/PGV değerlerine (Tablo 3.4) göre de değerlendirilmiştir. $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ setleriyle oluşturulan binalarda tfax değerlerinin yine tüm yer hareketi çiftleri etkisinde ulaştığı değerler, PGA/PGV oranına göre, sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir. Tüm yer hareketleri etkisinde PGA/PGV oranına bağlı olarak tfax değerlerinin değişimini veren Şekil 4.25 (c)'den görüldüğü üzere; için birkaç istisna bulunsa da PGA/PGV < 9 olması halinde daha yüksek ivme limitlerine ulaşılırken; PGA/PGV > 9 olması halinde PGA/PGV oranının etkisinin kaybolduğu görülmektedir. Yüksek PGV/PGA oranına (Şekil 3.16 (d)) ve dolayısıyla düşük PGA/PGV oranına sahip FD yer hareketlerinin, söz konusu sınırın altında baskın olduğu ve genel olarak 0.500g limitine ulaşılabildiği Şekil 4.25 (a)'dan görülebilmektedir. Şekil 4.25 (b)'den görüldüğü üzere ise, NFD yer hareketleri etkisinde PGA/PGV oranına bağlı olarak bir değişim bulunmamaktadır. $Set2B_{NL}$ setleri için ise, $T_{0,nom}$ değerinin artmasına bağlı olarak her iki tür yer hareketi etkisinde de aşılan ivme limit değerleri azalsa da; Şekil 4.26 (c)'den görüldüğü üzere PGA/PGV < 9 olması halinde yine FD yer hareketleri nedeniyle daha yüksek ivme limitlerine ulaşılırken; PGA/PGV > 9 olması halinde PGA/PGV oranının etkisinin kaybolduğu görülmektedir.

$Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için tüm FD ve NFD yer hareketleri etkisinde tfax değerlerine göre yapılan bu güvenilirlik analizleri, $Set1A_{NL}$, $Set1C_{NL}$, $Set2A_{NL}$ ve $Set2_{NL}$ setleri için de aynı şekilde yapılmıştır; ancak burada yer kısıtı nedeniyle ve örnek teşkil etmesi amacıyla $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ setlerine ait sonuçlar sunulabilmiştir. Bu çalışma sonucunda tüm alt setlerin göz önünde bulundurulmasıyla görülmüştür ki; $Set1A_{NL}$ ve $Set1C_{NL}$ setleri için de tüm FD ve NFD yer hareketleri etkisinde elde edilen tfax değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıklarının r ve PGA/PGV'ye bağlı olarak değişimi, aynı $T_{0,nom}$ değerine

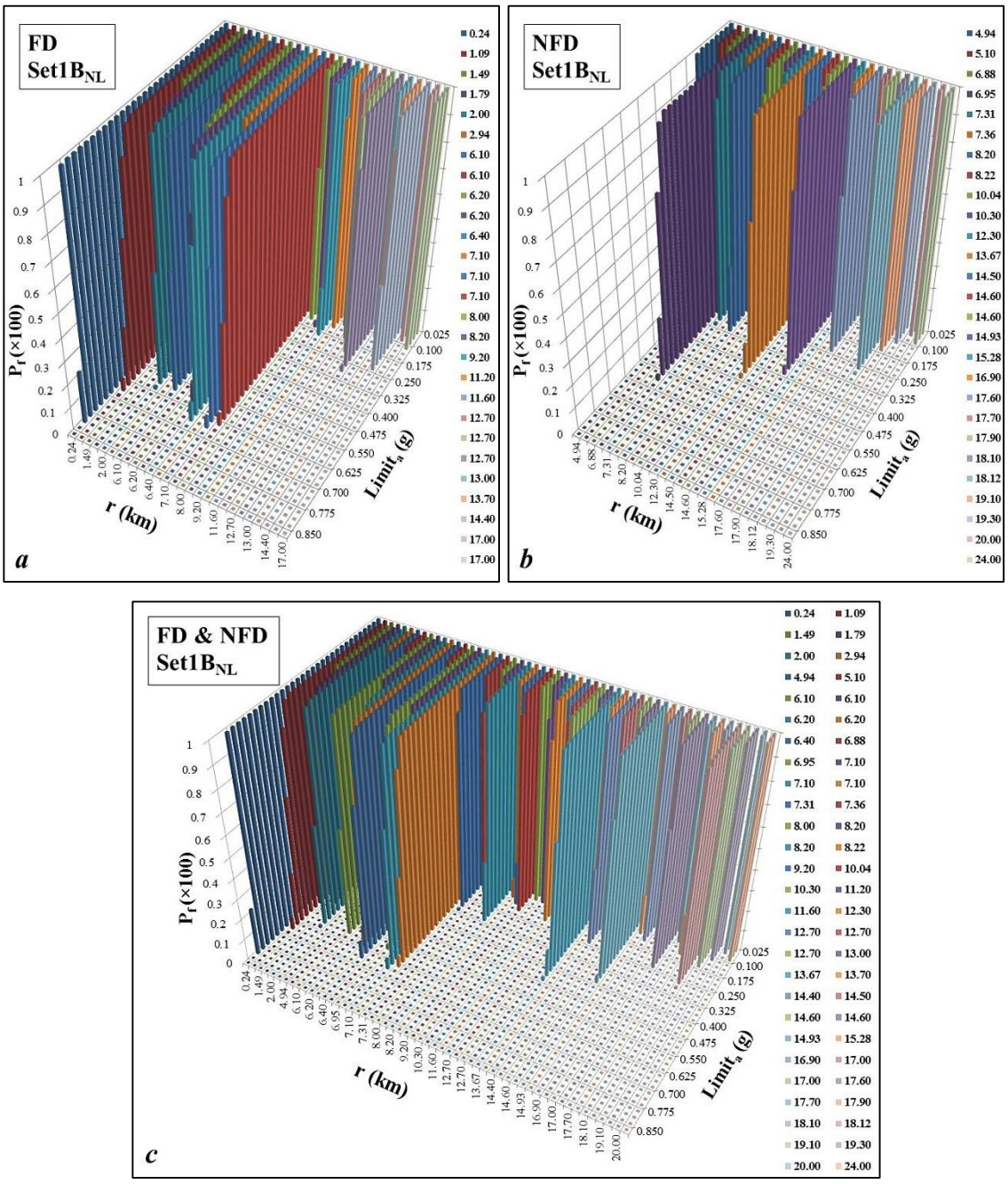
sahip Set1B_{NL} için Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.25'de verilenlere benzemektedir. Benzer şekilde, Set2A_{NL} ve Set2C_{NL} setleri ile elde edilen sonuçların *r* ve PGA/PGV'ye bağlı değişimi aynı $T_{0,nom}$ değerine sahip Set2B_{NL} için Şekil 4.22, Şekil 4.24 ve Şekil 4.26'da verilenlere benzemektedir. Ancak aynı tür yer hareketleri etkisinde aşılan tfax limitleri, Set1B_{NL} ve Set2B_{NL}'ye göre sırasıyla Set1A_{NL} ve Set2A_{NL}'de daha düşük iken, yine sırasıyla Set1C_{NL} ve Set2C_{NL}'de daha yüksektir ve c.o.v = %15 olan bu setlerde *c.o.v.* değeri artışına bağlı olarak, nispeten daha yüksek ivme limitlerine ulaşmaktadır. Bu durum, tüm setler için tüm yer hareketleri etkisinde ulaşılabilen maksimum tfax seviyelerinin verildiği Tablo 4.11'dan görülebilmektedir. Bu tabloda ayrıca, *c.o.v.* değerinin %5'den %10 ve %15 seviyesine çıkması durumunda, ulaşılabilen maksimum tfax değerlerinde *c.o.v.* = %5 olması durumuna göre olan artış miktarları parantez içinde % olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.11: Tüm bina setleri için tfax değerlerinin maksimumları.

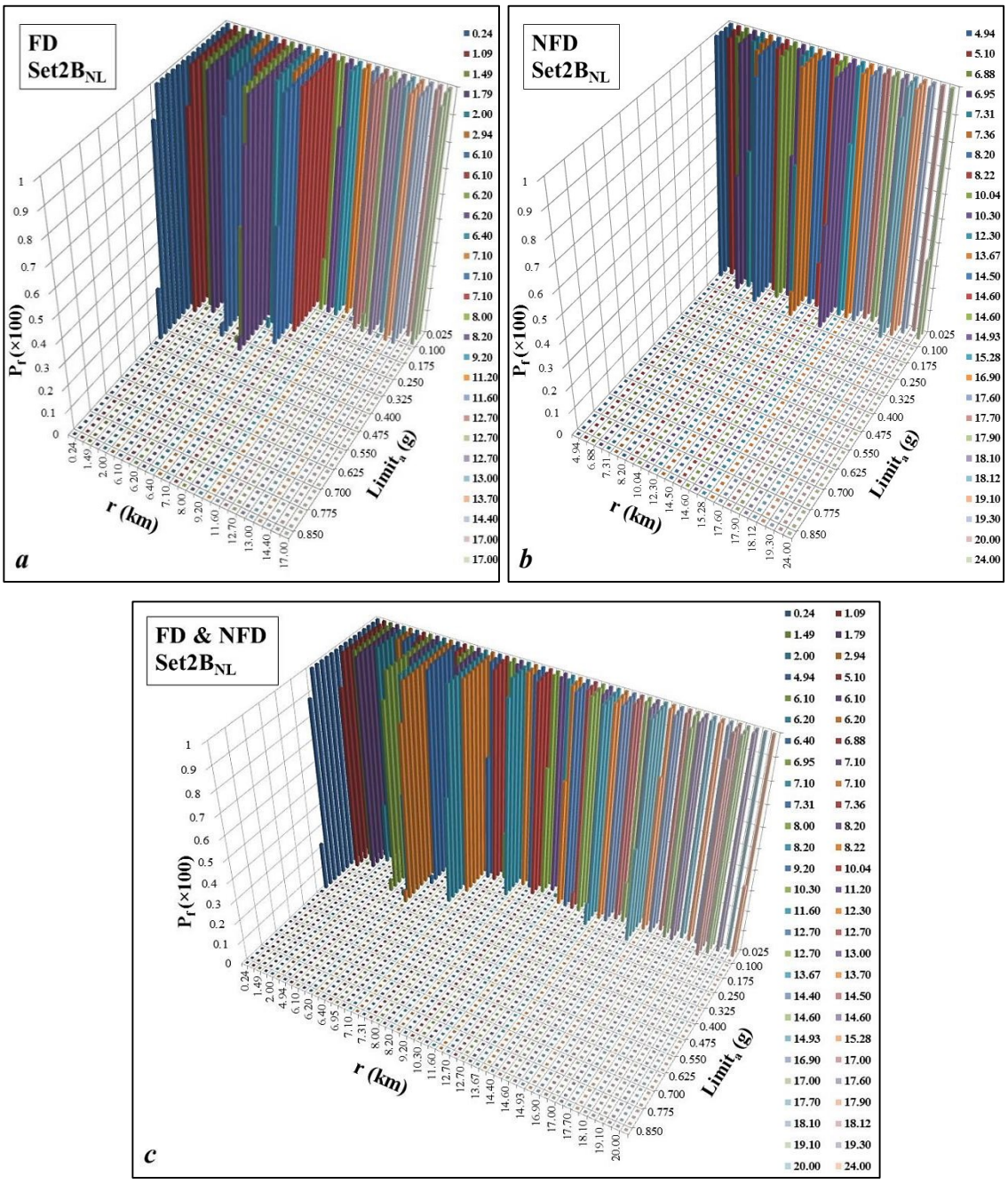
Yer Hareketi Türü	**Set1$_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 2 s)**			**Set2$_{BL}$($T_{0,nom}$ = 3.5 s)**		
	Set1A_{NL} (*c.o.v* = %5)	**Set1B_{NL} (*c.o.v*=%10)**	**Set1C_{NL} (*c.o.v* = %15)**	**Set2A_{NL} (*c.o.v* = %5)**	**Set2B_{NL} *c.o.v*=%10**	**Set2C_{NL} *c.o.v* = %15**
FD	0.809g	0.818g (%1.2)	0.848g (%4.8)	0.438g	0.464g (%6.1)	0.485g (%10.8)
NFD	0.569g	0.605g (%6.3)	0.629g (%10.5)	0.156g	0.160g (%2.9)	0.164g (%4.9)



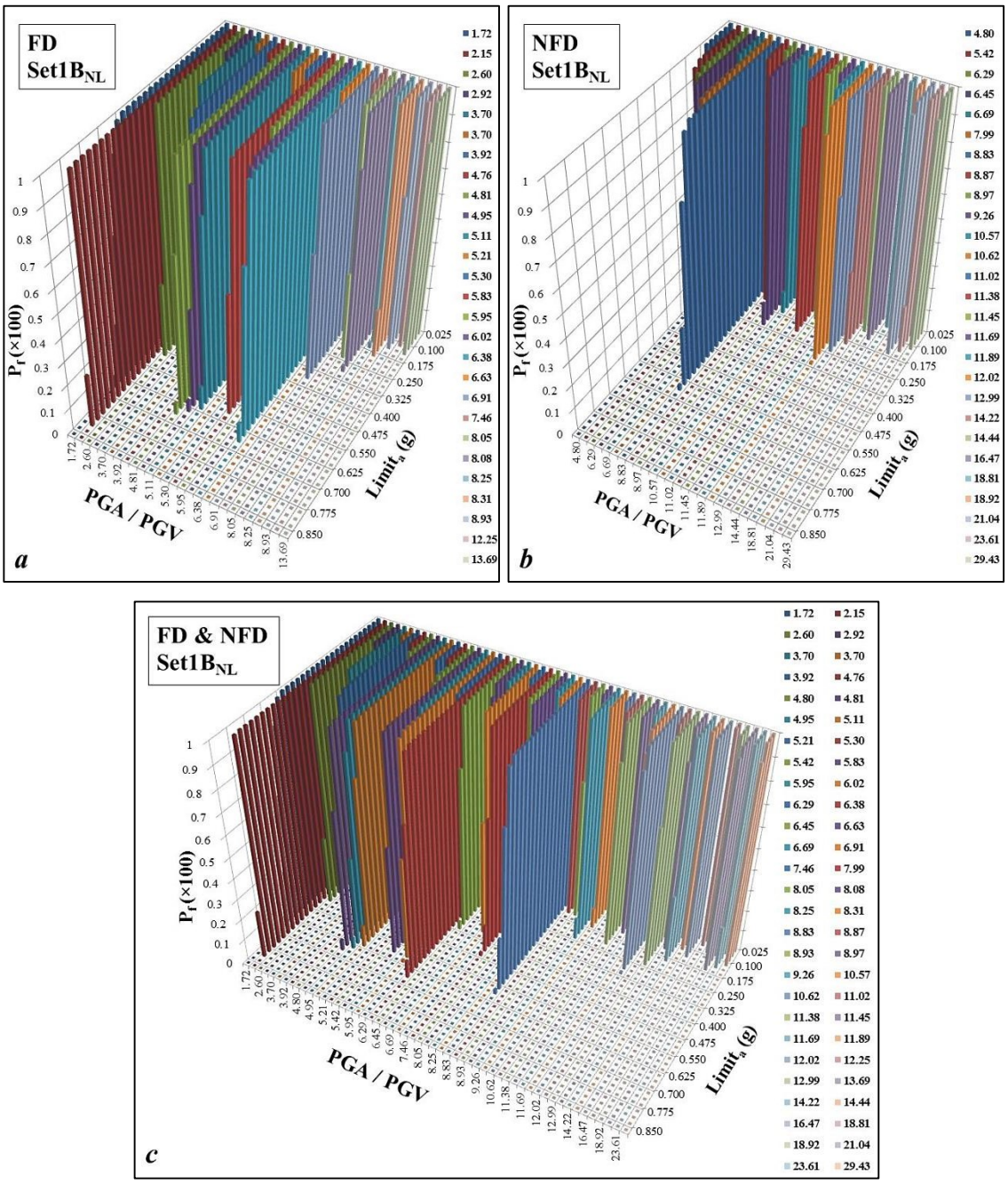
Şekil 4.22: Aşılan limit adımı sıralamasına göre tfax için başarısızlık olasılıkları.



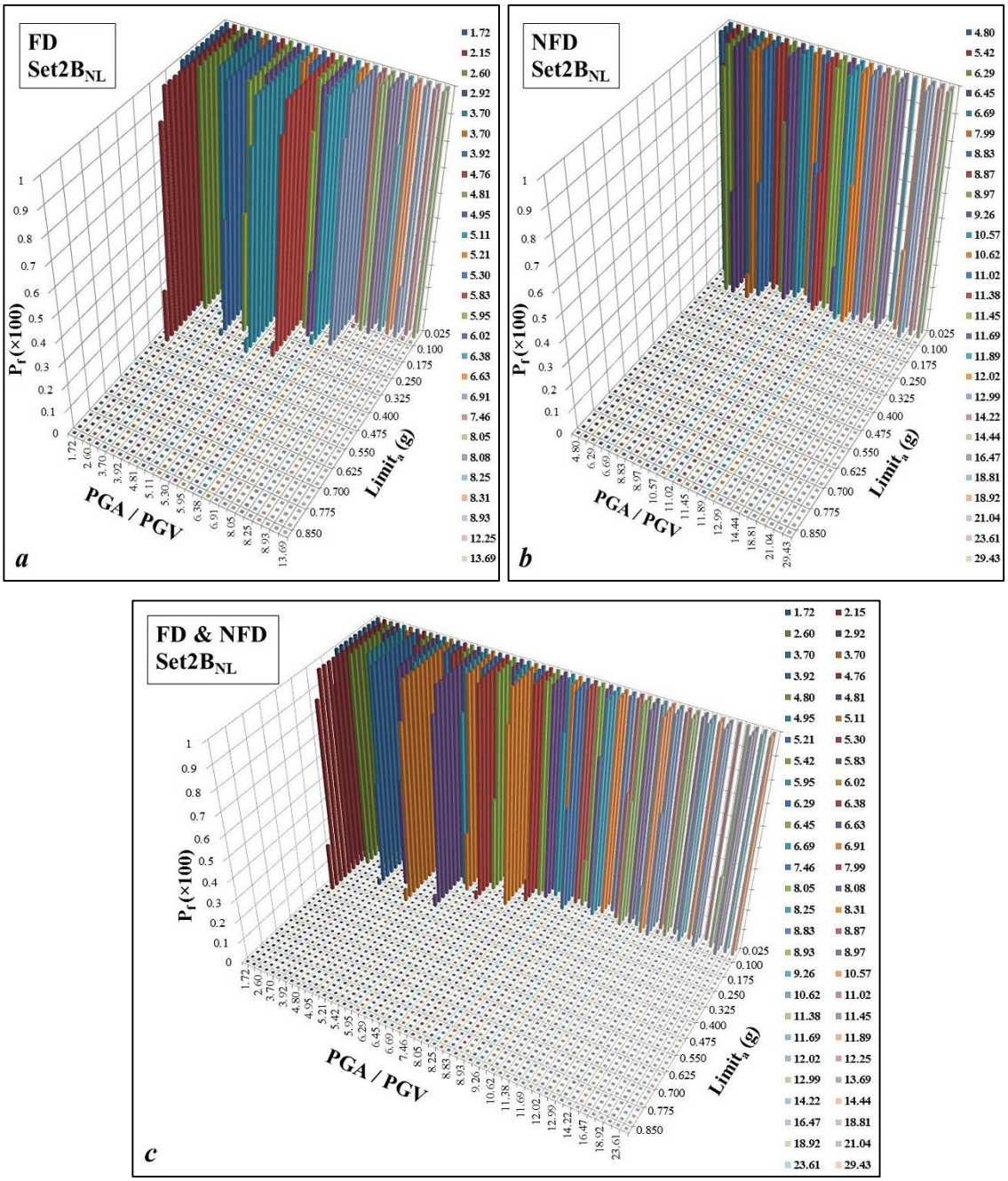
Şekil 4.23: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre tfax için başarısızlık olasılıkları (Set1B$_{NL}$).



Şekil 4.24: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre tfax için başarısızlık olasılıkları (Set2B$_{NL}$).



Şekil 4.25: PGA / PGV oranına göre tfax için başarısızlık olasılıkları (Set1B$_{NL}$).



Şekil 4.26: PGA / PGV oranına göre tfax için başarısızlık olasılıkları (Set2B$_{NL}$).

4.1.4.2. Pik İzolatör Deplasmanlarının Maksimumları İçin

Bölüm 4.1.4.1'de tfax için yapılan çalışma, bu bölümde bdix$_{max}$ için yapılmıştır. Her bir alt izolasyon sistemi setiyle oluşturulmuş 5,000 adet sismik izolasyonlu binanın her bir yer hareketi çiftine maruz kalması halinde gerçekleştirilen dinamik analizlerle elde edilen pik izolatör deplasmanlarının maksimumları (bdix$_{max}$) hesaplanarak; bu maksimum değerler, 0.025m artımla 0.025m~1.000 m aralığında değişen deplasman limit

adımlarıyla ($Limit_d$) karşılaştırılmış ve her bir adım için P_f değerleri, yine Denklem (3.27) 'ya göre hesaplanmıştır.

(i) Limit Değerlerinin Aşılma Olasılığına Göre

$Set1B_{NL}$ alt setiyle oluşturulan binalar için tüm FD ve NFD yer hareketi etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerlerinin, belirtilen limit adımları aşma durumu ve bu adımlar için P_f değerleri sırasıyla Şekil 4.27 (a) ve (c)'deki gibi verilmiştir. Şekil 4.27 (a)'da görüldüğü üzere, FD1 yer hareketi çifti etkisinde $Set1B_{NL}$ için $bdix_{max}$ değerleri, 0.950 m seviyelerine ulaşmaktadır. NFD yer hareketleri etkisindeki aynı set için bu değer, 0.575 m seviyelerine ulaşabilmektedir. $Set2B_{NL}$ setiyle oluşturulan binalarda yine tüm FD ve NFD yere hareketi çiftleri etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerleri ise sırasıyla, Şekil 4.27 (b) ve (d)'de verilmiştir. Şekil 4.27 (a) ve (b)'nin karşılaştırılmasından görüleceği üzere, hedef periyodun artması halinde FD yer hareketleri çiftleri etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, tfax değerlerinin (Şekil 4.22 (a) ve (b)) aksine artmakta; 1.000 m seviyelerini aşmaktadır (FD1 için $bdix_{max}$=1.239 m). NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set2B_{NL}$ için $bdix_{max}$ değerlerinin aştığı limit değerleri (Şekil 4.27 (d)) ise, diğer durumlara göre oldukça düşük olup; 0.400 m olarak gerçekleşen maksimum değerini NFD14 yer hareketi çifti etkisinde almaktadır.

(ii) Faya Olan En Yakın Mesafeye Göre

Bölüm 4.1.4.1'de tfax için yapıldığı gibi, bu bölümde de $bdix_{max}$ için söz konusu setlerde aşılan deplasman limitleri ve bunlara karşılık hesaplanan P_f değerleri, göz önünde bulundurulan yer hareketi çiftlerinden binalara X yönünde uygulanan bileşenlerin faya olan en yakın mesafelere (r'ye) göre de değerlendirilmiştir. $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için tüm yer hareketi çiftleri altında elde edilen $bdix_{max}$ değerleri ve bu değerlerin aştıkları deplasman limit adımları, r'ye bağlı olarak sırasıyla, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmektedir. Burada görüldüğü üzere, $r < 8$ km olması halinde FD yer hareketi çiftleri etkisinde $Set1B_{NL}$ (Şekil 4.28 (a)) ve $Set2B_{NL}$ (Şekil 4.29 (a)) için aşılan maksimum deplasman limitleri oldukça yüksek (genel olarak; $Set1B_{NL}$ için 0.600 m seviyelerinde, $Set2B_{NL}$ için ise 0.600 m~0.700 m seviyelerinde) iken, $r > 8$ km için bu değerler, hızla ($Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için de genel olarak 0.250 m seviyelerine) gerilemektedir. Şekil 4.28 (b) ve Şekil 4.29 (b)'den görüldüğü üzere, söz konusu setler için r'ye bağlı olarak, NFD yer hareketleri etkisinde benzer bir davranış görülememekte; NFD yer hareketleri etkisinde söz konusu setlerin davranışının r'den bağımsız olduğu görülmektedir.

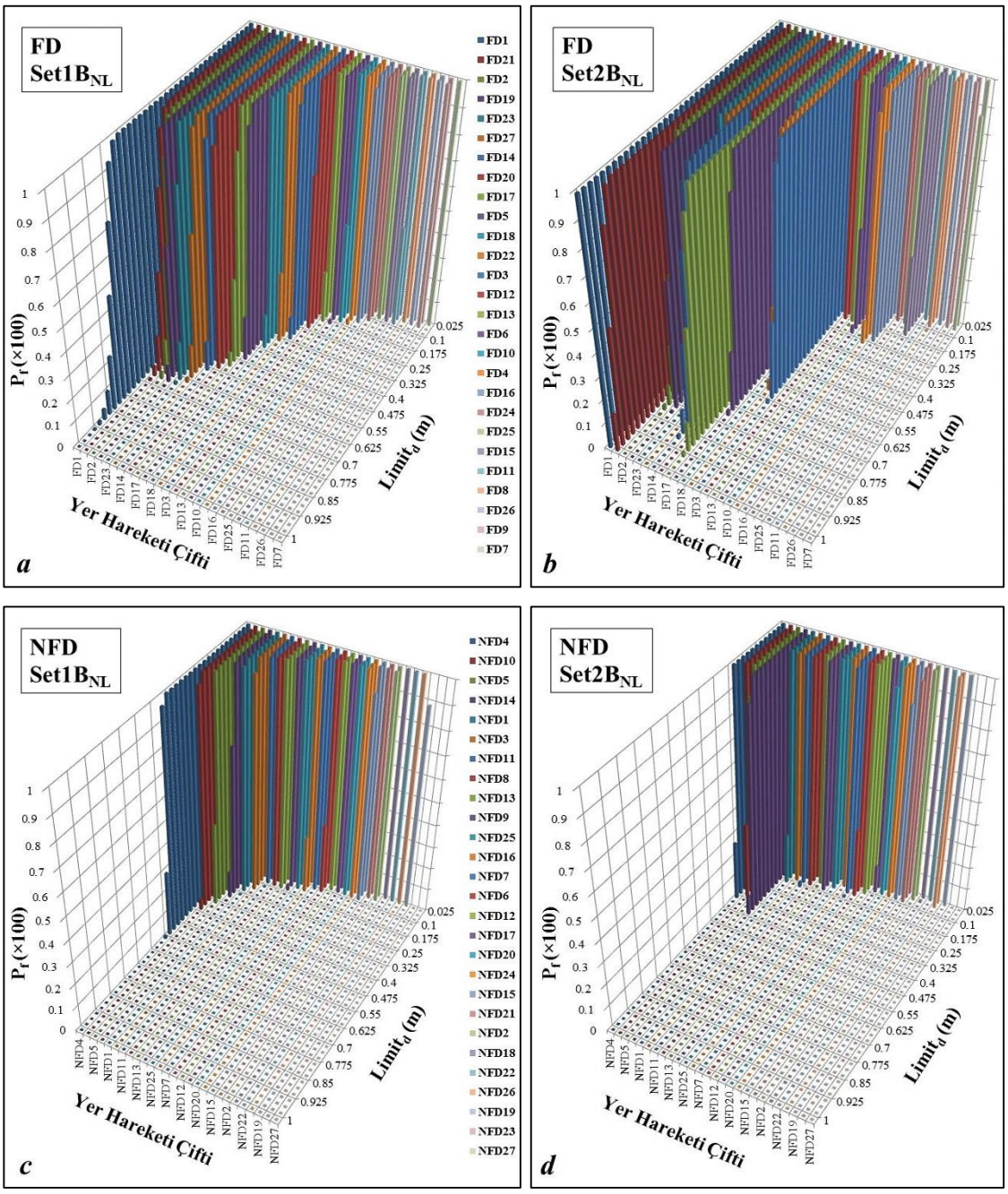
(iii) PGA/PGV Oranına Göre

$Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için tüm yer hareketi çiftleri altında elde edilen $bdix_{max}$ değerleri ve bu değerlerin aştıkları deplasman limit adımları, PGA/PGV oranına bağlı olarak ise sırasıyla, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de verilmektedir. Bölüm 4.1.4.1'de de olduğu gibi bu şekillerde de FD yer hareketi çiftleri etkisindeki her iki izolasyon sistemi seti için de yaklaşık olarak PGA/PGV < 9 olması halinde yüksek $bdix_{max}$ değerleri ve dolayısıyla söz konusu setler için bu $bdix_{max}$ değerlerine göre daha yüksek P_f değerleri ortaya çıkmaktadır. NFD yer hareketi çiftleri etkisinde ise, *r* için olduğu gibi PGA/PGV oranına bağlı bir davranış görülememektedir.

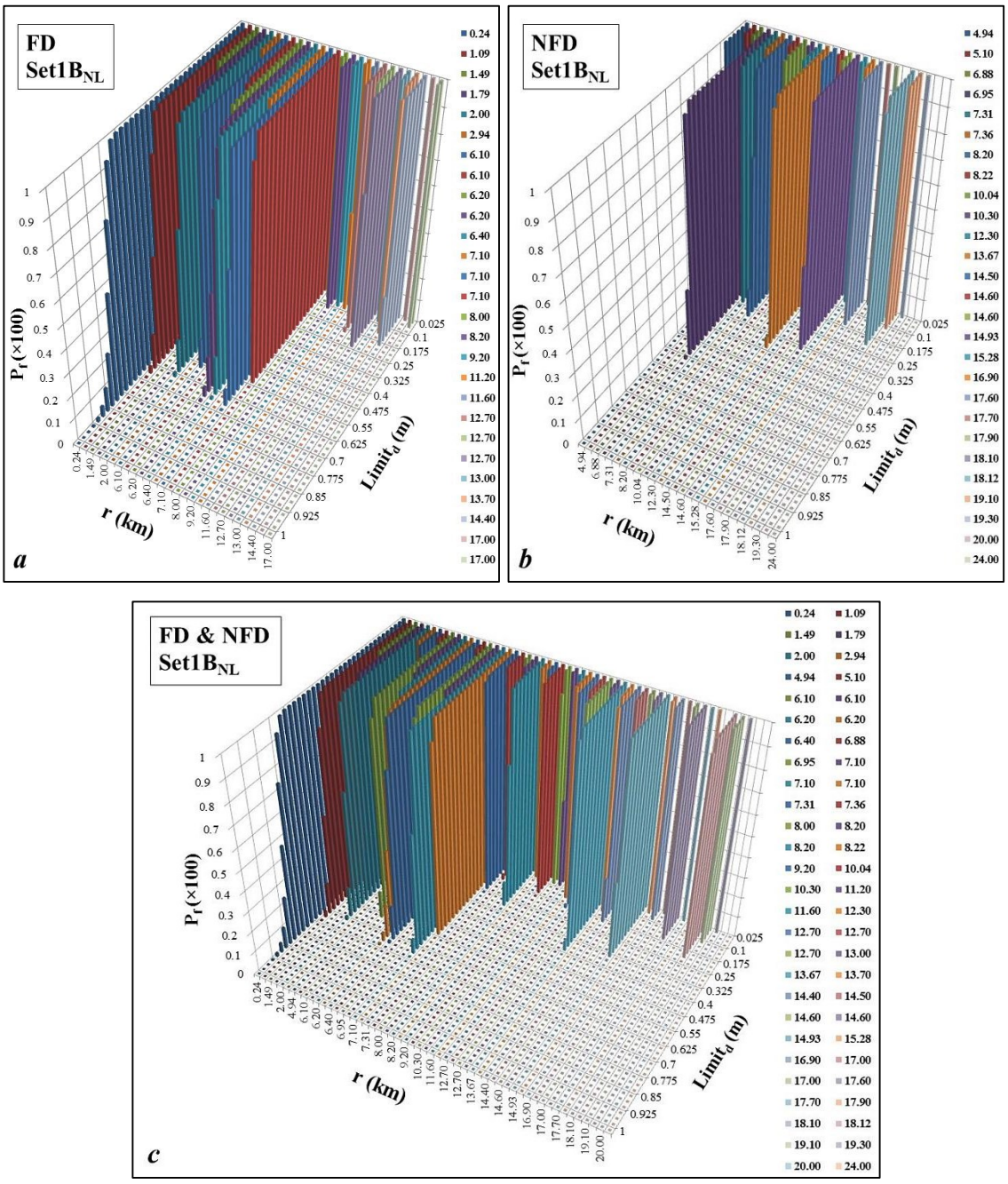
$Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için tüm FD ve NFD yer hareketleri etkisinde $bdix_{max}$'a göre yapılan güvenilirlik analizleri, $Set1A_{NL}$, $Set1C_{NL}$, $Set2A_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$ için de aynı şekilde yapılmıştır. Bölüm 4.1.4.1'de tfax için olduğu gibi; $Set1_{NL}$ ve $Set2_{NL}$ setleri dahilindeki diğer setler için tüm yer hareketleri etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıklarının *r*'ye ve PGA/PGV'ye bağlı olarak değişimi, $Set1B_{NL}$ veya $Set2B_{NL}$'den aynı $T_{0,nom}$ değerine sahip set için elde edilenlere benzemekte ve yakın değerler almaktadır. Ancak yine tfax için olduğu gibi, $bdix_{max}$ için de *c.o.v.* artışına bağlı olarak, nispeten daha yüksek deplasman limitlerine ulaşılmaktadır. Tüm setler için tüm yer hareketleri etkisinde ulaşılabilen maksimum $bdix_{max}$ seviyeleri, Tablo 4.12'de verilmiştir. *c.o.v.* değerinin %5'den %10 ve %15 seviyesine çıkması durumunda, ulaşılabilen maksimum $bdix_{max}$ değerlerinde *c.o.v.* = %5 olması durumuna göre olan artış miktarları parantez içinde % olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.12: Tüm bina setleri için $bdix_{max}$ değerlerinin maksimumları.

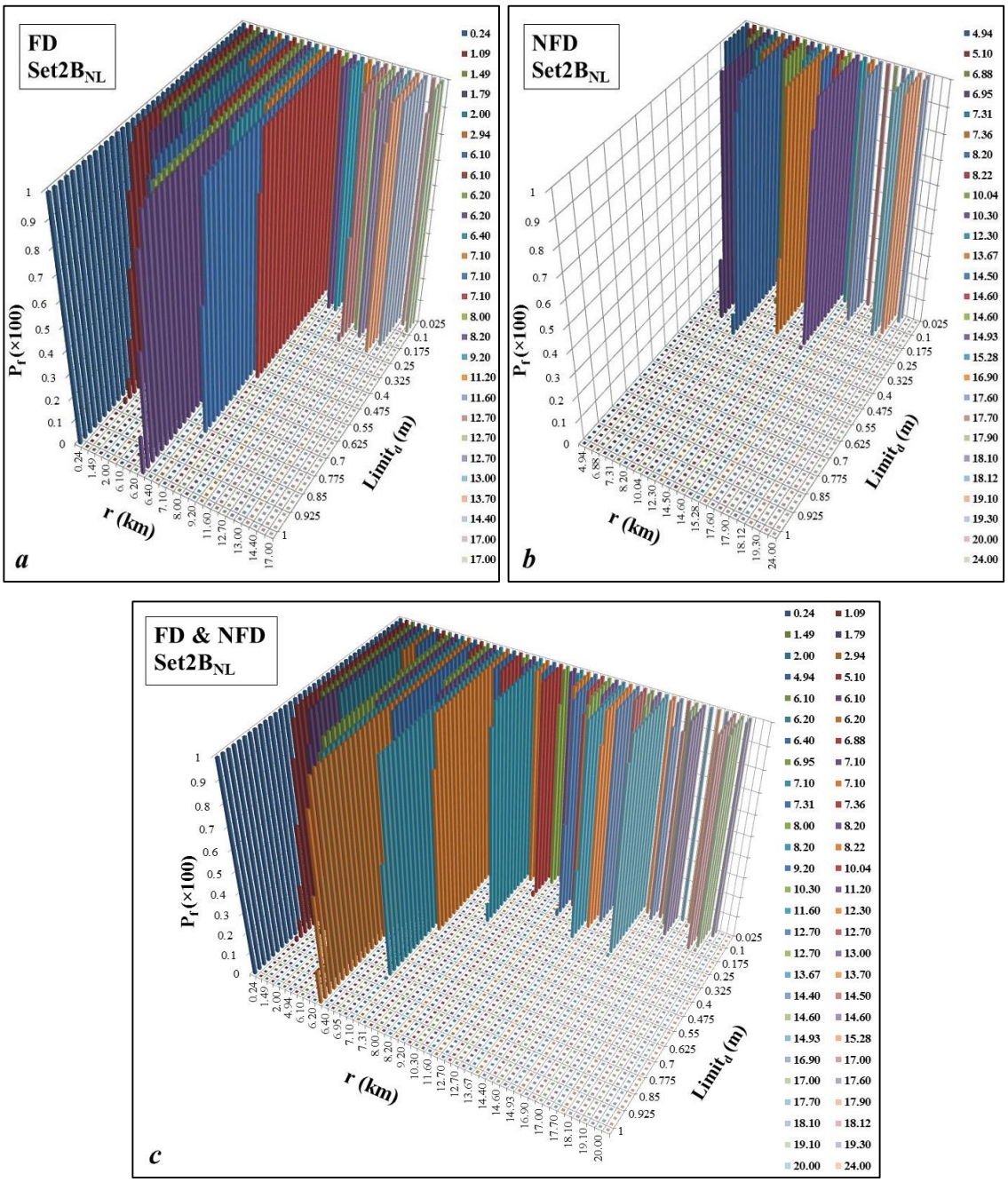
Yer Hareketi Türü	**$Set1_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 2 s)**			**$Set2_{BL}$($T_{0,nom}$ = 3.5 s)**		
	$Set1A_{NL}$ (*c.o.v* = %5)	**$Set1B_{NL}$ (*c.o.v*=%10)**	**$Set1C_{NL}$ (*c.o.v* = %15)**	**$Set2A_{NL}$ (*c.o.v* = %5)**	**$Set2B_{NL}$ *c.o.v*=%10**	**$Set2C_{NL}$ *c.o.v* = %15**
FD	0.879 m	0.967 m (%10.0)	1.123 m (%27.8)	1.183 m	1.239 m (%4.8)	1.344 m (%13.6)
NFD	0.539 m	0.571 m (%5.8)	0.612 m (%13.4)	0.384 m	0.401 m (%4.6)	0.452 m (%17.7)



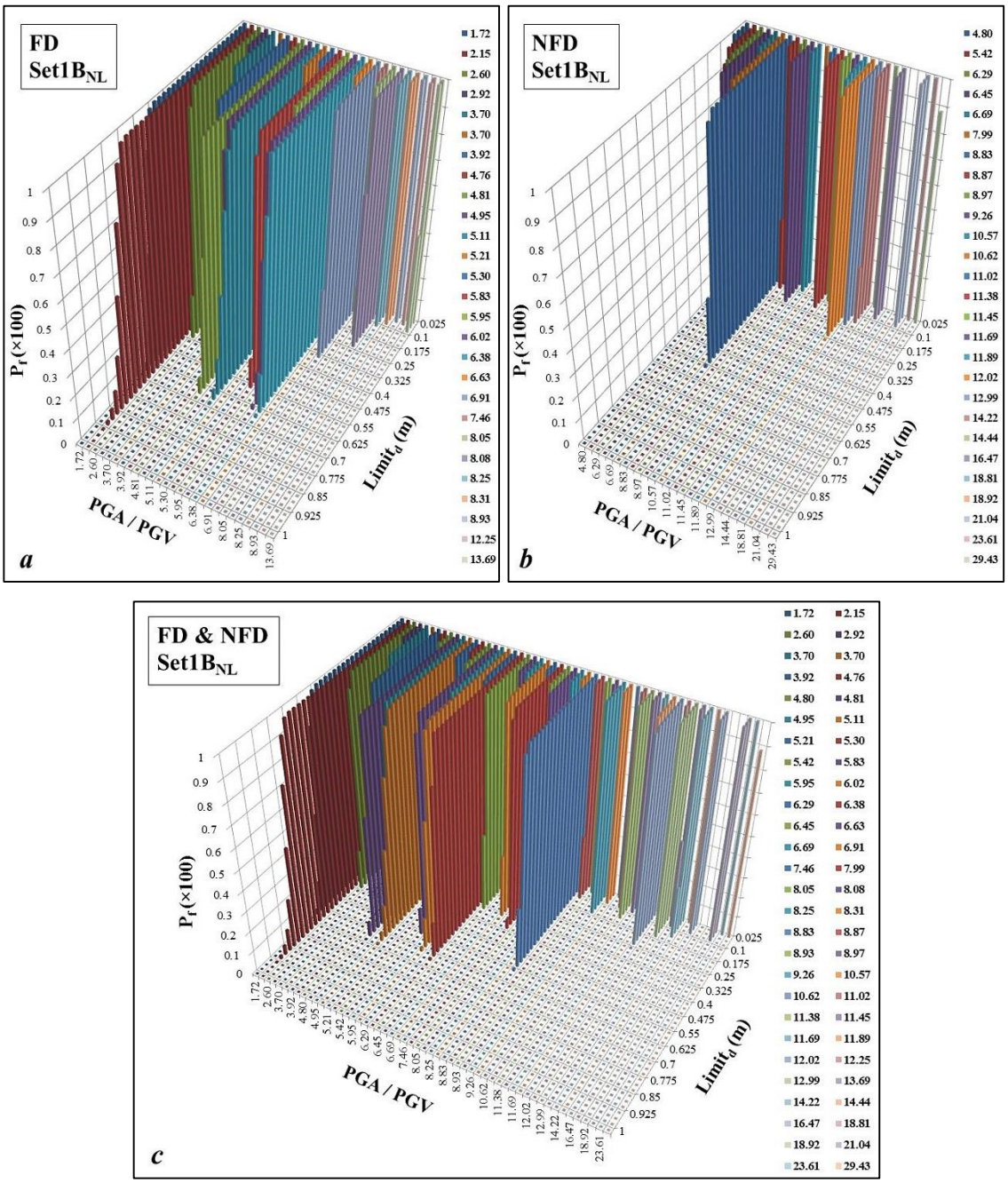
Şekil 4.27: Aşılan limit adımı sıralamasına göre $bdix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları.



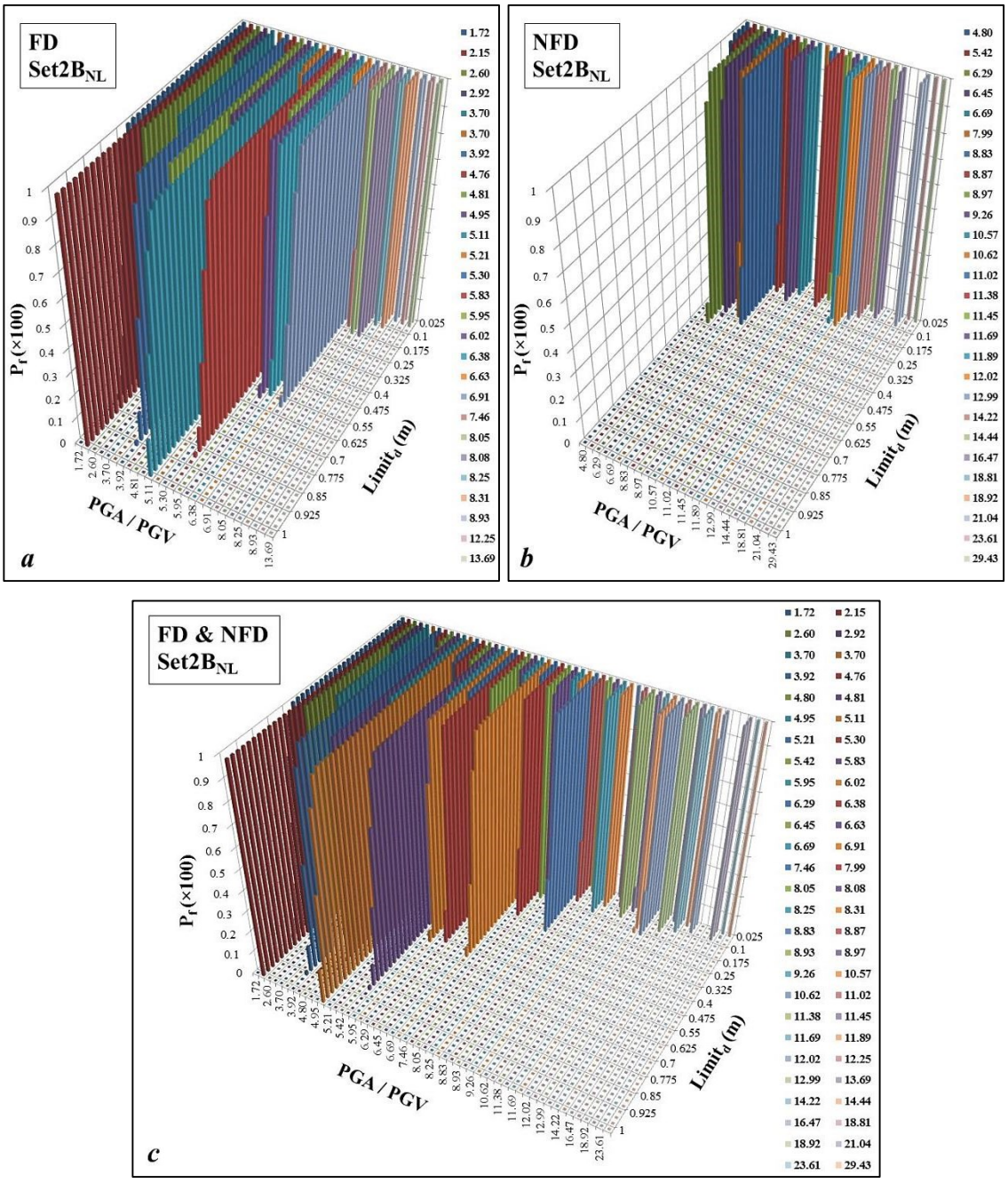
Şekil 4.28: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre $bdix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları ($Set1B_{NL}$).



Şekil 4.29: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre $bdix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları ($Set2B_{NL}$).



Şekil 4.30: PGA / PGV oranına göre bdixmax için başarısızlık olasılıkları (Set1B$_{NL}$).



Şekil 4.31: PGA / PGV oranına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları ($Set2B_{NL}$).

4.1.4.3. Pik Göreli Kat Öteleme Oranlarının Maksimumları İçin

Bölüm 4.1.4.1 ve Bölüm 4.1.4.2'de sırasıyla, tfax ve $bdix_{max}$ parametreleri için yapılan çalışma, bu bölümde pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları ($drix_{max}$) için yapılmıştır. Her bir alt izolasyon sistemi setiyle oluşturulmuş 5,000 adet sismik izolasyonlu binanın her bir yer hareketi çiftine maruz kalması halinde gerçekleştirilen dinamik analizlerle tüm kat seviyeleri için elde edilen pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları ($drix_{max}$) hesaplanarak; bu maksimum değerler, 5×10^{-5} artımla 5×10^{-5}

~1.5×10^{-3} aralığında değişen limit adımlarıyla ($Limit_{dr}$) karşılaştırılmış ve her bir adım için P_f değerleri Denklem (3.27)'ya göre hesaplanmıştır.

(i) Limit Değerlerinin Aşılma Olasılığına Göre

$Set1B_{NL}$ setiyle oluşturulan binalar için tüm FD ve NFD yer hareketi etkisinde elde edilen $drix_{max}$ değerlerinin, belirtilen limit adımlarını aşma durumu ve bu adımlar için P_f değerleri sırasıyla Şekil 4.32 (a) ve (c)'deki gibi verilmiştir. Şekil 4.32 (a)'da görüldüğü üzere; $Set1B_{NL}$ için $drix_{max}$ parametresi için maksimum değerlere FD1 yer hareketi çifti etkisinde ulaşılmakta olup; bu değer, 1.15×10^{-3} seviyelerindedir. NFD yer hareketleri etkisindeki aynı set için bu değer, 0.8×10^{-3} seviyelerine ulaşabilmektedir. $Set2B_{NL}$ setiyle oluşturulan binalarda yine tüm FD ve NFD yere hareketi çiftleri etkisinde elde edilen $drix_{max}$ değerleri ise, sırasıyla Şekil 4.32 (b) ve (d)'de verilmiştir. Şekil 4.32 (a) ve (b) ile (c) ve (d)'nin karşılaştırılmasından görüleceği üzere, her iki tür yer hareketleri çiftleri etkisinde de elde edilen $drix_{max}$ değerleri, hedef periyodun artması halinde düşmektedir. NFD yer hareketi çiftleri etkisindeki $Set2B_{NL}$ için söz konusu $drix_{max}$ değerlerinin aştığı limit değerleri, Şekil 4.32 (d)'den görüldüğü üzere diğer durumlara göre oldukça düşük olup; yaklaşık olarak 0.2×10^{-3} seviyelerinde gerçekleşen maksimum değerini NFD5 ve NFD14 yer hareketi çiftleri etkisinde almaktadır.

(ii) Faya Olan En Yakın Mesafeye Göre

Elde edilen $drix_{max}$ değerleri, yine Bölüm 4.1.4.1 ve Bölüm 4.1.4.2'de olduğu gibi göz önünde bulundurulan yer hareketi çiftlerinden binalara X yönünde uygulanan bileşenlerin faya olan uzaklık (r) mesafelerine göre de değerlendirilmiştir. $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için tüm yer hareketi çiftleri altında elde edilen $drix_{max}$ değerleri ve bu değerlerin aştıkları limit adımları, r'ye bağlı olarak sırasıyla Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de verilmektedir. Burada görüldüğü üzere, $r < 8$ km olması halinde FD yer hareketi çiftleri etkisinde $Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için aşılan göreli kat öteleme oranı limitleri, $r > 8$ km olan yer hareketlerine oranla daha yüksektir. tfax ve $bdix_{max}$ parametreleri için olduğu gibi, $drix_{max}$ değerleri için de söz konusu setler için r'ye bağlı olarak, NFD yer hareketleri etkisinde karakteristik bir davranış görülememekte; yani NFD yer hareketleri etkisinde söz konusu setlerin davranışının r'den bağımsız olduğu görülmektedir.

(iii) PGA/PGV Oranına Göre

$Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için tüm yer hareketi çiftleri altında elde edilen $drix_{max}$ değerleri ve bu değerlerin aştıkları deplasman limit adımları, PGA/PGV oranına bağlı olarak, sırasıyla

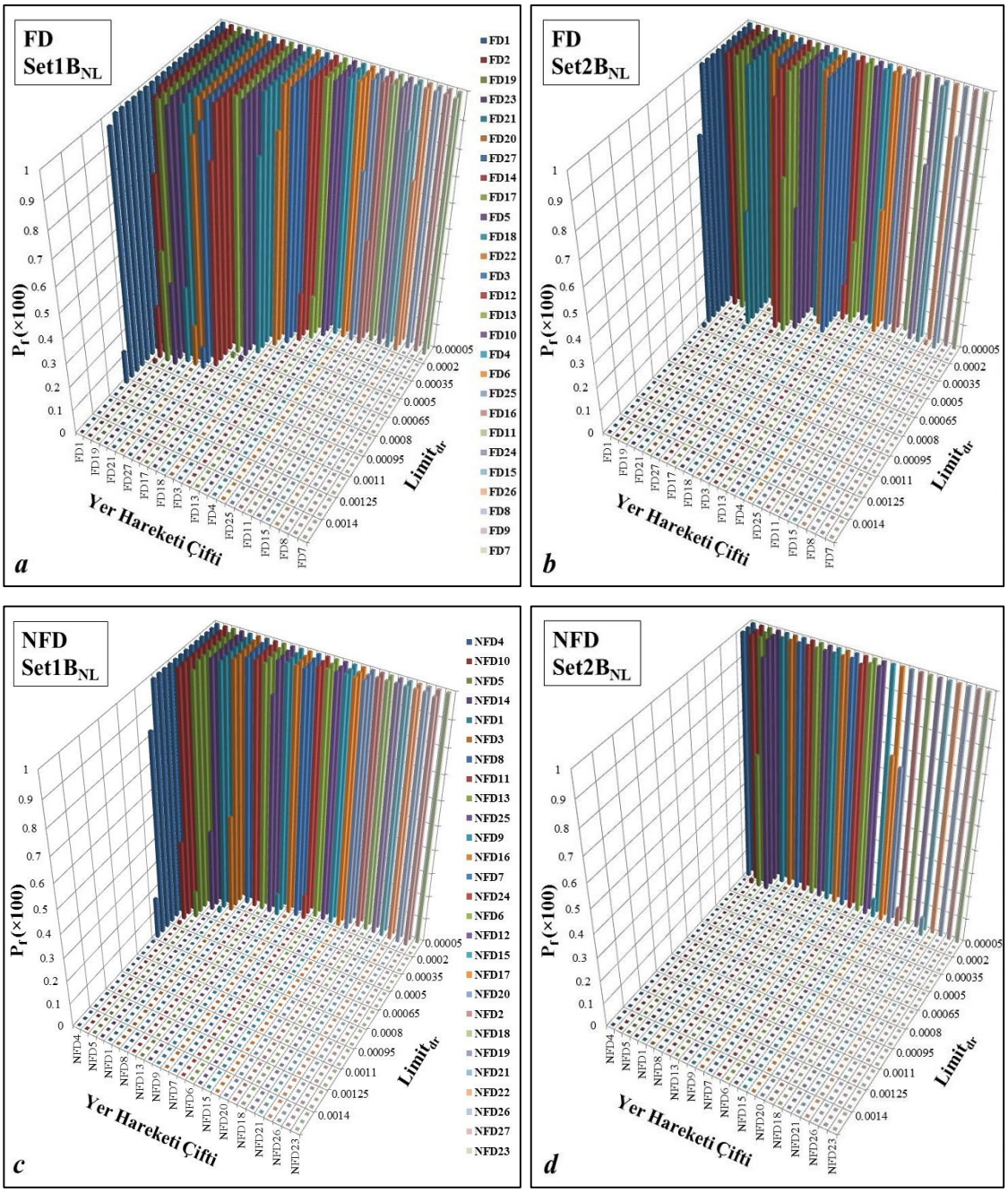
Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmektedir. Yine tfax ve $bdix_{max}$ parametreleri için olduğu gibi, söz konusu şekillerde de FD yer hareketi çiftleri etkisindeki her iki izolasyon sistemi seti için de yaklaşık olarak PGA/PGV < 9 olması halinde yüksek $drix_{max}$ değerleri elde edilmekte; NFD yer hareketi çiftleri etkisinde ise, r için olduğu gibi PGA/PGV oranına bağlı bir davranış görülememektedir.

$Set1B_{NL}$ ve $Set2B_{NL}$ için tüm FD ve NFD yer hareketleri etkisinde $drix_{max}$'a göre yapılan güvenilirlik analizleri, $Set1A_{NL}$, $Set1C_{NL}$, $Set2A_{NL}$ ve $Set2C_{NL}$ için de aynı şekilde yapılmıştır. Diğer yapısal cevap parametrelerinde de olduğu gibi, $Set1_{NL}$ ve $Set2_{NL}$ setleri dahilindeki diğer setler için tüm yer hareketleri etkisinde elde edilen $drix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıklarının *r*'ye ve PGA/PGV'ye bağlı olarak değişimi, $Set1B_{NL}$ veya $Set2B_{NL}$'den aynı $T_{0,nom}$ değerine sahip set için elde edilenlere benzemekte ve yakın değerler almaktadır. Ancak yine tfax ve $bdix_{max}$ için olduğu gibi, $drix_{max}$ için de *c.o.v.* artışına bağlı olarak, nispeten daha yüksek göreli kat öteleme oranı limitlerine ulaşılmaktadır. Tüm setler için tüm yer hareketleri etkisinde ulaşılabilen maksimum $drix_{max}$ seviyeleri, Tablo 4.13'de verilmiştir. *c.o.v.* değerinin %5'den %10 ve %15 seviyesine çıkması durumunda, ulaşılabilen maksimum $drix_{max}$ değerlerinde *c.o.v.* = %5 olması durumuna göre olan artış miktarları parantez içinde % olarak gösterilmiştir.

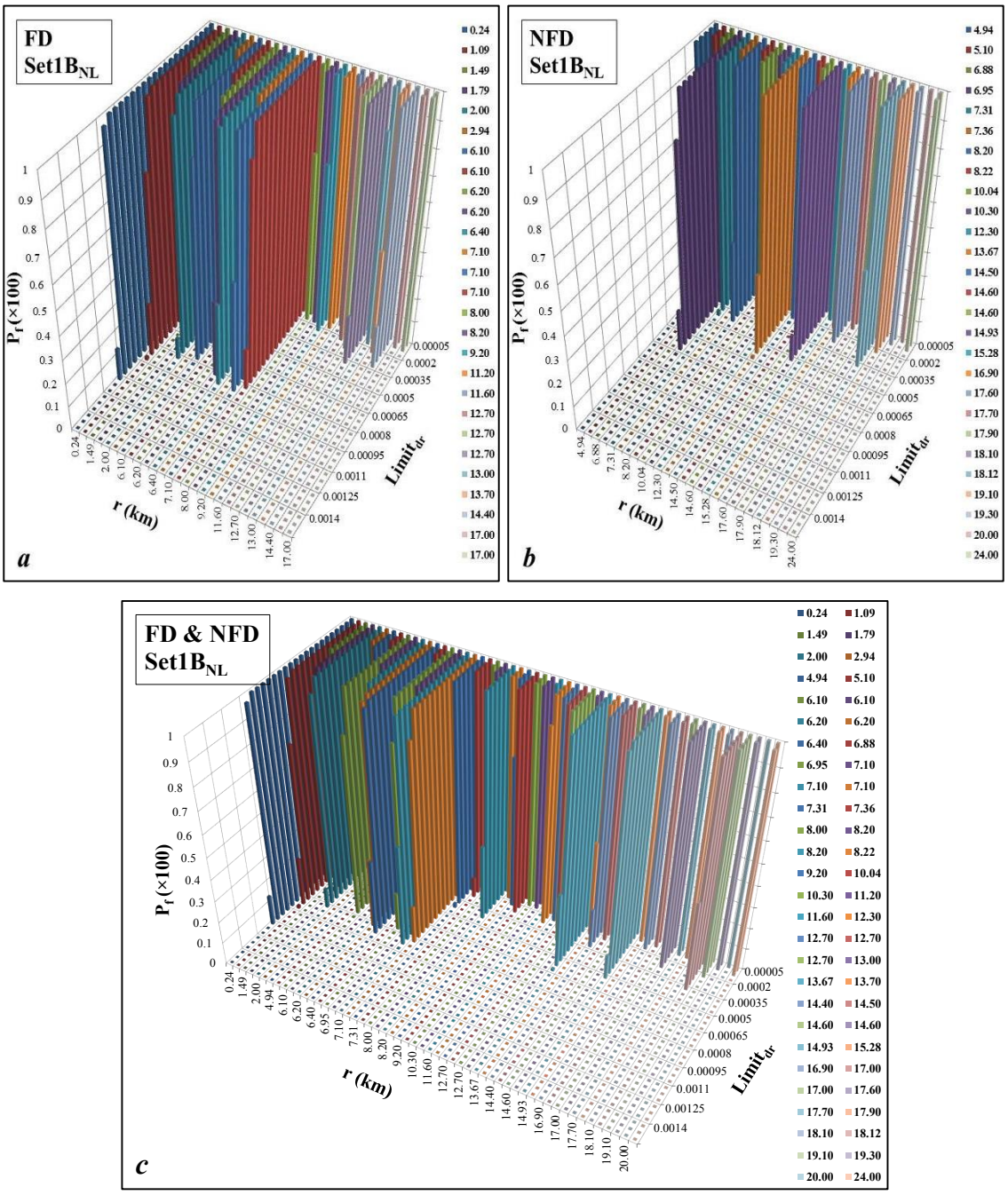
UBC (1997) Madde 1658.6'da belirtildiği üzere, sismik izolasyonlu binaların statik eşdeğer yatay yük yöntemine göre analizi yapılması halinde, üstyapı seviyesindeki maksimum göreli kat öteleme oranları $0.01/R_I$ değerini aşmamalıdır. Burada R_I, taşıyıcı sistem davranış katsayısı olup; sismik izolasyonlu binalarda üstyapının doğrusal-elastik davranış sergilemesi sebebiyle, R_I = 1.0 olmaktadır. Dolayısıyla UBC (1997)'ye göre sismik izolasyonlu binalarda göreli kat öteleme oranları, 1×10^{-2} değerini aşmamalıdır. Ancak, Tablo 4.13'den görüldüğü üzere, $drix_{max}$ parametresi için tüm bina setlerinin tüm yer hareketlerine maruz kalması durumunda elde edilen maksimum değer, $Set1C_{NL}$'nin FD türü yer hareketlerine maruz kalması halinde gerçekleşmekte olup; 1.250×10^{-3} değerindedir ve 1×10^{-2}'den oldukça düşüktür. Dolayısıyla, analizi yapılan bina setlerinin göz önünde bulundurulan tüm yer hareketleri etkisinde $drix_{max}$ parametresine göre başarısızlık olasılığı $P_f = 0$'dır. Yani hiçbir setin hiçbir yer hareketi etkisinde başarısızlık olasılığı bulunmamaktadır.

Tablo 4.13: Tüm bina setleri için $drix_{max}$ değerlerinin maksimumları.

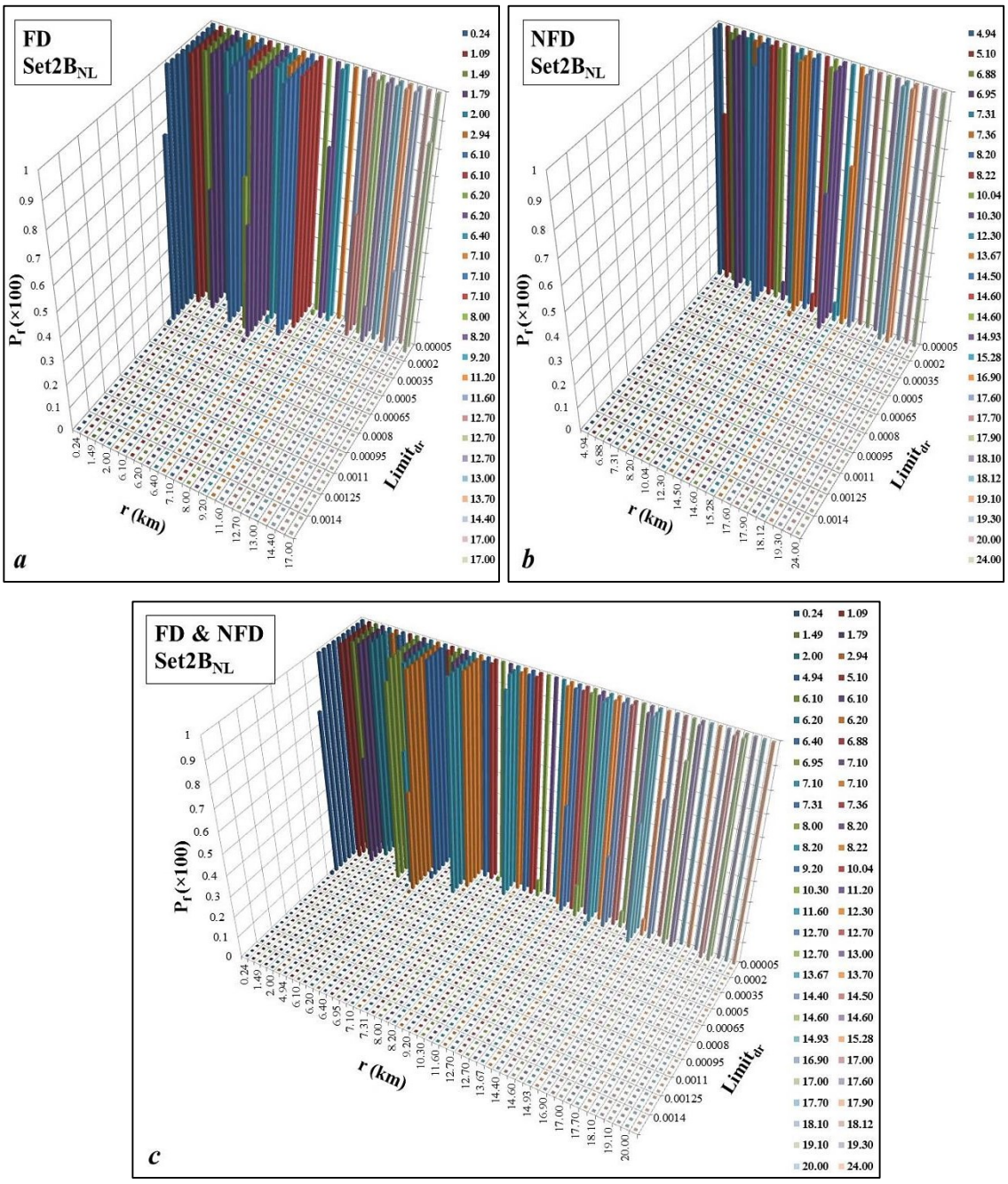
Yer Hareketi Türü	Set1$_{NL}$ ($T_{0,nom}$ = 2 s)			Set2$_{BL}$($T_{0,nom}$ = 3.5 s)		
	Set1A$_{NL}$ (*c.o.v* = %5)	Set1B$_{NL}$ (*c.o.v*=%10)	Set1C$_{NL}$ (*c.o.v* = %15)	Set2A$_{NL}$ (*c.o.v* = %5)	Set2B$_{NL}$ *c.o.v*=%10	Set2C$_{NL}$ *c.o.v* = %15
FD	1.111E-03	1.160E-03 (%4.5)	**1.250E-03** (%12.4)	0. 593E-03	0. 634E-03 (%6.9)	0. 653E-03 (%10.1)
NFD	0. 773E-03	0. 822E-03 (%6.3)	0. 864E-03 (%11.7)	0. 208E-03	0. 215E-03 (%3.2)	0. 221E-03 (%6.3)



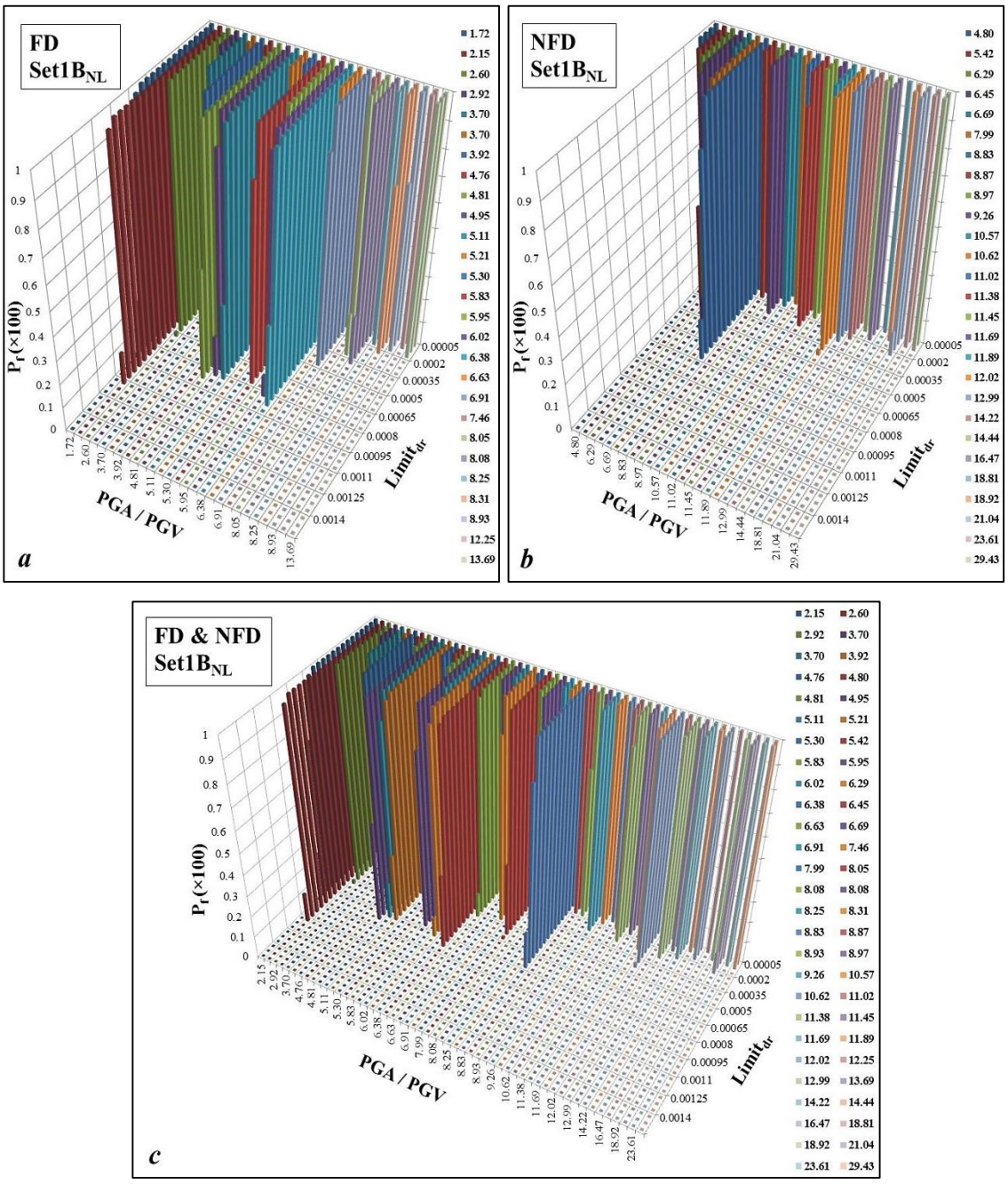
Şekil 4.32: Aşılan limit adımı sıralamasına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları.



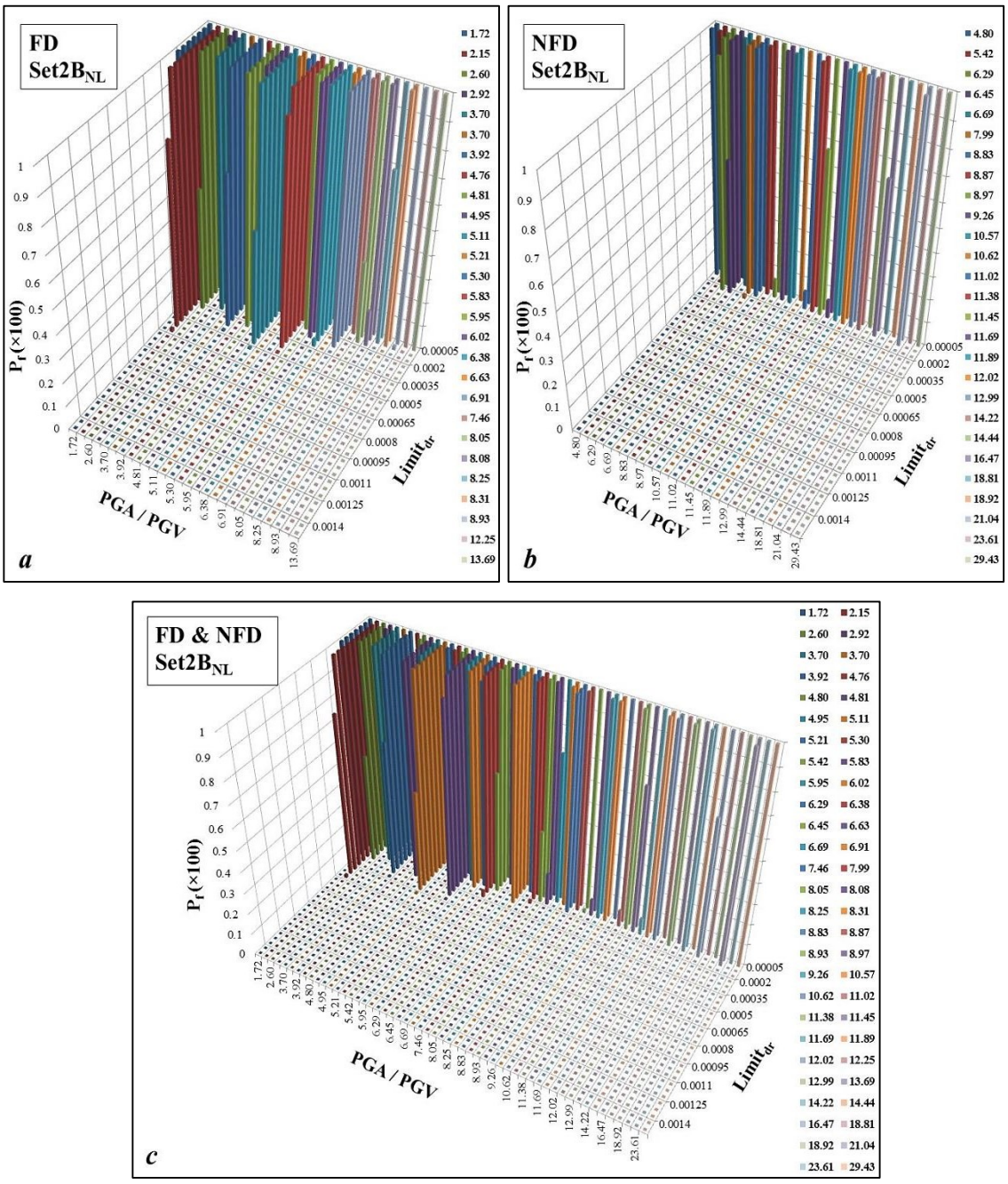
Şekil 4.33: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması ($Set1B_{NL}$).



Şekil 4.34: Faya olan en yakın mesafeye (*r*'ye) göre drix$_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması (Set2B$_{NL}$).



Şekil 4.35: PGA / PGV oranına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması ($Set1B_{NL}$).

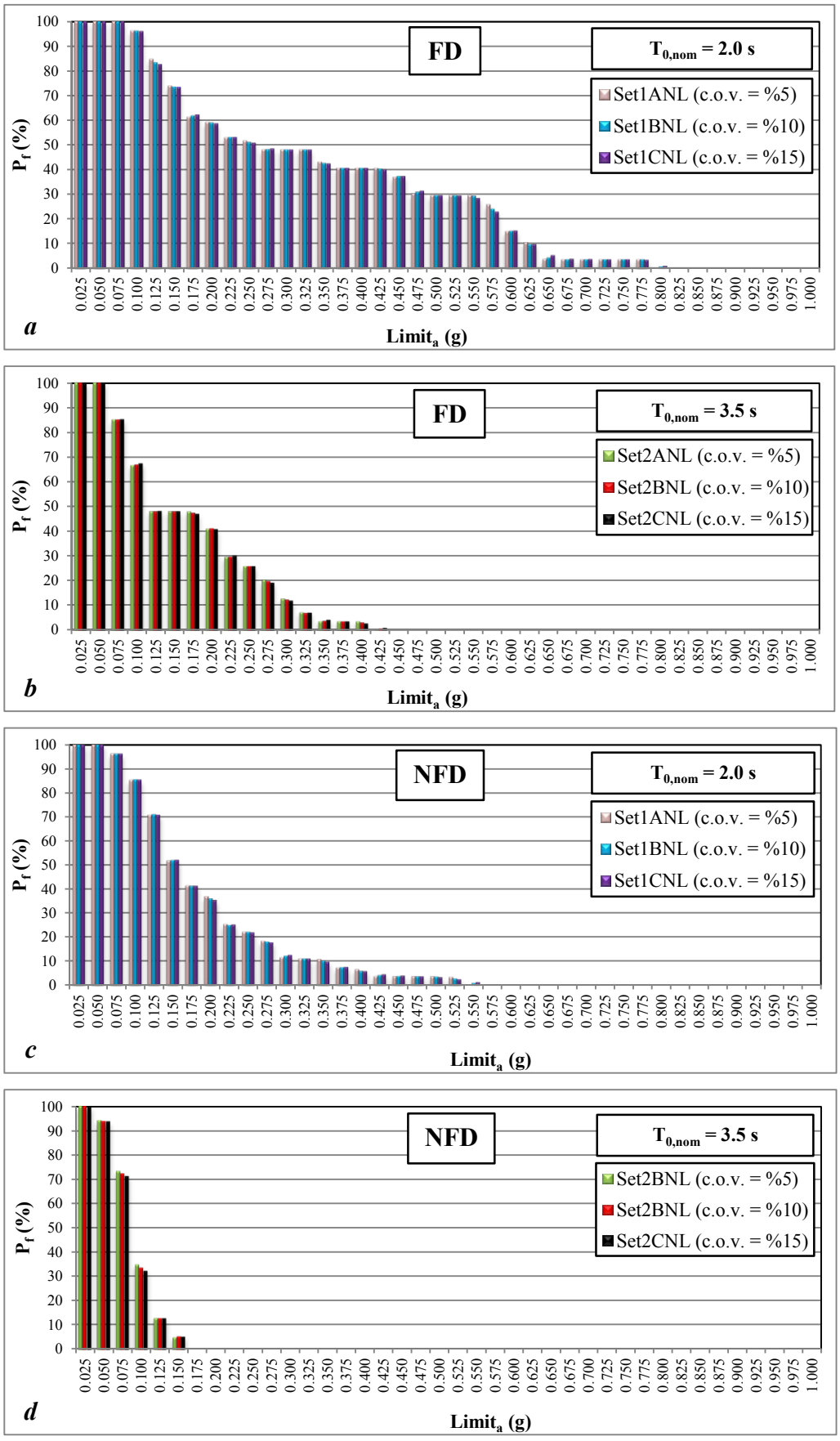


Şekil 4.36: PGA / PGV oranına göre $drix_{max}$ için başarısızlık olasılıkları sıralaması ($Set2B_{NL}$).

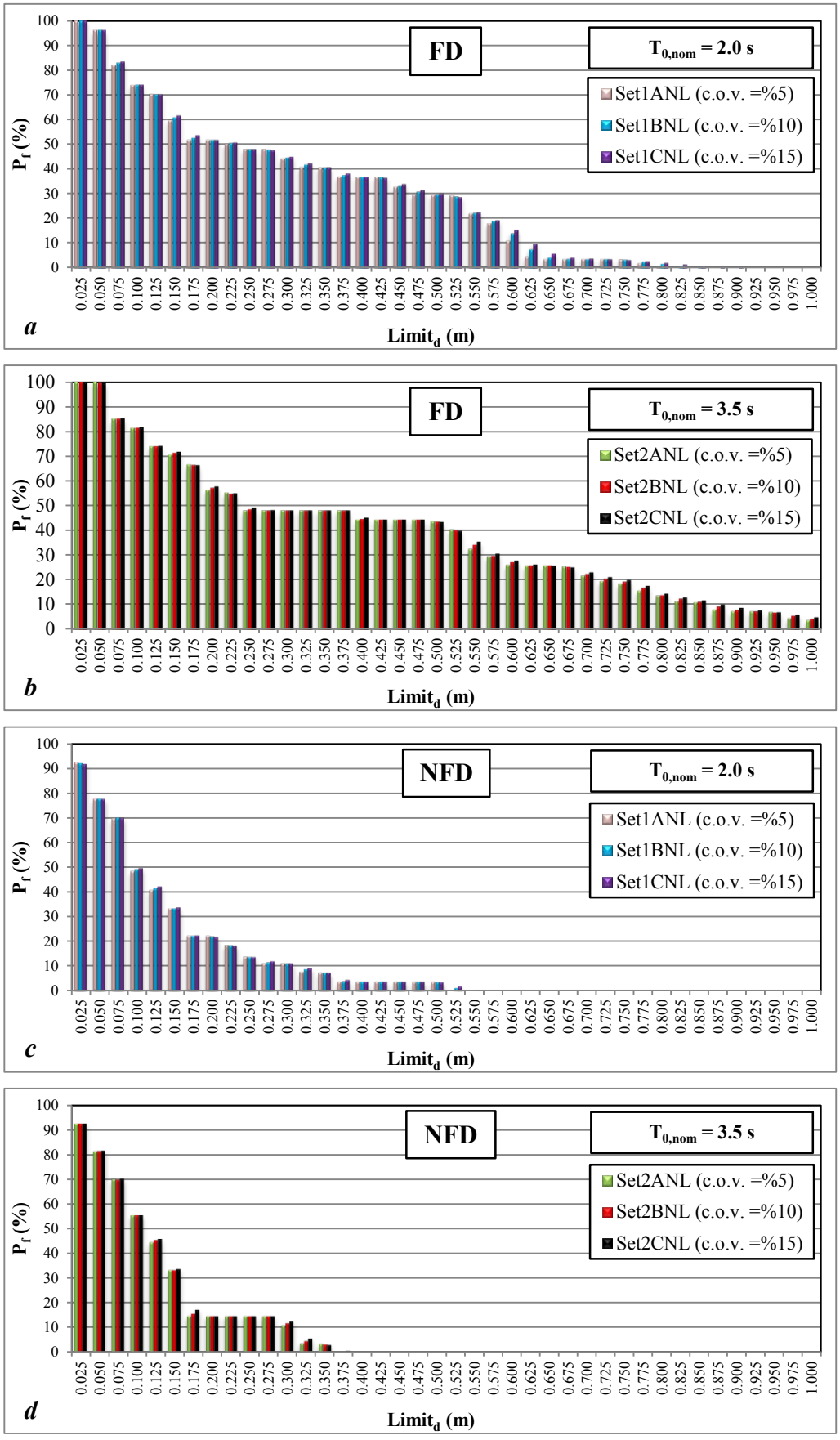
4.1.5. Güvenilirlik Analizlerinin İzolatör Karakteristik Parametreleri Varyasyon Katsayılarına Olan Duyarlılığı

Bu bölümde, Bölüm 4.1.4'de $tfax_{max}$, bdi_{max} ve $drix_{max}$ için gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerinin izolatör karakteristik parametreleri varyasyon katsayılarına olan duyarlılığı incelenmiştir. Söz konusu çalışma kapsamında her bir izolasyon sistemi alt seti için ayrı ayrı olmak üzere, her bir cevap parametresi ($tfax_{max}$, bdi_{max} ve $drix_{max}$) için aynı tür yer hareketleri altında her bir limit adımı seviyesinde elde edilen başarısızlık olasılıklarının (P_f değerlerinin) ortalamaları hesaplanmıştır.

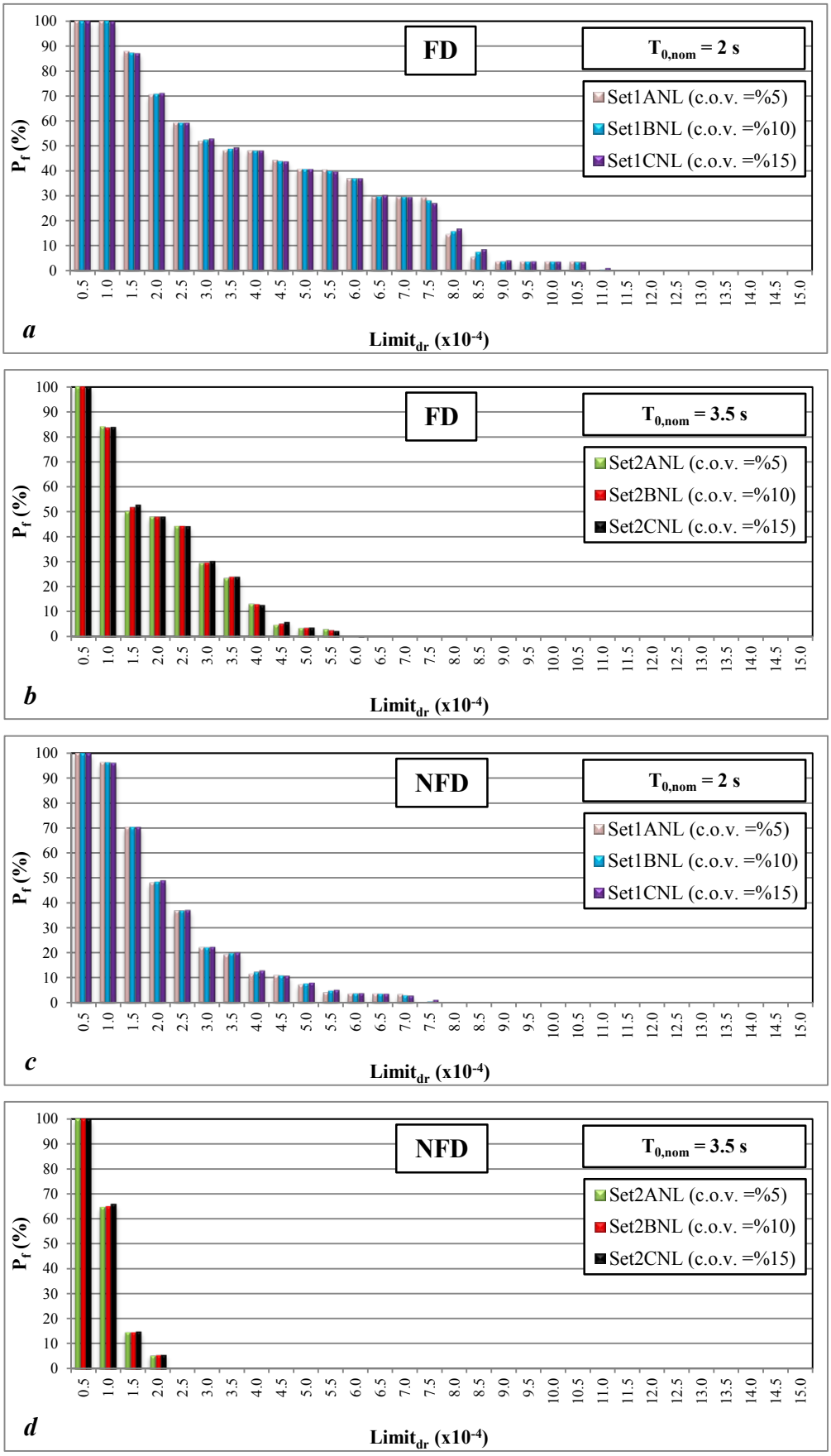
$tfax_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin (Bölüm 4.1.4.1) *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılık analizleri, FD yer hareketleri etkisindeki $T_{0,nom}$ = 2.0 s ve 3.5 s olan sistemler için sırasıyla Şekil 4.37 (a) ve (b)'de; NFD yer hareketleri etkisindeki $T_{0,nom}$ = 2.0 s ve 3.5 s olan sistemler için ise sırasıyla Şekil 4.37 (c) ve (d)'de verilmiştir. Söz konusu şekillerden görüldüğü üzere, $tfax_{max}$ parametresi için aynı tür yer hareketleri altında aynı nominal periyoda ve farklı varyasyon katsayısına sahip setlerden tüm limit adımlarında elde edilen ortalama başarısızlık olasılıkları, birbirine çok yakın olup; aralarındaki fark ihmal edilebilecek kadar küçük mertebelerdedir. $bdix_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin (Bölüm 4.1.4.2) *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılık analizleri ise, FD yer hareketleri etkisindeki $T_{0,nom}$ = 2.0 s ve 3.5 s olan sistemler için sırasıyla Şekil 4.38 (a) ve (b)'de; NFD yer hareketleri etkisindeki $T_{0,nom}$ = 2.0 s ve 3.5 s olan sistemler için ise, sırasıyla Şekil 4.38 (c) ve (d)'de verilmiştir. Benzer şekilde, $drix_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin (Bölüm 4.1.4.3) *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılık analizleri ise, FD yer hareketleri etkisindeki $T_{0,nom}$ = 2.0 s ve 3.5 s olan sistemler için sırasıyla Şekil 4.39 (a) ve (b)'de; NFD yer hareketleri etkisindeki $T_{0,nom}$ = 2.0 s ve 3.5 s olan sistemler için ise, sırasıyla Şekil 4.39 (c) ve (d)'de verilmiştir. Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da yer alan tüm grafiklerden görüldüğü üzere; $bdix_{max}$ ve $drix_{max}$ parametreleri için de $tfax_{max}$ parametresi için olduğu gibi, aynı tür yer hareketleri altında aynı nominal periyoda ve farklı varyasyon katsayısına sahip üretilmiş alt izolasyon sistemi setleri için tüm limit adımlarında elde edilen ortalama başarısızlık olasılıkları birbirine çok yakın olup; aralarındaki fark ihmal edilebilecek kadar azdır. Sonuç olarak, gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerinin (Bölüm 4.1.4) yer hareketi türü ve izolasyon periyodu farklılığından etkilendiği; ancak, izolatör karakteristik parametrelerinin varyasyon katsayılarına karşı duyarlılığının ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.37: $tfax_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılığı.



Şekil 4.38: $bdix_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılığı.



Şekil 4.39: $drix_{max}$ değerlerine göre güvenilirlik analizlerinin *c.o.v.* değerlerine olan duyarlılığı.

4.2. SİSMİK İZOLASYONLU BİNA TÜRÜ YAPILARIN YAKIN-FAY YER HAREKETLERİ ETKİSİNDEKİ OLASILIKSAL DİNAMİK DAVRANIŞININ VE DOĞRUSAL OLMAYAN İZOLASYON SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, mevcut tez ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Bölüm 3.6'de belirtildiği üzere, ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında, izolasyon sistemi karakteristik parametrelerinde çeşitli nedenlerle (Bölüm 2.3.1) meydana gelen değişikliklerin rastgele parametreler olarak göz önüne alındığı sismik izolasyonlu binaların, yakın-fay etkisi içeren depremlere maruz kalması durumunda, dinamik davranışlarının olasılıksal değişimi ve güvenilirlikleri incelenmiştir. Bu bölüm kapsamında izolasyon sistemi parametrelerindeki değişiklikler göz önünde bulundurulduğu gibi, daha kapsamlı bir olasılıksal dinamik davranış analizi gerçekleştirebilmek amacıyla, söz konusu yer hareketlerinin karakteristik parametrelerindeki değişiklikler de göz önünde bulundurulmuş; ve böylece yer hareketlerinin olasılıksal yapısı da dikkate alınmıştır. Mevcut bölüm kapsamında göz önünde bulundurulan puls içeren yakın-fay yer hareketleri, Bölüm 2.4.1.5'de verilen Agrawal ve He (2002) puls modeli kullanılmak suretiyle, sentetik olarak üretilmiştir. Üretilen sentetik depremlerin moment büyüklüğü (M_w) ve faya olan en yakın uzaklık (r) parametrelerine ait değerlerin bilinmesi durumu "Senaryo-I"; kesin olarak bilinmemesi durumu ise "Senaryo-II" olarak incelenmiştir. Senaryo-I dahilinde Bölüm 3.6.1.1'de 9 farklı "$M_w - r$" kombinasyonu için üretilen sentetik deprem setinin her birinin, Bölüm 3.6.1.2'deki gibi üretilen 6 farklı izolasyon sistemleri alt setinin her biri ile oluşturulan binalara uygulanması halinde elde edilen bulgular, Bölüm 4.2.1'de verilmiştir. Senaryo-II dahilinde Bölüm 3.6.2.1'deki 4 farklı nominal M_w değerine bağlı olarak üretilen 4 sentetik deprem setinin, yine Bölüm 3.6.1.2'deki gibi üretilen 6 farklı izolasyon sistemleri alt seti ile oluşturulan binalara uygulanması halinde elde edilen bulgular ise, Bölüm 4.2.2'de verilmiştir.

4.2.1. Senaryo-I için Gerçekleştirilen Analizlere Ait Bulgular

Senaryo-I dahilinde 3 farklı M_w (6.0, 6.5 ve 7.0) ve 3 farklı r (3 km, 6 km ve 9 km) değerine göre oluşturulan 9 farklı "$M_w - r$" kombinasyonu için V_p ve T_p ile ζ_p parametrelerinin her biri için Tablo 3.9'da verilen ölçek ve şekil parametresi değerlerine göre 9 farklı sentetik deprem seti, Bölüm 3.6.1.1'deki gibi üretilmiştir. Mevcut senaryo

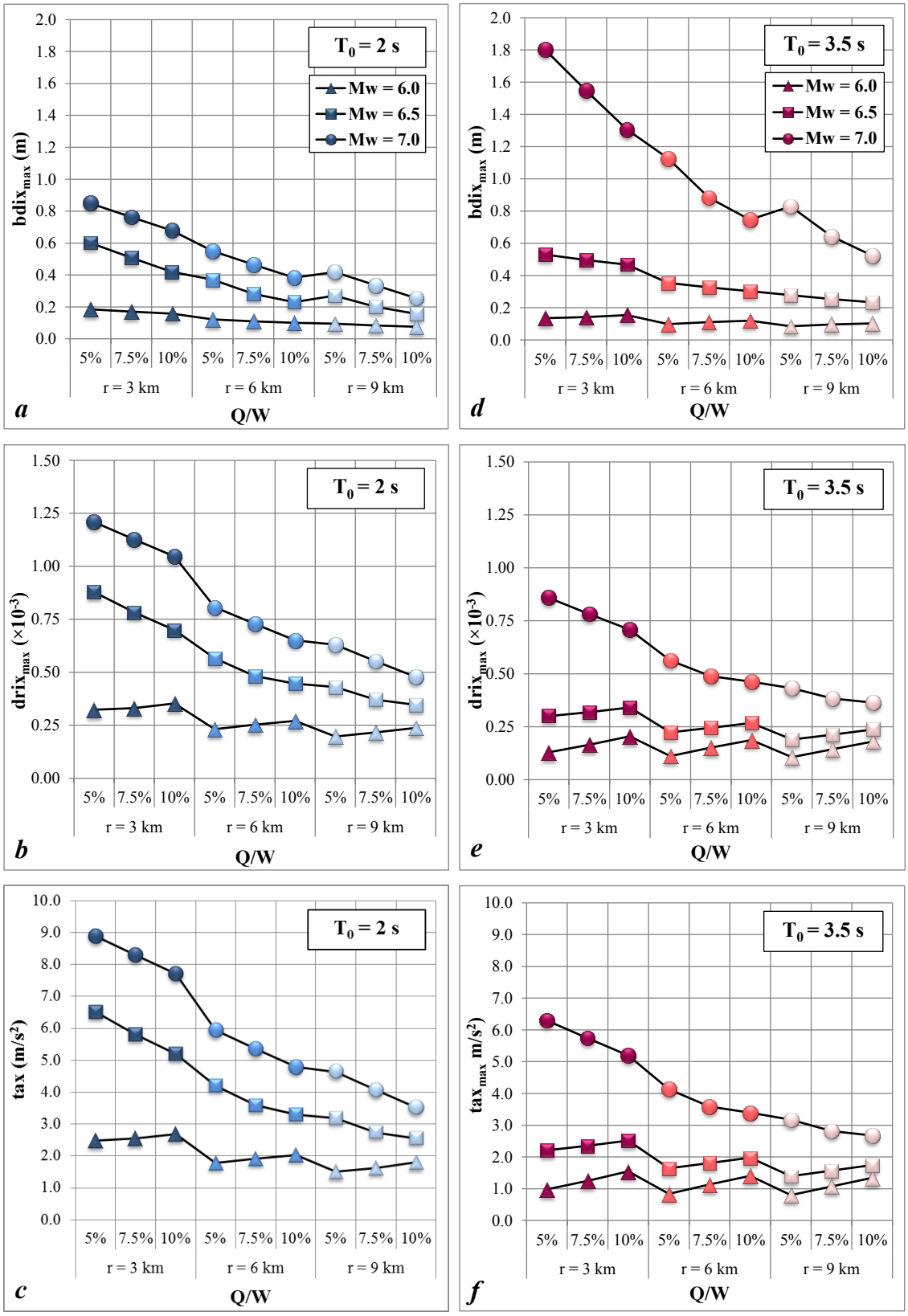
kapsamında söz konusu deprem setlerinin her biri, *c.o.v.* = %10 olmak üzere 2 farklı $T_{0,nom}$ (2.0 s ve 3.5 s) ve 3 farklı $Q_{s,nom}/W$ (%5, %7.5, %10) değeri için oluşturulan 6 farklı "$T_{0,nom}$ - $Q_{s,nom}/W$" kombinasyonu için K_1, K_2, Q, F_y ve D_y parametrelerinin Tablo 3.10'daki değerlerine göre üretilen 6 farklı izolasyon sistemleri alt seti ile oluşturulan sismik izolasyonlu binalara etkitilmiştir. Bölüm 3.6.1.4'de tespit edildiği üzere, her bir deprem setinde 10,000 adet birbirinden farklı karakteristik parametrelere sahip sentetik deprem; her bir izolasyon sistemleri alt setinde ise yine birbirinden farklı karakteristik parametrelere sahip 10,000 adet izolasyon sistemi bulunmaktadır. Bölüm 3.6.1.3'de belirtildiği üzere, mevcut tez ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen modifikasyonlar ile modifiye edilen 3D-BASIS (3D-BASIS-MONTEQ) programı aracılığıyla bir deprem setinde bulunan bir sentetik deprem, bir izolasyon sistemleri alt setinde bulunan ve söz konusu sentetik deprem ile aynı simülasyon sırasına sahip izolasyon sistemi ile oluşturulan sismik izolasyonlu binaya uygulanmış ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. 3D-BASIS-MONTEQ programının bir kez çalıştırılması ile 10,000 adet sentetik depreme maruz bırakılan 10,000 adet sismik izolasyonlu binanın dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. 9 farklı sentetik deprem setinin her birinin, 6 farklı izolasyon sistemleri alt setinin her birine maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilen 54 analiz seti ile mevcut senaryo dahilinde göz önünde bulundurulan 60,000 izolasyonlu binanın tüm sentetik depremler etkisindeki dinamik analizleri (toplam 9×60,000=540,000 analiz) gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.2.1.1'de söz konusu analizler sonucunda elde edilen yapısal cevap parametreleri, Bölüm 4.2.1.2'de bu cevap parametrelerinin belirli limit değerlerine göre başarısızlık olasılıkları ve Bölüm 4.2.1.3'de ise yine söz konusu cevap parametrelerine göre, mevcut bölüm kapsamında oluşturulan tüm sismik izolasyonlu yapılar için gerçekleştirilen performans testlerinin sonuçları verilmiştir.

4.2.1.1. Yapısal Cevap Parametreleri

Bu bölümde, yukarıda belirtildiği üzere Senaryo–I dahilinde 9 farklı "M_w – r" kombinasyonu için üretilen sentetik deprem setinin her birinin, yine mevcut senaryo dahilinde 6 farklı "$T_{0,nom}$ – $Q_{s,nom}/W$" kombinasyonu için üretilen izolasyon sistemleri alt setinin her birine etkitilmesiyle gerçekleştirilen 54 doğrusal olmayan dinamik analiz setinden elde edilen yapısal cevap parametrelerine yer verilmiştir. Gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde, her bir sismik izolasyonlu yapı için her bir sentetik deprem etkisinde elde edilen pik izolatör deplasmanlarının maksimumları ($bdix_{max}$), tüm kat

seviyelerindeki pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları ($drix_{max}$) ve tüm kat kütle merkezlerinde elde edilen pik toplam ivmelerinin maksimumları (tax_{max}) yapısal cevap parametreleri olarak göz önünde bulundurulmuştur. Her bir $T_{0,nom}$ değeri için 3 farklı $Q_{s,nom}/W$ değeri ile oluşturulan izolasyon sistemi alt setlerinden elde edilen söz konusu yapısal cevap parametrelerinin değişimi, kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) grafikleri ile ortaya konmuştur.

Bu bölümde ayrıca, üretilmiş sistemler için üretilmiş sentetik depremler etkisinde elde edilen yapısal cevap parametrelerini değerlendirebilmek amacıyla, her üretilmiş izolasyon sistemleri alt setine referans olan ve karakteristik parametreleri, 2 farklı T_0 ve 3 farklı Q_s/W değeri için Tablo 3.10'daki gibi verilen 6 farklı referans izolasyon sistemi ile oluşturulan 6 referans izolasyonlu yapının dinamik analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu referans yapıların her biri, 9 üretilmiş deprem setine referans olan ve karakteristik parametreleri Tablo 3.8'deki gibi verilen 9 farklı nominal depreme maruz bırakılmıştır. Hız – zaman ve ivme – zaman geçmişleri, sırasıyla Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'de verilen söz konusu nominal depremler, söz konusu referans yapılara sadece X ekseni doğrultusunda etkitilmiştir. Hedef periyotları (T_0 = 2 s) olmak üzere, karakteristik kuvvet oranları (Q_s/W) sırasıyla %5, %7.5 ve %10 olan I. Grup Referans İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan I. Grup Referans İzolasyonlu Yapılar için söz konusu 9 nominal deprem etkisinde elde edilen $bdix_{max}$, $drix_{max}$ ve tax_{max} değerleri, sırasıyla Şekil 4.40 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Benzer şekilde, hedef periyotları (T_0 = 3.5 s) olmak üzere, karakteristik kuvvet oranları (Qs/W) sırasıyla %5, %7.5 ve %10 olan II. Grup Referans İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan II. Grup Referans İzolasyonlu Yapılar için söz konusu 9 nominal deprem etkisinde elde edilen $bdix_{max}$, $drix_{max}$ ve tax_{max} değerleri ise, sırasıyla Şekil 4.40 (d), (e) ve (f)'de verilmiştir. Şekil 4.40'deki grafiklerden görüldüğü üzere, her bir referans yapının maruz kaldığı depremler için r değeri sabit olmak üzere, M_w değerlerinin artması halinde, elde edilen yapısal cevap parametrelerine ait değerler de artmaktadır. Diğer taraftan, her bir referans yapının maruz kaldığı depremler için M_w değeri sabit olmak üzere r değerlerinin azalması halinde, cevap parametrelerine ait değerler artmaktadır. Ayrıca, M_w = 7.0 olmak üzere 3 farklı r değeri için üretilen 3 referans depremin etkisindeki her iki referans binada da Q/W değeri artması halinde tüm yapısal cevap parametreleri azalmaktadır. M_w = 6.0 için bu durum, tersi yönde iken; M_w = 6.5 için değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.40: Referans izolasyonlu binaların nominal depremler etkisindeki yapısal cevap parametreleri; (a) – (c)**:** I. Grup Referans Binalar (d) – (f)**:** II. Grup Referans Binalar.

a) I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için

I. grupta bulunan 3 adet referans izolasyon sistemini referans alarak, izolasyonlu yapı nominal hedef periyodu ($T_{0,nom}$) değerleri 2 s ve nominal karakteristik kuvvet oranı ($Q_{s,nom}/W$) değerleri ise, %5, %10 ve %15 olacak şekilde üretilen I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu binanın, mevcut bölüm çalışmaları kapsamında M_w değerlerinin 6.0, 6.5 ve 7.0 olması halinde üretilen ve her biri 10,000 adet deprem içeren 3'er adet sentetik deprem setine maruz kalması halinde elde edilen pik izolatör deplasmanlarının maksimumlarına ($bdix_{max}$) ait CDF grafikleri sırasıyla Şekil 4.41 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Söz konusu yapıların, yine aynı deprem setlerine maruz kalması halinde elde edilen pik göreli kat ötelemelerinin maksimumları ($drix_{max}$), Şekil 4.42'de; pik toplam kat ivmelerinin maksimumları (tax_{max}) ise, Şekil 4.43'de verilmiştir.

Şekil 4.41'de görüldüğü üzere, tüm M_w değerleri için r'nin artması halinde $bdix_{max}$ değerleri azalmaktadır. Tüm deprem setleri için geçerli olmak üzere, aynı M_w ve r kombinasyonu ile üretilen deprem setine maruz yapı setlerinde $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde $bdix_{max}$ değerleri azalmaktadır. I. grup referans yapıların M_w değerinin 6.0 olduğu referans depremlere maruz kalması halinde elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, Şekil 4.40 (a)'da görüldüğü üzere 0.10 m~0.20 m aralığında değişmekte idi. I. grup üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binalarda M_w = 6.0 için üretilen deprem setleri etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerleri ise; Şekil 4.41 (a)'dan görüldüğü üzere, r = 9 km olması halinde 0.35 m, r = 6 km olması halinde 0.40 m ve r = 3 km olması halinde ise 0.50 m seviyelerine kadar çıkmaktadır. I. grup referans yapıların, M_w değerinin 6.5 ve 7.0 olduğu referans depremlere maruz kalması halinde elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, yine Şekil 4.40 (a)'da görüldüğü üzere sırasıyla 0.15 m~0.60 m ve 0.25 m~0.85 m aralığında değişmekte idi. I. grup üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binalarda M_w = 6.5 ve 7.0 için üretilen deprem setleri etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerleri ise; Şekil 4.41 (b) ve (c)'den görüldüğü üzere, sırasıyla 2.0 m ve 3.5 m seviyelerine kadar çıkmaktadır.

Şekil 4.42'de görüldüğü üzere, tüm M_w değerleri için r'nin artması halinde $drix_{max}$ değerleri azalmaktadır. Şekil 4.42 (a)'da görüldüğü üzere, M_w = 6.0 için aynı r değeri ile üretilen deprem setine maruz yapı setlerinde $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde, $drix_{max}$ değerleri de artmakta iken; M_w = 6.5 ve 7.0 için aynı r değeri ile üretilen deprem setine maruz yapı setlerinde $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde, $drix_{max}$ değerleri azalmaktadır.

Bu durum, I. grup referans yapılar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerinin verildiği Şekil 4.40 (b)'de de aynı şekilde gelişmiştir. I. grup referans yapıların M_w değerinin 6.0 olduğu referans depremlere maruz kalması halinde elde edilen $drix_{max}$ değerleri, Şekil 4.40 (b)'de görüldüğü üzere 0.25×10^{-3} civarında değerler almakta idi. I. grup üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binalarda M_w = 6.0 için üretilen deprem setleri etkisinde elde edilen $drix_{max}$ değerleri ise; Şekil 4.42 (a)'dan görüldüğü üzere, 0.8×10^{-3} seviyelerine kadar çıkmaktadır. I. grup referans yapıların, M_w değerinin 6.5 ve 7.0 olduğu referans depremlere maruz kalması halinde elde edilen $drix_{max}$ değerleri, yine Şekil 4.40 (b)'de görüldüğü üzere, sırasıyla yaklaşık 0.35×10^{-3} ~ 0.85×10^{-3} ve 0.50×10^{-3} ~ 1.25×10^{-3} aralığında değişmekte idi. I. grup üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binalarda M_w = 6.5 ve 7.0 için üretilen deprem setleri etkisinde elde edilen $drix_{max}$ değerleri ise; Şekil 4.42 (b) ve (c)'den görüldüğü üzere, sırasıyla en fazla 3×10^{-3} ve 5×10^{-3} seviyelerine kadar çıkmaktadır. Ancak bu değerler de UBC (1997) yönetmeliğinde sismik izolasyonlu binalar için göreli kat öteleme oranları üst sınırı olarak belirtilen 1×10^{-2} değerinden düşüktür. Bu nedenle, Senaryo-I kapsamında Bölüm 4.2.1.2 ve Bölüm 4.2.1.3'de yapılan değerlendirmelerde göreli kat öteleme oranları göz önünde bulundurulmayacaktır.

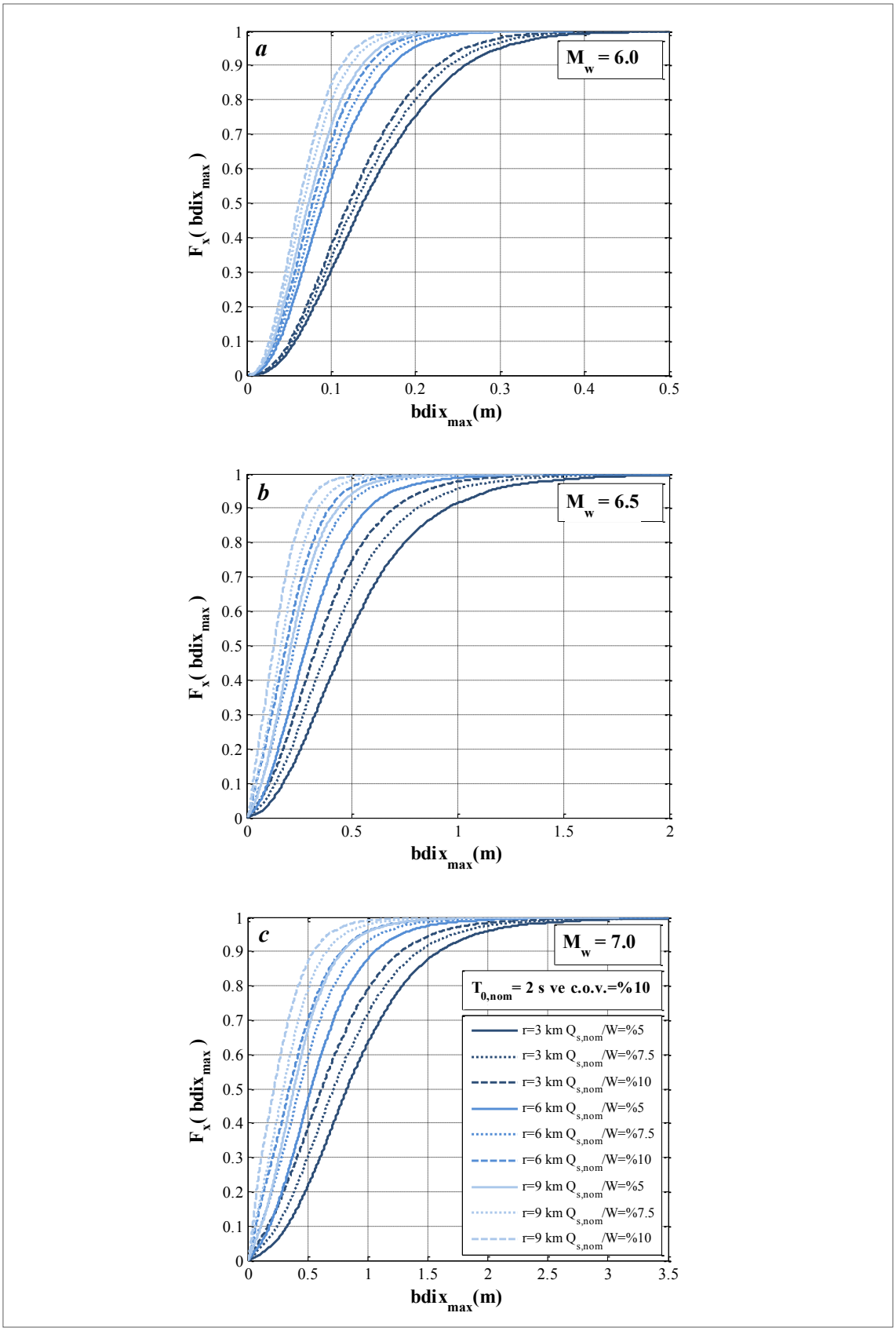
Diğer cevap parametrelerinde olduğu gibi, Şekil 4.43'de görüldüğü üzere tüm M_w değerleri için r'nin artması halinde tax_{max} değerleri azalmaktadır. $drix_{max}$ değerlerinde olduğu gibi (Şekil 4.42), M_w = 6.0 için aynı r değeri ile üretilen deprem setine maruz yapı setlerinde $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde tax_{max} değerleri de artmakta iken; M_w = 6.5 ve 7.0 için aynı r değeri ile üretilen deprem setine maruz yapı setlerinde $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde tax_{max} değerleri azalmaktadır. Bu durum, I. grup referans yapılar için elde edilen tax_{max} değerlerinin verildiği Şekil 4.40 (c)'de de aynı şekilde gelişmiştir. I. grup referans yapıların M_w = 6.0 olan referans depremlere maruz kalması halinde elde edilen tax_{max} değerleri, Şekil 4.40 (c)'de görüldüğü üzere 1.5~2.5 m/s^2 aralığında değerler almakta idi. I. grup üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binalarda M_w = 6.0 için üretilen deprem setleri etkisinde elde edilen tax_{max} değerleri ise; Şekil 4.43 (a)'dan görüldüğü üzere, 5.0 m/s^2 seviyelerine kadar çıkmaktadır. I. grup referans yapıların, M_w değerinin 6.5 ve 7.0 olduğu referans depremlere maruz kalması halinde elde edilen tax_{max} değerleri, yine Şekil 4.40 (c)'de görüldüğü üzere, sırasıyla yaklaşık 2.5 ~ 6.5 m/s^2 ve 3.5 ~ 9.0 m/s^2 aralığında değişmekte idi. I. grup üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binalarda M_w = 6.5 ve 7.0 için üretilen deprem setleri

etkisinde elde edilen tax_{max} değerleri ise; Şekil 4.43 (b) ve (c)'den görüldüğü üzere, sırasıyla 20 m/s^2 ve 35 m/s^2 seviyelerine kadar çıkmaktadır.

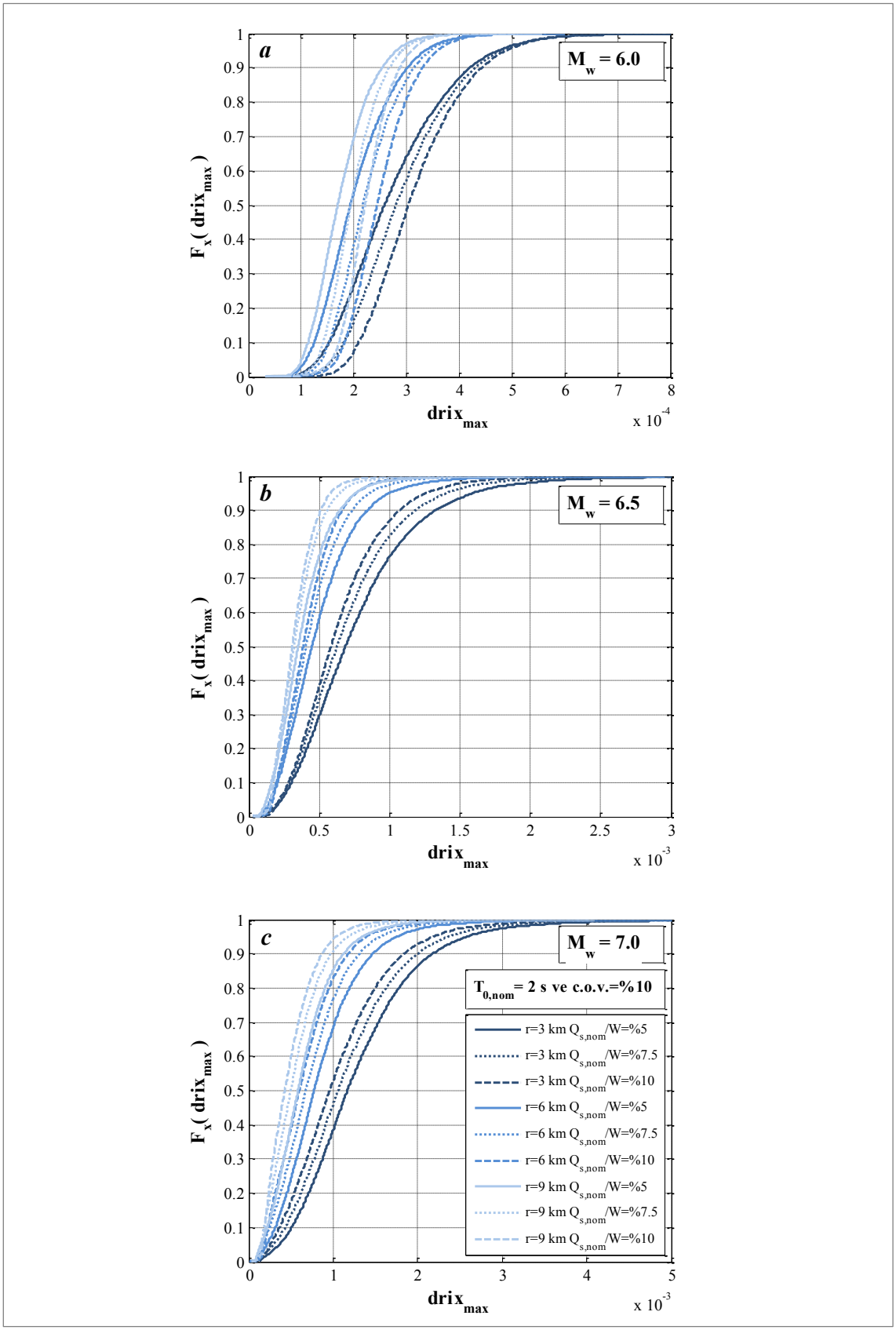
b) II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için

II. grupta bulunan 3 adet referans izolasyon sistemini referans alarak, $T_{0,nom}$ değerleri 3.5 s ve $Q_{s,nom}/W$ değerleri ise, %5, %10 ve %15 olacak şekilde üretilen II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu binanın, mevcut bölüm çalışmaları kapsamında M_w değerlerinin 6.0, 6.5 ve 7.0 olması halinde üretilen 30,000'er adet sentetik depreme maruz kalması halinde elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri ise, sırasıyla Şekil 4.44 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Söz konusu yapıların, yine aynı deprem setlerine maruz kalması halinde elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri, Şekil 4.45'de; tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri ise, Şekil 4.46'de verilmiştir.

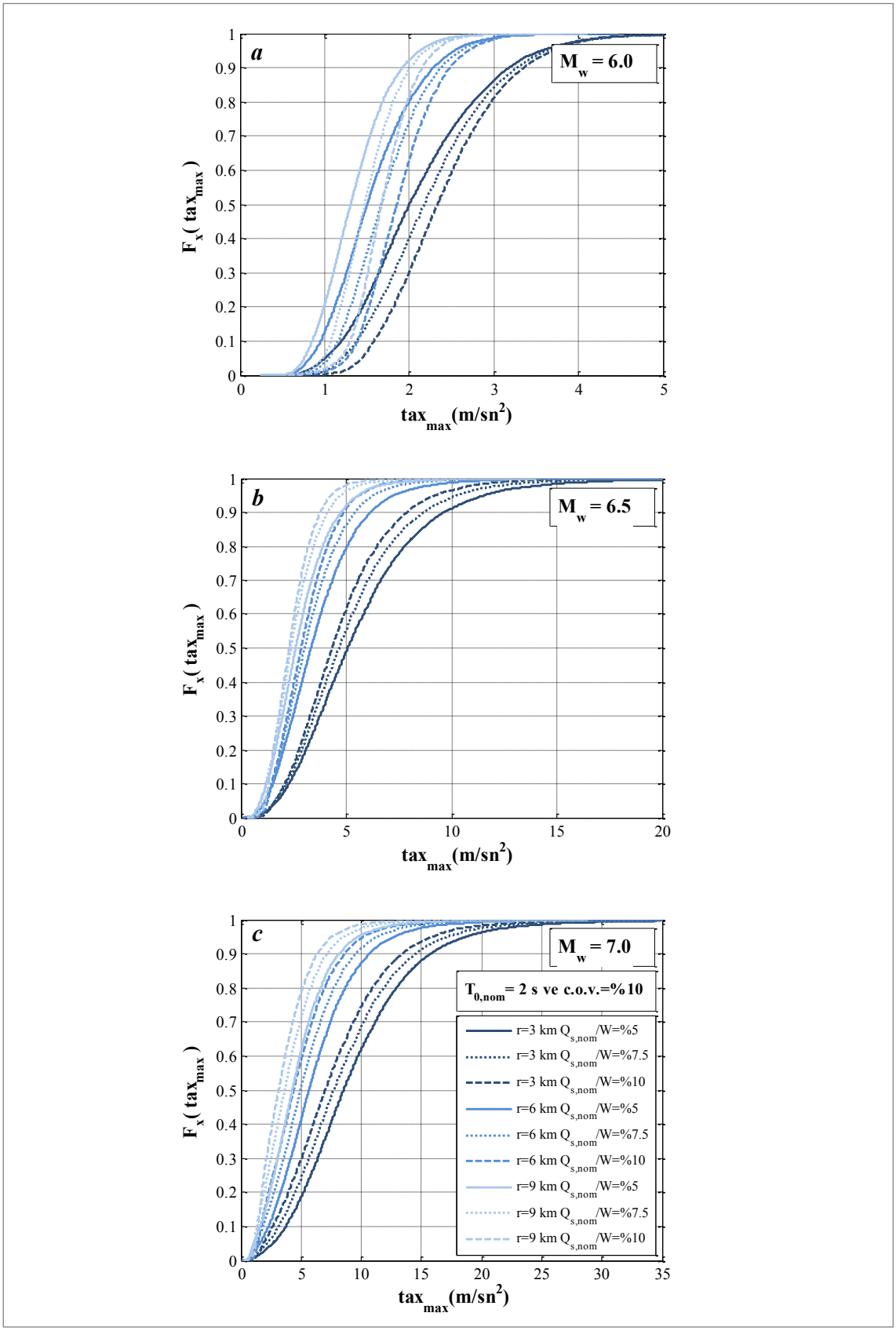
II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binaların, 9 üretilmiş deprem seti etkisinde tüm $Q_{s,nom}/W$ değerlerine bağlı davranışları, bu sistemlerin referansı olan II. Grup Referans İzolasyonlu Yapılarda (Şekil 4.40 (d), (e) ve (f)) olduğu gibidir. $bdix_{max}$, $drix_{max}$ ve tax_{max} parametreleri için II. grup referans izolasyonlu yapılardan elde edilen maksimum değerler sırasıyla yaklaşık 1.8 m, 0.85×10^{-3} ve 6.5 m/s^2 iken, II. grup üretilmiş izolasyon sistemleri ile oluşturulan binalarda söz konusu parametreler için elde edilen değerlerin sırasıyla 6 m (Şekil 4.44 (c)), 3×10^{-3} (Şekil 4.45 (c)) ve 20 m/s^2 (Şekil 4.46 (c)) değerlerine kadar çıkabildiği görülmektedir. Şekil 4.41 ve Şekil 4.44'ün karşılaştırılmasından görüldüğü üzere ise, M_w = 6.0 için I. ve II. Grup binalarda elde edilen $bdix_{max}$ değerleri birbirlerine yakın iken, M_w = 6.5 ve 7.0 olması durumunda II. Grup binalardan ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, I. Grup binalardan ($T_{0,nom}$ = 2.0 s) elde edilenlerin yaklaşık 2 katına çıkmaktadır. Bu durum, Şekil 4.42 ve Şekil 4.45'de görüldüğü üzere; $drix_{max}$ parametresi için tersine dönmekte ve periyot artışına bağlı olarak elde edilen $drix_{max}$ değerleri tüm deprem setleri için yaklaşık yarısına düşmektedir. Benzer şekilde, tax_{max} değerleri, I. Grup binalarda, II. Grup binalara göre daha yüksektir. Kısa periyotlu olan I. Grup binalar için elde edilen tax_{max} değerleri, M_w = 6.0, 6.5 ve 7.0 olması durumlarında II. Grup binalara göre sırasıyla yaklaşık 2 kat, 4 kat ve 1.75 kat daha fazladır.



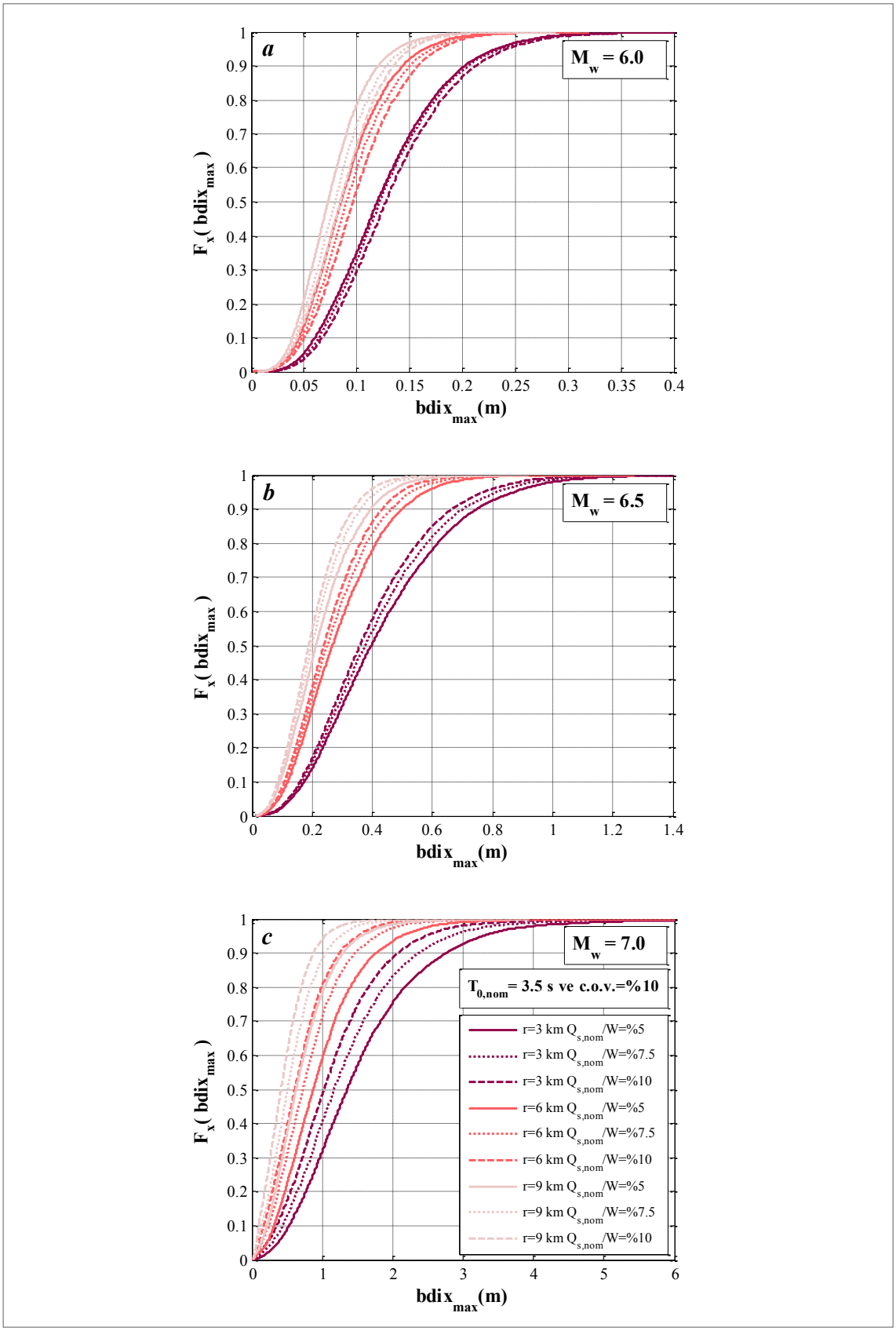
Şekil 4.41: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



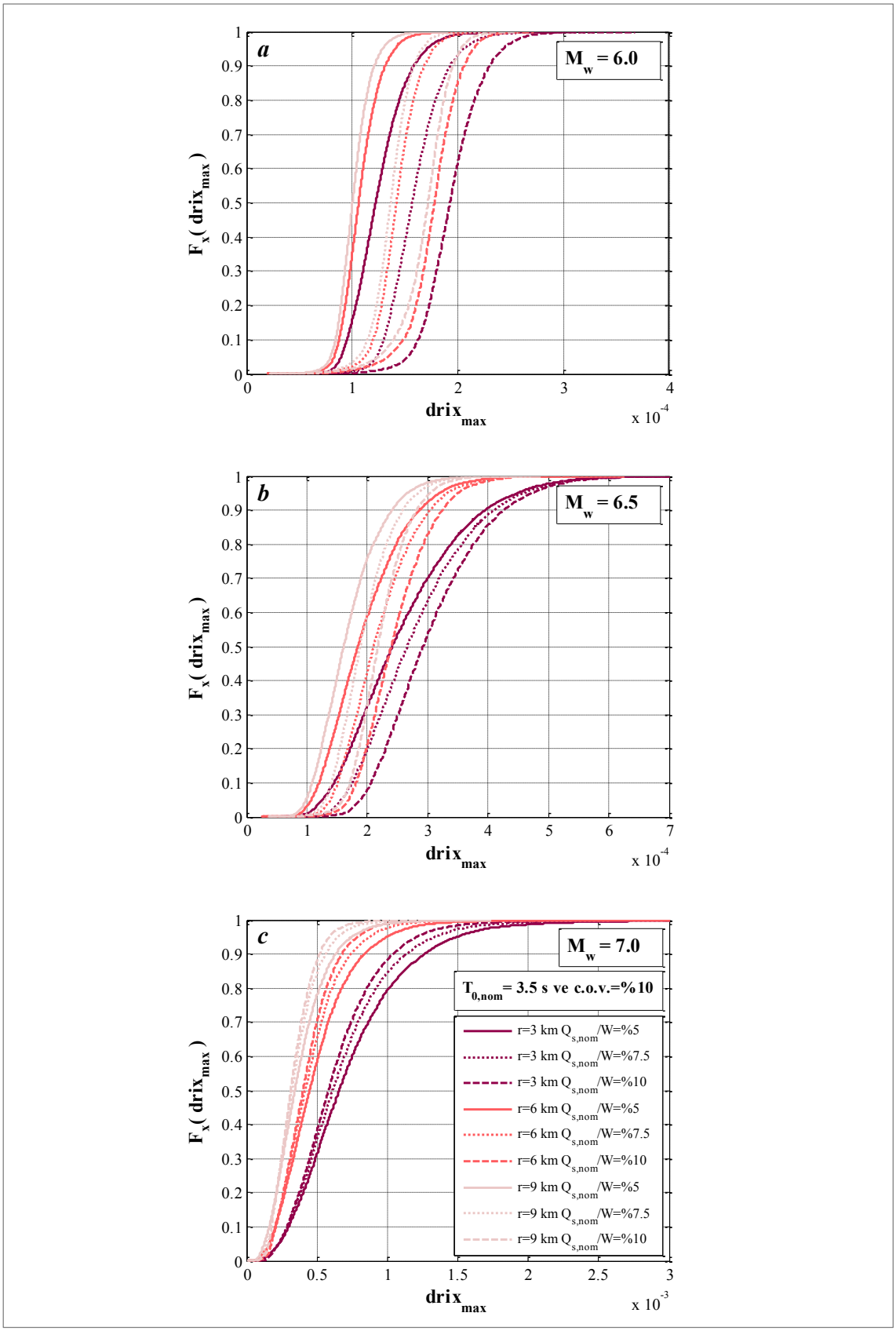
Şekil 4.42: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



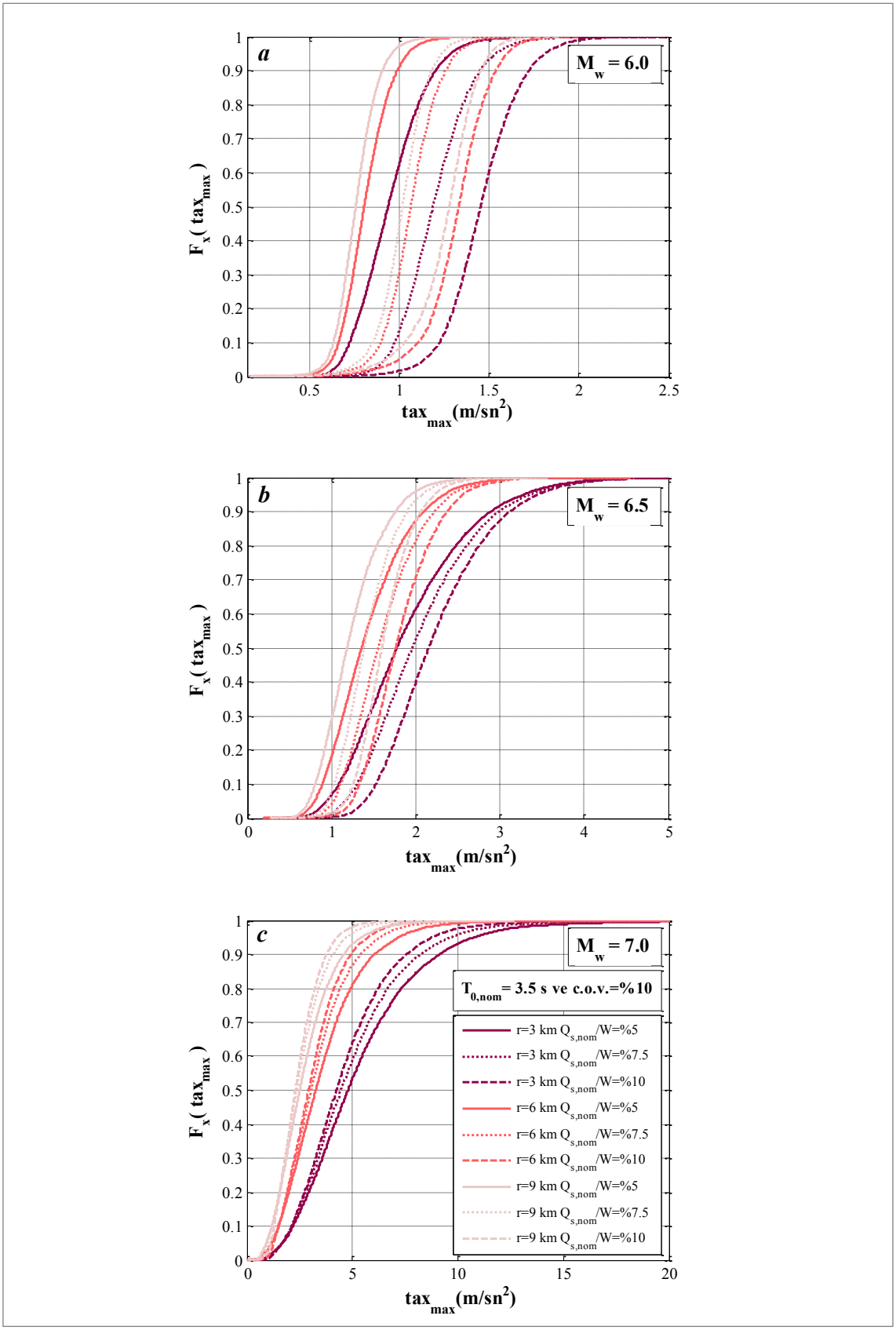
Şekil 4.43: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 4.44: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 4.45: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 4.46: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri.

4.2.1.2. Güvenilirlik Analizleri

Bu bölümde, Senaryo-I kapsamında üretilen 6 adet izolasyon sistemleri alt seti ile oluşturulan 6 adet sismik izolasyonlu bina setinin her birinin mevcut senaryo kapsamında üretilen 9 sentetik deprem setine maruz kalması halinde, Bölüm 4.2.1.1'deki gibi elde edilen yapısal cevap parametrelerinin, bu parametreler için belirlenen limit değerlerini aşma olasılıkları yani başarısızlık olasılıkları elde edilmiştir. Zira, sismik izolasyonlu bir yapı sisteminde yapısal bütünlüğün korunması için izolatör deplasmanları belli limitlerin altında kalması gerekirken; yapının barındırabileceği hassas cihazların da maruz kaldığı ivmelerin belirli limit değerleri aşmaması gerekmektedir. Bu nedenle, bu bölümdeki çalışmalar sismik izolasyonlu yapıların yapısal bütünlüğünü koruyabilmek için izolatör deplasmanlarının aşmaması gereken limit değerleri ve söz konusu yapıların içerisinde ivmeye duyarlı cihazlar bulunması halinde, bu yapıların cihaz bazında performansa dayalı tasarımları için kat ivmelerinin aşmaması gereken limit değerleri ortaya koyabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Burada öncelikle, mevcut senaryo kapsamında incelenen binaların yapısal bütünlüğünün tehlikeye girmemesi için izolatörlerin deplasman kapasitelerini temsilen aşılmaması gereken izolatör deplasman seviyeleri (Limit_d) oluşturulmuş ve mevcut senaryo kapsamında oluşturulan tüm bina setleri için ayrı ayrı olmak üzere, bu limitlerin aşıldığı durumların yüzdesi (başarısızlık olasılıkları), söz konusu bina setlerindeki tüm binalar için elde edilen pik izolatör deplasmanlarının maksimumlarının (bdix_{max}) söz konusu limitleri aşanlarının sayısı bina setindeki toplam bina sayısına (N_{MCA}=10,000) oranlanarak hesaplanmıştır. Ardından, söz konusu binalarda ivmeye duyarlı hassas cihazların bulunması halinde bu yapıların cihaz bazında performansa dayalı tasarımları için kat ivmelerinin aşmaması gereken limit değerleri (Limit_a) oluşturulmuş ve yine mevcut senaryo kapsamında oluşturulan tüm bina setleri için ayrı ayrı olmak üzere bu limitlerin aşıldığı durumların yüzdesi; bdix_{max} için olduğu gibi, söz konusu bina setlerindeki tüm binalar için elde edilen kat kütle merkezi pik ivmelerinin maksimumlarının (tax_{max}) söz konusu limitleri aşanlarının sayısı bina setindeki toplam bina sayısına oranlanarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.40 ve Şekil 4.45'den görüldüğü üzere; göz önünde bulundurulan tüm deprem setleri etkisinde I. ve II. Grup İzolasyonlu Bina Alt Setleri için elde edilen pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumlarının ulaşabildiği maksimum değerler, sırasıyla 5×10^{-3}

ve 3×10^{-3} olup; bu değerler, yönetmeliklerde (UBC, 1997; ASCE/SEI 7-05, 2006) doğrusal olmayan izolasyon sistemine sahip sismik izolasyonlu binaların doğrusal olmayan zaman tanım analizleri ile hesaplanan pik göreli kat ötelemelerinin maksimumu için üst sınır olarak belirlenen 1×10^{-2} değerinden görüldüğü üzere, düşüktür. Bu nedenle, bu bölümde ve Bölüm 4.2.1.3'de yapılan değerlendirmelerde göreli kat öteleme oranları göz önünde bulundurulmamıştır. Dolayısıyla mevcut çalışmada, sismik izolasyonlu yapıların yapısal bütünlüğü ve cihaz bazında performansa dayalı tasarımları için yapılan değerlendirmelerde yapısal cevap parametreleri olarak, $bdix_{max}$ ve tüm kat kütle merkezlerinde elde edilen tax_{max} göz önünde bulundurulmuştur.

Pan ve diğ. (2005) tarafından rapor edildiği üzere, maksimum tasarım deplasmanı ile burkulma veya yırtılma durumlarına karşılık gelen azami deformasyon seviyesindeki deplasman değeri, 0.80 m çapındaki doğal kauçuk izolatörler için sırasıyla 0.45 m~0.55 m ve 0.60 m~0.80 m seviyelerindedir. Yine aynı çalışmada (Pan ve diğ., 2005) belirtildiği üzere, maksimum tasarım ve azami deformasyon seviyelerindeki deplasman değerleri, 0.80 m çapındaki HDRB tipi izolatörler için sırasıyla 0.45 m~0.55 m ve 0.55 m~0.80 m seviyelerinde iken; yine 0.80 m çapındaki LRB tipi izolatörler için sırasıyla 0.40 m~0.50 m ve 0.60 m~0.70 m seviyelerindedir. Diğer taraftan izolatör üretici firmalarına ait kataloglara bakıldığında, örneğin Dynamic Isolation Systems (2013)'ün LRB'ler için yayınlamış olduğu izolatör mühendislik özellikleri kataloğunda izolatör çapları, 0.305 m~1.55 m aralığında değişmekte olup; bu izolatörler için maksimum deplasman kapasitelerinin ise, 0.15 m~0.91 m aralığında değiştiği görülmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, mevcut çalışma kapsamında pik izolatör deplasmanlarının maksimumları için limit değerleri ($Limit_d$), 0.40 m, 0.60 m, 0.80 m ve 1.00 m olarak alınmıştır. Yine, Pan ve diğ. (2005) çalışmasında belirtildiği üzere; yönetmeliklerde açık bir şekilde belirtilmese de maksimum yatay ivme değerleri yaygın bir kural olarak 3 m/s^2 ($\approx 0.3g$) ile sınırlandırılmaktadır. Mizuno ve diğ. (1986) tarafından belirtildiği üzere; bu limit değer, tıbbi ve elektronik cihazlar için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Ayrıca, Worksafe Technologies (2013)'de temin edildiği üzere, bazı disk sürücüleri için çalışma ve çalışmama durumlarında aşılmaması gereken maksimum ivme limitlerinin ise, 0.2 g~1.0 g aralığında değiştiği görülmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, mevcut çalışma kapsamında kat kütle merkezlerindeki pik toplam ivmelerin maksimumları için limit değerleri ($Limit_a$) ise; 0.1 g, 0.2 g, 0.5 g ve 1.0 g olarak alınmıştır.

a) Pik İzolatör Deplasmanlarının Maksimumları ($bdix_{max}$) için

I. ve II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan binaların, mevcut çalışma kapsamında üretilen tüm deprem setlerine maruz kalması durumunda elde edilen $bdix_{max}$ değerlerinin yukarıda belirtildiği üzere 4 deplasman limitine göre başarısızlık olasılıkları, sırasıyla Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü üzere, üretilen deprem setleri M_w değerlerine göre gruplandırılmıştır.

I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan 3 farklı bina setinin her birinin, $M_w = 6.0$ olması durumunda 3 farklı r değeri için üretilen 3 farklı sentetik deprem setinin her birine maruz kalması durumunda, elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre başarısızlık olasılıkları, Şekil 4.47 (a)'da verilmiştir. Benzer şekilde, söz konusu bina setlerinin her birinin, M_w değerinin 6.5 ve 7.0 olması durumlarında 3 farklı r değeri için üretilen 3'er farklı sentetik deprem setinin her birine maruz kalması durumunda, elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre başarısızlık olasılıkları ise, sırasıyla Şekil 4.47 (b) ve (c)'de verilmiştir. Şekil 4.47 (a)'da görüldüğü üzere, $M_w = 6.0$ olması halinde üretilen 3 sentetik deprem setinin, I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan 3 farklı bina setinin her birine uygulanması halinde gerçekleştirilen 9 analiz setinden elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, hiçbir deplasman limiti değerini aşmamaktadır. Şekil 4.47 (b)'de görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W = \%5$ için oluşturulan bina setinin $M_w = 6.5$ ve $r = 3$ km olması halinde üretilen sentetik deprem setine maruz kalması halinde, 0.4 m limiti için P_f değeri %60'lara ulaşmaktadır. Yani, söz konusu deprem setine maruz kalan söz konusu bina setinde bulunan 10,000 adet binanın yaklaşık 6,000 tanesinde $bdix_{max}$ değeri 0.4 m'yi aşmaktadır. $Q_{s,nom}/W = \%7.5$ ve $Q_{s,nom}/W = \%\ 10$ için oluşturulan bina setlerinin yine aynı sentetik deprem setine maruz kalması halinde ise, 0.4 m limiti için P_f değerleri, sırasıyla yaklaşık %50 ve %40'a inmektedir. Görüldüğü üzere, aynı deprem setine maruz bina setleri için $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde, $bdix_{max}$ parametresi için P_f değerleri azalmaktadır. Yine bu şekilden görüldüğü üzere, r değerinin artması halinde aynı $Q_{s,nom}/W$ değerine sahip bina seti için $bdix_{max}$ parametresinin P_f değerleri azalmaktadır. Ayrıca, limit değerlerinin ($Limit_d = 0.4$ m, 0.6 m, 0.8 m ve 1.0 m) artmasına paralel olarak, her bir bina setinden elde edilen P_f değerleri de düşmektedir.

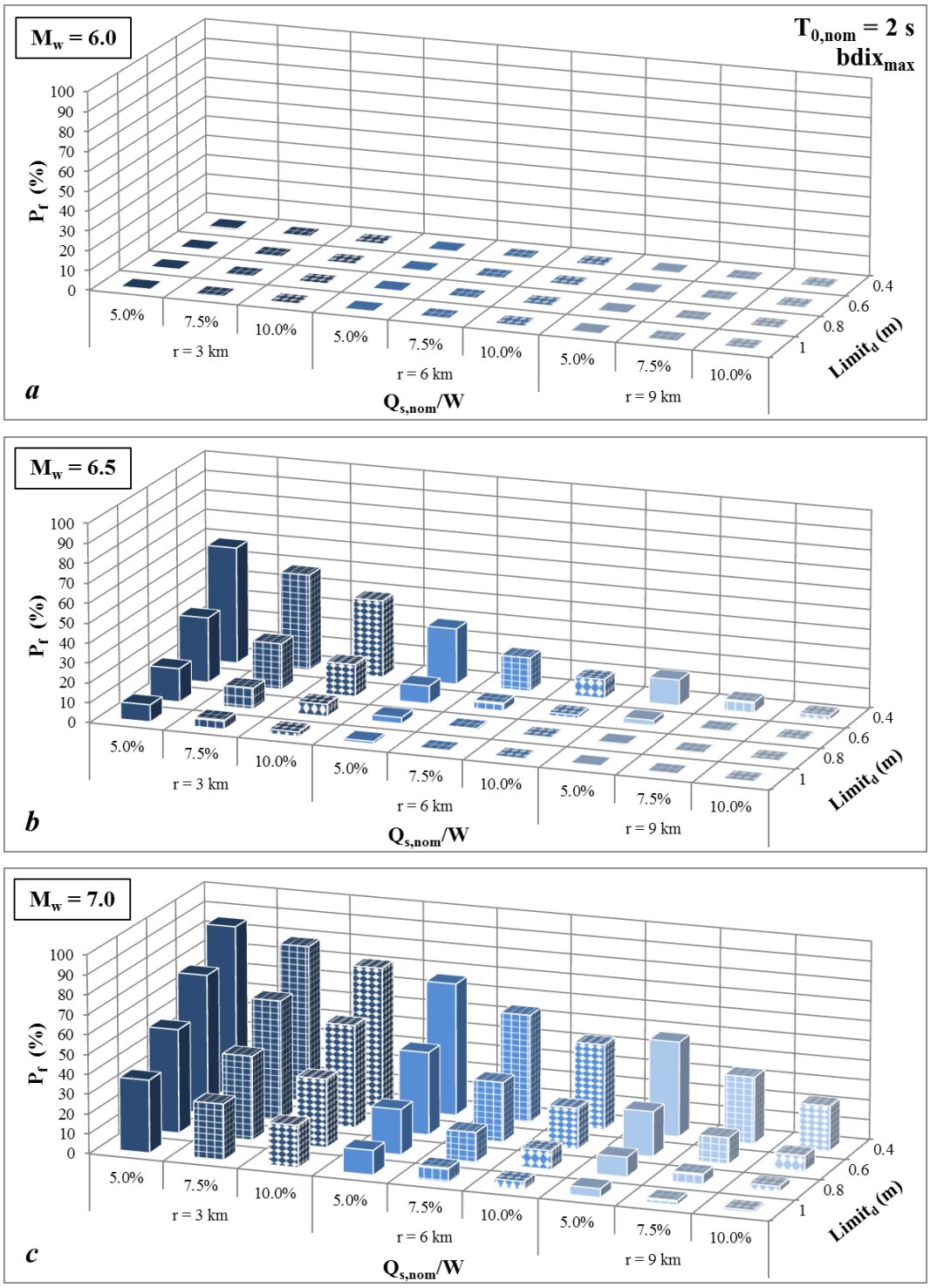
M_w değerinin 7.0 olması halinde üretilen 3 deprem setinin, yine I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan 3 farklı bina setinin her birine uygulanması

halinde elde edilen P_f değerleri ise, Şekil 4.47 (c)'de görüldüğü üzere diğer M_w değerleri için üretilen depremler etkisinde elde edilen P_f değerlerinden oldukça yüksektir. $Q_{s,nom}/W$ = %5 için oluşturulan bina setinin, M_w = 7.0 ve r = 3 km için üretilen sentetik deprem setine maruz kalması halinde, 0.4 m limiti için P_f değeri %85 seviyelerine çıkmaktadır. Aynı bina setinin, yine aynı deprem setine maruz kalması halinde 1.0 m limiti için P_f değeri ise, %36 seviyelerindedir. Yani söz konusu bina setinde bulunan 10,000 binanın yaklaşık 3,600 adedinde izolatör deplasmanları, 1.0 m limitini aşabilmektedir. Yine $Q_{s,nom}/W$ = %5 için oluşturulan bina setinin, M_w = 7.0 ve r = 9 km için üretilen sentetik deprem setine maruz kalması halinde, P_f değeri ise yaklaşık %50'dir. Aynı bina setinin, M_w = 6.0 ve r = 9 km ile M_w = 6.5 ve r = 9 km olması durumlarında üretilen sentetik deprem setlerine maruz kalması halinde, P_f değerleri, Şekil 4.47 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere, sırasıyla yaklaşık %0 ve %10 idi. Buradan görüldüğü üzere, M_w değerinin 6.5'dan 7.0'ye çıkması halinde izolatör deplasmanlarında meydana gelen artış, M_w değerinin 6.0'dan 6.5'e çıkması halinde söz konusu deplasmanlarda meydana gelen artışlardan çok daha fazladır. Ayrıca, Şekil 4.47 (c)'de de görüldüğü üzere; Şekil 4.47 (b)'de olduğu gibi aynı deprem setine maruz yapılar için $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde, $bdix_{max}$ parametresi için P_f değerleri azalmaktadır. Yine bu şekilden görüldüğü üzere, r değerinin artması halinde aynı $Q_{s,nom}/W$ değerine sahip bina seti için $bdix_{max}$ parametresinin P_f değerleri azalmaktadır.

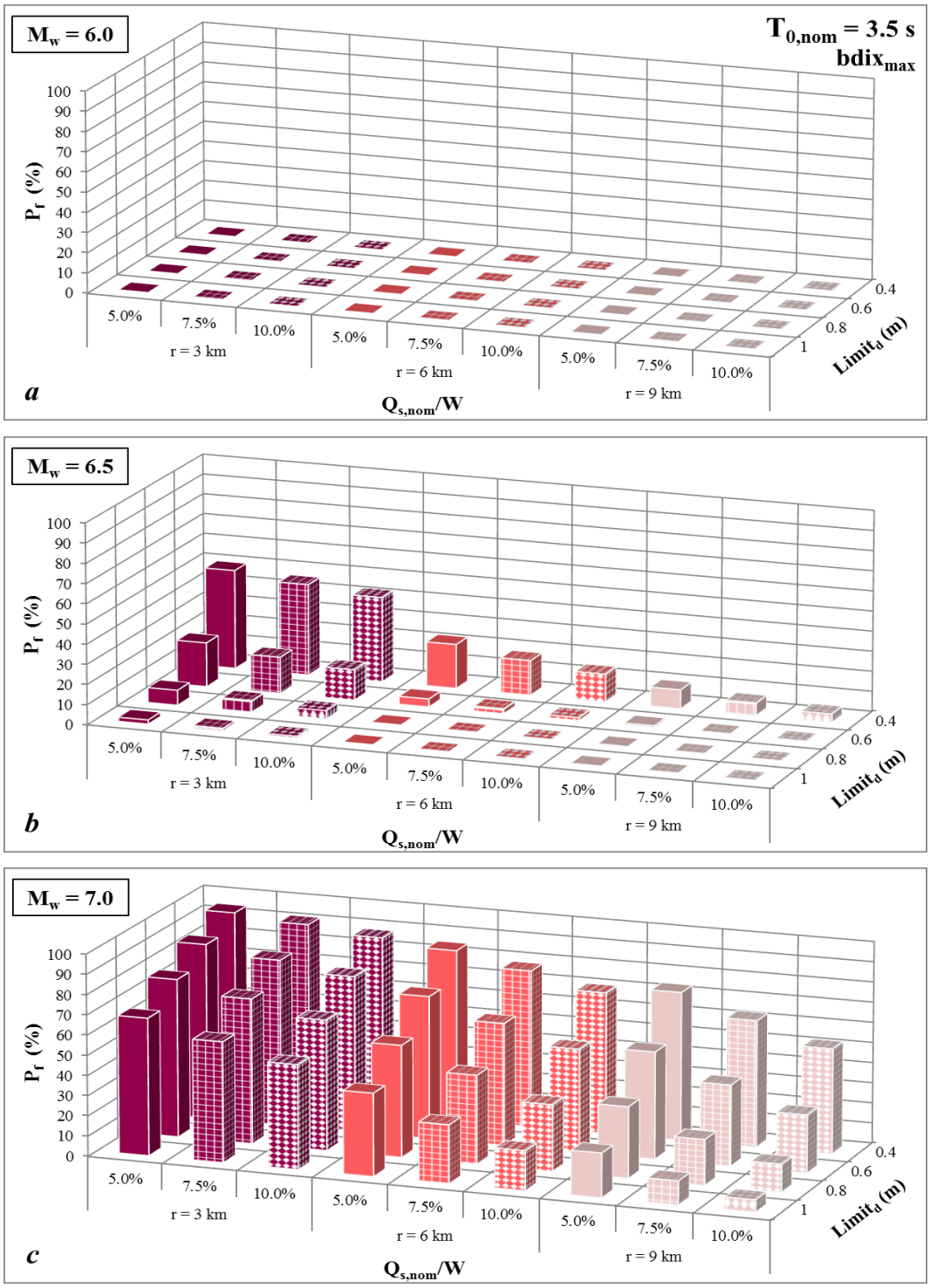
II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan 3 farklı bina setinin her birinin, M_w = 6.0 olması durumunda 3 farklı r değeri için üretilen 3 farklı sentetik deprem setinin her birine maruz kalması durumunda, elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre başarısızlık olasılıkları, Şekil 4.48 (a)'da verilmiştir. Burada da I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan bina setleri için olduğu gibi, M_w = 6.0 olması halinde üretilen 3 sentetik deprem setinin söz konusu bina setlerinin her birine uygulanması halinde gerçekleştirilen 9 analiz setinden elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, hiçbir deplasman limiti değerini aşmamaktadır. M_w = 6.5 için üretilen deprem setlerinin II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan bina setlerine uygulanması halinde $bdix_{max}$ parametresi için elde edilen P_f değerlerinde (Şekil 4.48 (b)), I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan binalardan elde edilen P_f değerlerine (Şekil 4.47 (b)) göre bir miktar azalma olmakla birlikte, söz konusu şekillerdeki P_f değerlerinin $Q_{s,nom}/W$, r ve $Limit_d$ değerlerine göre değişimi benzerdir. M_w

= 7.0 için üretilen deprem setlerinin II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan bina setlerine uygulanması halinde $bdix_{max}$ parametresi için elde edilen P_f değerlerinde (Şekil 4.48 (c)) ise, I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan binalardan elde edilen P_f değerlerine (Şekil 4.47 (c)) göre, tüm r ve $Q_{s,nom}/W$ seviyeleri için önemli artışlar olmaktadır. $Q_{s,nom}/W$ = %5 için oluşturulan bina setinin M_w = 7.0 ve r = 3 km için üretilen sentetik deprem setine maruz kalması halinde, 0.4 m limiti için P_f değeri %95 seviyelerine çıkmaktadır. Aynı bina setinin, yine aynı deprem setine maruz kalması halinde 1.0 m limiti için P_f değeri ise, %68 seviyelerindedir. Bu değer, $T_{0,nom}$ = 2 s olmak üzere aynı $Q_{s,nom}/W$ değerine sahip bina setinde %36 idi (Şekil 4.47 (c)). Görüldüğü üzere, nominal hedef periyodun artması halinde M_w = 6.0 ve M_w = 6.5 için üretilen deprem setleri etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerlerinin başarısızlık olasılıklarında çok fazla değişme olmazken; M_w = 7.0 olması halinde tüm r değerleri için üretilen deprem setlerine maruz kalan tüm bina setlerinin P_f değerlerinde önemli artışlar olmaktadır.

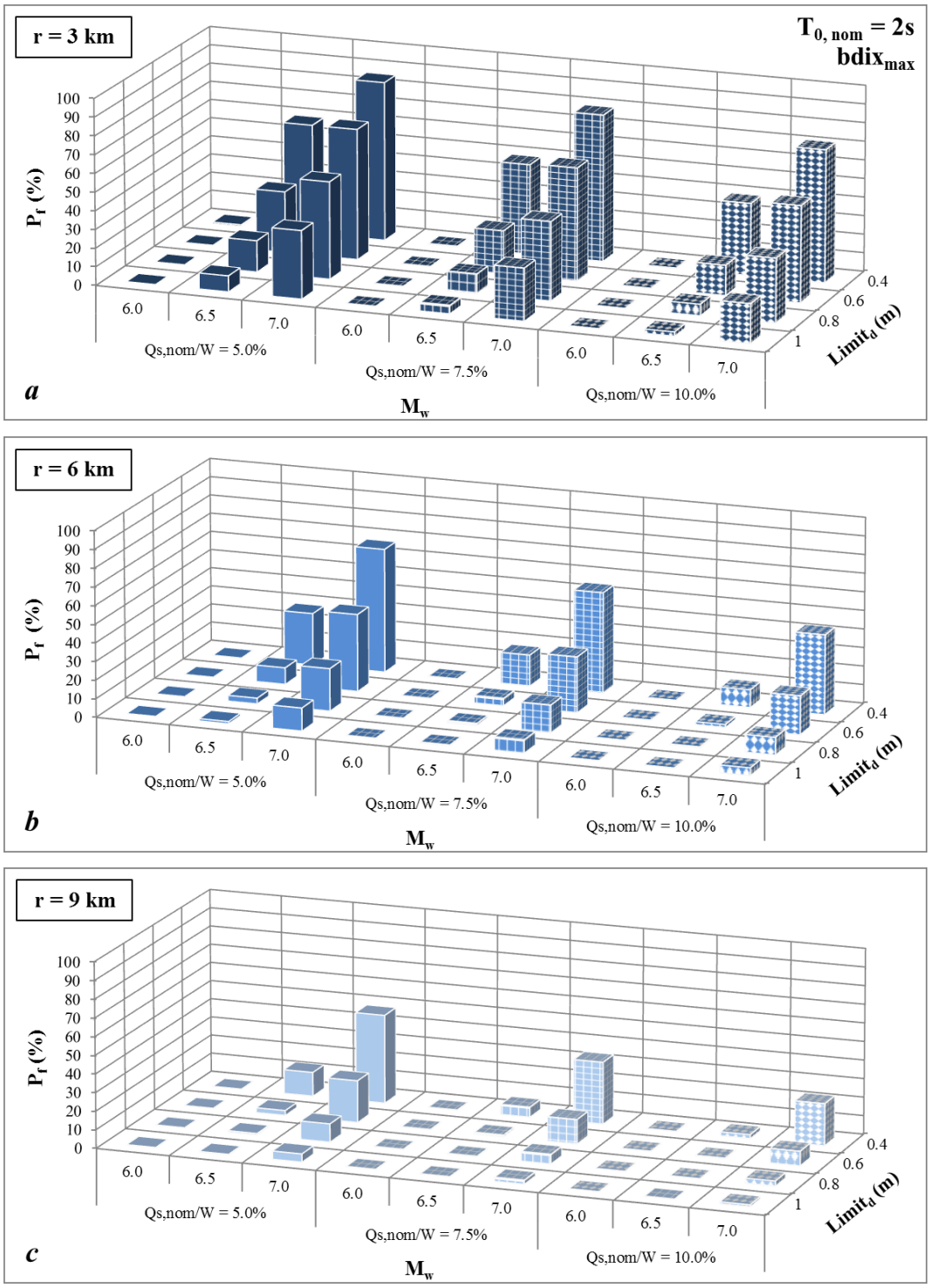
I. Grup ve II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıklarının r'ye göre değişimi ise sırasıyla, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, r'nin azalması, M_w'nun artması ve $Q_{s,nom}/W$'nun azalması hallerinde her iki grup bina setleri için de P_f değerleri, artmaktadır. Şekil 4.49 (a)'dan görüldüğü üzere, r = 3 km mesafede M_w = 7.0 büyüklüğünde depremin oluşması halinde, $Q_{s,nom}/W$ = % 5 olan I. Grup Alt Bina Setlerinde 1.0 m limiti dahi, %50'lere varan başarısızlık olasılıkları ile aşılabilmektedir. Yine aynı şekilden görüldüğü üzere, aynı deprem kombinasyonu için $Q_{s,nom}/W$ = % 10 olan I. Grup Alt Bina Setlerinde söz konusu 1.0 m limiti için başarısızlık olaslıkları gerilemektedir; ancak hala %20'ler civarındadır. Şekil 4.50 (a)'dan görüldüğü üzere, r = 3 km mesafede M_w = 7.0 büyüklüğünde depremin oluşması halinde, $Q_{s,nom}/W$ = % 10 olan II. Grup Alt Bina Setlerinde ise 1.0 m limiti, %50'lerin üzerinde başarısızlık olasılıkları ile aşılabilmektedir. Şekil 4.50 (c)'den görüldüğü üzere; aynı bina seti için r = 9 km ve M_w = 7.0 deprem kombinasyonundaki 1.0 m limiti %5'ler seviyesine gerilemektedir. Ancak yine de bu oran çok yüksek olup; yine aynı deprem kombinasyonuna maruz $Q_{s,nom}/W$ = % 10 olan II. Grup Alt Bina Setlerinde (Şekil 4.50 (c)) 1.0 m limiti için başarısızlık olasılıkları %20'lere ulaşmaktadır.



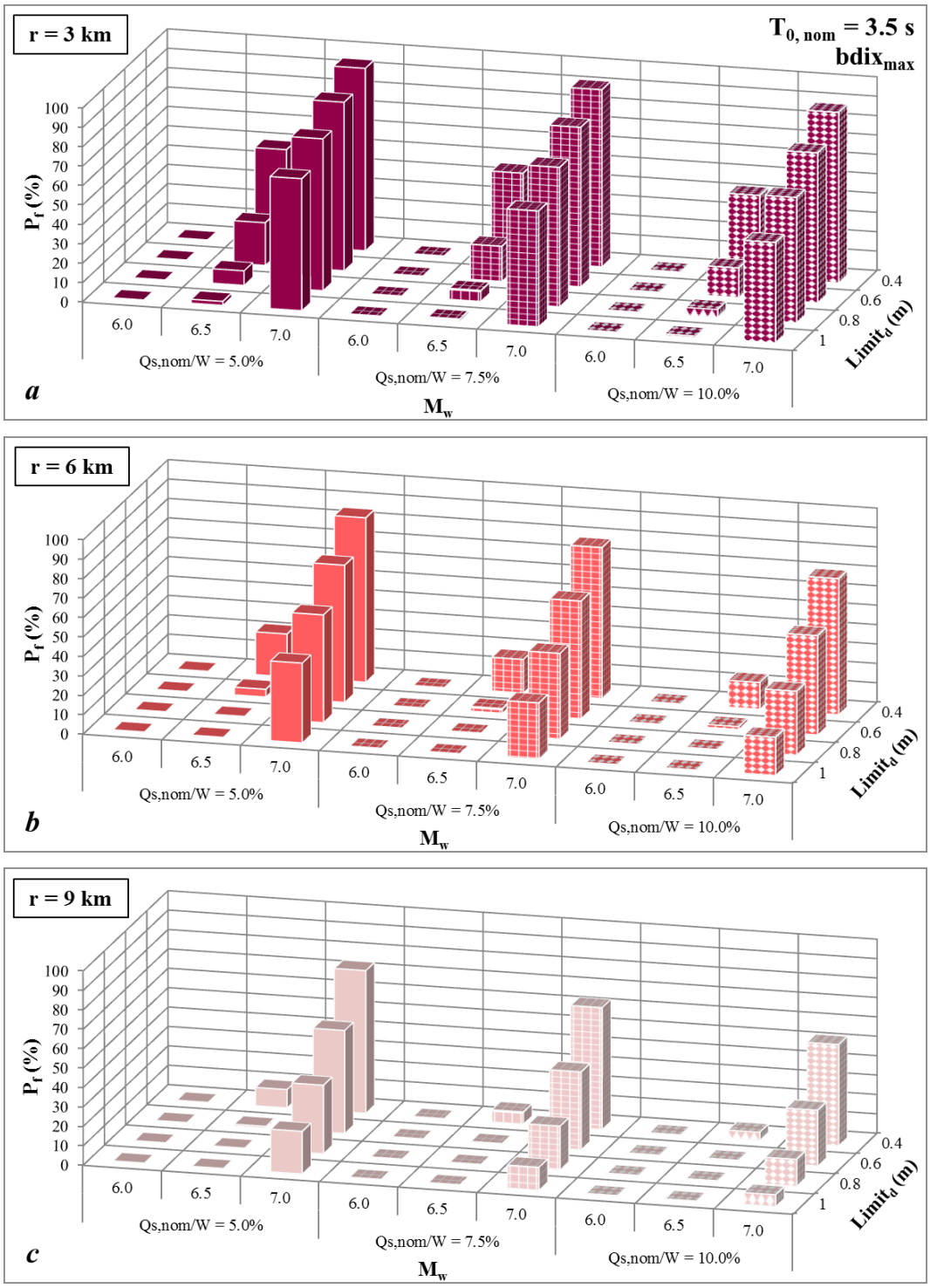
Şekil 4.47: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre).



Şekil 4.48: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre).



Şekil 4.49: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre).



Şekil 4.50: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre).

b) Pik Kat Kütle Merkezi Toplam İvmelerinin Maksimumları (tax_{max}) için

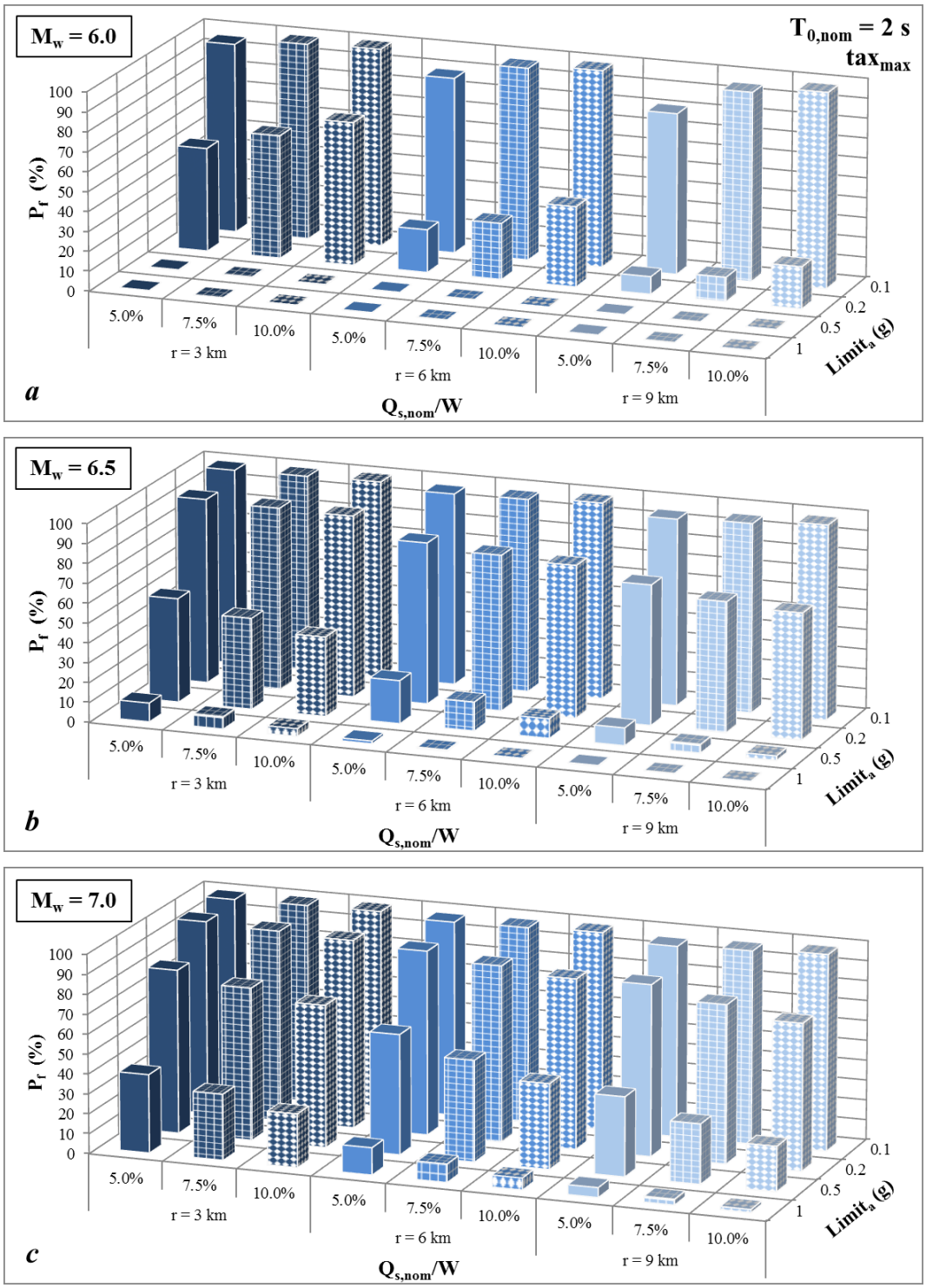
I. ve II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan binaların, mevcut çalışma kapsamında üretilen tüm deprem setlerine maruz kalması durumunda elde edilen tax_{max} değerlerinin dört farklı ivme limitine göre başarısızlık olasılıkları (P_f), sırasıyla Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'de verilmiştir. Bu şekillerde de görüldüğü üzere, üretilen deprem setleri M_w değerlerine göre gruplandırılmıştır. Aynı bina setleri için elde edilen P_f değerlerinin r'ye göre gruplandırılmış halleri ise, sırasıyla sırasıyla Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'da verilmiştir.

I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan 3 farklı bina ($Q_{s,nom}/W$=%5, %7.5 ve %10) setinin her birinin, yine M_w = 6.0, 6.5 ve 7.0 her biri için üretilen 3'er farklı sentetik deprem setinin her birine maruz kalması durumunda, elde edilen tax_{max} değerlerine göre başarısızlık olasılıkları, Şekil 4.51 (a), (b) ve (c)'da verilmiştir. Şekil 4.51'den görüldüğü üzere, I. Grup Bina Setleri için elde edilen tax_{max} değerleri, 0.1 g limitini M_w = 6.0 olması halinde dahi önemli ölçüde aşmaktadır. Şekil 4.51 (a)'da görüldüğü üzere, M_w = 6.0 ve r = 3 km için üretilen sentetik deprem setinin söz konusu 3 farklı bina setinin her birine uygulanması halinde gerçekleştirilen 3 analiz setinden elde edilen tax_{max} değerlerinin yaklaşık %50~% 70'i 0.2 g limitini aşmaktadır. 0.2 g limitindeki P_f değerleri, r = 6 km için %20~% 40 aralığında; r = 9 km için ise, yaklaşık %10~% 20 aralığında değişmektedir. Yine, Şekil 4.51 (a)'da görüldüğü üzere söz konusu sistemlerin M_w = 6.0 için üretilen depremlere maruz kalması halinde tax_{max} değerleri, 0.5 g ve 1.0 g limitlerini aşmamaktadır. Diğer taraftan Şekil 4.51 (b)'de görüldüğü üzere, M_w = 6.5 için 0.5 g limiti, %2~%50 aralığında değişen P_f değerleri ile aşılabilirken; Şekil 4.51 (c)'de görüldüğü üzere, M_w = 7.0 olması halinde söz konusu 0.5 g limitinin aşılma olasılıkları, tüm r ve tüm $Q_{s,nom}/W$ değerleri için önemli ölçüde artmakta; yaklaşık %23~%82 aralığında değişen değerler almaktadır. Yine, Şekil 4.51 (b) ve (c)'nin karşılaştırılmasından görüldüğü üzere, I. Grup Bina Setlerinin M_w = 6.5 için üretilen deprem setlerine maruz kalması halinde 1.0 g limiti için P_f değerleri, oldukça düşük (max: %9.5) iken; bu setlerin özellikle M_w = 7.0 ve r = 3 km için üretilen deprem setine maruz kalması halinde söz konusu 1.0 g limiti için P_f değerleri, yine önem arz eden seviyelerdedir (%27~%40).

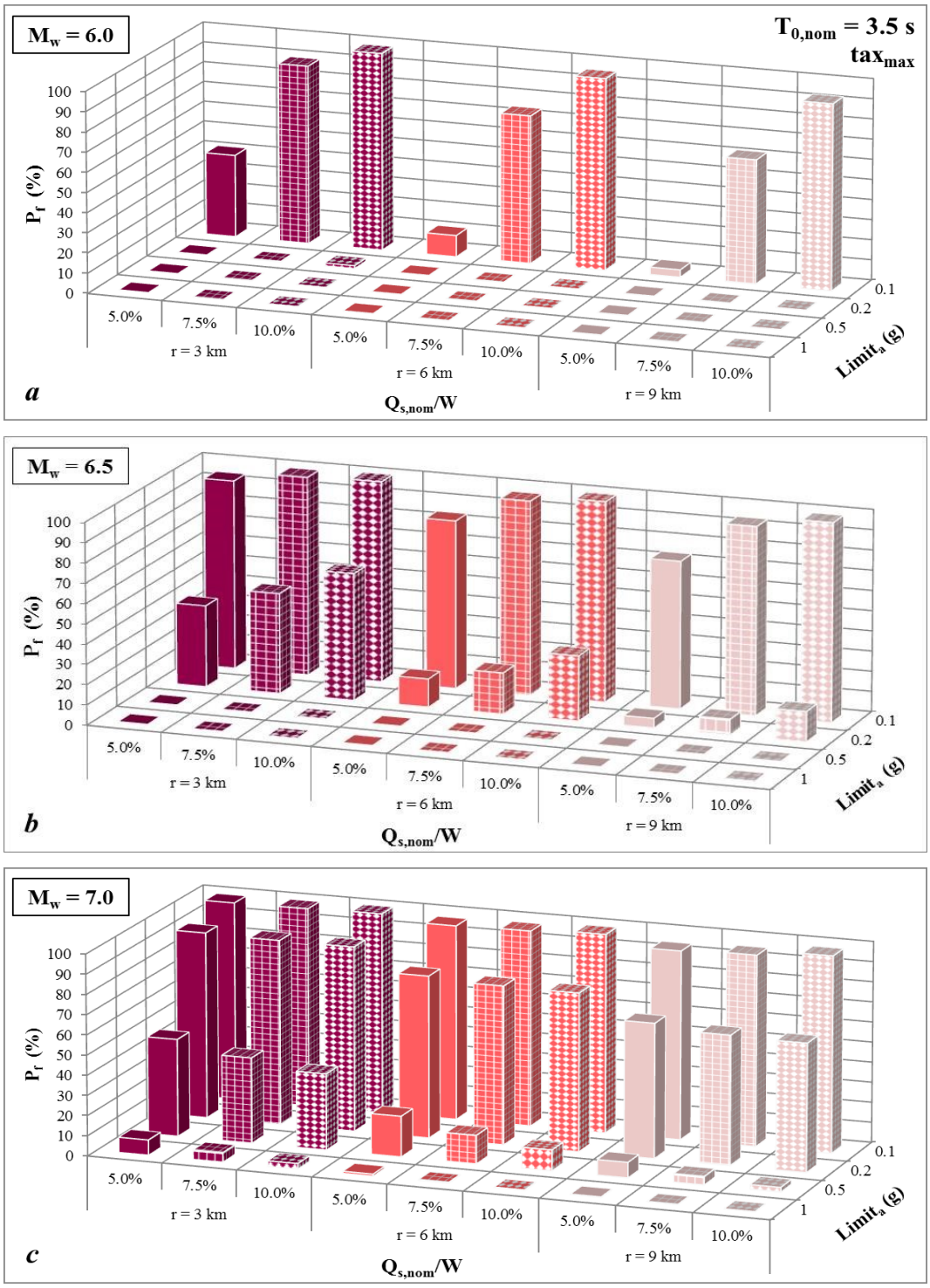
II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemi Alt Setleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan 3 farklı bina ($Q_{s,nom}/W$=%5, %7.5 ve %10) setinin her birinin, yine M_w = 6.0, 6.5 ve 7.0 her biri için üretilen 3'er farklı sentetik deprem setinin her birine maruz kalması durumunda, elde edilen tax_{max} değerlerine göre başarısızlık olasılıkları ise, Şekil 4.52 (a), (b) ve (c)'da verilmiştir. Şekil 4.52 (a)'dan görüldüğü üzere, özellikle $Q_{s,nom}/W$ değerinin %7.5 ve %10 olması halinde oluşturulan bina setleri için 0.1 g önemli ölçüde (%90'ların üzerinde P_f değerleri ile) aşılırken; $Q_{s,nom}/W$ değerinin %5 olduğu bina seti için tüm r seviyelerinde 0.1 g limitinin aşılma olasılıkları, periyodun artmasına bağlı olarak Şekil 4.51 (a)'ya önemli ölçüde düşmüştür. Yine Şekil 4.52 (a)'dan görüldüğü üzere, II. Grup Bina Setlerinin hiçbiri için hiçbir deprem seti altında 0.2 g, 0.5 g ve 1.0 g limitleri aşılmamaktadır. Şekil 4.52 (b)'de görüldüğü üzere; tax_{max} için belirlenen 0.5 g ve 1.0 g limitleri, söz konusu bina setlerinin hiçbirinde M_w = 6.5 için üretilen deprem setleri etkisinde aşılmamaktadır. Kısa periyotlu olan I. Grup Bina setlerinde 0.5 g limiti, M_w = 6.5 ve r = 3 km olması halinde %50'ye varan P_f değerleri ile aşılabilirken; periyot artışına bağlı olarak kat ivmelerinin 0.5 g limiti altına gerilediği görülmektedir.

Diğer taraftan, Şekil 4.52 (c)'de görüldüğü üzere ise, tax_{max} için belirlenen 0.5 g limiti, söz konusu bina setlerinin M_w = 7.0 için üretilen deprem setlerine maruz kalması halinde, I. Grup Bina Setlerine (Şekil 4.51 (c)) oranla daha düşük olsa da hâlâ aşılmakta olup; söz konusu bina setlerinin özellikle M_w = 7.0 ve r = 3 km için üretilen depremler etkisinde 0.5 g limiti için P_f değerleri, hâlâ önem arz edecek seviyelerdedir (%38~%48). Aynı M_w ve r değeri için üretilen deprem seti etkisindeki II. Grup Bina setleri için 1.0 g limitine ait P_f değerleri de I. Grup Bina Setlerine (Şekil 4.51 (c)) oranla daha düşük (%3~%8) olup; r'nin 6 km ve 9 km olması halinde, söz konusu bina setlerinde 1.0 g limitinin aşılmadığı görülmektedir.

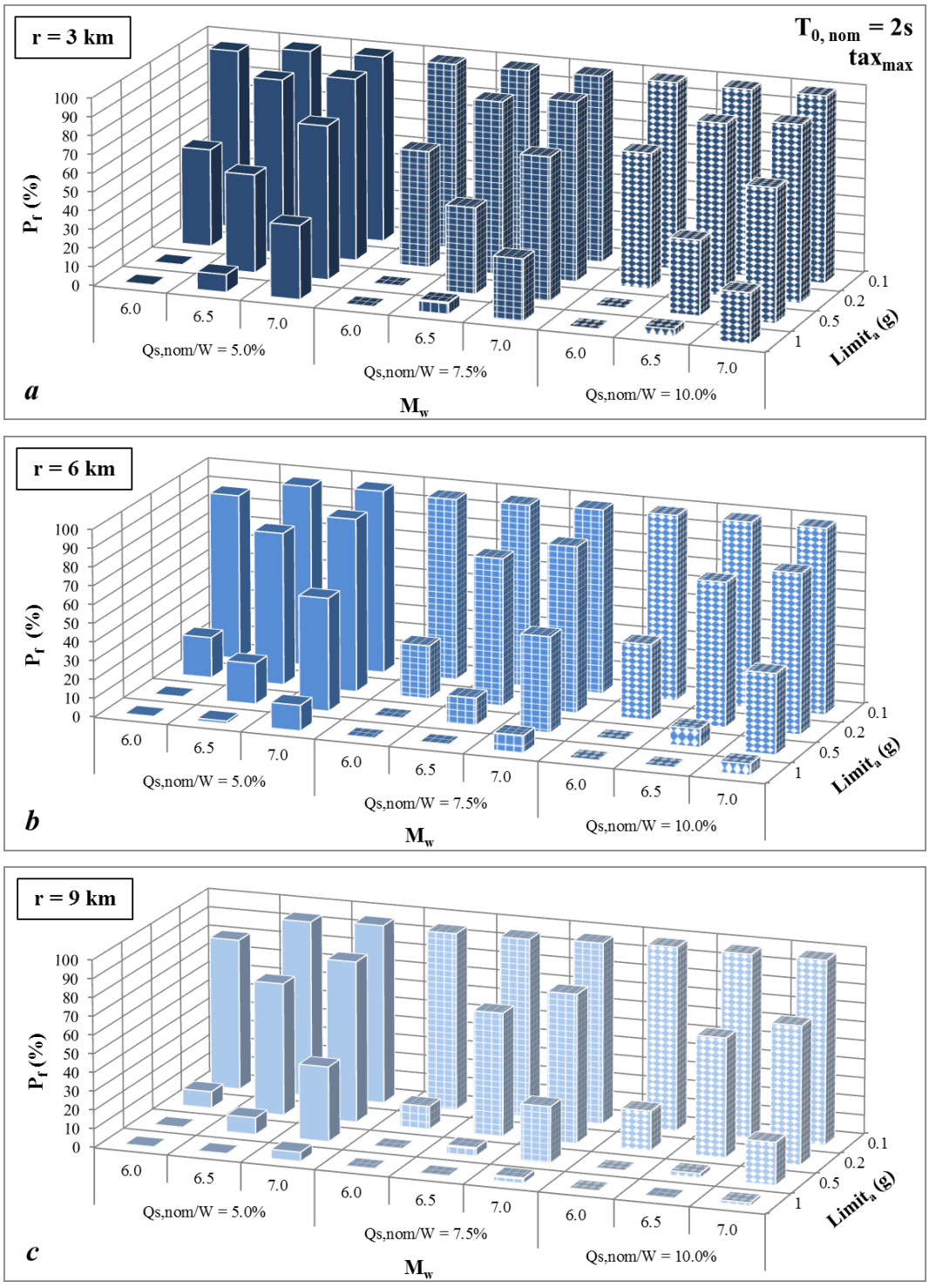
I. ve II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıklarının r'ye göre değişimini veren Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'da görüldüğü üzere; her iki grup bina setleri için de en büyük P_f değerleri r = 3 km için elde edilemektedir. Şekil 4.53 (a)'da görüldüğü üzere r = 3 km için 1.0 g limitinin dahi %40'a varan P_f değerleri ile aşılabildiği görülmektedir. Ayrıca tüm r değerleri için her iki grup bina setlerinde 0.1 g limitinin kolaylıkla ve çok yüksek P_f değerleri ile aşıldığı; r = 9 km olması halinde dahi I. Grup bina setleri için 0.5 g limitinin %40'a varan P_f değerleri ile aşılabildiği (Şekil 4.53 (c)) görülmektedir.



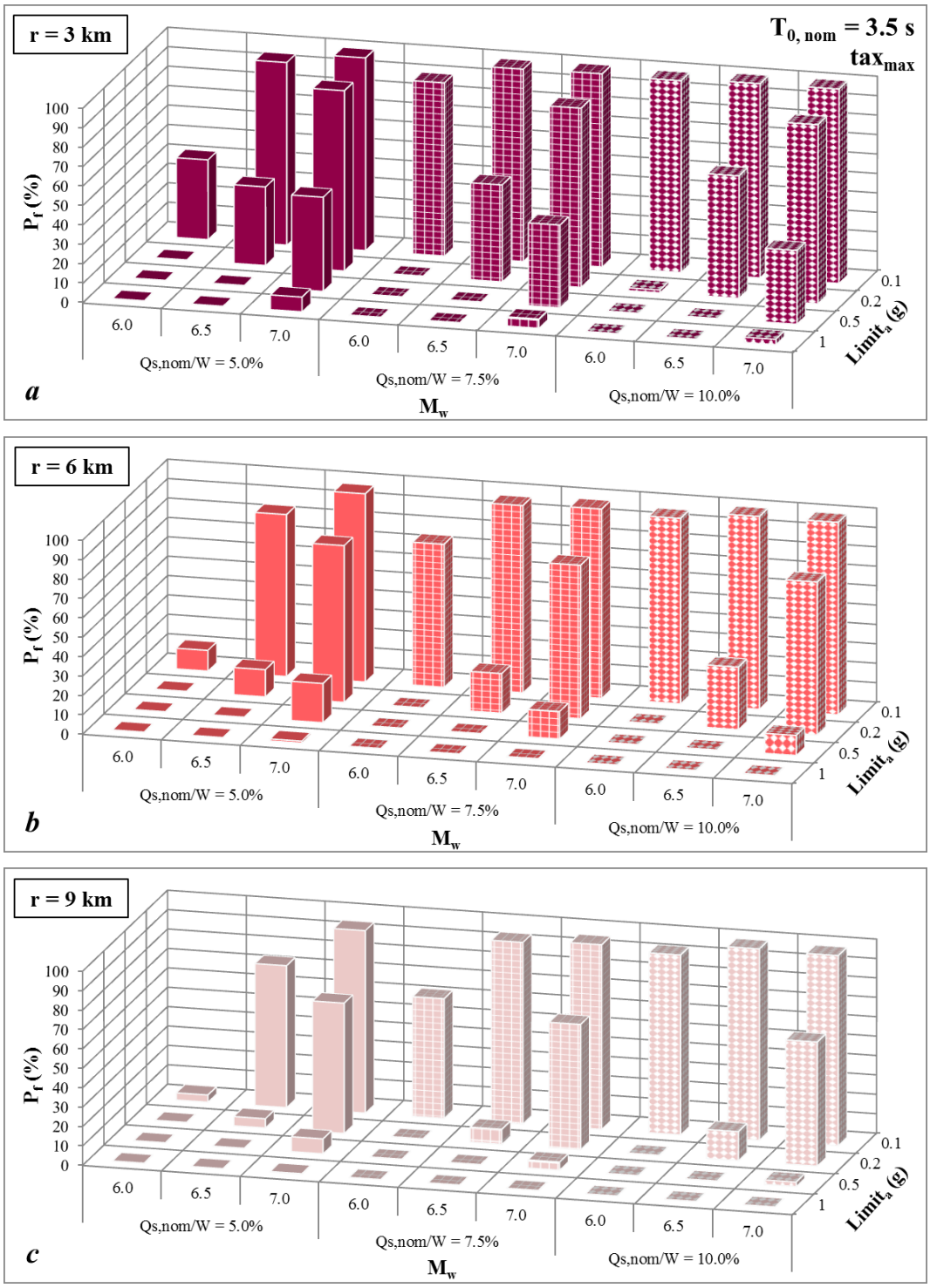
Şekil 4.51: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre).



Şekil 4.52: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (M_w'ya göre).



Şekil 4.53: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre).



Şekil 4.54: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri (*c.o.v.* = %10) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine göre hesaplanan başarısızlık olasılıkları (*r*'ye göre).

4.2.1.3. Performans Testleri

Mevcut tez çalışması ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında oluşturulan sismik izolasyonlu bina setlerinin, yine bu bölüm çalışmaları kapsamında üretilen sentetik deprem setlerine maruz kalması halinde elde edilen $bdix_{max}$ ve tax_{max} yapısal cevap parametrelerine ait değerlerin, bu parametrelerin her ikisi için de ayrı ayrı belirlenen 4 limit değerini aşma olasılıkları (P_f), Bölüm 4.2.1.2'de verilmiştir. Bu bölümde ise, yapısal bütünlüğün tehlikeye girmesine neden olacak izolatör deplasmanları ile söz konusu binaların içinde bulunma ihtimali olan ivmeye duyarlı cihazların zarar görmesine neden olacak kat ivmeleri birlikte değerlendirilmiştir. Böylece incelenen binaların hem yapısal bütünlük açısından ve hem de cihaz bazında performans açısından birlikte sağlamaları gereken performans seviyeleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda söz konusu $bdix_{max}$ ve tax_{max} parametreleri için Bölüm 4.2.1.2'de belirlenen limit değerleri kullanılarak; 16 adet performans testi (Tablo 4.14) oluşturulmuştur.

Tablo 4.14: Senaryo-I için Performans Testi Koşulları ve Limitleri.

Sıra	Test Adı	Başarısızlık Koşulları ve Limitleri		
		Kat İvmeleri için		İzolatör Deplamanları için
1	**Test1**	$tax_{max} \geq 0.1$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.4$ m
2	**Test2**	$tax_{max} \geq 0.1$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.6$ m
3	**Test3**	$tax_{max} \geq 0.1$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.8$ m
4	**Test4**	$tax_{max} \geq 0.1$ g	veya	$bdix_{max} \geq 1.0$ m
5	**Test5**	$tax_{max} \geq 0.2$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.4$ m
6	**Test6**	$tax_{max} \geq 0.2$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.6$ m
7	**Test7**	$tax_{max} \geq 0.2$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.8$ m
8	**Test8**	$tax_{max} \geq 0.2$ g	veya	$bdix_{max} \geq 1.0$ m
9	**Test9**	$tax_{max} \geq 0.5$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.4$ m
10	**Test10**	$tax_{max} \geq 0.5$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.6$ m
11	**Test11**	$tax_{max} \geq 0.5$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.8$ m
12	**Test12**	$tax_{max} \geq 0.5$ g	veya	$bdix_{max} \geq 1.0$ m
13	**Test13**	$tax_{max} \geq 1.0$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.4$ m
14	**Test14**	$tax_{max} \geq 1.0$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.6$ m
15	**Test15**	$tax_{max} \geq 1.0$ g	veya	$bdix_{max} \geq 0.8$ m
16	**Test16**	$tax_{max} \geq 1.0$ g	veya	$bdix_{max} \geq 1.0$ m

Söz konusu testlerde başarısızlık koşulu, göz önünde bulundurulan bir binada pik izolatör deplasmanlarının maksimumlarının ($bdix_{max}$) veya pik kat kütle merkezi ivmelerinin maksimumlarının (tax_{max}), Tablo 4.14'de verilen her bir testte bu parametreler için belirlenen limit değerleri aşması olarak göz önünde bulundurulmuştur. Yani, incelenen bir binada söz konusu iki yapısal cevap parametresinden en az birinin bir test için

belirlenen limit değerini aşması halinde, söz konusu bina için o testin başarısızlıkla sonuçlandığı varsayılmıştır. Her bir testte başarısızlık durumunun gerçekleşmesi için söz konusu cevap parametrelerinden en az birinin aşması gereken limitler, Tablo 4.14'deki gibi belirlenmiştir. Bu testler, mevcut senaryo kapsamındaki 6 adet üretilmiş izolasyon sistemleri seti ile oluşturulan 6 bina setinin her birinde yer alan tüm binalar için gerçekleştirilmiş olup; her bir bina seti içinde söz konusu testleri sağlamayan binaların yüzdesi, ilgili bina setinin ilgili test için başarısızlık olasılığı (P_f) olarak grafikler halinde sunulmuştur.

A) I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için Gerçekleştirilen Performans Testleri

Mevcut çalışma kapsamında, $T_{0,nom}$ = 2 s olmak üzere $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin %5, %7.5 ve %10 alındığı I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu bina için performans testi sonuçları, her bir performans seviyesi için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 4.55, Şekil 4.56, Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de verilmiştir.

A1) Test1, Test2, Test3 ve Test4 Performans Testleri

I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan bina setleri ($T_{0,nom}$ = 2 s ve $Q_{s,nom}/W$=%5, 7.5 ve %10) için 0.1 g ivme limitine göre gerçekleştirilen Test1, Test2, Test3 ve Test4 performans testlerine ait sonuçlar, sırasıyla Şekil 4.55 (1), (2), (3) ve (4)'de verilmiştir. Bu testlere ait söz konusu şekillerden görüldüğü üzere; 0.1 g limitinin çok düşük bir ivme limiti olması sebebiyle, söz konusu bina setlerinin tüm deprem setleri (M_w = 6.0, 6.5, 7.0 ve r = 3 km, 6 km ve 9 km) etkisindeki P_f değerleri, oldukça yüksek olup; dört testte aynı deprem setine maruz aynı bina seti için elde edilen başarısızlık olasılıkları birbirinin aynıdır. Söz konusu dört test için de en düşük başarısızlık olasılığı, M_w = 6.0 – r = 9 km deprem setine maruz $T_{0,nom}$ = 2 s - $Q_{s,nom}/W$ = %5 bina seti için gerçekleşmekte olup; bu durum için P_f = %81'dir. Yine söz konusu dört test için de en yüksek başarısızlık olasılığı, M_w = 7.0 – r = 3 km deprem setine maruz $T_{0,nom}$ = 2 s - $Q_{s,nom}/W$=%10 bina seti için gerçekleşmekte olup; bu durum için P_f = %99.8'dir. Bu dört testten görüldüğü üzere, başarısızlık olasılıklarını deplasman seviyelerine bakılmaksızın 0.1 g ivme limiti belirlemekte olup; I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan bina setleri için 0.1 g limiti ile oluşturulan performans seviyeleri, söz konusu binaların M_w = 6.0 - r = 9 km deprem seti etkisinde olması durumunda bile sağlanması zor performans seviyeleridir.

A2) Test5, Test6, Test7 ve Test8 Performans Testleri

Yine, aynı bina setleri için 0.2 g ivme limitine göre gerçekleştirilen performans testleri olan Test5, Test6, Test7 ve Test8 için sırasıyla Şekil 4.56 (5), (6), (7) ve (8)'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere; bu dört testte de aynı deprem setine maruz aynı bina seti için elde edilen başarısızlık olasılıkları birbirinin aynıdır. 0.2 g ivme limitinin de düşük bir limit olması sebebiyle P_f değerleri, ilk dört testteki (Şekil 4.55) gibi yüksektir; ancak yine de tüm P_f değerlerinde ilk 4 teste göre düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler, en fazla M_w = 6.0 - r = 9 km deprem seti etkisinde meydana gelmiştir. $T_{0,nom}$ = 2 s - $Q_{s,nom}/W$ = %5 bina setinin M_w = 6.0 - r = 9 km deprem setine maruz bırakılması halinde P_f değeri, Test1'de %81 iken Test5'de %9 civarına gerilemiştir. Söz konusu dört performans testi için tüm bina setlerinin her birinin M_w = 6.5 ve M_w = 7.0 için üretilen deprem setlerinin her birine maruz kalması halinde P_f değerleri ise, sırasıyla %64~%93 ve %74~%97 aralığında değişmektedir. Ayrıca, M_w = 6.5 ve M_w = 7.0 için üretilen tüm deprem setlerine maruz bina setleri için $Q_{s,nom}/W$ değerinin artmasına paralel olarak P_f değerleri azalmakta iken; aynı bina setlerinin M_w = 6.0 için üretilen deprem setlerine maruz kalması halinde $Q_{s,nom}/W$ değerinin artmasına paralel olarak P_f değerleri de artmaktadır. Bu dört testten görüldüğü üzere, I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için 0.2 g limiti ile oluşturulan performans seviyeleri, söz konusu binaların özellikle M_w = 6.5 ve M_w = 7.0 için üretilen depremler etkisinde olması durumunda sağlanması zor performans seviyelerdir.

A3) Test9, Test10, Test11 ve Test12

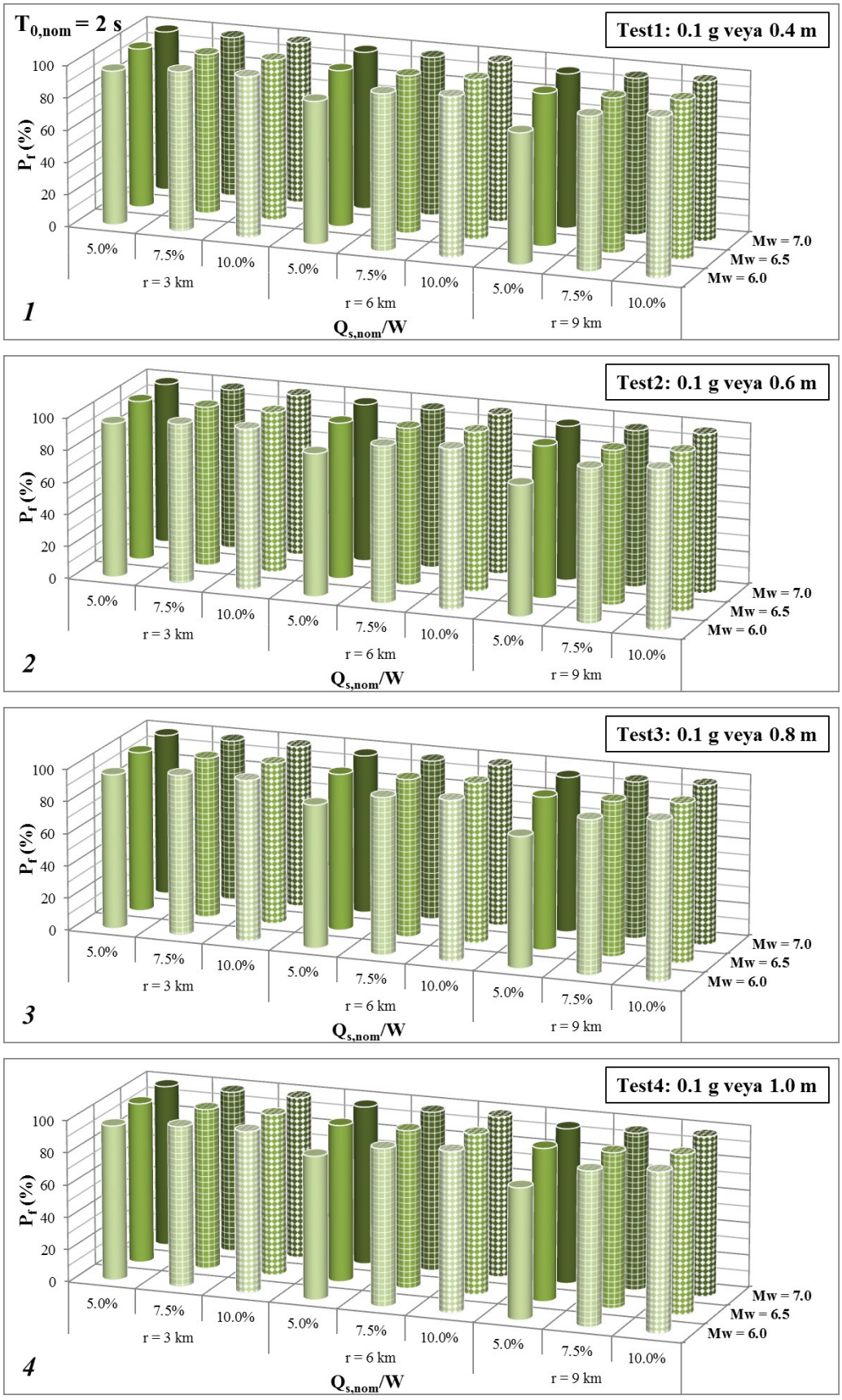
I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan bina setleri için 0.5 g ivme limitine göre gerçekleştirilen performans testlerine (Test9, Test10, Test11 ve Test12) ait sonuçlar ise, Şekil 4.57 (9), (10), (11) ve (12)'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, tüm P_f değerlerinde önceki testlere göre önemli düşüşler gerçekleşmiştir. Hatta söz konusu bina setlerinin M_w = 6.0 için üretilen tüm deprem setlerine maruz kalması durumunda, söz konusu dört test için de ivme ve deplasman limitleri aşılmamaktadır. M_w = 6.5 ve M_w = 7.0 için üretilen deprem setlerine maruz binalar için söz konusu ivme ve deplasman seviyelerinde P_f değerleri, dört test için de birbirine çok yakın olup; sırasıyla %2~%59 ve %23~%86 aralığında değişmektedir. Ayrıca, bu dört test için de başarısızlık olasılıklarını 0.5 g limitinin belirlediği; deplasman limitine bağlı olarak farkedilir bir değişmenin olmadığı görülmektedir.

A4) Test13, Test14, Test15 ve Test16

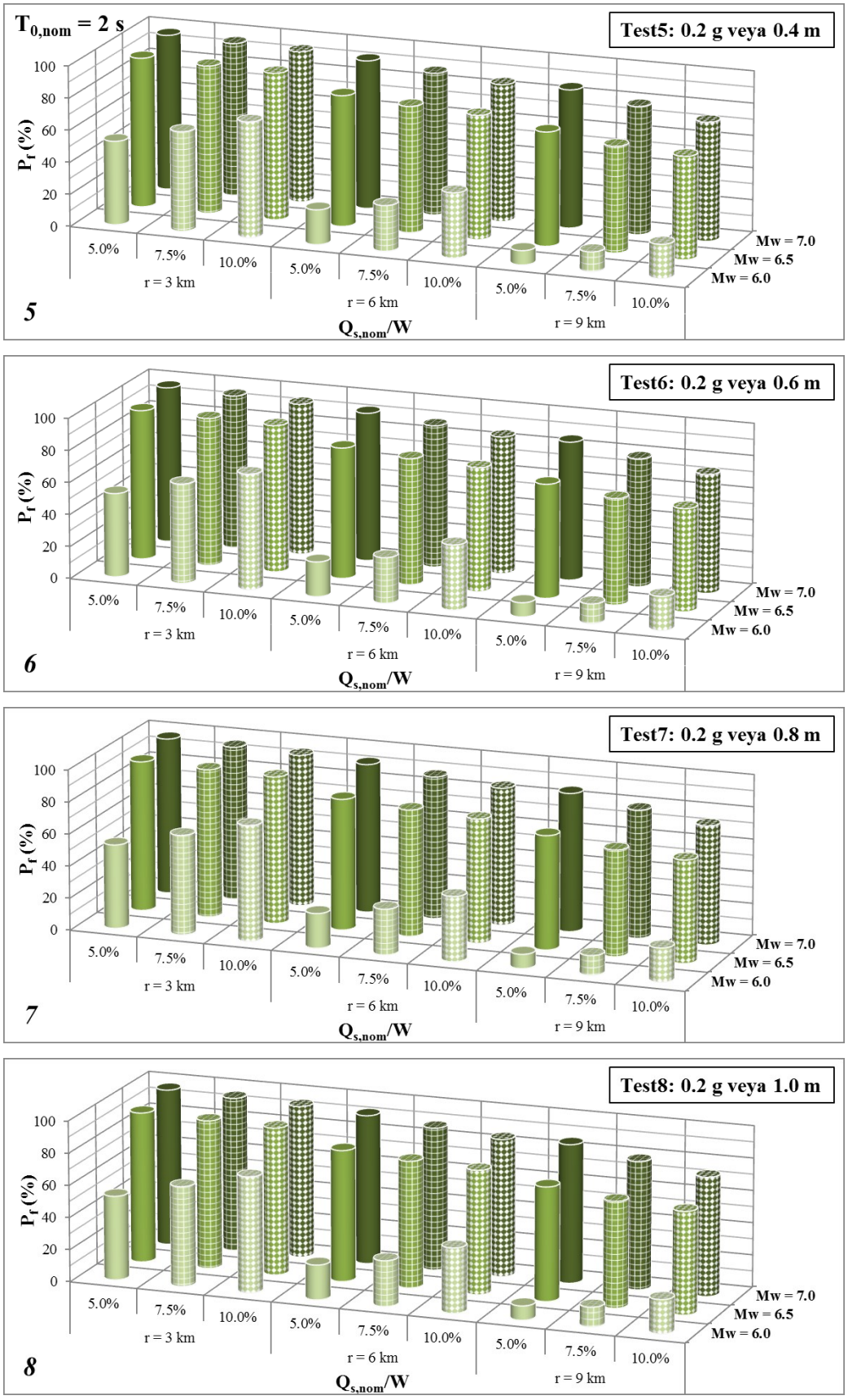
Aynı bina setleri için 1.0 g ivme limitine göre gerçekleştirilen performans testlerinin sonuçları ise, Şekil 4.58 (13), (14), (15) ve (16)'da verilmiştir. Söz konusu bina setlerine M_w = 7.0 için üretilen depremlerin etkimesi halinde başarısızlık olasılıkları, 0.5 g ivme limiti için gerçekleştirilen testlerden elde edilen başarısızlık olasılıklarına göre düşmektedir; ancak M_w = 6.5 için üretilen depremlerin etkimesi halinde elde edilen başarısızlık olasılıklarındaki düşüş daha fazladır. M_w = 6.5 için üretilen depremlerin etkimesi halinde söz konusu bina setleri için "1.0 g veya 0.4 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %2~%59 arasında; "1.0 g veya 0.6 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %0.2~%59 arasında; "1.0 g veya 0.8 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %0~%17 arasında ve "1.0 g veya 1.0 m" performans seviyesini aşma olasılıkları ise, %0~%9.5 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, M_w = 7.0 için üretilen depremlerin etkimesi halinde söz konusu bina setleri için "1.0 g veya 0.4 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %22~%86 arasında; "1.0 g veya 0.6 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %6~%70 arasında; "1.0 g veya 0.8 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %3~%52 arasında ve "1.0 g veya 1.0 m" performans seviyesini aşma olasılıkları ise, %2~%40 arasında değişmektedir. Görüldüğü üzere, 1.0 g ivme limiti için oluşturulan testlerde deplasman limitlerinin artması halinde başarısızlık olasılıkları azalmakta ve 1.0 g aşılması zor bir ivme limiti olduğu için ve büyük oranda aşılamadığı için bu ivme limiti için başarısızlık olasılıkları üzerinde artık deplasman seviyeleri belirleyici olmaktadır.

B) II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için Gerçekleştirilen Performans Testleri

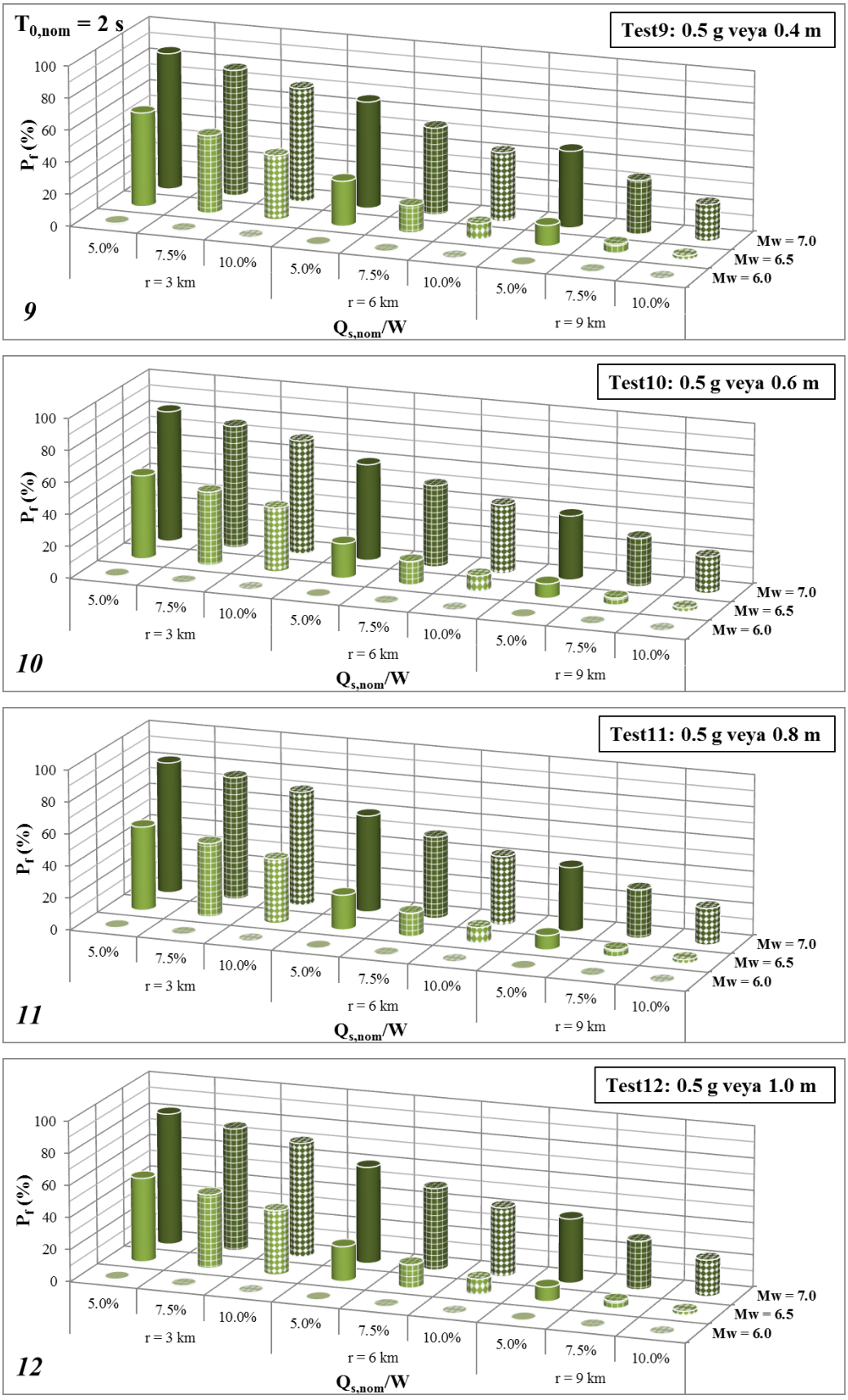
$T_{0,nom}$ = 3.5 s olmak üzere $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin yine %5, %7.5 ve %10 alındığı II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu bina için performans testi sonuçları ise, yine her bir performans seviyesi için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 4.59, Şekil 4.60, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü üzere; aynı ivme limiti ile oluşturulmuş performans seviyeleri için gerçekleştirilen testlerde, başarısızlık olasılıkları arasındaki farklar ihmal edilebilecek mertebede azdır. Söz konusu performans seviyeleri için deplasman limitlerinin artması halinde meydana gelen farklılıklar, söz konusu izolasyon sistemi setleri ile oluşturulan binalar için 0.5 g ve 1.0 g ivme limitleri için oluşturulan testlerde görülmektedir.



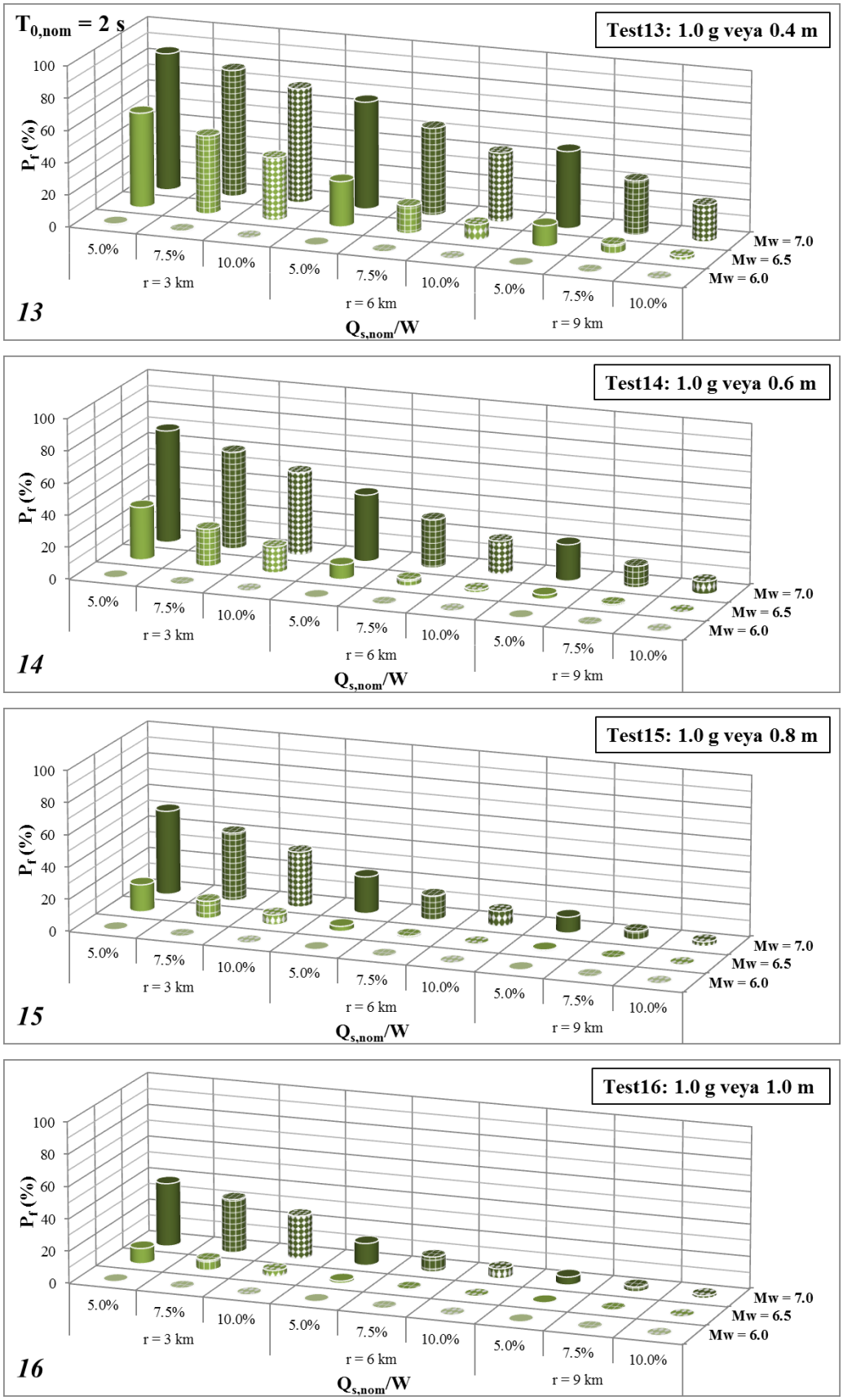
Şekil 4.55: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test1, Test2, Test3, Test4.



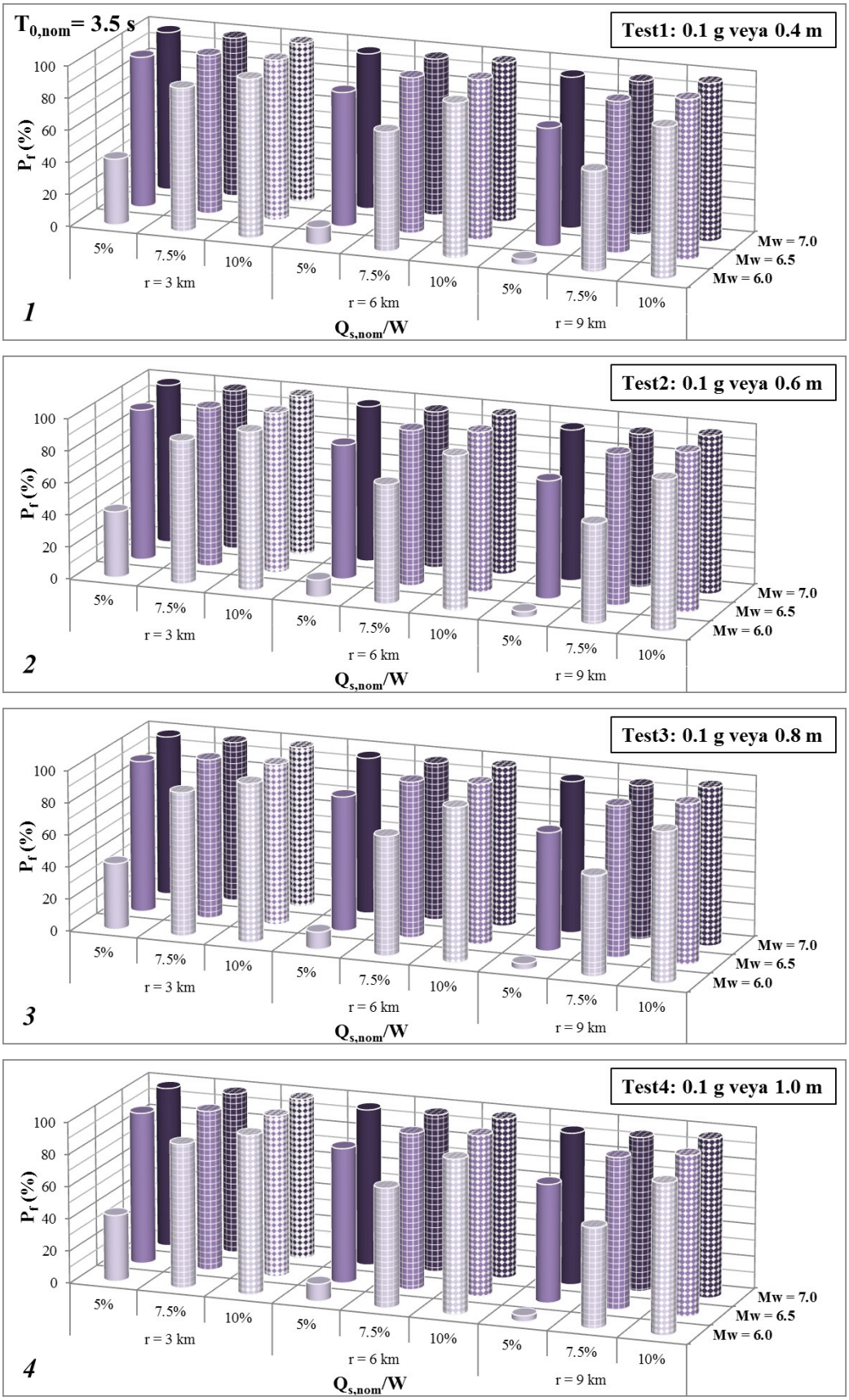
Şekil 4.56: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test5, Test6, Test7, Test8.



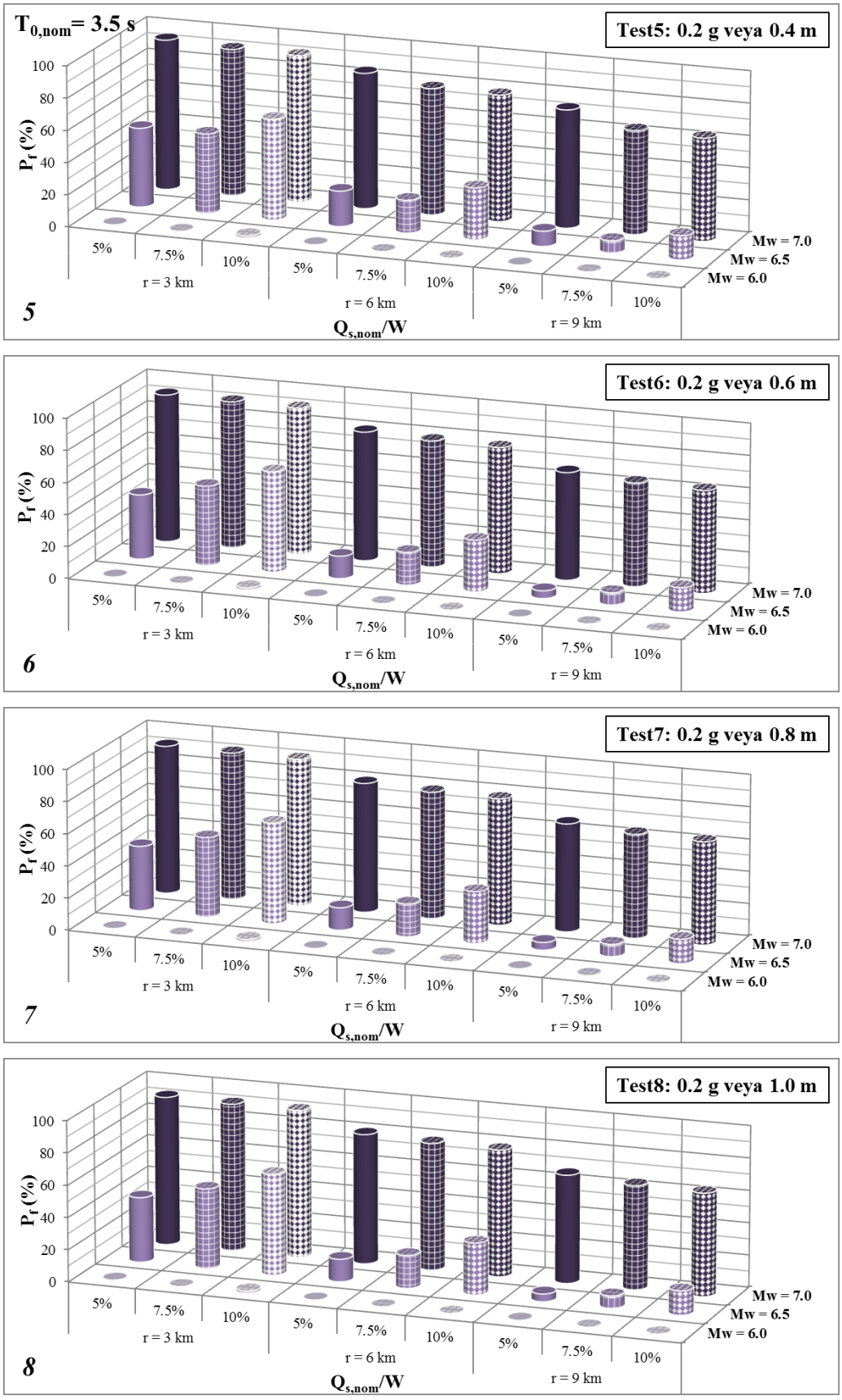
Şekil 4.57: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test9, Test10, Test11, Test12.



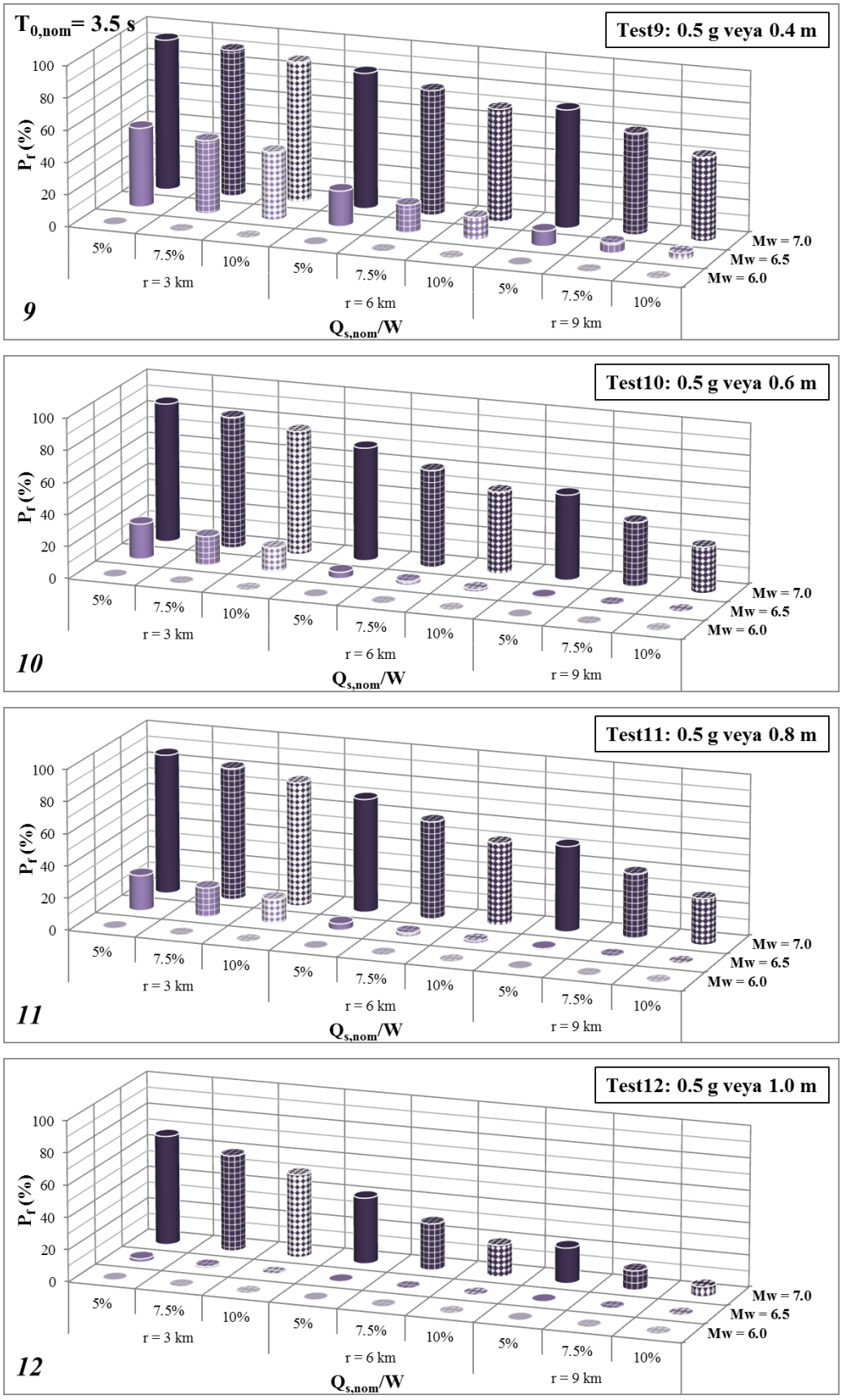
Şekil 4.58: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test13, Test14, Test15, Test16.



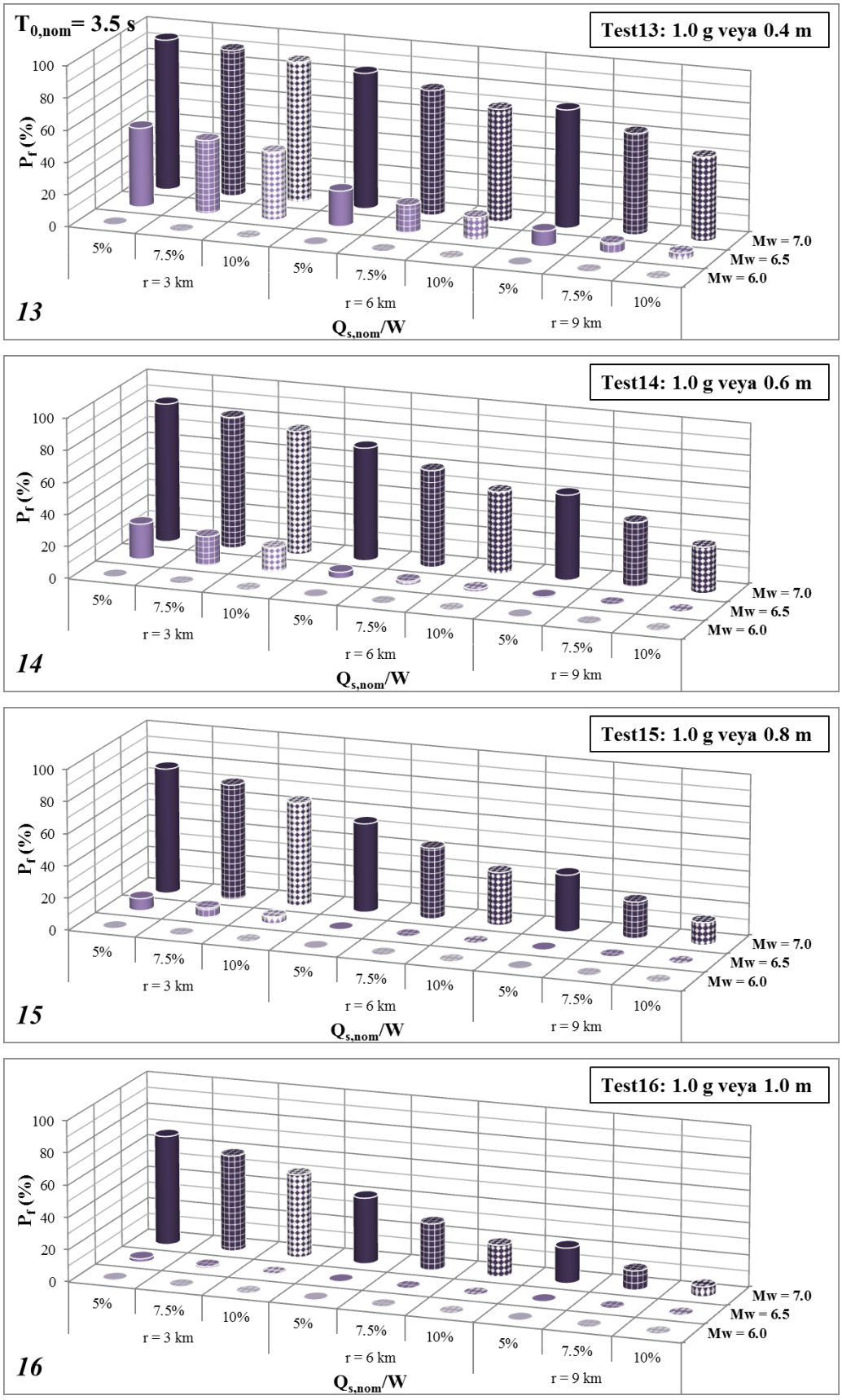
Şekil 4.59: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test1, Test2, Test3, Test4.



Şekil 4.60: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test5, Test6, Test7, Test8.



Şekil 4.61: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test9, Test10, Test11, Test12.



Şekil 4.62: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-I): Test13, Test14, Test15, Test16.

4.2.2. Senaryo-II için Gerçekleştirilen Analizlere Ait Bulgular

Senaryo-II dahilinde 4 farklı nominal M_w değerine (5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0) bağlı olarak, r'nin 3~10 km arasında üniform olarak değişmesi halinde oluşturulan 4 farklı kombinasyon için V_p ve T_p ile ζ_p parametrelerinin her birine ait olmak üzere, Tablo 3.11'de verilen ölçek ve şekil parametresi değerlerine göre 4 farklı sentetik deprem seti, Bölüm 3.6.2.1'deki gibi üretilmiştir. Mevcut senaryo kapsamında da Senaryo-I'de olduğu gibi, söz konusu deprem setlerinin her biri, *c.o.v.* = %10 olmak üzere 2 farklı $T_{0,nom}$ (2.0 s ve 3.5 s) ve 3 farklı $Q_{s,nom}/W$ (%5, %7.5, %10) değeri için oluşturulan 6 farklı "$T_{0,nom}$ - $Q_{s,nom}/W$" kombinasyonu için K_1, K_2, Q, α, F_y ve D_y parametrelerinin Tablo 3.10'daki değerlerine göre üretilen 6 farklı izolasyon sistemleri alt seti ile oluşturulan sismik izolasyonlu binalara etkitilmiştir. Bölüm 3.6.2.3'de tespit edildiği üzere, yine Senaryo-I'de olduğu gibi, her bir deprem setinde 10,000 adet birbirinden farklı karakteristik parametrelere sahip sentetik deprem; her bir izolasyon sistemleri alt setinde ise yine birbirinden farklı karakteristik parametrelere sahip 10,000 adet izolasyon sistemi bulunmaktadır. Mevcut tez ikinci ana bölüm çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen modifikasyonlar ile modifiye edilen 3D-BASIS (3D-BASIS-MONTEQ) programı aracılığıyla bir deprem setinde bulunan bir sentetik deprem, bir izolasyon sistemleri alt setinde bulunan ve söz konusu sentetik deprem ile aynı simülasyon sırasına sahip izolasyon sistemi ile oluşturulan sismik izolasyonlu binaya uygulanmış ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. 3D-BASIS-MONTEQ programının bir kez çalıştırılması ile 10,000 adet sentetik depreme maruz bırakılan 10,000 adet sismik izolasyonlu binanın dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. 4 farklı sentetik deprem setinin her birinin, 6 farklı izolasyon sistemleri alt setinin her birine maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilen 24 analiz seti ile mevcut senaryo dahilinde göz önünde bulundurulan 60,000 izolasyonlu binanın tüm sentetik depremler etkisindeki dinamik analizleri (toplam 4×60,000=240,000 analiz) gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.2.2.1'de söz konusu analizler sonucunda elde edilen yapısal cevap parametreleri, Bölüm 4.2.2.2'de bu cevap parametrelerinin belirli limit değerlerine göre başarısızlık olasılıkları ve 4.2.2.3'de ise yine söz konusu cevap parametrelerine göre, Senaryo-II kapsamında oluşturulan tüm sismik izolasyonlu yapılar için gerçekleştirilen performans testlerinin sonuçları verilmiştir.

4.2.2.1. Yapısal Cevap Parametreleri

Bu bölümde, yukarıda belirtildiği üzere Senaryo-II dahilinde, *r*'nin 3~10 km arasında üniform olarak değişmesi halinde 4 farklı nominal M_w değeri için Bölüm 3.6.2.1'deki gibi üretilen 4 sentetik deprem setinin, Senaryo-I dahilinde Bölüm 3.6.1.2'deki gibi 6 farklı "$T_{0,nom} - Q_{s,nom}/W$" kombinasyonu için üretilen izolasyon sistemleri alt setinin her birine etkitilmesiyle gerçekleştirilen 24 doğrusal olmayan dinamik analiz setinden elde edilen yapısal cevap parametrelere yer verilmiştir. Gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde, Senaryo-I'de olduğu gibi, her bir sismik izolasyonlu yapı için her bir sentetik deprem etkisinde elde edilen pik izolatör deplasmanlarının maksimumları ($bdix_{max}$), tüm kat seviyelerindeki pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları ($drix_{max}$) ve tüm kat kütle merkezlerinde elde edilen pik toplam ivmelerinin maksimumları (tax_{max}) yapısal cevap parametreleri olarak göz önünde bulundurulmuştur. 6 farklı "$T_{0,nom} - Q_{s,nom}/W$" kombinasyonu için üretilen izolasyon sistemleri alt seti ile oluşturulan 6 bina seti için elde edilen söz konusu yapısal cevap parametrelerinin değişimi, yine Senaryo-I'de olduğu gibi, kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) grafikleri ile ortaya konmuştur.

a) I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için

Nominal hedef periyodu ($T_{0,nom}$) değerleri 2 s ve nominal karakteristik kuvvet oranı ($Q_{s,nom}/W$) değerleri ise, %5, %7.5 ve %10 olacak şekilde üretilen I. Grup üretilmiş izolasyon sistemleri alt setleriyle ile oluşturulan I. Grup bina alt setlerinin (her bir alt sette 10,000 adet bina) her birinin Senaryo-II kapsamında $M_{w,nom}$ değerlerinin 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 olması halinde üretilen 4 adet sentetik deprem setine maruz kalması halinde elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri sırasıyla Şekil 4.63 (a), (b), (c) ve (d)'de verilmiştir. Söz konusu binaların, yine aynı deprem setlerine maruz kalması halinde elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri,Şekil 4.64'da; tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri ise, Şekil 4.65'de verilmiştir.

Şekil 4.63'den görüldüğü üzere; I. Grup bina alt setlerinin, $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 için üretilen 4 deprem setinin her birine maruz kalması halinde, $bdix_{max}$ parametresi için elde edilen değerler, sırasıyla 0.15 m, 0.5 m, 1.5 m ve 2.5 m'ye kadar ulaşmaktadır. Ayrıca, yine Şekil 4.63'den görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin artması halinde, söz konusu bina alt setlerinden elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, $M_{w,nom}$ değerinin 6.0, 6.5 ve 7.0 olması durumlarında azalırken; $M_{w,nom}$ değerinin 5.5 olması durumunda ise artmaktadır. Şekil 4.64'den görüldüğü üzere; aynı bina alt setlerinin, $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 için

üretilen 4 deprem setinin her birine maruz kalması halinde, $drix_{max}$ parametresi için elde edilen değerler, sırasıyla 0.35×10^{-3}, 0.70×10^{-3}, 2.0×10^{-3} ve 3.5×10^{-3} seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Yine Şekil 4.64'den görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin artması halinde, söz konusu bina setlerinden elde edilen $drix_{max}$ değerleri, $M_{w,nom}$ değerinin 6.5 ve 7.0 olması durumlarında azalırken; $M_{w,nom}$ değerinin 5.5 ve 6.0 olması durumlarında ise artmaktadır. Şekil 4.65'den görüldüğü üzere; söz konusu bina alt setlerinin, $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 için üretilen 4 deprem setinin her birine maruz kalması halinde, tax_{max} parametresi için elde edilen değerler, sırasıyla 2.5 m/s^2, 5 m/s^2, 15 m/s^2 ve 25 m/s^2 seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Şekil 4.65'den görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin artması halinde, söz konusu bina setlerinden elde edilen tax_{max} değerleri, $M_{w,nom}$ değerinin 6.5 ve 7.0 olması durumlarında azalırken; $M_{w,nom}$ değerinin 5.5 ve 6.0 olması durumlarında ise artmaktadır.

Şekil 4.63, Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'nin sırasıyla Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'in karşılaştırılmasından görüldüğü üzere, I. Grup bina alt setleri için Senaryo-II dahilinde elde edilen cevap parametrelerinin hepsinin maksimum değerlerinde tüm M_w değerleri için, Senaryo-I'e göre düşüşler görülmüştür. Bu durum, mevcut senaryo kapsamında *r*'nin 3~10 km aralığında üniform dağılıma sahip bir değişken olması ve Senaryo-I'deki söz konusu maksimum değerlerin oluşmasına neden olan r = 3 km seviyesinde olduğu gibi, tek bir değere sahip olmamasından kaynaklanmaktadır.

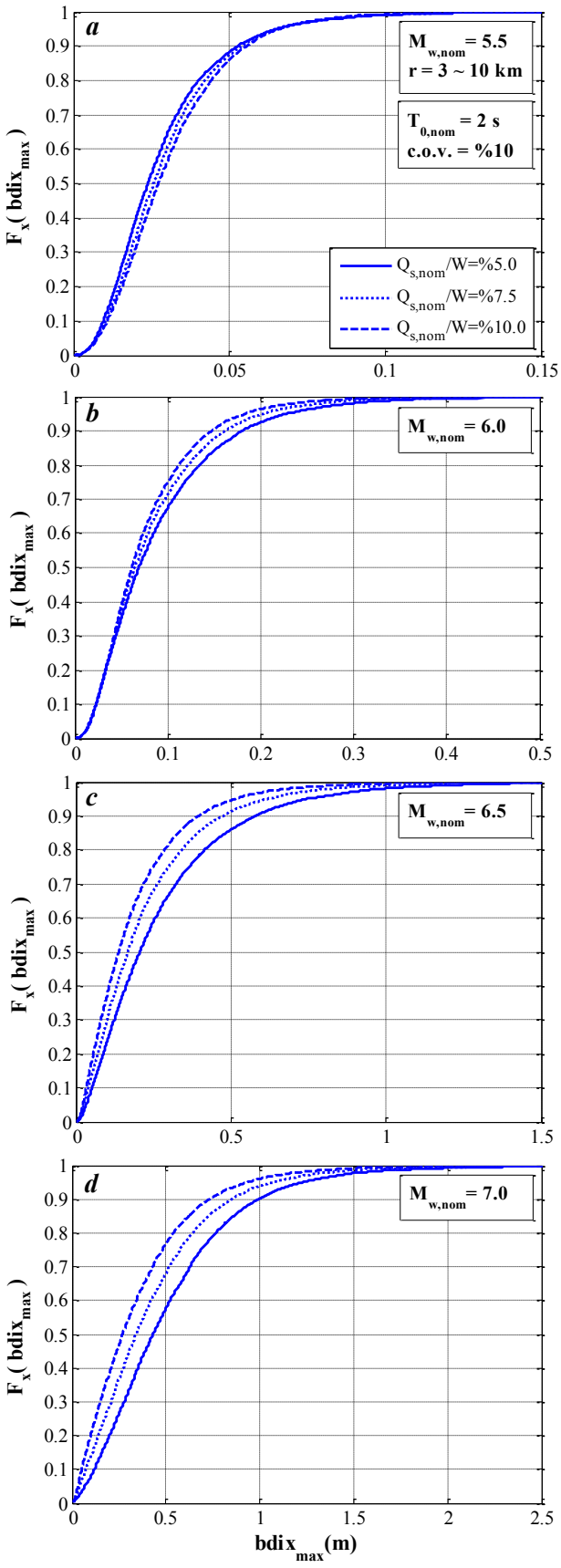
b) II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için

Nominal hedef periyodu ($T_{0,nom}$) değerleri 3.5 s ve nominal karakteristik kuvvet oranı ($Q_{s,nom}/W$) değerleri ise, %5, %10 ve %15 olacak şekilde üretilen II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu binanın, $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 için üretilen ve her biri 10,000 adet deprem içeren 4 adet sentetik deprem setine maruz kalması halinde elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri, sırasıyla Şekil 4.66 (a), (b), (c) ve (d)'de verilmiştir. Söz konusu yapıların, yine aynı deprem setlerine maruz kalması halinde elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri, Şekil 4.67'de; tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri ise, Şekil 4.68'de verilmiştir. Şekil 4.66'den görüldüğü üzere; II. Grup bina alt setlerinin $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 için üretilen 4 deprem setinin her birine maruz kalması halinde, $bdix_{max}$ parametresi için elde edilen değerler, sırasıyla 0.15 m, 0.4 m, 1.5 m ve 5 m'ye kadar ulaşmaktadır. Bu şekilden görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin artması halinde, söz

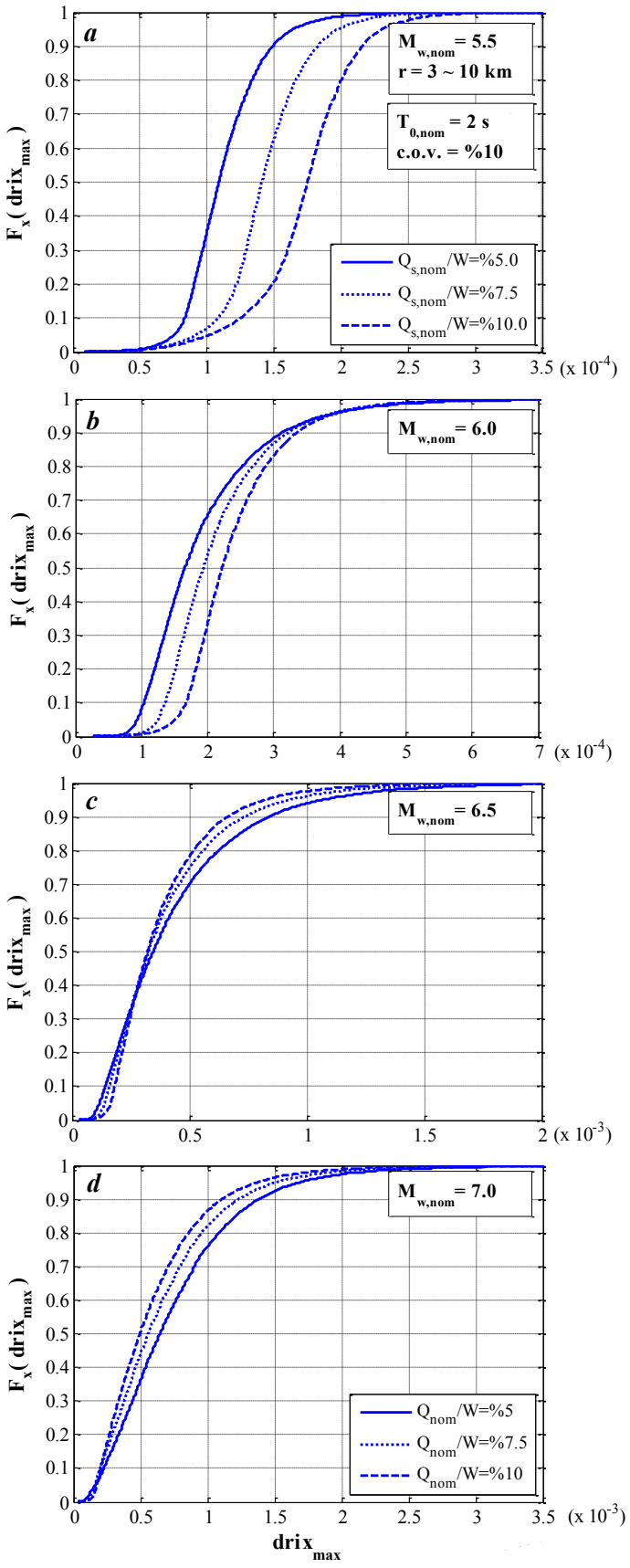
konusu bina setlerinden elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, $M_{w,nom}$ değerinin 6.5 ve 7.0 olması durumlarında azalırken; $M_{w,nom}$ değerinin 5.5 ve 6.0 olması durumlarında ise artmaktadır. Şekil 4.63 ve Şekil 4.66'in karşılaştırılmasından görüldüğü üzere ise, $M_{w,nom}$ değerlerinin 5.5, 6.0 ve 6.5 olması hallerinde iki grup bina setlerinden $bdix_{max}$ parametresi için elde edilen maksimum değerler yakın iken; söz konusu cevap parametresi için $M_{w,nom}$ değerlerinin 7.0 olması durumunda II. grup bina setlerinden elde edilen maksimum değerler, I. grup bina setlerinden elde edilen maksimum değerlerin 2 katına çıkmaktadır.

Şekil 4.67'den görüldüğü üzere; aynı bina setlerinin, $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 için üretilen 4 deprem setinin her birine maruz kalması halinde, $drix_{max}$ parametresi için elde edilen değerler, sırasıyla 0.30×10^{-4}, 0.35×10^{-4}, 0.70×10^{-4} ve 2.5×10^{-3} seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Bu şekilden görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin artması halinde, söz konusu bina setlerinden elde edilen $drix_{max}$ değerleri, $M_{w,nom}$ değerinin 7.0 olması durumunda azalırken; $M_{w,nom}$ değerinin 5.5, 6.0 ve 6.5 olması durumlarında ise artmaktadır. Şekil 4.64 ve Şekil 4.67'ün karşılaştırılmasından görüldüğü üzere ise, nominal hedef periyodun artması durumunda tüm deprem setleri etkisinde elde edilen $drix_{max}$ değerleri azalmaktadır.

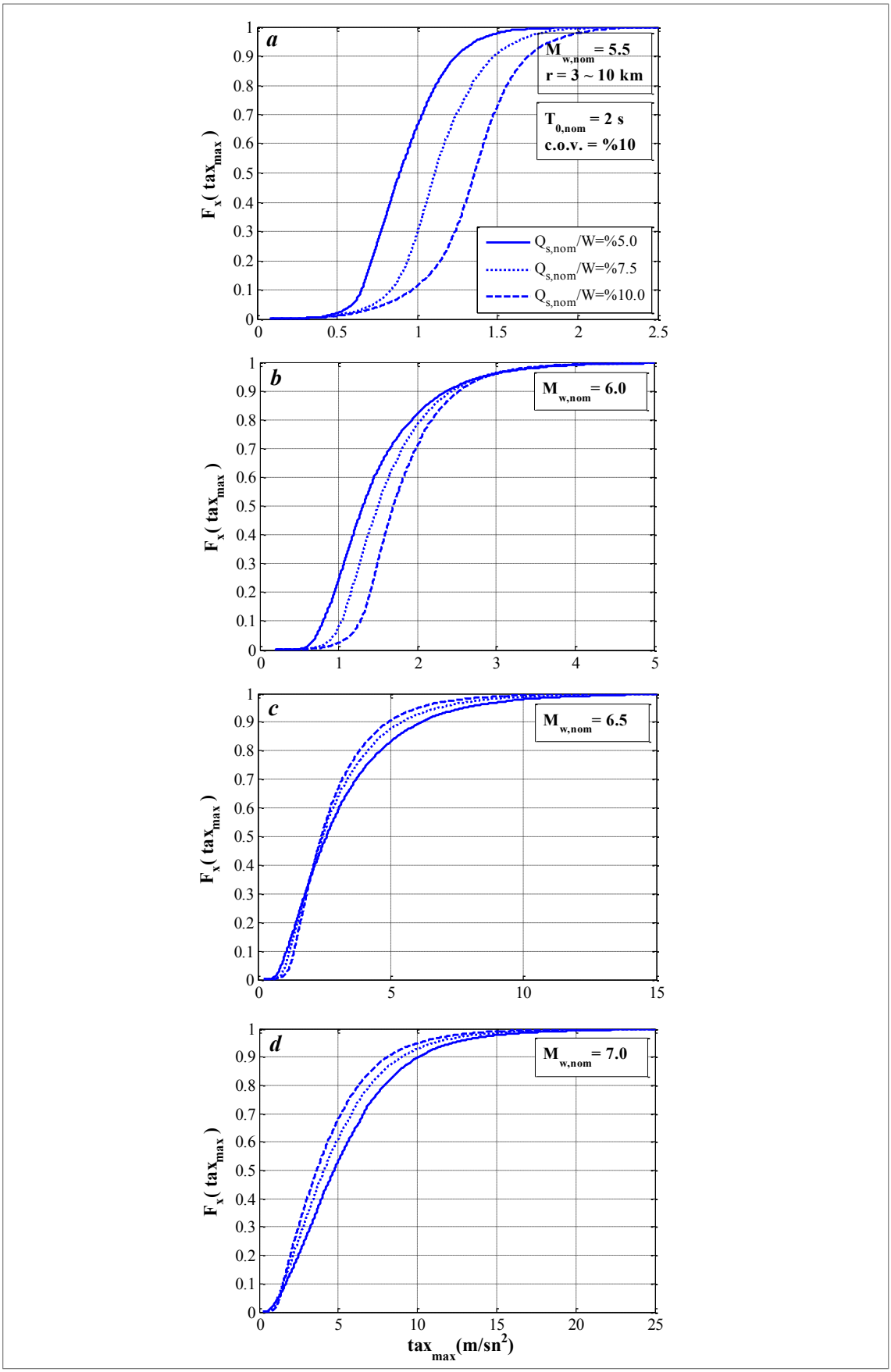
Şekil 4.68'den görüldüğü üzere; söz konusu bina setlerinin, $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 için üretilen 4 deprem setinin her birine maruz kalması halinde, tax_{max} parametresi için elde edilen değerler, sırasıyla 2.0 m/s^2, 2.5 m/s^2, 5 m/s^2 ve 15 m/s^2 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu şekilden görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin artması halinde, söz konusu bina setlerinden elde edilen tax_{max} değerleri, $M_{w,nom}$ değerinin 7.0 olması durumunda azalırken; $M_{w,nom}$ değerinin 5.5, 6.0 ve 6.5 olması durumlarında ise artmaktadır. Şekil 4.65 ve Şekil 4.68'ın karşılaştırılmasından görüldüğü üzere ise, nominal hedef periyodun artması durumunda tüm deprem setleri etkisinde elde edilen tax_{max} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, söz konusu II. Grup bina setleri için de mevcut senaryo dahilinde elde edilen cevap parametrelerinin değerleri, Senaryo-I'de bu parametreler için elde edilen değerlerden bir miktar daha düşüktür.



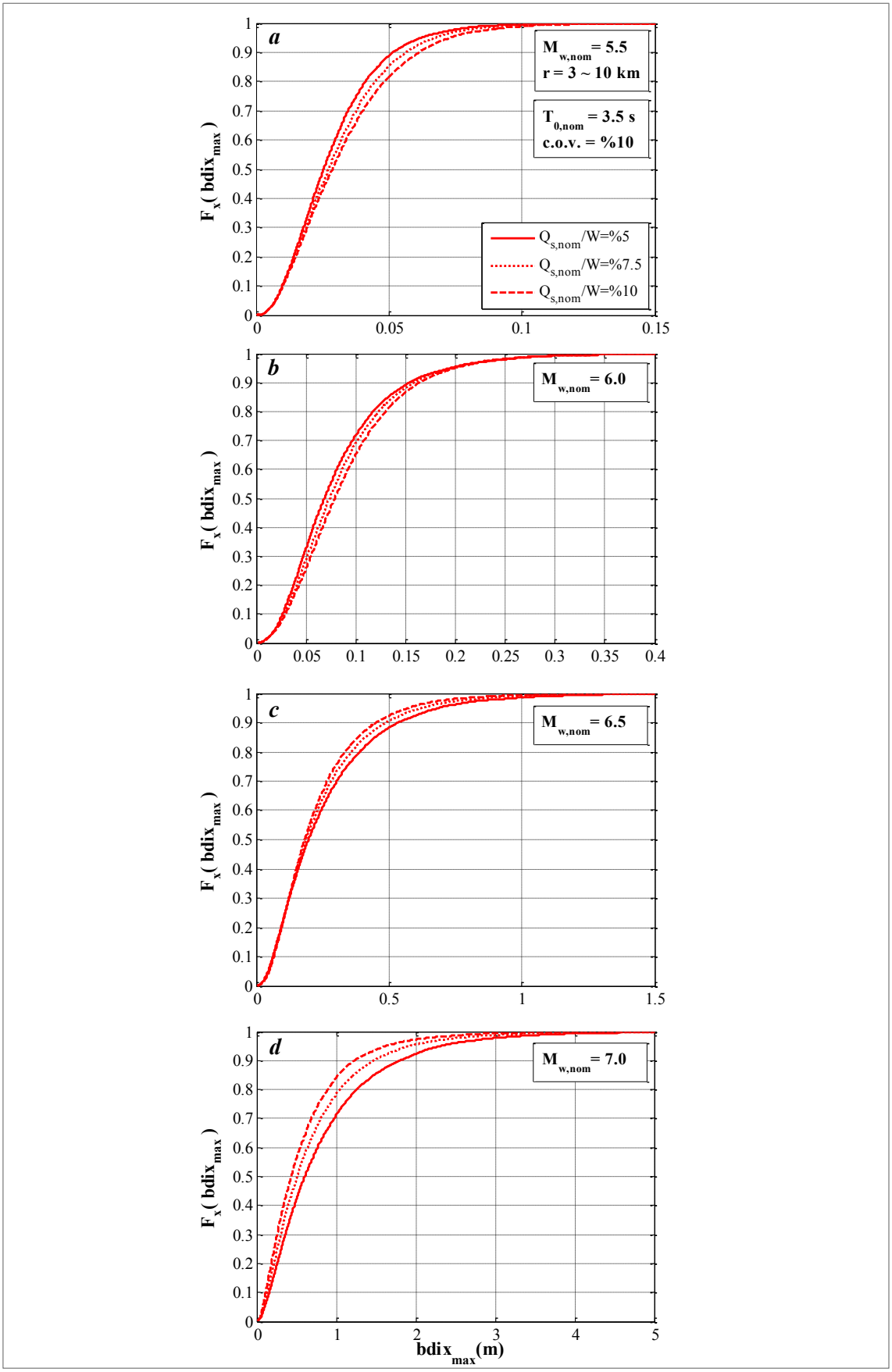
Şekil 4.63: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



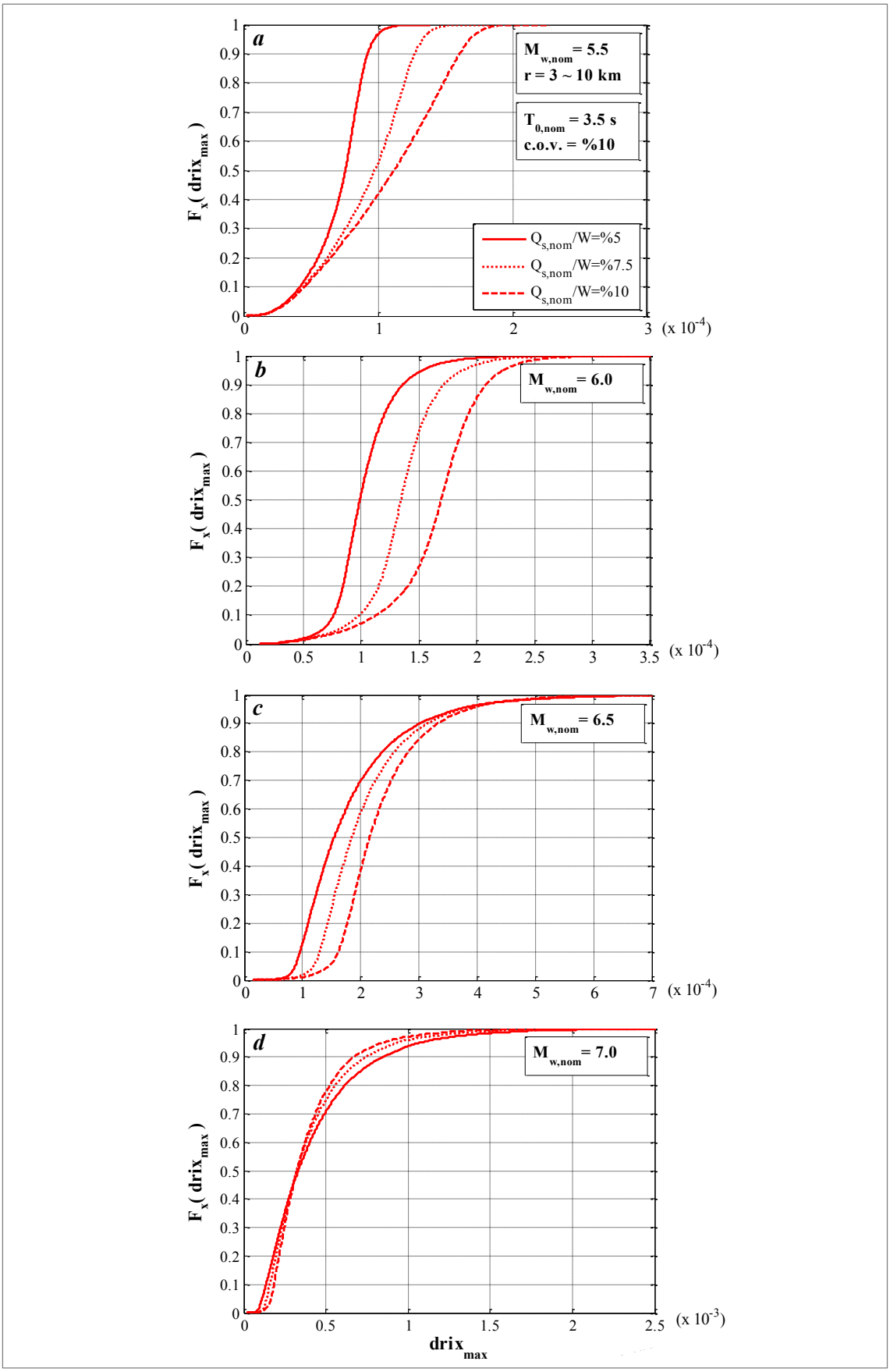
Şekil 4.64: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



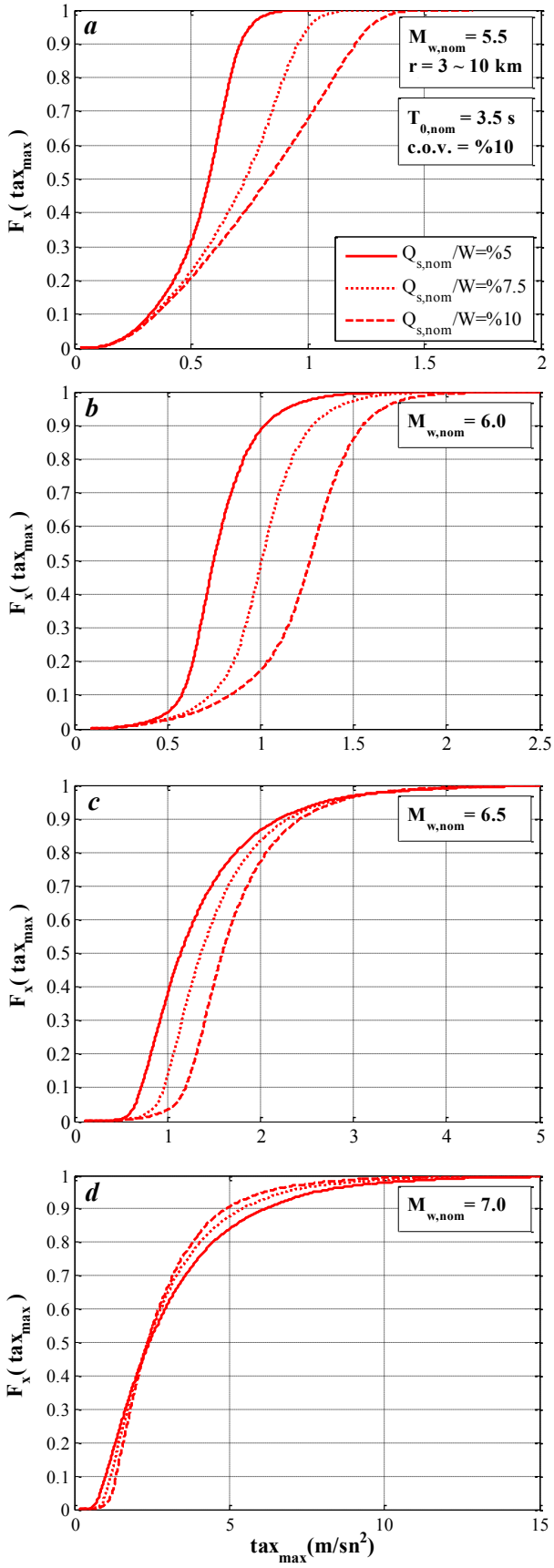
Şekil 4.65: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 2 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 4.66: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 4.67: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.



Şekil 4.68: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) ile oluşturulan binalar için elde edilen $drix_{max}$ değerlerine ait CDF grafikleri.

4.2.2.2. Güvenilirlik Analizleri

Bu bölümde, Senaryo-II kapsamında üretilen 6 adet izolasyon sistemleri alt seti ile oluşturulan 6 adet sismik izolasyonlu bina setinin her birinin mevcut senaryo kapsamında üretilen 4 sentetik deprem setine maruz kalması halinde, Bölüm 4.2.2.1'deki gibi elde edilen yapısal cevap parametrelerinin, bu parametreler için yine Senaryo-I'deki gibi belirlenen limit değerlerini aşma olasılıkları yani başarısızlık olasılıkları elde edilmiştir. Bu çalışma, Senaryo-I için Bölüm 4.2.1.2'de yapıldığı gibi, ancak mevcut senaryo dahilinde M_w ve r değerlerinin kesin olarak bilinmemesi halinde üretilen deprem setleri etkisindeki aynı bina setleri için elde edilen pik izolatör deplasmanları açısından sismik izolasyonlu yapıların yapısal bütünlüğünü irdelemek ve ve ardından söz konusu yapıların içerisinde ivmeye duyarlı cihazlar bulunması halinde, bu yapıların cihaz bazında performansa dayalı tasarımları pik kat kütle merkezi ivmelerinin aşmaması gereken limit değerleri ortaya koyabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.64 ve Şekil 4.67'den görüldüğü üzere; göz önünde bulundurulan tüm deprem setleri etkisinde I. ve II. Grup izolasyonlu bina alt setleri için elde edilen $drix_{max}$ parametresinin ulaşabildiği maksimum değerler, sırasıyla 3.5×10^{-3} ve 2.5×10^{-3} olup; bu değerler de, Senaryo-I'de olduğu gibi yönetmeliklerde (UBC, 1997; ASCE/SEI 7-05, 2006) doğrusal olmayan izolasyon sistemine sahip sismik izolasyonlu binaların doğrusal olmayan zaman tanım analizleri ile hesaplanan pik göreli kat ötelemelerinin maksimumu için üst sınır olarak belirlenen 1×10^{-2} değerinden düşüktür. Bu nedenle, bu bölümde ve Bölüm 4.2.2.3'de yapılan performans değerlendirmelerinde $drix_{max}$ parametresi göz önünde bulundurulmamıştır. Dolayısıyla mevcut senaryoda da sismik izolasyonlu yapıların yapısal bütünlüğü ve cihaz bazında performansa dayalı tasarımları için yapılan değerlendirmelerde yapısal cevap parametreleri olarak sırasıyla, $bdix_{max}$ ve tax_{max} parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Mevcut senaryo kapsamında $bdix_{max}$ ve tax_{max} parametreleri için limit değerleri, Senaryo-I'deki gibi alınmıştır.

a) Pik İzolatör Deplasmanlarının Maksimumları ($bdix_{max}$) için

I. ve II. Grup bina alt setlerinin mevcut senaryo kapsamında üretilen 4 deprem setine (Bölüm 3.6.2.1) maruz kalması durumunda elde edilen $bdix_{max}$ değerlerinin 4 deplasman limitine ($Limit_d$ = 0.40 m, 0.60 m, 0.80 m ve 1.00 m) göre başarısızlık olasılıkları, sırasıyla Şekil 4.69 (a) – (d) ve Şekil 4.69 (e) – (h)'de verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü üzere, üretilen deprem setleri M_w değerlerine göre gruplandırılmıştır. Şekil 4.69 (a) ve (b)

ile Şekil 4.69 (e) ve (f)'den görüldüğü üzere, I. ve II. grup bina alt setlerinin hiçbirinde $M_{w,nom}$ = 5.5 ve 6.0 için üretilen deprem setleri etkisinde elde edilen $bdix_{max}$ değerleri, 0.4 m limitini dâhi aşılmamaktadır.

$M_{w,nom}$ = 6.5 olması halinde ise, I. ve II. Grup İzolasyon Sistemi Alt Setleri ile oluşturulan bina setlerinin 0.4 m limitini aşma olasılıkları, sırasıyla yaklaşık %10~%20 ve %14~%20 aralıklarında değişmektedir (Şekil 4.69 (c)). Söz konusu I. ve II. grup bina alt setlerinin her birinin yine $M_{w,nom}$ = 6.5 için üretilen deprem setine maruz kalması halinde, 0.6 m limitini aşma olasılıkları, sırasıyla yaklaşık %3~%10 ve %4~%8 aralıklarında değişmektedir (Şekil 4.69 (c)). Yine aynı şekilden görüldüğü üzere, söz konusu deprem seti etkisindeki söz konusu her iki grup bina setlerinden $Q_{s,nom}/W$ değerinin %7.5 ve %10 olduğu setlerde neredeyse hiçbir bina için 1.0 m limiti aşılmazken; $Q_{s,nom}/W$ değerinin %5 olduğu setler için 1.0 m limiti yaklaşık %2 oranında aşılmaktadır.

$M_{w,nom}$ = 7.0 için her iki grup bina setleri için de P_f değerleri, $M_{w,nom}$ = 6.5 için elde edilen değerlere göre önemli artışlar göstermekle beraber, II. grup bina alt setlerinin P_f değerlerindeki artış, I. grup bina setleri için elde edilen değerlerdeki artışlardan daha fazladır (Şekil 4.69 (d) ve (h)). Şekil 4.69 (d) ve (h)'den görüldüğü üzere, söz konusu deprem seti etkisinde bulunan I. ve II. grup bina setlerinin 0.4 m limitini aşma olasılıkları, sırasıyla yaklaşık %33~%53 ve %53~%66 aralığında değişmektedir. Yine Şekil 4.69 (d) ve (h)'den görüldüğü üzere, I. ve II. grup bina setlerinin 1.0 m limitini aşma olasılıkları ise, sırasıyla yaklaşık %4~%10 ve %15~%30 aralığında değişmekte olup; bu aralıkların üst değerleri $Q_{s,nom}/W$=%5 için, alt değerleri ise $Q_{s,nom}/W$=%10 için oluşmaktadır. Yani $Q_{s,nom}/W$ artmasıyla izolatör deplasmanlarına ait P_f değerleri azalmaktadır.

b) Pik Kat Kütle Merkezi Toplam İvmelerinin Maksimumları (tax_{max}) için

I. ve II. grup bina alt setlerinin, mevcut senaryo kapsamında üretilen 4 deprem setine maruz kalması durumunda elde edilen tax_{max} değerlerinin 4 ivme limitine ($Limit_a$ = 0.1 g, 0.2 g, 0.5 g ve 1.0 g) göre başarısızlık olasılıkları ise, sırasıyla Şekil 4.70 (a) – (d) ve Şekil 4.70 (e) – (h)'de verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü üzere, üretilen deprem setleri M_w değerlerine göre gruplandırılmıştır. Şekil 4.70'dan görüldüğü üzere, söz konusu iki grup bina setlerinin tüm deprem setleri etkisinde, söz konusu ivme limitleri için elde edilen P_f değerleri, genel olarak $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde artmaktadır. Yani, Şekil

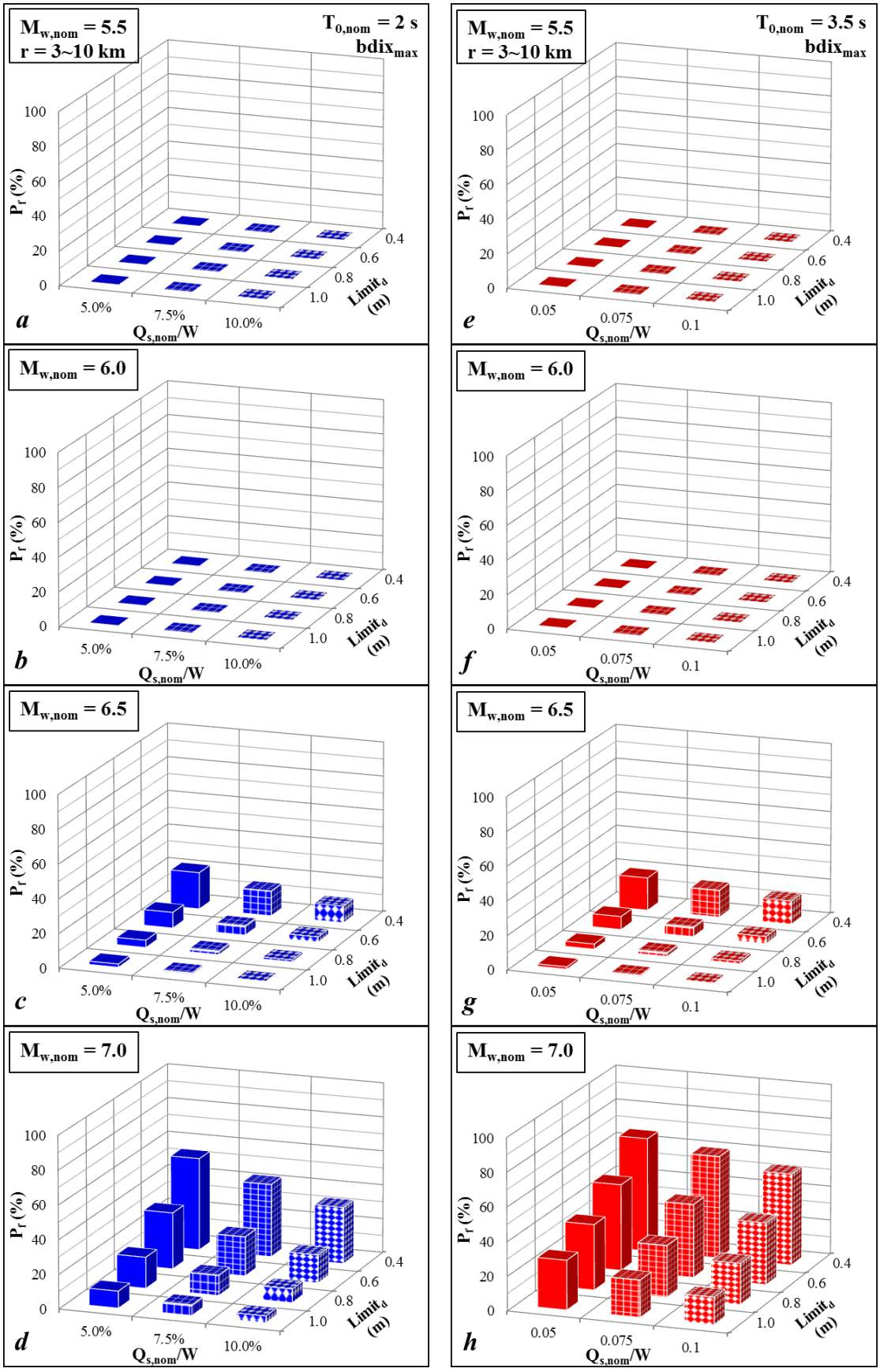
4.69'de görüldüğü üzere; $Q_{s,nom}/W$ değerinin artması halinde izolatör deplasmanları azalırken, burada görüldüğü üzere kat ivmeleri artmektadır.

Şekil 4.70 (a) ve (e)'den görüldüğü üzere, I. ve II. grup bina setlerinin neredeyse hiçbirinde, $M_{w,nom}$ = 5.5 için üretilen deprem seti etkisinde elde edilen tax_{max} değerleri, 0.2 g limitini aşmaz iken; I. grup bina setleri için 0.1 g limitinin aşılma olasılığı, %35~%90 aralığında, II. grup bina setleri için 0.1 g limitinin aşılma olasılığı ise, %0~%35 aralığında değişmektedir.

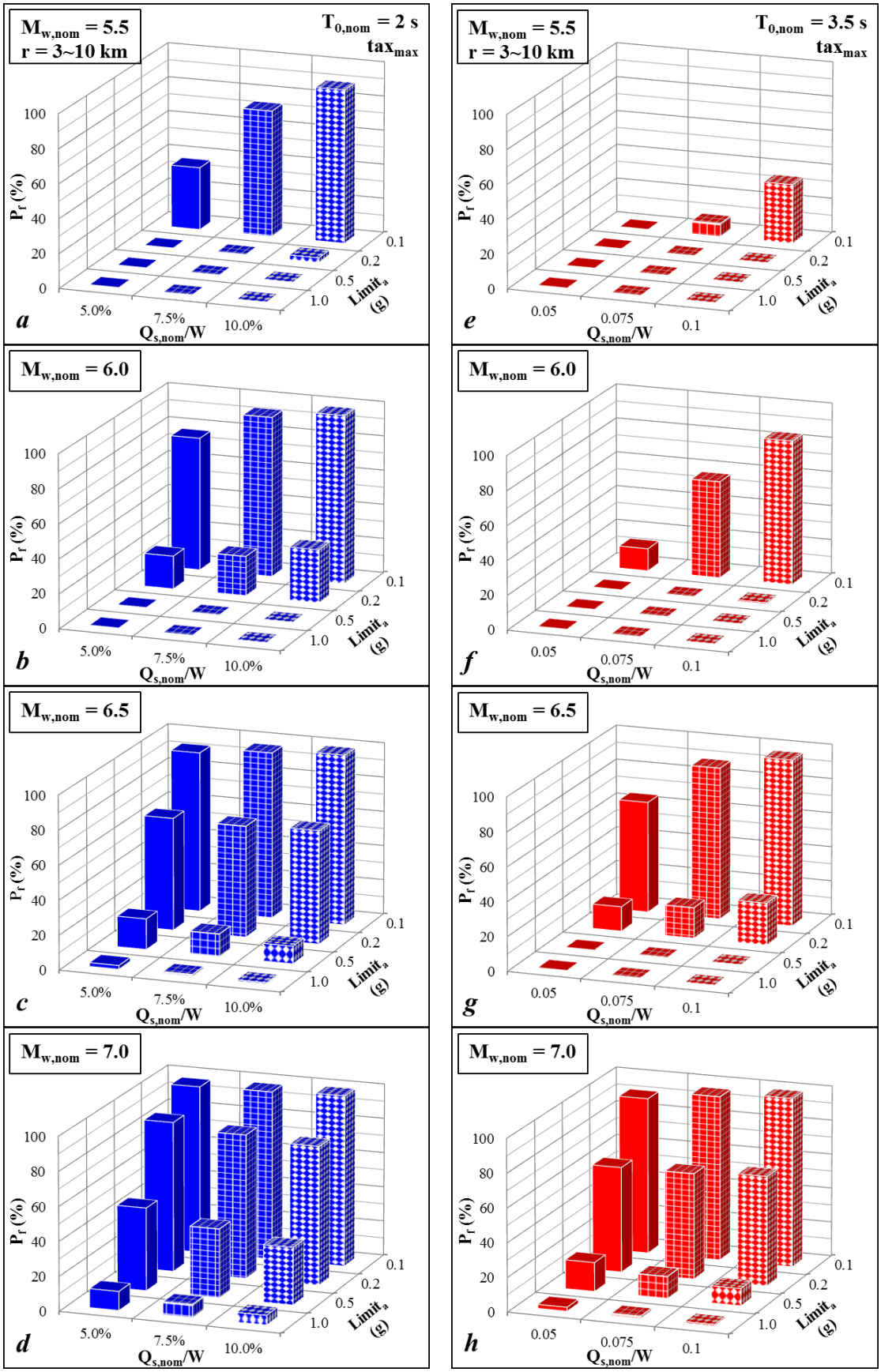
I. ve II. grup bina setlerinin $M_{w,nom}$ = 6.0 için üretilen deprem seti etkisinde elde edilen tax_{max} değerleri, 0.1 g limitini aşma olasılıkları, sırasıyla yaklaşık %77~%97 (Şekil 4.70 (b)) ve %13~%84 (Şekil 4.70 (f)) aralığında değişirken; yine aynı şekillerde görüldüğü üzere, I. grup bina setlerinin 0.2 g limitini aşma olasılıkları hızla düşmekte ve %20~%30 aralığında değişmekte; II. grup bina setlerinin hiçbirinde ise 0.2 g limiti aşılmamaktadır. 0.5 g ve 1.0 g limitleri ise, I. ve II. grup bina setlerinin hiçbirinde aşılmamaktadır.

$M_{w,nom}$ = 6.5 için üretilen deprem seti etkisindeki I. ve II. grup bina setlerinden elde edilen tax_{max} değerlerinin 0.1 g limitini aşma olasılıkları, sırasıyla yaklaşık %93~%99 (Şekil 4.70 (c)) ve %65~%97 (Şekil 4.70 (g)) aralığında değişmektedir. Söz konusu deprem seti etkisinde yine aynı grup bina setlerinden elde edilen tax_{max} değerlerinin 0.2 g limitini aşma olasılıkları ise, sırasıyla yaklaşık %65~%66 (Şekil 4.70 (c)) ve %15~%25 (Şekil 4.70 (g)) aralığında değişmektedir. $M_{w,nom}$ = 6.5 için üretilen deprem seti etkisindeki II. grup bina setlerinden elde edilen tax_{max} değerleri, 0.5 g limitini aşmaz iken; I grup bina setleri için söz konusu limitin aşılma olasılığı ise, %10~%18 aralığında değişmekte, bu bina setleri için 1.0 g limiti ise aşılmamaktadır.

Şekil 4.70 (d) ve (h)'ın karşılaştırılmasından görüldüğü üzere, I. ve II. grup bina setlerinin hepsi için de 0.1 g ve 0.2 g limitlerini aşma olasılıkları oldukça yüksek olup; I. grup bina setlerinin 0.5 g limitini aşma olasılığı, %33~%48 aralığına, II. grup bina setlerinin söz konusu ivme limitini aşma olasılığı ise, %10~%17 aralığına gerilemektedir. Yine bu şekillerden görüldüğü üzere; II. grup bina setlerinde bulunan binaların neredeyse hiçbirinde 1.0 g limiti aşılmazken; I. grup bina setlerinde bulunan binaların yaklaşık %6~%11'i, 1.0 g limitini aşmaktadır.



Şekil 4.69: Senaryo-II kapsamında oluşturulan binalar için elde edilen $bdix_{max}$ değerlerinin belirli limitlere göre başarısızlık olasılıkları; (a) – (d): $T_{0,nom}$ = 2 s, (e) – (h): $T_{0,nom}$ = 3.5 s.



Şekil 4.70: Senaryo-II kapsamında oluşturulan binalar için elde edilen tax_{max} değerlerinin belirli limitlere göre başarısızlık olasılıkları; (a) – (d): $T_{0,nom}$ = 2 s, (e) – (h): $T_{0,nom}$ = 3.5 s.

4.2.2.3. Performans Testleri

İkinci ana bölüm çalışmaları kapsamında oluşturulan toplam 6 izolasyonlu bina setinin Senaryo-I dahilinde üretilen 9 farklı deprem setine maruz kalması halinde Bölüm 4.2.1.3'deki performans testleri, bu bölümde söz konusu bina setlerinin Senaryo-II dahilinde üretilen 4 deprem setine maruz kalması halinde yapılmıştır. Söz konusu performans testlerinde, Senaryo-I için Bölüm 4.2.1.3'de yapıldığı gibi bu bölümde de yapısal bütünlüğün tehlikeye girmesine neden olacak izolatör deplasmanları ile incelenen binaların içinde bulunma ihtimali olan ivmeye duyarlı hassas cihazların zarar görmesine neden olacak kat ivmeleri birlikte değerlendirilmiştir. Böylece Senaryo-I'de olduğu gibi incelenen binaların hem yapısal bütünlük açısından ve hem de cihaz bazında performans açısından birlikte sağlamaları gereken performans seviyeleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda söz konusu yine bdix_{max} ve tax_{max} parametreleri için Bölüm 4.2.1.2'de belirlenen aynı limit değerleri kullanılarak; yine 16 adet performans testi Tablo 4.14'deki gibi oluşturulmuştur.

A) I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için Gerçekleştirilen Performans Testleri

Mevcut çalışma kapsamında, $T_{0,\text{nom}} = 2$ s olmak üzere $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin %5, %7.5 ve %10 alındığı I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu bina için performans testi sonuçları, her bir performans seviyesi için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 4.71 ve Şekil 4.72'de verilmiştir. Bu şekillerden genel olarak görüldüğü üzere; aynı ivme limiti ile oluşturulmuş performans seviyeleri için gerçekleştirilen testlerde başarısızlık olasılıkları arasındaki farklar, Senaryo-I'de olduğu gibi ihmâl edilebilecek mertebede azdır. Söz konusu performans seviyeleri için deplasman limitlerinin artması halinde meydana gelen farklılıklar, I. Grup bina setleri için yine Senaryo-I'de olduğu gibi, sadece 1.0 g ivme limiti için oluşturulan testlerde görülmektedir.

A1) Test1, Test2, Test3 ve Test4 Performans Testleri

I. Grup bina setleri için 0.1 g ivme limitine göre gerçekleştirilen performans testlerine (Test1, Test2, Test3 ve Test4) ait sonuçlar, Şekil 4.71 (1), (2), (3) ve (4)'de verilmiştir. Deplasman seviyesine göre P_f değerlerinin çok fazla değişmediği bu 4 test sonuçlarından görüldüğü üzere, söz konusu bina setlerinin $M_{w,nom}$ değerinin 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 olması halinde üretilen deprem setlerine maruz kalması halinde, başarısızlık olasılıkları, sırasıyla

yaklaşık %36~%90, %77~%97, %93~%99 ve %97~%99 aralıklarında değişmektedir. Dolayısıyla, bu 4 testten görüldüğü üzere, I. Grup bina setleri için 0.1 g limiti ile oluşturulan performans seviyeleri, söz konusu binaların M_w = 5.5 için üretilen depremler etkisinde olması durumunda bile sağlanması zor performans seviyeleridir. Ayrıca, bu 4 testten görüldüğü üzere başarısızlık olasılıklarını 0.1 g ivme limiti belirlemekte olup; $Q_{s,nom}/W$'un artması halinde $M_{w,nom}$ = 5.5 ve 6.0 için kat ivmeleri arttığı için (Şekil 4.65 (a) ve (b)) bu deprem setleri etkisinde söz konusu performans seviyelerindeki başarısızlık olasılıkları da artmaktadır. $M_{w,nom}$ = 6.5 ve 7.0 için $Q_{s,nom}/W$ oranına bağlı olarak başarısızlık olasılıklarında blirgin bir değişim gözlenmemektedir.

A2) Test5, Test6, Test7 ve Test8 Performans Testleri

Aynı bina setleri için 0.2 g ivme limitine göre gerçekleştirilen performans testleri olan Test5, Test6, Test7 ve Test8 için sırasıyla Şekil 4.71 (5), (6), (7) ve (8)'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere; tüm P_f değerlerinde ilk 4 teste göre düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler, en fazla M_w = 5.5 ve M_w = 6.0 için üretilen depremler etkisinde meydana gelmiştir. $T_{0,nom}$ = 2 s ve $Q_{s,nom}/W$ = %10 bina setinin M_w = 5.5 deprem setine maruz bırakılması halinde P_f değeri, Test1'e göre %90 iken, Test5'e göre %3 civarına gerilemiştir. Söz konusu performans testleri için yine aynı bina setlerinin her birinin $M_{w,nom}$ = 6.0, $M_{w,nom}$ = 6.5, $M_{w,nom}$ = 7.0 için üretilen deprem setlerinin her birine maruz kalması halinde P_f değerleri ise, sırasıyla %20~%30, %65~%66 ve %80~%87 aralığında değiştiği görülmektedir. Ayrıca, $M_{w,nom}$ = 5.5, 6.0 ve 6.5 olan deprem setlerine maruz bina setleri için $Q_{s,nom}/W$ değerinin artmasına paralel olarak P_f değerleri artarken; aynı bina setlerinin M_w = 7.0 deprem setine maruz kalması halinde $Q_{s,nom}/W$ değerinin artmasına paralel olarak P_f değerleri de azalmaktadır. Söz konusu 4 testten görüldüğü üzere, I. Grup bina setleri için 0.2 g limiti ile oluşturulan performans seviyeleri, söz konusu binaların özellikle $M_{w,nom}$ = 6.5 ve $M_{w,nom}$ = 7.0 için üretilen depremler etkisinde olması durumunda sağlanması zor performans seviyelerdir. Söz konusu performans seviyeleri için $M_{w,nom}$ = 6.0 olması halinde elde edilen başarısızlık olasılıkları da göz ardı edilemeyecek ($Q_{s,nom}/W$ = %10 için $P_f \approx$ %40) seviyelerdedir. Ayrıca yine ilk dört testte olduğu gibi buradaki dört testte de ivme limiti P_f değerlerini belirlemekte; çünkü bu değerlerde deplasman seviyesine göre bir değişim olmamaktadır.

A3) Test9, Test10, Test11 ve Test12

I. grup bina setleri için 0.5 g ivme limitine göre gerçekleştirilen performans testlerine (Test9, Test10, Test11 ve Test12) ait sonuçlar ise, Şekil 4.72 (9), (10), (11) ve (12)'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, tüm P_f değerlerinde önceki testlere göre önemli düşüşler gerçekleşmiştir. Hatta söz konusu bina setlerinin, $M_{w,nom}$ değerinin 5.5 ve 6.0 olması halinde üretilen tüm deprem setlerine maruz kalması durumunda, ilgili performans seviyelerinin ivme ve deplasman limitleri aşılmamaktadır. M_w = 6.5 ve M_w = 7.0 için üretilen deprem setlerine maruz binalar için söz konusu ivme ve deplasman seviyelerindeki P_f değerleri ise, sırasıyla %10~%18 ve %33~%48 aralığında değişmektedir. Bu testlerde görüldüğü üzere, $Q_{s,nom}/W$ oranı artması halinde başarısızlık olasılıkları düşmektedir. Test9 ve Test10'un karşılaştırılmasından görüldüğü üzere; deplasman limitinin artmasına bağlı olarak aynı ivme limiti için P_f değerleri azalmakta ve deplasman limiti belirleyici olmaktadır. Ancak Test10 ve sonrasındaki testler için 0.5 g limiti P_f değerlerini belirlemektedir.

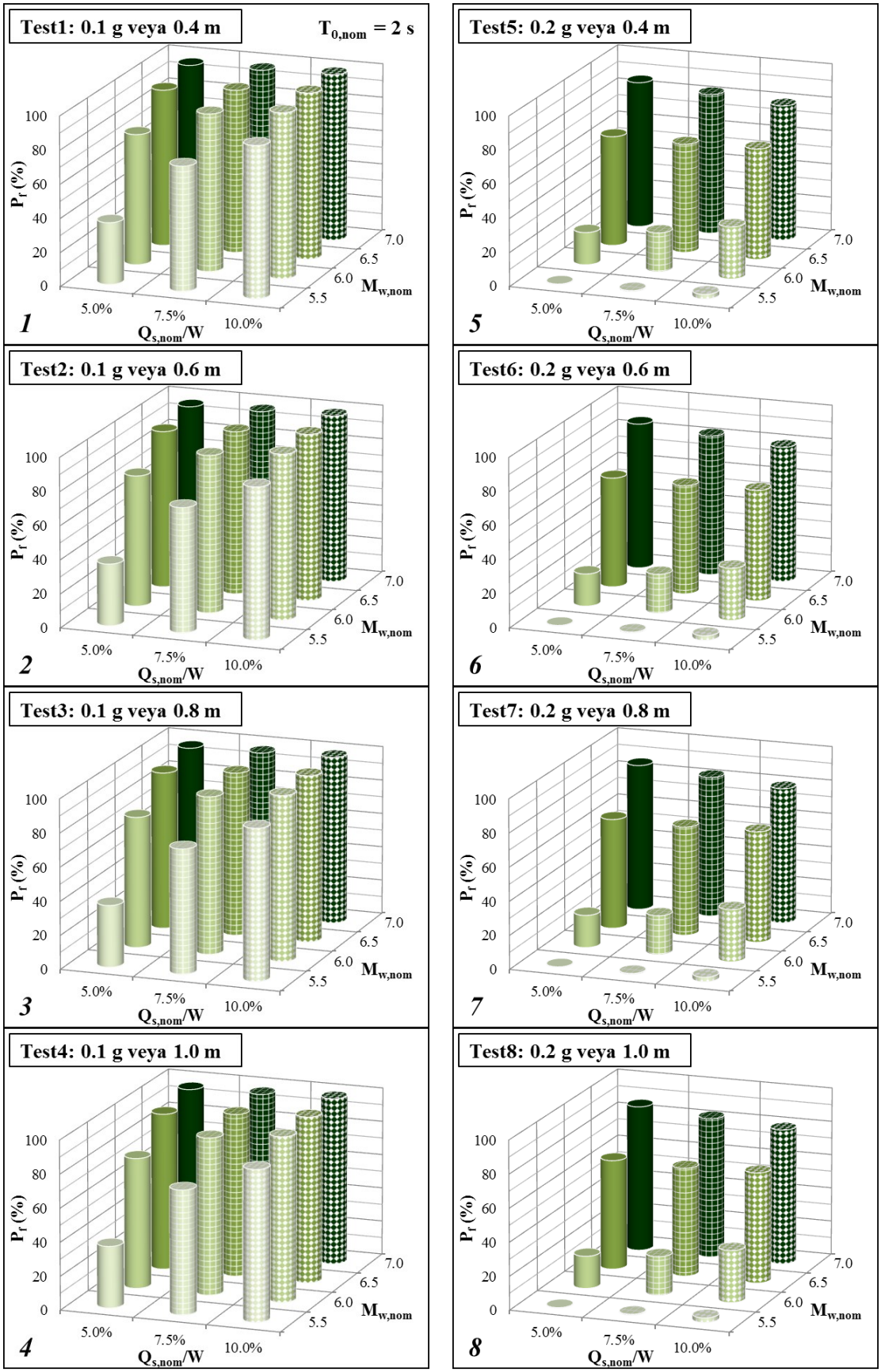
A4) Test13, Test14, Test15 ve Test16

Aynı bina setleri için 1.0 g ivme limitine göre gerçekleştirilen performans testlerinin sonuçları ise, Şekil 4.72 (13), (14), (15) ve (16)'da verilmiştir. Söz konusu bina setlerine $M_{w,nom}$ değerinin 6.5 ve 7.0 olması halinde üretilen depremlerin etkimesi halinde başarısızlık olasılıkları, Test13 hariç olmak üzere 0.5 g ivme limiti için elde edilen başarısızlık olasılıklarına göre düşmektedir. M_w = 6.5 için üretilen depremlerin etkimesi halinde söz konusu bina setleri için "1.0 g veya 0.4 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %10~%20 arasında; "1.0 g veya 0.6 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %3~%10 arasında; "1.0 g veya 0.8 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %1~%4 arasında ve "1.0 g veya 1.0 m" performans seviyesini aşma olasılıkları ise, %0.7~%2 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, M_w = 7.0 için üretilen depremlerin etkimesi halinde söz konusu bina setleri için "1.0 g veya 0.4 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %33~%54 arasında; "1.0 g veya 0.6 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %16~%33 arasında; "1.0 g veya 0.8 m" performans seviyesini aşma olasılıkları, %8~%18 arasında ve "1.0 g veya 1.0 m" performans seviyesini aşma olasılıkları ise, %5~%10 arasında değişmektedir. Ayrıca bu testlerede görüldüğü üzere, deplasman limitlerinin artması halinde başarısızlık olasılıkları azalmakta ve 1.0 g aşılması zor bir ivme limiti olduğu için ve büyük oranda aşılamadığı

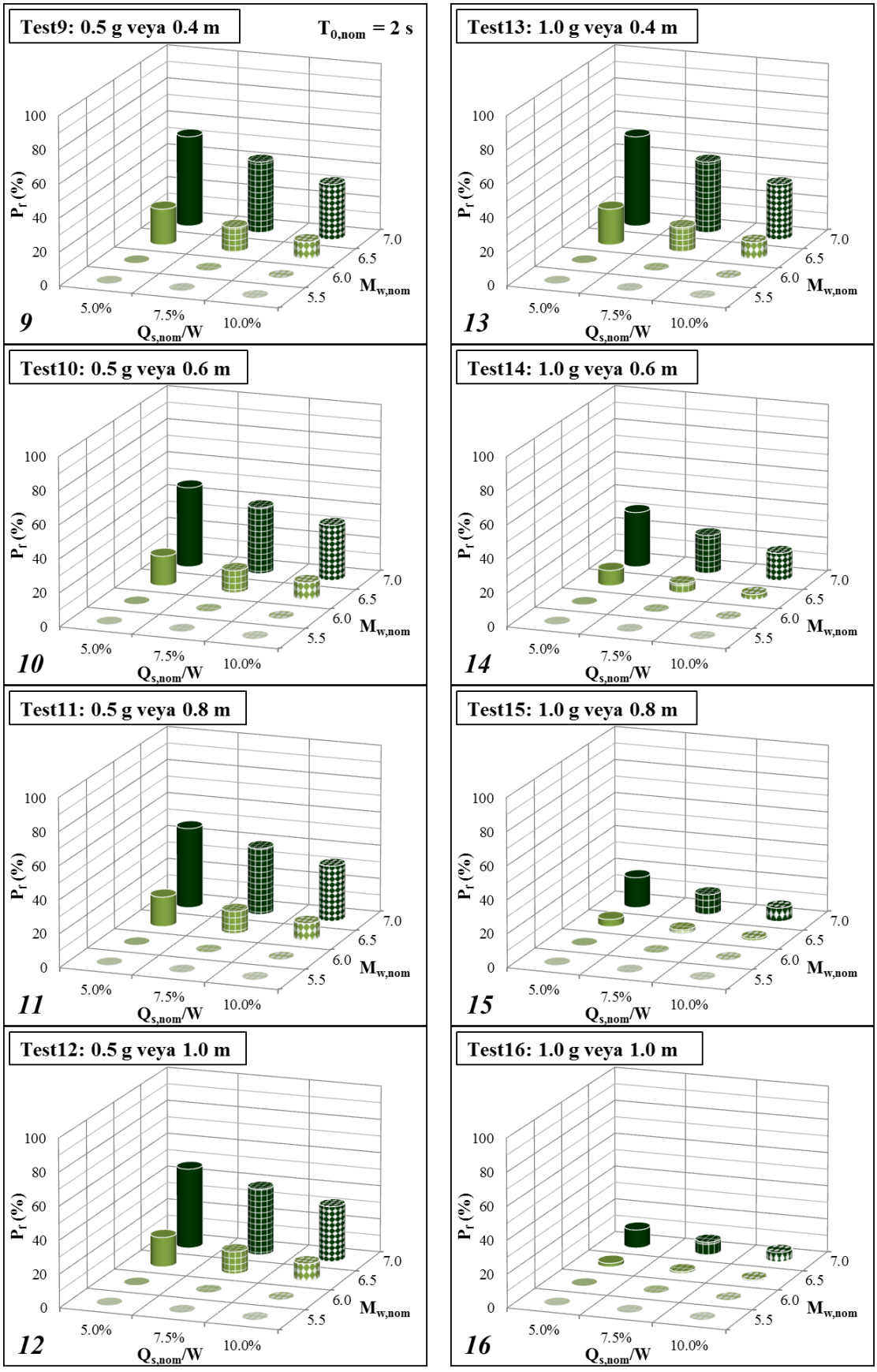
için, Senaryo-I'de de olduğu gibi bu ivme limiti için başarısızlık olasılıkları üzerinde artık deplasman seviyeleri belirleyici olmaktadır.

B) II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile Oluşturulan Binalar için Gerçekleştirilen Performans Testleri

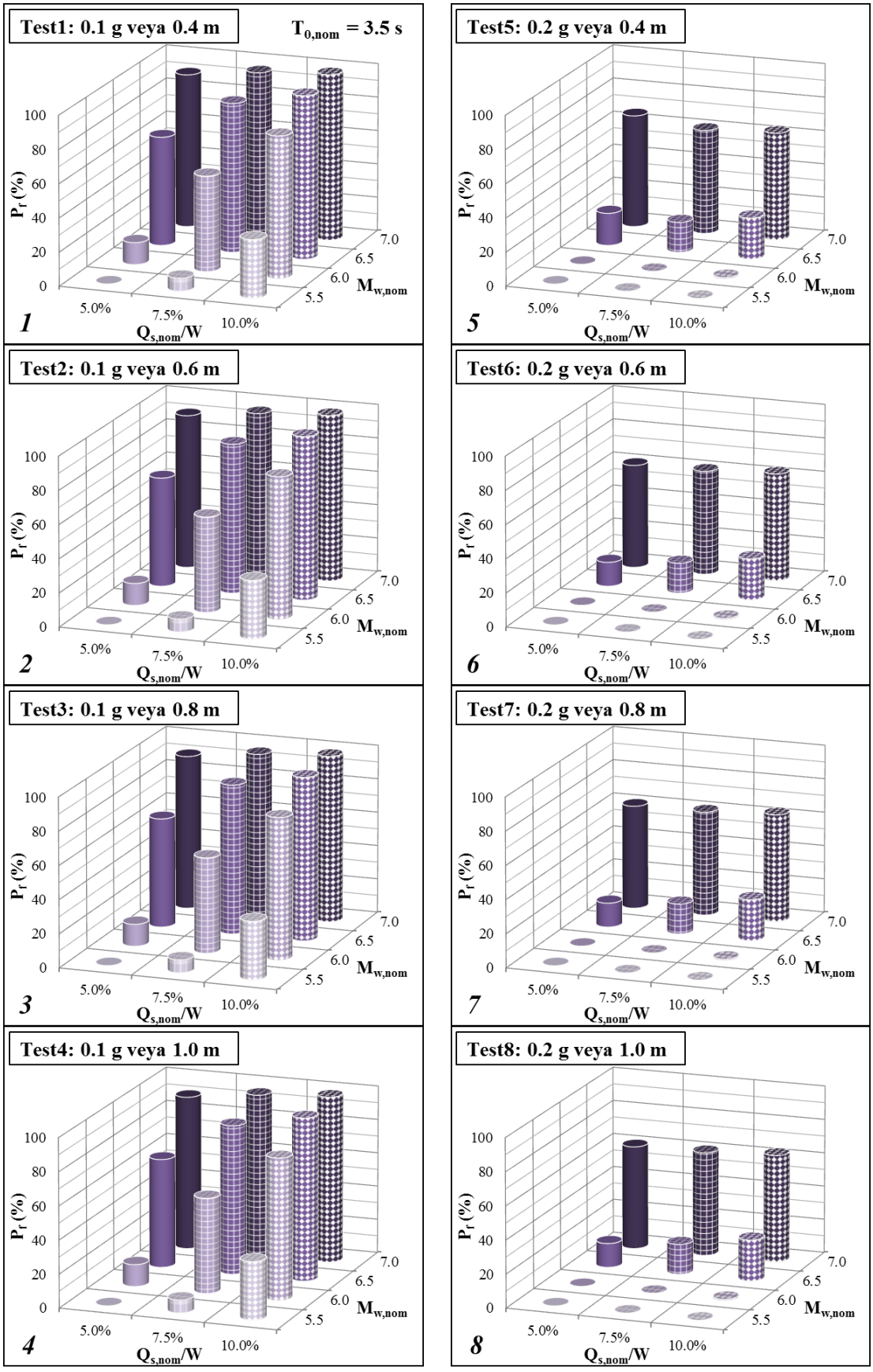
$T_{0,nom}$ = 3.5 s olmak üzere $Q_{s,nom}/W$ değerlerinin yine %5, %7.5 ve %10 alındığı II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan toplam 30,000 adet sismik izolasyonlu bina için performans testi sonuçları ise, yine her bir performans seviyesi için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 4.73 ve Şekil 4.74'da verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü üzere; aynı ivme limiti ile oluşturulmuş performans seviyeleri için gerçekleştirilen testlerde, başarısızlık olasılıkları arasındaki farklar ihmal edilebilecek mertebede azdır. Söz konusu performans seviyeleri için deplasman limitlerinin artması halinde meydana gelen farklılıklar, söz konusu izolasyon sistemi setleri ile oluşturulan binalar için 0.5 g ve 1.0 g ivme limitleri için oluşturulan testlerde görülebilmektedir.



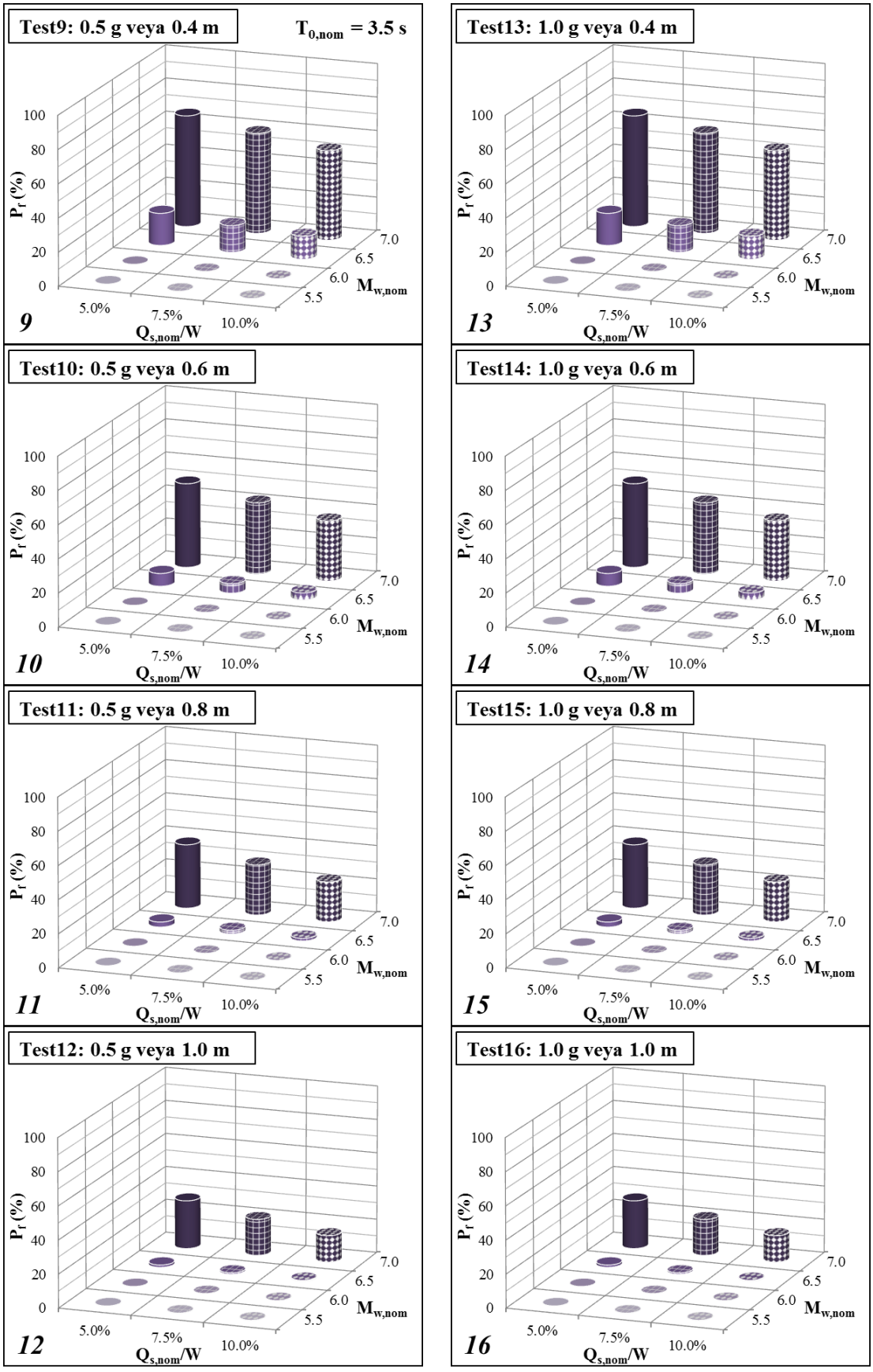
Şekil 4.71: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test1, Test2, Test3, Test4, Test5, Test6, Test7 ve Test8.



Şekil 4.72: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test9, Test10, Test11, Test12, Test13, Test14, Test15 ve Test16.



Şekil 4.73: II. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test1, Test2, Test3, Test4, Test5, Test6, Test7 ve Test8.



Şekil 4.74: I. Grup Üretilmiş İzolasyon Sistemleri ile oluşturulan binalar için performans testi sonuçları (Senaryo-II):Test9, Test10, Test11, Test12, Test13, Test14, Test15 ve Test16.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında, doğrusal olmayan kauçuk esaslı izolatörlerin ana karakteristik parametreleri olan akma öncesi rijitlik, akma sonrası rijitlik ve akma dayanımı parametrelerinde, bu parametrelerin tasarıma esas olmak üzere tespit edilen nominal değerlerine göre çeşitli nedenlerle meydana gelebilecek değişiklikleri göz önünde bulundurmak suretiyle, üç boyutlu olasılıksal bir yapısal modelin oluşturulması ve bu olasılıksal modelin Monte Carlo analizleri yardımıyla incelenmesi suretiyle de: (1) doğrusal olmayan izolasyon sistemlerinde meydana gelebilecek rastgele değişimlerin taban izolasyonlu binaların dinamik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmış, (2) UBC (1997) yönetmeliğinde taban izolasyonlu binalar için tanımlanan burulma büyütme katsayılarının güvenilirliği ortaya konulmuş, (3) doğrusal olmayan izolasyon sistemine sahip taban izolasyonlu binaların yakın-fay depremleri altındaki güvenilirlikleri, farklı deprem momenti büyüklüğü ve farklı fay mesafelerine bağlı olarak ortaya konulmuş ve (4) karakteristik kuvvet oranının (sönümün) yakın-fay depremleri etkisindeki söz konusu binaların güvenilirliklerini ne derece etkilediği incelenmiştir. Bu kapsam doğrultusunda tez çalışmaları iki ana bölüme ayrılmıştır. Bu iki ana bölüm kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların özeti ve bu çalışmalar ile elde edilen sonuçlar, sırasıyla Bölüm 5.1 ve Bölüm 5.2'de sunulmuştur.

5.1. İZOLASYON SİSTEMİ KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNDEKİ RASTGELE DEĞİŞİMİN YAPISAL SİSTEMİN DİNAMİK DAVRANIŞI VE GÜVENİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Tez çalışmasının birinci ana bölümünde, iki farklı izolasyon periyodu (T_0 = 2.0 s ve 3.5 s) için modellenen ve izolatör karakteristik parametreleri kendi içlerinde aynı olan iki referans izolasyon sistemini referans almak ve izolatör karakteristik parametreleri için üç farklı varyasyon katsayısı (*c.o.v.*= %5, %10 ve %15) göz önünde bulundurmak suretiyle, 6 farklı izolasyon sistemi kombinasyonu dahilinde her bir izolatörü birbirinden farklı mekanik özelliklere sahip 30,000 adet birbirinden farklı doğrusal olmayan izolasyon sistemi üretilmiştir. Bu sistemler, aynı üstyapı ile entegre edilerek; 30,000 adet üç boyutlu

sismik izolasyonlu bina oluşturulmuştur. Monte Carlo simülasyonları dahilinde her bina, 27 adet ileri-yönelim etkisi taşıyan tarihi yakın-fay yer hareketi bileşeni (FD) ile 27 adet ileri-yönelim etkisi taşımayan yer hareketi bileşenine (NFD) X yönünde ve bu bileşenlere dik yer hareketi bileşenlerine ise Y yönünde maruz bırakılarak doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Yapısal cevap parametreleri olarak pik taban katı kütle merkezi deplasmanları, pik köşe izolatör deplasmanları, pik en üst kat kütle merkezi deplasmanları, pik en üst kat kütle merkezi toplam ivmeleri, pik üstyapı kesme kuvvetleri ve pik taban katı kesme kuvvetleri göz önünde bulundurulmuştur. Yer hareketi türü, nominal izolasyon periyodu ($T_{0,nom}$) ve varyasyon katsayısı (*c.o.v.*) farkı gözetilerek, tüm bina setleri için yapısal cevap parametrelerinin değerleri, bu değerlerden %80, %85, %90, %95 ve %100 güvenlik seviyelerine karşılık gelen değerlerin referans binalardaki nominal değerlerinden sapma yüzdeleri ve burulma büyütmesi katsayıları hesaplanmış; pik en üst kat kütle merkezi ivmeleri, pik izolatör deplasmanlarının maksimumları ve pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları için güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, son olarak da bu güvenilirlik analizlerinin izolasyon sistemi elemanlarının varyasyon katsayılarına olan duyarlılığı araştırılmıştır. Bu incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Varyasyon katsayısının artması halinde, göz önünde bulundurulan tüm güvenlik seviyeleri için tüm yapısal cevap parametrelerinin nominal değerlerden sapma yüzdeleri de artmaktadır.
2. Ortalama sapma yüzdeleri göz önünde bulundurulduğunda, %95 güvenlik seviyesine kadar varyasyon katsayısı artışının sapma yüzdeleri üzerindeki etkisi azdır. Ancak %95 güvenlik seviyesinin üstünde varyasyon katsayısının artmasına bağlı olarak, yapısal cevap parametrelerinin nominal değerlerinden sapma yüzdeleri hızlı bir şekilde artmaktadır; yani, varyasyon katsayısı artışının etkisi, %95 üstü güvenlik seviyelerinde belirgin olmakta ve önem kazanmaktadır.
3. Ortaya çıkan sapma yüzdeleri açısından, FD veya NFD yer hareketlerine bağlı olarak sonuçlarda benzer eğilimler ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde, izolasyon periyotlarının uzun ($T_{0,nom}$=3.5 s) veya daha kısa ($T_{0,nom}$=2.0 s) olmasına bağlı olarak sonuçlarda benzer eğilimler ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla, sapma yüzdeleri yer hareketi türü ve izolasyon periyotlarından bağımsız davranış sergilemektedir.

4. Varyasyon katsayısının artması halinde, göz önünde bulundurulan tüm güvenlik seviyeleri için burulma büyütmeleri de artmaktadır. Ancak, %95 güvenlik seviyesine kadar varyasyon katsayısı artışının burulma büyütmelerinin üzerindeki etkisi azdır. Varyasyon katsayısının artışının etkisi, burulma büyütmeleri açısından da %100 güvenlik seviyesinde daha belirgin olmaktadır.
5. Hesaplanan burulma büyütmeleri açısından da FD ve NFD yer hareketlerine bağlı olarak sonuçlarda benzer eğilimler ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde, izolasyon periyotlarının uzun ($T_{0,nom}$=3.5 s) veya daha kısa ($T_{0,nom}$=2.0 s) olmasına bağlı olarak da sonuçlarda benzer eğilimler ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla, burulma büyütmeleri de yer hareketi türü ve izolasyon periyotlarından bağımsız davranış sergilemektedir.
6. Yer hareketi türü ve izolasyon periyodu gözetilmeksizin burulma büyütmelerinin ortalamaları alındığında, bu ortalamalara standart sapmaların da ilave edilmesi halinde dahi %95 güvenlik seviyesi için UBC (1997) yönetmeliğine göre sismik izolasyonlu yapılar için rastlantısal olarak ortaya çıkan izolasyon sistemi elemanları rijitliklerindeki farklılıklara bağlı olarak hesaplanan tüm burulma büyütmeleri, 1.15 limitinin (UBC Limit_2) altında değerler almaktadır. %100 güvenlik seviyesi için ise, 1.15 limiti, sadece *c.o.v.*=%5 olan setlerde sağlanmakta olup; *c.o.v.*=%10 ve %15 olan diğer setler için bu limit aşılmaktadır.
7. UBC (1997) yönetmeliğine göre mutlak alt limit olan 1.10 limiti (UBC Limit_1) ise, %95 güvenlik seviyesinde *c.o.v.*=%5 ve %10 olan alt setlerde sağlanmaktadır. %100 güvenlik seviyesinde ise, bu limit sadece *c.o.v.*=%5 olan alt setlerde sağlanmaktadır.
8. Madde 6 ve Madde 7 birlikte değerlendirildiğinde görülmektedir ki, UBC (1997) yönetmeliğindeki mutlak alt limit olan 1.10 limiti yetersizdir; UBC Limit_2 ise, gereklidir. Ancak bu limit de %100 güvenlik seviyesi için yeterli olmayıp; *c.o.v.*=%10 ve *c.o.v.*=%15 seviyeleri için sırasıyla %98 ve %95 güvenlik seviyelerine kadar güvenlidir. Daha yüksek güvenlik seviyeleri için tasarımların planlanması halinde, söz konusu limitin arttırılması düşünülebilir.
9. En üst kat kütle merkezi pik toplam ivmeleri, pik izolatör deplasmanlarının maksimumları ve pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumlarına göre yapılan güvenilirlik analizleri sonucunda, varyasyon katsayısı artışının güvenilirlik seviyesini ihmal edilebilecek kadar küçük oranda etkilediği görülmüştür. Güvenilirliğin asıl belirleyicisinin izolasyon sistemi elemanlarının mekanik

özelliklerindeki belirsizlik değil, yer hareketindeki belirsizlik olduğu ortaya konmuştur.

10. Güvenilirlik analizleri kapsamında; FD yer hareketleri etkisindeki altında ortaya çıkan başarısızlık olasılıkları, NFD yer hareketlerine maruz kalınması haline göre çok daha yüksektir. FD yer hareketleri için $r < 8$ km olması halinde ulaşılan ivme, deplasman ve göreli kat öteleme oranı değerleri oldukça yüksek iken; $r > 8$ km olması durumunda bu değerler hızla gerilemektedir. NFD yer hareketleri için ise, r'ye bağlı belirgin bir eğilim görülmemektedir. Ayrıca, FD yer hareketi çiftleri için PGA/PGV oranının düşük olması halinde, pik izolatör deplasmanlarının ve pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları ile pik en üst kat kütle merkezi toplam ivmelerinin ulaştığı limit değerler genellikle daha yüksek olmaktadır. NFD yer hareketleri için ise, PGA/PGV oranına bağlı belirgin bir eğilim görülmemektedir.

11. Güvenilirlik analizleri kapsamında, izolasyon periyotlarının uzun ($T_{0,nom}$=3.5 s) veya daha kısa ($T_{0,nom}$=2 s) olmasına bağlı olarak farklı eğilimler ortaya çıkmıştır. Kısa izolasyon periyoduna sahip binalarda, özellikle FD yer hareketleri etkisinde ulaşılan pik izolatör deplasmanı limitleri, uzun periyoda sahip yapılara göre çok daha küçüktür. Pik en üst kat ivmesi açısından ise, uzun izolasyon periyoduna sahip yapılarda ulaşılan limitlerin kısa izolasyon periyoduna sahip yapılara göre çok daha küçük olduğu görülmüştür. Pik göreli kat öteleme oranları açısından elde edilen sonuçlar ise, pik en üst kat ivmelerinden elde edilen sonuçlara benzemektedir.

5.2. SİSMİK İZOLASYONLU BİNA TÜRÜ YAPILARIN YAKIN-FAY YER HAREKETLERİ ETKİSİNDEKİ OLASILIKSAL DİNAMİK DAVRANIŞININ VE DOĞRUSAL OLMAYAN İZOLASYON SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Tez çalışmasının ikinci ana bölümünde ise, iki farklı nominal izolasyon periyodu (T_0 = 2.0 s ve 3.5 s), üç farklı nominal karakteristik kuvvet oranı ($Q_{s,nom}/W$= %5, %7.5 ve %10) seviyesi ve tek varyasyon katsayısı (*c.o.v.* = %10) için üretilen 60,000 adet birbirinden farklı doğrusal olmayan izolasyon sistemlerine sahip, toplam 60,000 adet üç boyutlu sismik izolasyonlu bina oluşturulmuştur. Bu binalar, puls içeren sentetik yakın-fay depremlerine maruz bırakılmış olup; söz konusu depremlerin üretilmesinde, deprem momenti büyüklüğü (M_w) ve faya olan en yakın mesafe (r) parametrelerinin kesin olarak bilinip bilinmemesine göre iki senaryo oluşturulmuştur. Senaryo-I'de M_w ve r

parametreleri, belirli M_w ve r değerlerine göre yapılacak değerlendirmelerin sınıflandırılabilmesi için değerlerinin bilindiği varsayılarak deterministik parametreler olarak göz önüne alınmış; puls hızı (V_p), puls periyodu (T_p) ve puls sönüm oranı (ζ_p) ise rastgele değişkenler olarak ele alınmıştır. Senaryo-II'de ise, M_w ve r parametrelerinin de kesin olarak bilinmediği göz önünde bulundurularak bu parametreler de rastgele değişkenler olarak ele alınmıştır. Farklı M_w ve r seviyeleri için Senaryo-I'de 90,000 adet, Senaryo-II'de ise 40,000 adet birbirinden farklı sentetik yakın-fay depremi üretilmiştir. Yapısal cevap parametreleri olarak, pik izolatör deplasmanlarının maksimumları, pik göreli kat öteleme oranlarının maksimumları ve pik kat kütle merkezi ivmelerinin maksimumları göz önünde bulundurulmuştur. Bu cevap parametrelerinin değişimleri, göz önünde bulundurulan nominal izolasyon periyodu ($T_{0,nom}$) ve nominal izolasyon sönüm oranları için uygulamada mühendislerin de ön tasarımlarında referans alabileceği ve nihai tasarımlarında da güvenilirlik değerlendirmesi yapabileceği kümülatif dağılım fonksiyonları ile ortaya konmuştur. Bu bölümde ayrıca, pik izolatör deplasmanları ve pik kat kütle merkezi ivmelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ve birlikte değerlendirmeleri durumlarında tüm binalar için sırasıyla güvenilirlik analizleri ve performans testleri deprem momenti büyüklüğü, fay mesafesi, izolasyon periyodu ve karakteristik kuvvet oranı farkı gözetilerek gerçekleştirilmiştir. İkinci ana bölüm kapsamında incelenen sismik izolasyonlu binalar için Monte Carlo simülasyonları dahilinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan dinamik analizler neticesinde, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Deplasman açısından başarısızlık olasılıklarının deprem büyüklüğü arttıkça, fay hattı mesafesi azaldıkça, izolasyon periyotları arttıkça ve karakteristik kuvvet oranları azaldıkça monotonik olarak arttığı görülmektedir.
2. $M_w = 6.0$ büyüklüğünde bir yakın-fay depreminde, fay hattına $r = 3$ km yakınlığındaki bölgelerde dahi düşük sayılabilecek deplasman değerleri (40 cm gibi) aşılmamaktadır.
3. $M_w = 6.5$ büyüklüğüne ulaşıldığında, ancak fay hattına yakın bölgelerde ($r = 3$ km) deplasmanlar dikkate değer seviyelere ulaşmaktadır. Ancak, fay hattına yakınlığı $r =$ 6 km'den daha uzak olan bölgelerde, 60 cm ve üstü deplasman kapasiteli izolatörler kullanılması halinde –özellikle $Q_{s,nom}/W$=%7.5 ve daha yüksek karakteristik kuvvet oranları için- başarısızlık olasılıkları makul seviyelere inmektedir.

4. M_w = 7.0 büyüklüğünde bir yakın-fay depreminde, uzun izolasyon periyodu için ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) başarısızlık olasılıkları çok yüksektir: En olumsuz durumda (r = 3 km ve $Q_{s,nom}/W$ = %5) 40 cm limiti %90 başarısızlık olasılığı oluşturmakta ve fay hattına r = 9 km uzaklığına çıkılarak deplasman kapasitesi 1.00 m olan izolatör ve yüksek karakteristik kuvvet oranı ($Q_{s,nom}/W$=%10) kullanılsa dahi başarısızlık olasılıkları ancak %5'lere inmektedir. Kısa izolasyon periyodu için de ($T_{0,nom}$ = 2.0 s) başarısızlık olasılıkları çok yüksek olmakla birlikte -en olumsuz durumda (r = 3 km ve $Q_{s,nom}/W$ = %5) 40 cm limiti %80 başarısızlık olasılığı oluşturmaktadır- fay hattına r = 9 km uzaklığına çıkılarak deplasman kapasitesi 80 cm ve daha fazla olan izolatör kullanılması durumunda başarısızlık olasılıkları makul seviyelere (%2 ila %10) inebilmektedir. Dolayısıyla, M_w = 7.0 büyüklüğünde depremlerin meydana gelme riskinin bulunduğu yakın-fay bölgelerindeki sismik izolasyonlu binalarda yapısal bütünlüğün tehlikeye girme riskinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle söz konusu bölgelerde sismik izolasyonlu binaların inşasının uygun olmayabileceği neticesine varılmıştır.
5. İvme açısından başarısızlık olasılıklarının deprem büyüklüğü arttıkça, fay hattı mesafesi azaldıkça, izolasyon sistemi periyodu azaldıkça ve karakteristik kuvvet oranları arttıkça, başarısızlık olasılıkları artmaktadır.
6. İvme açısından 0.1g limitinin oldukça iddialı bir limit olduğu tespit edilmiştir ve bu limit, uzun periyotlu ($T_{0,nom}$ = 3.5 s) sistem söz konusu olduğunda M_w = 6.0 için bile aşılmaktadır.
7. M_w = 6.5 büyüklüğüne ulaşıldığında, 0.1g ve 0.2g limitleri için özellikle kısa periyotlu ($T_{0,nom}$ = 2 s) sistemlerde tüm fay hattı mesafelerinde başarısızlık olasılıkları çok yüksektir.
8. En olumsuz durumda (M_w=7, r=3 km, $Q_{s,nom}/W$=%10 ve $T_{0,nom}$ = 2 s) 0.1 g için %90, 1.0 g için %30 başarısızlık olasılıklarına ulaşılmaktadır. Dolayısıyla, M_w = 7.0 büyüklüğünde depremlerin meydana gelme riskinin bulunduğu yakın-fay bölgelerindeki sismik izolasyonlu yapılarda titreşime hassas cihazlar bazında güvenilirliğin düşük olduğu (yani riskin büyük olduğu); bu nedenle yakın-fay bölgelerine hassas cihazları barındırması planlanan sismik izolasyonlu yapıların inşasının uygun olmayabileceği neticesine varılmıştır.
9. Farklı deplasman ve ivme limitlerine göre ulaşılan başarısızlık olasılıkları yukarıda tarif edildiği gibi ayrı ayrı elde edilmiştir. Ancak, gerçekçi bir yapısal sistemde

izolatör deplasmanları yapısal bütünlüğün korunması için belli limitlerin altında kalması gerekirken, aynı zamanda yapının barındırabileceği hassas cihazların maruz kaldığı ivmeler de belirli limit değerleri aşmamalıdır. Bu nedenle, incelenen izolasyonlu binalar için izolatör deplasmanı ve kat ivme limitlerinin eş zamanlı olarak sağlanmasını kriter kabul eden performans testleri yapılmıştır. Buna göre, öncelikle ivme limitlerinin yakın-fay mesafelerinde çok daha belirleyici olduğu ve 0.2g ve altında kalan limitlerin oldukça zor sağlandığı ortaya çıkmıştır. İzolatör deplasman limitlerinin belirleyici olduğu durumlar daha ziyade uzun izolasyon periyoduna sahip yapılar için geçerli olmakta ve sadece 40 cm gibi oldukça düşük limitlerin 0.5 g ve üzeri yüksek ivme limitleri ile birlikte ele alınması söz konusu olduğunda gerçekleşmektedir.

10. Performans testlerine göre, karakteristik kuvvet oranının arttırılması başarısızlık olasılıklarını düşürebildiği gibi -ivme limitinin performans üzerinde belirleyici etkisi olduğu durumlarda- bu olasılıkları arttırabilmektedir. Özellikle düşük ivme limitleri söz konusu olduğunda, yakın-fay mesafesindeki izolasyonlu yapılar için *Q/W* oranlarının (sönümün) arttırılması başarısızlığa bir çare olamamaktadır.

11. Tez çalışması ikinci ana bölüm çalışmaları sonucunda görülmüştür ki; özellikle kritik işleve sahip, titreşime hassas cihazları barındıran sismik izolasyonlu binaların (Örneğin: hastane, üniversite, veri depolama merkezleri gibi) hiçbir değerlendirme yapılmadan her deprem bölgesine uygulanması uygun değildir. Söz konusu binaların bir bölgede inşası için bölgenin depremselliğini de göz önünde bulundurarak, yapısal bütünlüğü ve bu binaların içerisinde bulunma ihtimali olan titreşime hassas cihazlar bazında güvenilirliklerini birlikte değerlendiren performans testleri yapılmalı ve bu testlere göre karar verilmelidir.

KAYNAKLAR

AASHTO, 2010, *Guide specifications for seismic isolation design* (*Third Edition*), American Association of state highway and transportation officials, Washington.

Agrawal, A.K. and He, W.L., 2002, A closed form approximation of near fault ground motion pulses for flexible structures, *15th ASCE proceeding of engineering mechanics conference*, 3 June 2002, Columbia University, New York.

Alavi, B. and Krawinkler H., 2001, *Effect of near-fault ground motions on the response to frame structures* (*Report no: 138*), The John A. Blume earthquake engineering center, Stanford University, Stanford.

Aldemir, Ü. ve Aydın, E., 2005, Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar, *Türkiye mühendislik haberleri*, 435, 81-89.

Alhan, C., 2003, *Performance and reliability of passive and controllable seismic isolation systems*, Thesis (PhD), Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University.

Alhan, C. and Gavin, H.P., 2004a, A parametric study of linear and non-linear passively damped seismic isolation systems for buildings, *Engineering structures*, 26(4), 485-497.

Alhan, C. and Gavin, H.P., 2004b, Parametric analysis of passive damping in base isolation, *16th ASCE engineering mechanics conference*, 16-18 July 2003, USA.

Alhan, C. and Gavin H.P., 2005, Reliability of base isolation for the protection of critical equipment from earthquake hazards, *Engineering structures*, 27, 1435-1449.

Alhan, C. and Göktaş, Y., 2009, Effects of near-field earthqukes on seismically isolated buildings, *WCCE-ECCE-TCCE joint conference: earthquake and tsunami*, 22-24 June, Istanbul, Turkey.

Alhan, C. and Şahin, F., 2011, Protecting vibration-sensitive contents: an investigation of floor accelerations in seismically isolated buildings, *Bulletin of earthquake engineering*, 9, 123-1226.

Alhan, C. and Sürmeli, M., 2011, Shear building representations of seismically isolated buildings, *Bulletin of earthquake engineering*, 9(5), 1643-1671.

Alhan, C. ve Hışman, K., 2011a, Doğrusal sismik izolasyon sistemlerinin performansının yapısal parametrelere duyarlılığı, *Yedinci ulusal deprem mühendisliği konferansı*, 30 Mayıs-3 Haziran 2011, İstanbul, Türkiye.

Alhan, C. ve Hışman, K., 2011b, Doğrusal olmayan sismik izolasyon sistemlerinin performanslarının yapısal parametrelere duyarlılığı, *Türkiye deprem mühendisliği ve sismoloji konferansı*, 11-14 Ekim 2011, Ankara, Türkiye.

Alhan, C. and Gazi, H., 2014, Bringing Probabilistic Analysis Perspective into Structural Engineering Education: Use of Monte Carlo Simulations, *International journal of engineeering education*, 30(5), 1280-1294.

AS5100.4, 2004, *Bridge Design – Part4: Bearings and Deck Joints (Australian Standard)*, Standards Australia, Sydney, Australia.

ASCE, 2006, *ASCE/SEI 7-05: Minimum design loads for buildings and other structures*, American society of civil engineers, USA.

Ateş, Ş., 2012, Seismic behaviour of isolated multi-span continuous bridge to nonstationary random seismic excitation, *Nonlinear dynamics*, 67, 263–282.

Ayyub, B.M. and McCuen R.H., 2011, *Probability, statistics, and reliability for engineers*, CRC Press, New York, ISBN: 978-1-4398-9533-7.

Bakhshi, A. and Mostafavi, S.A., 2014, *Development of fragility curves for base isolated RC structures, proceedings of the 9th ınternational conference on structural dynamics - EURODYN 2014*, 30 June - 2 July 2014, Porto, Portugal, 2947-2953.

BCJ (Building Center of Japan), 2002, *Report on new building technologies – approvals, appraisals and certification* (*Technical report of the Building Center of Japan*), 75-82.

Bentner, J., Bauer, G., Obermair, G.M., Morgenstern, I. and Schneider, J., Optimization of the time-dependent traveling salesman problem with Monte Carlo methods, *Physical review E*, 64(3), Part 2.

Berton, S., Infanti, S., Castellano, M.G. and Hikosaka, H., 2007, Self-centring capacity of seismic isolation systems, *Structural control and health monitoring*, 14, 895-914.

Bhagat, S. and Wijeyewickrema, A.C., 2014, Effect of isolator characteristics on the behavior of base-isolated buildings, *6th Multidisciplinary International Student Workshop (MISW2014)*, 7-8 August 2014, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.

Billard, J., Mayet, F. and Santos, D., 2011, Markov chain Monte Carlo analysis to constrain dark matter properties with directional detection, *Physical review D*, 83(7), Article Number: 075002.

Bolt, B.A., 1973, Duration of strong ground motion, *Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering*, 1304–1313.

Bray, J.D. and Marek, A.R., 2004, Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 24, 815–828.

Brun, R., Buncic, P., Carminati, F., Morsch, A., Rademakers, F. and Safarik K., 2003, Computing in ALICE, *Nuclear instruments and methods in physics research A*, 502, 339–346.

Burtscher, S.L. and Dorfmann, A., 2004, Compression and shear tests of anisotropic high damping rubber bearings, *Engineering structures*, 26, 1979-1991.

Bucher, C., 2009, Probability-based optimal design of friction-based seismic isolation devices, *Structural safety*, 31, 500–507.

Cardone, D., Gesualdi, G. and Nigro, D., 2011, Effects of air temperature on the cyclic behavior of elastomeric seismic isolators, *Bull Earthquake Eng*, 9, 1227–1255.

Cardone, D. and Gesualdi, G., 2012, Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures, *International journal of mechanical sciences*, 64, 127–143.

Castelnuovo, E., 2013, Monetary policy shocks and financial conditions: a monte carlo experiment, *Journal of international money and finance*, 32, 282-303.

Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2004, *Deprem mühendisliğine giriş*, Beta Dağıtım, İstanbul, ISBN 975-95405-2-5.

Chen, G. and Zhao, J., 2010, Application and ımplementation of monte carlo method in mechanical engineering, *Applied mechanics and materials*, 26-28, 925-930, Part 1-2.

Chen, W.F. and Scawthorn, C., 2002, *Earthquake engineering handbook*, CRC Press, USA, ISBN: 0-8493-0068-1.

Chen, Y. and Ahmadi, G., 1992, Stochastic earthquake response of secondary systems in base-isolated structures, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 21(12), 1039-1057.

Chen, J., Liu, W., Peng, Y. and Li, J., 2007, Stochastic seismic response and reliability analysis of base-isolated structures, *Journal of earthquake engineering*, 11, 903–924.

Cheng, F.Y., Jiang, H. and Lou, K., 2008, *Smart structures innovative systems for seismic response control*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, ISBN: 8-0-8493-8532-2.

Christopoulos, C. and Filiatrault, A., 2006, *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS Press, Italy, ISBN: 88-7358-037-8

Cho, D.M. and Retamal, E., 1993, The Los Angeles county emergency operations center on high damping rubber bearings to withstand an earthquake bigger than the big one, *Proc. ATC-17-1 seminar on seismic ısolation passive energy dissipation and active control*, March 1993, San Francisco, CA.

Chopra, A.K., 1995, *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, New Jersey, ISBN: 0-13-855214-2.

Choun, Y.S., Park, J. and Choi, I.K., 2014, Effects of mechanical property variability in lead rubber bearings on the response of seismic isolation system for different ground motions, *Nuclear engineering and technology*, 46(5), 605-618.

Chu, S.Y., Soong, T.T. and Reinhorn, A.M., 2002, Real-time active control verification via a structural simulator, *Engineering structures*, 24(3), 343-353.

Clark, P.W, Higashino, M. and Kelly, J.M., 1994, Performance of seismically isolated structures in the January 17 1994 Northridge earthquake, *Proceedings of the sixth US–Japan workshop on the ımprovement of building structural design and construction practices in the United States and Japan*, *ATC-15-5*, WITPress, Canada.

Constantinou, M.C., Papageorgiou A. 1990, Stochastic response of practical sliding isolation systems, *Probabilistic engineering mechanics*, 5(1), 27–34.

Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kasalanati, A., and Wolf, E.D., 1999, *Property modification factors for seismic isolation bearings* (*Technical report MCEER-99-0012*), New York.

Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y., Fenz, D.M. and Warn, G.P., 2007, *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading Technical Report MCEER-07-0012*, The State University of New York, Buffalo.

Cox, K.E. and Ashford, S.A., 2002, *Characterization of large velocity pulses for laboratory testing* (*PEER Report 2002/22*), Pacific earthquake engineering research center, University of California, Berkeley.

Curadelli, O., 2013, Equivalent linear stochastic seismic analysis of cylindrical base isolated liquid storage tanks, *Journal of constructional steel research*, 83, 166–176.

CSI, 2011, *SAP2000: Structural analysis program, static and dynamic finite element analysis of structures - V15.1*, Computers and Structures Inc., USA.

Dall'asta, A. and Ragni, L., 2008, Dynamic systems with high damping rubber: Nonlinear behavior and linear approximation, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 37, 1511-1526.

Datta, T.K., 2010, *Seismic analysis of structures*, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., Singapore, ISBN: 978-0-470-82461-0.

De Grandis, S. Domaneschi, M. and Perrotti, F., 2009, A numerical procedure for computing the fragility of NPP components under random seismic excitation, *Nuclear engineering and design*, 239 (11), 2491-2499.

De La Llera, J.C. and Inaudi, J.A., 1994, Analysis of Base-Isolated Buildings Considering Stiffness Uncertainty in the Isolation System, *Fifth national conference on earthquake engineering*, 1994, Chicago, Illionis, Earthquake Engineering Research Institute, 623-632.

Dezfuli, F.H. and Alam, M.S., 2014, Performance-based assessment and design of FRP-based high damping rubber bearing incorporated with shape memory alloy wires, *Engineering structures*, 61, 166-183.

Diani, J., Fayolle, B. and Gilormini, P., 2009, A review on the Mullins effect, *European polymer journal*, 45, 601–612.

Dicleli, M., 2006, Performance of seismic-isolated bridges in relation to near-fault ground-motion and isolator characteristics, *Earthquake spectra*, 22(4), 887–907.

Dicleli, M. and Buddaram, S., 2006a, Effect of isolator and ground motion characteristics on the performance of seismic-isolated bridges, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 35, 233-250.

Dicleli, M. and Buddaram, S., 2006b, Improved effective damping equation for equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges, *Earthquake spectra*, 22, 29-46.

Dicleli, M. and Buddaram, S., 2007a, Equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges subjected to near-fault ground motions with forward rupture directivity effect*, Engineering structures*, 29, 21-32.

Dicleli, M. and Buddaram, S., 2007b, Comprehensive evaluation of equivalent linear analysis method for seismic-isolated structures represented by sdof systems, *Engineering structures*, 29, 1653-1663.

Dorfman, A. and Ogden, R.W., 2004, A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber, *International journal of solids and structures*, 41, 1855–1878.

Edholm, O. and Nagle, J.F., 2005, Areas of molecules in membranes consisting of mixtures, *Biophysical journal*, 89(3), 1827-1832.

Erdik, M. and Durukal, E., 2000, Assessment of design basis earthquake ground motions for near-fault conditions, *12th world conference on earthquake engineering* (*12WCEE*), 30 Jan - 04 Feb 2000, Auckland, New Zealand.

Fan, F.G. and Ahmadi, G., 1990, Random response analysis of frictional base isolation system, *Journal of engineering mechanics*, 116(9), 1881–1901.

Fan, F.G., Ahmadi, G., Mostaghel, N. and Tadjbakhsh, I.G., 1991, Performance analysis of aseismic base isolation systems for a multi-story building, *Soil dynamics and earthquake engineering,* 10(3), 152-171.

Fan, F.G. and Ahmadi, G., 1992, Seismic responses of secondary systems in base-isolated structures, *Engineering structures*, 14(1), 35-48.

FEMA 273, 1997, *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Applied Technology Council (ATC-33 Project), Redwood City, California.

FEMA 274, 1997, *NEHRP Commetary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Applied Technology Council (ATC-33 Project), Redwood City, California.

Franchin, P., Monti, G. and Pinto, P.E., 2001, On the accuracy of simplified methods for the analysis of isolated bridges, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 30, 363-382.

Fuller, K.N.G., Gough, J. and Thomas, A.G., 2004, The effect of low temperature crystallization on the mechanical behaviour of rubber, *Journal of Polymer Science*, 42(11), 2181–2190.

Gavin, H. and Alhan, C., 2003, Parametric analysis of passive damping in base isolation, *16th ASCE engineering mechanics conference*, 16-18 July 2003, USA.

Gazi, H. ve Alhan, C., 2013, Sismik İzolasyon sistemi parametrelerindeki rastgele değişimlerin etkisinin monte carlo simülasyon metoduyla incelenmesi, *2. Türkiye deprem mühendisliği ve sismoloji konferansı (2.TDMSK)* , 25-27 Eylül 2013, Hatay, Türkiye.

Gazi, H., Öncü Davas, S. and Alhan, C., 2013, Comparison of ground motion pulse models for the drift response of seismically isolated buildings, *3rd annual international conference on civil engineering*, 10-13 June 2013, Greece, http://www.atiner.gr/papers/CIV2013-0745.pdf.

Gibson, N., Filiatrault, A. and Ashford, S.A., 2002, *Performance of beam to column bridge joints subjected to a large velocity pulse* (*PEER Report 2002/24*), Pacific earthquake engineering research center, University of California, Berkeley.

Grinstead, C.M. and Snell, J.L., 2010, *Introduction to probability*, http://www.dartmouth.edu/~chance/teaching_aids/books_articles/probability_book/pdf.html, [Ziyaret Tarihi: Aralık 2011].

Haldar, A. and Mahadevan, S., 2000, *Probability reliability and statistical methods in engineering design*, John Wiley & Sons, Danvers MA, ISBN 0-471-33119-8.

Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J, 1995, Near-source ground motion and its effects on flexible buildings, *Earthquake spectra*, 11, 569-605.

Hall, J.F., 1999, Discussion: the role of damping in seismic isolation, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 28, 1717-1720.

Hall, J.F. and Ryan, K.L., 2000, Isolated buildings and the 1997 UBC near-source factors, *Earthquake spectra*, 16(2), 393-411.

Hamaguchi, H., Samejima, Y. and Kani, N., A study of aging effect on rubber bearings after about twenty years in use, *Proc. 11th world conference on seismic ısolation, energy dissipation and active vibration control of structures*, 17-21 November 2009, Guangzhou, China.

Hameed, A., Koo, M.S., Do, T.D. and Jeong, J.H., 2008, Effect of lead rubber bearing characteristics on the response of seismic-isolated bridges, *KSCE journal of civil engineering*, 12(3), 187-196.

Haque, N., Zisan, B. and Bhuiyan, A.R., 2013, Seismic response analysis of base isolated building: effect of lead rubber bearing characteristics, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 25(2), 154-167.

Hasgür, Z. ve Umut, Ö., 2007, Yakın fay hareketli depremlerin yapılar üzerindeki etkisi ve temel ayırıcılı–sıvı sönümleyicilerin bu yapılardaki etkinliği, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, 305-316.

He, W.L. and Agrawal, A.K., 2008, An analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of smart protective systems, *ASCE journal of structural engineering*, 134 (7), 1177-1188.

Heaton, T.H., Hall, J.F., Wald, D.J. and Halling, M.W., 1995, Response of high-rise and base-ısolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, *Science*, New Series, 267(5195), 206-211.

Hışman, K., 2011, *Sismik izolasyon platformalarının performanslarının sismik izolatörlern mekanik özelliklerindeki küçük sapmalara olan duyarlılığı*, Tez (Yüksek Lisans), İnşaat mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.

Hirata, K., Shiojiri, H., Mazda, T. and Kontani, O., 1989, Response variability of isolated structure due to randomness of isolation devices. *ICOSSAR 89, Proceedings of the 5th international conference on structural safety and reliability*, San Francisco.

Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer Jr., B.F. and Yao, T.P., 1997, Structural control: past, present, and future, *Jornal of engineering mechanics*, 123(9), 897-971.

Hwang, J.S. and Sheng, L.H., 1993, Effective stiffness and equivalent damping of base-isolated bridges, *Journal of structural engineering*, 119, 3094-3101.

Hwang, J.S. and Chiou, J.M., 1996, An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings", *Engineering structures*, 18, 528-536.

Hwang, J.S., 1996, Evaluation of equivalent linear analysis methods of bridge isolation, *Journal of structural engineering*, 122:972-6.

Hsu, H.P., 1996, *Schaum's outline of theory and problems of probability, tandom variables and random process*, McGraw-Hill, USA, ISBN: 0-07-030644-3.

Ismail, M., Rodellar J. and Ikhouane F., 2009, An innovative isolation bearing for motion-sensitive equipment, *Journal of sound and vibration*, 326, 503–521.

Jacob, C., Sepahvand, K., Matsagar, V.A. and Marburg, S., 2013, Stochastic seismic response of base-isolated buildings, *International journal of applied mechanics*, 5(1), 1350006 (21 pages).

Jangid, R.S. and Datta, T.K., 1992, Seismic behaviour of torsionally coupled base isolated structure, *European earthquake engineering*, 6 (3), 3-13.

Jangid, R.S. and Datta, T.K., 1995a, The stochastic response of asymmetric base isolated buildings, *Journal of sound and vibration*, 179(3), 463–473.

Jangid, R.S. and Datta, T.K., 1995b, Performance of base-isolation systems for asymmetric building subject to random-excitation, *Engineering structures*, 17 (6), 443-454.

Jangid, R.S., 2000, Optimum frictional elements in sliding isolation systems, *Computers and structures*, 76, 651-661

Jangid, R.S. and Kelly, J.M., 2001, Base isolation for near-fault motions, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 30, 691-707.

Jangid, R.S., 2007, Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions, *Engineering structures*, 29, 2503-2513.

Jangid, R.S., 2008, Equivalent linear stochastic seismic response of isolated bridges, *Journal of sound and vibration*, 309, 805-822.

Jangid, R. S., 2010, Stochastic response of building frames isolated by lead-rubber bearings, *Structural control health monitoring*, 17(1), 1–22.

Jara, M. and Casas, J.R., 2006, A direct displacement-based method for the seismic design of bridges on bi-linear isolation devices, *Engineering structures*, 28, 869-879.

Jara, M., Jara, J.M., Olmos, B.A. and Casas J.R., 2012, Improved procedure for equivalent linearization of bridges supported on hysteretic isolators, *Engineering structures*, 35, 99-106.

Jia, G., Gidaris, I., Taflanidis, A.A. and Mavroeidis, G.P., 2014, Reliability-based assessment/design of floor isolation systems, *Engineering structures*, 78, 41–56.

Kalkan, E. and Kunnath, S. K., 2006, Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, *Earthquake spectra*, 22(2), 367‑390.

Karalar, M., Padgett, J.E. and Dicleli, M., 2012, Parametric analysis of optimum isolator properties for bridges susceptible to near-fault ground motions, *Engineering structures*, 40, 276–287.

Karim, K.R. and Yamazaki, F., 2007, Effect of isolation on fragility curves of highway bridges based on simplified approach, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 27, 414–426.

Kastner, M., 2010, Monte Carlo methods in statistical physics: Mathematical foundations and strategies, *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, 15(6), 1589-1602.

Kato M., Watanabe Y., Yoneda G., Tanimoto E., Hirotani T., Shirahama K., Fukushima Y., and Murazumi Y., investigation of aging effects for laminated rubber bearings of Pelham Bridge, *Proc. 11th World Conference on Earthquake Engineering*, 23-28 June 1996, Acapulco, Mexico.

Kazeminezhad, M., Taheri, A.K. and Tieu, A.K., 2007, Utilization of the finite element and Monte Carlo model for simulating the recrystallization of inhomogeneous deformation of copper, *Computational materials science*, 38(4), 765-773.

Kelly, J., 1999, The role of damping in seismic isolation, *Earthquake engineering and structural dynamics,* 28:3-20.

Kelly, T.E., 2001, *Base isolation of structures*, Holmes Consulting Group Ltd., Wellington, New Zealand.

Kim, Y.S. and Yun, C.B., 2007, Seismic response characteristics of bridges using double concave friction pendulum bearings with tri-linear behavior, *Engineering structures*, 29, 3082–3093.

Kim, D., Oh, J., Do, J. and Park, J., 2014, Effects of thermal aging on mechanical properties of laminated and natural tubber bearing, *Earthquakes and structures*, 6(2), 127-140.

Komodromos, P., 2000, *Seismic isolation for earthquake-resistant structures*, WIT Press, ISBN: 1-85312-803-1.

Krawinkler H. and Alavi, B., 1998, Development of improved design prodecures for near-fault ground motions, *SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*, 15 September 1998, Oakland, CA.

Kulak, R.F., Coveney, V.A., and Jamil, S. 1998, Recovery characteristics of high-damping elastomers used in seismic isolation bearings, *1998 ASME/JSME Joint Pressure Vessel and Piping Conference*, 26-30 July 1998, San Diego, CA (USA).

Kumar, M., Whittaker, A.S. and Constantinou, M.C., An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 43, 1955–1974.

Kwag, S. and Ok, S.Y., 2013, Robust design of seismic isolation system using constrained multi-objective optimization technique, *KSCE journal of civil engineering*, 17(5), 1051-1063.

Landau, D.P. and Binder, K., *A guide to monte carlo simulations in statistical physics*, 2nd ed., Cambridge University press, USA, ISBN: 978-0-511-13098-4.

Lee, G.C., Ou, Y.C., Song, J., Niu, T. And Liang Z., 2008, A roller seismic isolation bearing for highway bridges, *The 14th world conference on earthquake engineering*, 12-17 October 2008, Beijing, China.

Luca, S.G., Chira, F. And Roşca, V.O., 2005, Passive active and semi-active control systems in civil engineering, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy* (Constructions, Architecture Section), 3-4, 23-31.

Ma, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Tan, P. and Zhou, F., 2011, Stochastic seismic response analysis of base-isolated high-rise buildings, *Procedia engineering*, 14, 2468–2474.

Ma, C.F., Zhang, Y.H., Tan, P., Kennedy, D., Williams, F.W. and Zhou, F.I., 2013, Non-stationary seismic response analysis of base-isolated buildings with many hysteretic devices, *Computers and structures*, 123, 39–47.

Ma, C.F., Zhang, Y.H., Tan P. and Zhou, F.L., 2014, Seismic response of base-isolated high-rise buildings under fully nonstationary excitation, *Shock and vibration*, Article id 401469, 11 pages.

Makris, N., 1997, Rigidity, plasticity, viscocity: can electrorheological dampers protect base isolated structures from near source ground motions?, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 26, 571-591.

Makris, N. and Chang, S., 1998, *Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures* (*PEER Report 1998/06*), Pacific earthquake engineering research center, University of California, Berkeley.

Makris, N. and Chang, S., 2000a, Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 29, 85-107.

Makris, N. and Chang, S., 2000b, Response of damped oscillators to cycloidal pulses, *Journal of engıneering mechanics*, 126(2), 123-131.

Malhotra, P.K., 1999, Response of buildings to near-field pulse-like ground motions, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 28, 1309-1326.

Manolis, G.D., Juhn, G., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M., 1990, *Secondary Systems in Base-Isolated Structures: Experimental Investigation, Stochastic Response and Stochastic Sensitivity (Technical Report NCEER-90-0013)*, National center for earthquake engineering research, State University of Newyork, Buffalo.

Mathworks, 2009, *MATLAB: The Language of Technical Computing, Version 7.8.0* (*R2009a*), The Math Works Inc., USA.

Matsagar, V.A. and Jangid, R.S., 2003, Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures, *Engineering structures*, 25, 1311–1323.

Matsagar, V.A. and Jangid, R.S., 2004, Influence of isolator characteristic on the response of base-isolated structures, *Engineering structures*, 26, 1735-1749.

Matsagar, V.A. and Jangid, R.S., 2005, Base-isolated building with asymmetries due to the isolator parameters, *Advances in structural engineering*, 8, 603-621.

Matsagar, V.A. and Jangid, R.S., 2006, Seismic response of simply supported base-isolated bridge with different isolators, *International journal of applied science and engineering*, 4(1), 53-69.

Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S., 2003, A mathematical represantation of near-fault ground motions, *Bulletin of the seismological society of America*, 93(3), 1099-1131.

Mazza, F. and Vulcano, A., 2009, Nonlinear response of RC framed buildings with isolation and supplemental damping at the base subjected to near-fault earthquakes, *Journal of earthquake engineering*, 13, 690-715.

Mazza, F. Vulcano, A. and Mazza, M., 2012, Nonlinear dynamic response of RC buildings with different base isolation systems subjected to horizontal and vertical components of near-fault ground motions, *The open construction and building technology journal*, 6, 373-383.

McCool, J.I., 2012, *Using the weibull distribution: reliability, modeling, and inference*, John wiley & sons inc., New Jersey, ISBN: 978-1-118-21798-6.

Menun, C. and Fu, Q., 2002, An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems, *Proceedings of the 7th U.S. national conference on earthquake engineering*, 21-25 July 2002, Boston, Massachusetts.

Mishra, S.K., Roy, B.K. and Chakraborty, S., 2013, Reliability-based-design-optimization of base isolated buildings considering stochastic system parameters subjected to random earthquakes, *International journal of mechanical sciences*, 75, 123–133.

Mishra, S.K. and Chakraborty S., 2013, Performance of a base-isolated building with system parameter uncertainty subjected to a stochastic earthquake, *International journal of acoustics and vibration*, 18(1), 7-19.

Mizuno, H., Iiba, M. and Yamaguchi, N., 1986, Earthquake resistance of medical equipments with casters, *Proceedings of the 7th Japanese earthquake enigineering symposium,* Tokyo, Japan, 1837-1842.

Moore, D.S., McCabe, G.P., Alwan, L.C., Craig, B.A. and Duckworth, W.M., 2011, *The practice of statistics for business and economics*, W.H. Freeman company, New York, ISBN: 978-1-4292-3281-4.

Morgan, T., Whittaker, A.S. and Thompson, A.C., 2001, Cyclic behavior of high-damping rubber bearings, *Fifth world congress on joints, bearings and seismic systems for concrete structures*, October 2011, Rome, Italy.

Murota, N., Goda, K., Suzuki, S., Sudo, C. and Suizu, Y., 1994, *Recovery characteristics of dynamic properties of high damping rubber bearings (Report No. NCEER-94-0009)*, National center for earthquake engineering research, Buffalo, NY.

Naeim, F. and Kelly, J.M., 1999, *Design of seismic isolated structures from theory to practice*, Wiley, New York, ISBN: 0-471-14921-7.

Nagai, T. and Nishitani, A., 2005, Equivalent linearization approach to probabilistic response evaluation for base isolated buildings, *Proceedings of the 9th international conference on structural safety and reliability ICOSSAR'05*, June 19–23, Rome, Italy, pp.2991–2296.

Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and Constantinou, M.C., 1989, *Nonlinear dynamic analysis of three-dimensional base isolated structures (3D-BASIS) Technical Report NCEER-89-0019*, National center for earthquake engineering research, State University of New York, Buffalo.

Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and Contantinou, M.C., 1991a, *3D-BASIS: A general program for the nonlinear dynamic analysis of three dimensional base isolated buildings*, National center for earthquake engineering research, State University of New York, Buffalo.

Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and Constantinou, M.C., 1991b, *Nonlinear dynamic analysis of three-dimensional base isolated structures - Part II., Technical Report*

NCEER-91-0005, National center for earthquake engineering research, State University of New York, Buffalo.

Nagarajaiah, S., Li, C., Reinhorn, A.M. and Constantinou, M.C., 1993, *3D-BASIS-TABS, Computer program for nonlinear dynamic analysis of three dimensional base isolated structures, Technical Report NCEER-93-0011*, National center for earthquake engineering research, State University of New York, Buffalo.

Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and Constantinou, M.C., 1993, Torsional coupling in sliding base-isolated structures, *Journal of structural engineering*, 1129(1), 130-149.

Nagarajaiah, S. and Ferrell, K., 1999, Stability of elastomeric seismic isolation bearings, *Journal of structural engineering*, 125(9), 946–954.

Nagarajaiah, S. and Xiaohong, S., 2000, Response of base-isolated USC hospital building in Northridge earthquake, *Journal of structural engineering*, 126, 1177-1186.

Nakazawa, M., Nagano, T., Kato, A., Kobatake, M., and Ohta, K., 1991, Study on the seismic base isolation of LWR plants (durability of laminated rubber bearings), *Transactions, 11th ınternational conference on structural mechanics in reactor technology*, Atomic energy society of Japan, Tokyo, Japan.

Newman, M.E.J. and Barkema, G.T., 2001, *Monte carlo methods in statistical physics*, Oxford University press, USA, ISBN: 0 19 851797 1.

Niederreiter, H., 1992, *Random number generation and quasi-monte carlo methods*, Society for industrial and applied mathematics, Pennsylvania, ISBN: 0-89871-295-5.

Nowak, A.S. and Collins K.R., 2000, *Reliability of structures*, Mc Graw-Hill companies inc., Boston, ISBN 0-07-048163-6.

O'Connor, A.N., 2011, *Probability distributions used in reliability engineering*, University of Maryland, Maryland USA, ISBN: 978-1-933904-07-8.

Okamura, S. and Fujita, S., Motion analysis of pendulum type isolation systems during earthquakes (probabilistic study of isolation performance of base isolated structure considering characteristic dispersion of pendulum type isolation systems), 2007, *Journal of pressure vessel technology-transactions of the asm*, 129(3), 507-515.

Ordonez, D., Foti, D. and Bozzo, L., 2003, Comparative study of the inelastic base isolated buildings, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 32, 151-164.

Orozco, G.L. and Ashford, S.A., 2002, *Effects of large velocity pulses on reinforced concrete bridge columns* (*PEER Report 2002/23*), Pacific earthquake engineering research center, University of California, Berkeley.

Öncü, S., 2011, *Puls periyotlarının sismik izolasyonlu binaların performansına etkisi*, Tez (Yüksek Lisans), İnşaat mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.

Öncü, S. and Alhan, C., 2012, Effectiveness of seismic isolation in protecting sensitive contents against nearfault earthquakes of various magnitudes, *10th International congress on advances in civil engineering (ACE2012)*, 17-19 Ekim 2012, Türkiye.

Öncü Davas S., Alhan C., 2013, Sentetik deprem puls sönüm oranlarının sismik izolasyonlu binaların davranışına etkisi, *2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 25-27 Eylül 2013, Hatay, Türkiye.

Öncü Davas, S., Gazi, H. and Alhan, C., 2013, Comparison of ground motion pulse models for the acceleration response of seismically isolated buildings, *3rd annual international conference on civil engineering*, 10-13 June 2013, Greece, http://www.atiner.gr/papers/CIV2013-0744.pdf.

Özdemir, G. and Akyüz, U., Dynamic analyses of isolated structures under bi-directional excitations of near-field ground motions, *Shock and vibration*, 19, 505–513.

Özgür, M., 2010, *Doğrusal ve doğrusal olmayan izolasyon sistemlerinin sismik performanslarının karşılaştırılması*, Tez (Yüksek Lisans), İnşaat mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.

Pagnini, L.C. and Solari, G., 1999, Stochastic analysis of the linear equivalent response of bridge piers with aseismic devices, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 28(5), 543–60.

Pan, T.C. and Cui, W., 1994, Dynamic characteristics of shear buildings on laminated rubber bearings, *Earthquake engineering & structural dynamics,* 23(12), 1315-1329.

Pan, P., Zamfirescu, D., Nakashima, M., Nakayasu, N. and Kashiwa, H., 2005, Base-isolation design practice in Japan: introduction to the post-Kobe approach, *Journal of earthquake engineering*, 9, 147–171.

Paramashanti, Kitane, Y., Itoh, Y., Kito, S. and Muratani, K., 2011, Experimental investigation of aging effect on damping ratio of high damping rubber bearing, *Journal of structural engineering*, 57A, 769-779.

Park, K.S., Jung H.J. and Lee, I.W., 2002, A comparative study on aseismic performances of base isolation systems for multi-span continuous bridge, *Engineering structures*, 24, 1001–1013.

Perros, H., 2009, *Computer simulation techniques: the definitive introduction!*, NC State University, Raleigh, NC.

PEER, 2011, *Pacific earthquake engineering resource center: NGA database*, http://ngawest2.berkeley.edu/, [Ziyaret Tarihi: Ocak 2011].

Pengelly, J., 2002, *Monte Carlo methods*, http://cash6.org/download/1677, [Ziyaret Tarihi: Ocak 2011].

Perrotti, F.; Domaneschi, M. and De Grandis, S., 2013, The numerical computation of seismic fragility of base-isolated nuclear power plants buildings, *Nuclear engineering and design*, 262, 189-200.

Pinarbasi, S., Akyuz, U. and Ozdemir, G., 2007, An experimental study on low temperature behavior of elastomeric bridge bearings, *10th world conference on seismic isolation energy dissipation and active vibrations control of structures*, 28-31 May 2007, Istanbul, Turkey.

Pinto, P.E. and Vanzi, I., 1992, Base-isolation: reliability for different design creteria, *Earthquake engineering tenth world conference*, 1992, Rotterdam, 2033-2038.

Pirrotta, A. and Ibrahim, R.A., 1997, Experimental investigation of friction base isolation, *Probabilistic engineering mechanics*,12(3), 125–136.

Politopoulos, I. and Sollogoub, P., 2005, Vulnerability of elastomeric bearing isolaed buildings and their equipment, Journal of earthqukae engineering, 9(4), 525-546.

Politopoulos, I. and Pham, H.K., 2009, Sensitivity of Seismically Isolated Structures, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 38, 989–1007.

Pradlwarter H.J., Shueller, G.I. and Dorka, U., 1998, Reliability of mdof-systems with hysteretic devices, *Engineering structures*, 20(8), 685–691.

Providakis, C.P., 2008, Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations, *Engineering structures*, 30, 1187-1198.

Providakis, C.P., 2009, Effect of supplemental damping on LRB and FPS seismic isolators under near-fault ground motion. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 29, 80-90.

Ramberg, W. and Osgood, W.R., 1943, *Description of stress-strain curves by three parameters - Technical note no: 902*, National advisory committee for aeronautics, Washington, 1–13.

Ray, T., Sarlis, A.A., Reinhorn, A.M. and Constantinou, M.C., 2013, Hysteretic models for sliding bearings with varying frictional force, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 42, 2341–2360.

Reinhorn, A.M., Contantinou, M.C. and Nagarajaiah, S., 2010, *3D-BASIS: computer program series for nonlinear dynamic analysis of three-dimensional base isolated structures* (*Research accomplisments*),http://civil.eng.buffalo.edu/3dbasis/features.aspx, [Ziyaret tarihi: Kasım, 2010].

Rinne, H., 2009, *The weibull distribution: a handbook*, CRC Press, USA, ISBN: 978-1-4200-8743-7.

Rodriguez-Marek, A., 2000, *Near-fault seismic site response*, Thesis (PhD), University of California, Berkeley.

Roeder, C.W., Stanton, J.F. and Feller, T., 1990, Low-temperature performance of elastomeric bearings, *Journal of Cold Regions Engineering*, 4(3), 113–132.

Roy, B.K. and Chakraborty, S., 2013, Optimal design of base isolation system considering uncertain bounded system parameters, *Structural engineering and mechanics*, 46(1), 19-37.

Roy, B.K., Chakraborty, S. and Mishra, S.K., 2014, Robust optimum design of base isolation system in seismic vibration control of structures under uncertain bounded system parameters, *Journal of vibration and control*, 20(5), 786–800.

Rubinstein, R.Y., 1981, *Simulation and the monte carlo method*, John Wiley & Sons Inc., USA, 0-471-08917-6.

Rubinstein, R.Y. and Kroese, D.P., 2008, *Simulation and the monte carlo method,* 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., USA, ISBN: 978-0-470-1 7794-5.

Russo, G., Pauletta, M., Cortesia, 2013, A., A study on experimental shear behavior of fiber-reinforced elastomeric isolators with various fiber layouts, elastomers and aging conditions, *Engineering structures*, 52, 422–433.

Sayani, P. and Ryan, K., 2009, Evaluation of approaches to characterize seismic isolation systems for design, *Journal of earthquake engineering*, 13, 835-851.

SCDEC (South California Earthquake Data Center), 2015, *Significant Earthquakes and Faults*, http://scedc.caltech.edu/significant/sanfernando1971.html, [Ziyaret Tarihi: 24 Nisan 2015.

Saha, S.K., Sepahvand, K., Matsagar, V.A., Jain, A.K. and Marburg, S., 2013, Stochastic analysis of base-isolated liquid storage tanks with uncertain isolator parameters under random excitation, *Engineering structures*, 57, 465–474.

Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., Elgawady, M. and Cofer, W.F., 2011, Efeect of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures., *Engineering structures*, 33, 767-779.

Sharma, A. and Jangid, R.S. (2011), Influence of high initial isolator stiffness on the seismic response of a base-isolated benchmark building, *International journal of structural stability and dynamics*, 11(06), 1201-1128.

Shenton III, H.W. and Holloway, E.S., 2000, Effect of stiffness variability on the response of isolated structures, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 29, 19-36.

Shimoda I., Masayoshi I., Mochimaru M., Miyazaki M., Sakuraba S., Masuda K. and Wake T., 2004, Survey of Aging for LRB of a BaseIsolated Building Completed 15 Years Ago, *ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference*, 25–29 July 2004, San Diego, California, USA.

Simo, J.C. and Kelly, J.M., 1984, The analysis of multilayer elastomeric bearings, *Journal of applied mechanics*, 51(2), 256-262.

Skinner, R.I., Robinson, W.H. and McVerry G.H., 1993, *An introduction to seismic isolation*, John Wiley & Sons Ltd., England, ISBN: 0 471 93433 X.

Someville, P., 1997, Engineering characteristics of near fault ground motion, *SMIP97 Seminar on utilizarion of strong-motion data*, 8 May 1997, Los Angeles, California.

Sommerville, P.G., 1998, Development of an improved representation of near-fault ground motions, *SMIP98 proceedings, seminar on utilization of strong-motion data*, 15 September 1998, Oakland, CA, 1-20.

Somerville, P., 2000, Characterization of near field ground motions, *U.S.-Japan Workshop: Effects of Near-Field Earthquake Shaking*, 20-21 March 2000, San Francisco.

Somerville, P.G., 2002, Characterizing near fault ground motion for the design and evaluation of bridges, *Third national conference and workshop on bridges and highways*, 29 April-1 May 2002, Portland, Oregon.

Somerville, P., 2003, Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, *Physics of the earth and planetary interiors*, 137, 201–212.

Somerville, P., 2005, Engineering characterization of near fault ground motions, *Planning and Engineering for Performance in Earthquakes* (*2005 NZSEE*), 11-13 March 2005, New Zealand.

Spanos, P.D. and Evangelatos, G.I., 2010, Response of a non-linear system with restoring forces governed by fractional derivatives-time domain simulation and statistical linearization solution, *Soıl dynamıcs and earthquake engıneerıng*, 30(9), 811-821.

Spencer Jr., B.F. and Soong, T.T., 1999, New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the usa, *Proceedings of international post-smirt conference seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibration of structures*, 23-25 August 1999 Cheju Korea.

Spencer Jr., B.F. and S. Nagarajaiah, 2003, State of the art of structural control, *Journal of structural engineering*, 129, 845-856.

Stewart, P.J., Chiou, S., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A., 2001, *Ground motion evaluation procedures for performance-based design*

(*PEER Report 2001/09*), Pacific earthquake engineering research center, University of California, Berkeley.

Stirzaker, D., 1999, *Probability and random variables*, Cambridge University press, USA, ISBN: 0 511 02258 1.

Su, L. and Ahmadi, G., 1988, Response of frictional base isolation systems to horizontal–vertical random earthquake excitations. *Probabilistic engineering mechanics*, 3(1), 12–21.

Su, L., Ahmadi, G. and Tadjbakhsh, I., 1989, A comparative study of performances of various base isolation systems part I: shear beam structures. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 18(1), 11-32.

Su, L., Ahmadi, G. and Tadjbakhsh, I., 1990a, A comparative study of performances of various base isolation systems part II: sensitivity analysis. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 19, 21-33.

Su, L., Ahmadi, G. and Tadjbakhsh, I.G., 1990b, Responses of base-isolated shear beam structures to random excitations, *Probabilistic engineering mechanics*, 5(1), 35–46.

Symans, M.D. and Constantinou, M.C., 1999, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, *Engineering structures*, 21, 469-487.

Şafak, E. and Kaya, Y., 2008, Sensitivity of base-isolated systems to ground motion characteristics: a stochastic approach, *Conference on Seismic Engineering Conference*, 08-11 July 2008, Calabria, Italy.

Tan, R.Y. and Huang, M.C., 2000, System identification of a bridge with lead-rubber bearings, *Computers and structures*, 74, 267-280.

Tena-Colunga, A. and Gomez-Soberon, L., 2002, Torsional response of base-isolated structures due to asymmetries in the superstructure, *Engineering structures*, 24, 1587-1599.

Tena-Colunga, A. and Zambrana-Rojas, C., 2006, Dynamic torsional amplifications of base-isolated structures with an eccentric isolation system, *Engineering structures*, 28, 72–83.

Tena-Colunga, A. and Escamilla-Cruz, J.L., 2007, Torsional amplifications in asymmetric base-isolated structures, *Engineering structures*, 29, 237–247.

Tezcan, S. and Cimilli, S., 2002, Seismic base isolation, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları, Bebek, İstanbul, Yayın No: KT 004 / 02.

Thompson, A.C., Whittaker, A.S., Fenves, G.L. and Mahin, S.A., 2000, Property modification factors for elastomeric seismic base isolation bearings, *12th world conference on earthquake engineering* (*12WCEE*), Auckland, New Zealand.

Tsai, C.S., Chiang, T.C., Chen, B.J. and Lin, S.B., 2003, An advanced analytical model for high damping rubber bearings, *Earthqukae enigineering and structural dynamics*, 32, 1373-1387.

Tsopelas, P.C., Nagarajaiah, S., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M., 1991, *3D-BASIS-M: Nonlinear dynamic analysis of multiple building base isolated structures, Technical Report NCEER-91-0014*, National center for earthquake engineering research, State University of New York, Buffalo.

Tsopelas, P.C., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M., 1994, *3D-BASIS-ME: Computer program for nonlinear dynamic analysis of seismically isolated single and multiple structures and liquid storage tanks, Technical Report NCEER-94-0010*, National center for earthquake engineering research, State University of New York, Buffalo.

Tsopelas , P.C., Rousis, P.C., Constantinou, M.C., Buchanan, R. and Reinhorn, A.M., 2005, *3D-BASIS-ME-MB: computer program for nonlinear dynamic analysis of seismically ısolated structures, Technical Report MCEER-05-0009*, National center for earthquake engineering research, State University of New York, Buffalo.

UBC, 1997, *Uniform building code, Volume 2: Structural engineering provisions*, International Conference of Building Officials, Whittier, California.

USGS, 2015, Effects *of Fling-Step and Forward Directivity on the Seismic Response of Buildings* (*Downloadable Twenty-five Processed Fling, Forward Directivity and Far-Fault Records*), http://nsmp.wr.usgs.gov/ekalkan/Fling/index.html, [Ziyaret tarihi: Mart, 2015].

Vargas J.P., Koppe J.C., Pérez S., 2014, Monte Carlo simulation as a tool for tunneling planning, *Tunnelling and underground space technology*, 40, 203-209.

Yakut,A. and Yura, J.A., 2002, Parameters influencing performance of elastomeric bearings at low temperature, *Journal of Structural Engineering*, 128(8), 986–994.

Yamada, K. and Kobori T., 2001, Fundamental dynamics and control strategies for aseismic structural control, *International Jornal of solids and structures*, 38, 6079-6121.

Yoo, B. and Kim, Y.H., 2002, Study on effects of damping in laminated rubber bearings on seismic responses for a ⅛ scale isolated test structure, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(10), 1777-1792.

Wang, Z., Wang, Y., Ma, M. and Wu, J., 2013, Efficient localization for mobile sensor networks based on constraint rules optimized monte carlo method, *Computer networks*, 57(14), 2788-2801.

Wen, Y.K., 1976, Method for random vibration of hysteretic systems, *Journal of the engineering mechanics division* (*ASCE*), 102, 249–263.

Warn, G. And Whittaker, A.S., 2006, Property modification factors for seismically isolated bridges, *Bridge engineering* (ASCE), 11(3), 371-377.

Warn, G.P. and Ryan, K.L., 2012, A review of seismic ısolation for buildings: historical development and research needs, *Buildings*, 2, 300-325.

Wilson E.L., Hollings, J.P. and Dovey, H.H., 1975, *ETABS – three dimensonal analysis of building systems, Report No: UCB/EERC – 75/13*, Earthquake engineering research center, University of California, Berkeley, California.

Wolff, E.D. and Constantiou, M.C., 2004, *Experimental study of seismic isolation systems with emphasis on secondary system response and verification of accuracy of dynamic response history analysis methods Technical Report MCEER-04-0001*, State University of New York, Buffalo.

Worksafe Technologies, 2013, *ISO-Base Seismic Isolation Platform (Technical documentation)*, http://www.3agrup.com/teknikdokuman.pdf, [Ziyaret Tarihi: Nisan, 2013].

Zhang, J. and Huo, Y., Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method. *Engineering structures*, 31(8), 1648–1660.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Hatice GAZİ
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	24 Nisan 1979, İstanbul
Telefon	Sabit**:** 0212 473 70 70 GSM**:** 0535 674 5174
E-mail	hgazi@istanbul.edu.tr
Web adres	http://aves.istanbul.edu.tr/hgazi/

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği ABD.	2015
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği ABD.	2008
Lisans	İ. Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2001
Lise	Şehremini Süper Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)	1997

Makaleler

1. Gazi H., Öztorun N.K., 2011, Düzlem Elastisite Problemlerinin Analizi Kapsamında Sonlu Elemanlar Metoduyla Çalışan Bir Yazılımın Geliştirilmesi, *Yapı Dünyası*, 179, 11-17.

2. Alhan C. and Gazi H., 2014, Bringing Probabilistic Analysis Perspective into Structural Engineering Education: Use of Monte Carlo Simulations, *International Journal of Engineering Education*, 30(5), 1280-1294.

Bildiriler

1. Gazi H., Öncü Davas S. and Alhan C., 2013, Comparison Of Ground Motion Pulse Models For The Drift Response Of Seismically Isolated Buildings, *3rd Annual International Conference on Civil Engineering*, 10-13 June 2013, Athens, Greece, http://www.atiner.gr/papers/CIV2013-0745.pdf.

2. Öncü Davas S., Gazi H. and Alhan C., 2013, Comparison Of Ground Motion Pulse Models For The Drift Response Of Seismically Isolated Buildings, *3rd Annual International Conference on Civil Engineering*, 10-13 June 2013, Athens, Greece, http://www.atiner.gr/papers/CIV2013-0744.pdf.

3. Alhan C., Öncü Davas S. and Gazi H., 2013, Evaluation Of Content Damage Ratios Of Seismically Isolated Buildings Under Earthquake Loading, *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics & 13. D-A-CH Tagung*, 28-30 August 2013, Austria.

4. Gazi H. ve Alhan C., Sismik İzolasyon Sistemi Parametrelerindeki Rastgele Değişimlerin Etkisinin Monte Carlo Simülasyon Metoduyla İncelenmesi, *2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı* (*2. TDMSK*), 25-27 Eylül 2013, Hatay, Türkiye.

5. Gazi H., Alhan C. and Selek M., Behavior of Common-Base Multiple Seismically Isolated Buildings Under Near-Fault Earthquakes, *2nd Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering* (*ACE2014*), 24-25 March 2014, Singapore.

6. Gazi H., Alhan C. and Kurtuluş H., 2015, Significance Of Stiffening Of High Damping Rubber Bearings On The Response Of Base-Isolated Buildings Under Near-Fault Earthquakes, *International Conference On Structural Engineering Dynamics* (*ICEDyn 2015*), 22-24 June 2015, Portugal.

7. Gazi H., Alhan C. and Kurtuluş H., 2015, Influence Of Advanced Modeling Of High Damping Rubber Bearings On The Dynamic Behavior Of Seismically Isolated Buildings, *Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World (SECED 2015)*, 9-10 July 2015, Cambridge, UK.