SİSMİK İZOLASYON SİSTEMİ PARAMETRELERİNDEKİ RASTGELE DEĞİŞİMLERİN ETKİSİNİN MONTE CARLO SİMÜLASYON METODUYLA İNCELENMESİ

H. Gazi[1] ve C. Alhan[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*
[2] *Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*
Email: hgazi@istanbul.edu.tr

ÖZET:

Sismik izolasyonlu yapıların izolasyon sistemleri, izolatörlere ait akma öncesi rijitlik, akma sonrası rijitlik ve akma deplasmanları kullanılarak modellenebilmektedir. Bu parametrelere bağlı olarak izolasyon sistemi elemanlarının kuvvet-yer değiştirme ilişkileri kurulur ve bu parametreler, yapısal sistemin dinamik analizlerinde kullanılırlar. Bu nedenle, sismik izolasyonlu yapılarda izolasyon sistemi elemanlarının mekanik parametrelerine ait değerlerin doğruluğu önemlidir. Ancak, üretim sonucu ortaya çıkan değerler -izolatörlerin malzeme özelliklerindeki veya boyutlarındaki üretime bağlı belirsizliklerden dolayı- modelleme ve analiz için belirlenen değerlerden farklılık gösterebilir. Dahası, bu özellikler yıpranma, eskime, sıcaklık değişimi ve yük geçmişi gibi nedenlerle zaman içerisinde de değişebilir. Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen olası değişikliklerin yapısal davranışa etkisinin olasılıksal olarak incelenmesi amacıyla, bilineer davranış gösteren sismik izolatörlere mesnetlenmiş çerçeve türü tek katlı bir yapısal model, üç boyutlu olarak ele alınmıştır. Her bir izolatörün akma sonrası rijitliğinin akma öncesi rijitliğine oranı, akma kuvveti ile akma deplasmanı, normal dağılıma uygun, bağımsız ve rastgele değişkenler olarak modellenmiştir. Monte Carlo Simülasyon Metodu ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda yapısal tepki parametrelerinden pik izolatör deplasmanları, pik kat ivmeleri ve pik göreli kat öteleme oranlarının yığışımlı yoğunluk fonksiyonları ortaya konmuştur. Simülasyonlar, 16.01.1995 tarihli Kobe depreminin KJMA istasyonu ve 09.02.1971 tarihli San Fernando depreminin 24278 Castaic - Old Ridge Route istasyonu kayıtları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, izolasyon sistemi parametrelerindeki rastgele değişkenliğin sismik izolasyonlu yapıların yapısal cevabını etkileyebileceği; bu etkinin de depreme ve izolatörlere ait karakteristik parametrelerin standart sapma yüzdesine bağlı olarak nasıl değiştiği ortaya konmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Sismik izolatör, taban izolasyonu, sismik izolasyonlu yapı, olasılıksal analiz, Monte Carlo simülasyon metodu.

1. GİRİŞ

Bir izolatörün gerçek kayma rijitliği genellikle; malzeme özelliklerindeki, eleman boyutlarındaki, fabrikasyon metotlarındaki, kalite kontroldeki belirsizlikler ile yıpranma, ısı, yükleme geçmişi ve izolatör rijitliğini tahmin etmekte kullanılan teorik modeller nedeniyle nominal değerinden farklılıklar gösterir (De la Llera ve Inaudi, 1994). Benzer şekilde kauçuk esaslı bir izolatörün akma kuvveti, akma deplasmanı ve karakteristik kuvveti gibi karakteristik parametreleri de modelleme ve analiz için belirlenen nominal değerlerinden farklılıklar gösterebilir. Söz konusu parametrelerde meydana gelen bu farklılıklar nedeniyle bu izolasyon elemanlarının kullanıldığı sistemlerdeki yapısal tepki parametrelerinde de farklılıklar meydana gelmesi mümkündür.

Sismik izolasyonlu yapılarda, izolasyon sistemi elemanları ve/veya üstyapı elemanlarına bağlı olarak yapısal davranışın değişiminin incelendiği çalışmalara örnek olarak Lee, 1980; Su vd., 1990; Kilar ve Koren, 1990; Nagarajaiah vd, 1993; Jangid ve Datta, 1992; Jangid ve Datta, 1995, Tena-Colunga ve Gomez-Soberon, 2002; Alhan ve Gavin, 2004; Tena-Colunga ve Zambrana-Rojas, 2006; Tena-Colunga ve Escamilla-Cruz, 2007 gösterilebilir. İzolasyon sistemi ve/veya üstyapı elemanlarına bağlı olarak, üstyapı ve/veya izolasyon katı davranışını inceleyen bu çalışmalar; farklı rijitlik veya kütle dağılımından kaynaklanan üstyapı ve/veya altyapı eksantrisitesi, üstyapı ve izolasyon katı frekanslar oranı, üstyapı fleksibilitesi, üstyapı ve izolasyon katı kütleler oranı ve izolatör sayısı gibi seçilen belirli değerlere sahip parametrelere dayalı deterministik çalışmalardır. Olasılıksal çalışmalar (De La Llera ve Inaudi, 1994; Shenton III ve Holloway, 2000; Politopoulos ve Pham, 2009) ise çok azdır. De La Llera ve Inaudi, 1994 çalışmalarında izolasyon sisteminin *lineer davranış* gösterdiği kabulüyle farklı sayıda izolatörden oluşan sistemler kullanarak ve izolasyon sistemi rijitliklerine bağlı olarak sadece tasarım deplasmanlarını incelemişlerdir. Shenton III ve Holloway, 2000 çalışmalarında kat seviyesinde *iki serbestlik* alarak modelledikleri bir izolasyonlu yapıda izolasyon elemanlarının *lineer davranış* gösterdiğini kabul ederek, bu elemanların rijitliklerini normal dağılıma uygun rastgele değişken varsaymışlar ve izolasyon katı kütle merkezi ve köşe deplasmanı ile taban kesme kuvvetinin değişimini incelemişlerdir. Politopoulos ve Pham, 2009 ise, *iki serbestlik dereceli* bir model göz önünde bulundurarak; pik yer ivmesi, yer hareketinin frekansı, düktilite kapasitesi, üstyapı akma kuvveti, yapı rijitliği ve izolatör rijitliğini rastgele değişken parametreler olarak almışlar ve sismik izolasyonlu yapıların bu değişkenlere olan hassaslığını incelemişlerdir.

Gazi (2010) çalışması kapsamında gerçekleştirilen mevcut çalışmada, yukarıda bahsedilen olası değişikliklerin yapısal davranışa etkisinin olasılıksal olarak incelenmesi amacıyla, *bilineer davranış* gösteren sismik izolatörlere mesnetlenmiş çerçeve türü tek katlı bir yapısal model, üç boyutlu olarak ele alınmıştır. Her bir izolatörün akma sonrası rijitliğinin akma öncesi rijitliğine oranı, akma kuvveti ile akma deplasmanı, normal dağılıma uygun, bağımsız ve rastgele değişkenler olarak modellenmiştir. Monte Carlo Simülasyon Metodu ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda yapısal tepki parametrelerinden pik izolatör deplasmanları, pik kat ivmeleri ve pik göreli kat öteleme oranlarının yığışımlı yoğunluk fonksiyonları ortaya konmuştur.

2. YAPISAL SİSTEM

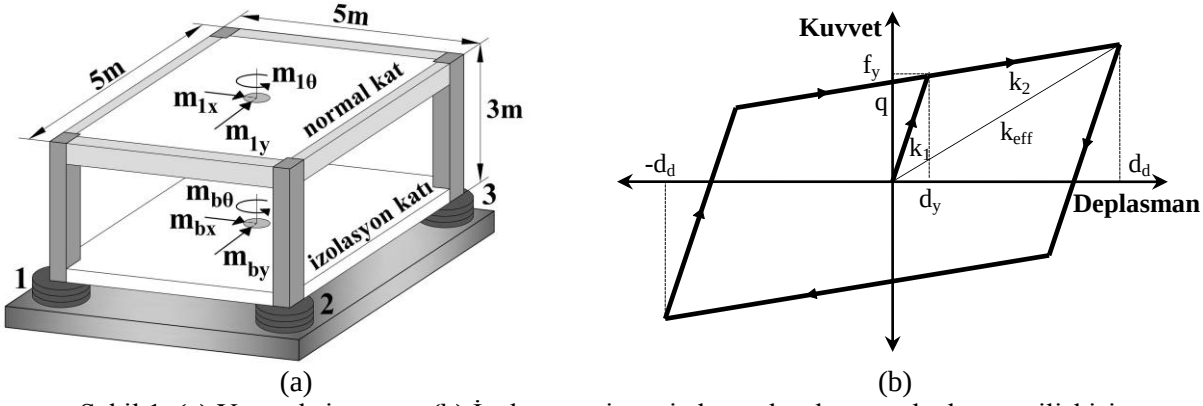
Bu çalışmada kullanılan yapısal model, Şekil 1a'da görülen 4 adet kauçuk esaslı izolatör üzerine mesnetlenmiş, izolasyon katı hariç tek katı bulunan ve tüm üstyapı elemanları, betonarme olan çerçeve türü bir sismik izolasyonlu yapıdır. Her iki yöndeki (x, y) açıklık 5m, kat yüksekliği 3m ve tüm üstyapı elemanlarının elastisite modülü E = 30,000 MPa alınmıştır. Söz konusu yapı, gerçekleştirilen dinamik analizlerde üç boyutlu kesme çerçevesi olarak modellenmiştir. Kolonların rijitlikleri, yapının taban ankastre haline ait 1. mod periyodu T_{ank} = 0.3 s olacak şekilde ve Denklem 1'deki eşitlikler kullanarak tespit edilmiştir. Bu eşitliklerdeki K_{kat}, x ve y yönlerinde eşit olmak üzere katın toplam yanal rijitliğini, k_k, I_k ve L_k sırasıyla bir kolonun yanal rijitliği, atalet momenti ve uzunluğunu gösterirken; m_{ank} taban ankastre yapının kütlesini ve n_k kolon sayısını göstermektedir. Katın burulma rijitliği (K_θ) ise, Denklem 2 ile hesaplanmıştır. Bu denklemde k_{xj} ve k_{yj}, j. kolonun sırasıyla x ve y yönlerindeki yanal rijitliklerini; x_j ve y_j ise yine j. kolonun kat kütle merkezine göre konumunu göstermektedir. İzolasyonlu yapıda, normal kat ve izolasyon katının her ikisi de kütle merkezinde iki doğrusal (x, y) ve bir açısal (θ) serbestliğe sahip, rijit diyaframlar olarak modellenmiştir. Her iki kat, ağırlık merkezlerinde yığılı olduğu varsayılan, eşit kütlelere ($m_{1x} = m_{1y} = m_{bx} = m_{by}$ = 25 kNs^2/m) ve dönel kütle atalet momentine ($m_{1\theta} = m_{b\theta}$ = 104.17 kNs^{2}m) sahiptir.

$$K_{kat} = 4\pi^2 m_{ank} / T_{ank}^2 \qquad k_k = K_{kat} / n_k = 12EI_k / L_k^3 \tag{1}$$

$$K_\theta = \sum_j k_{xj} y_j^2 + \sum_j k_{yj} x_j^2 \tag{2}$$

Mevcut çalışmada, özellikleri yukarıdaki gibi özetlenen üstyapı öncelikle, her kolonun altında merkezi olarak yerleştirilmiş, bilineer davranışa sahip (Şekil 1b) 4 adet kauçuk esaslı izolatörden oluşan "*referans izolasyon sistemi*"ne mesnetlenerek; 1. mod periyodu T_{izo} = 3 s (Denklem 3) olan "*referans izolasyonlu yapı*" elde edilmiştir. Referans izolasyon sistemindeki tüm izolatörlerin bütün karakteristik özellikleri aynı olup; bu parametrelerden akma sonrası rijitliğin (k_2) akma öncesi rijitliğe (k_1) oranı olan (α), akma kuvveti (f_y) ve akma deplasmanına (d_y) ait değerler sırasıyla 0.1, 8.225 kN ve 15 mm olarak alınmıştır. Denklem 3'de m_{izo} izolasyonlu yapı toplam kütlesini, K_2 izolatörlerin akma sonrası rijitlikleri toplamını, n_{izo} izolatör sayısını göstermektedir.

$$T_{izo} = 2\pi\sqrt{m_{izo} / K_2} \qquad m_{izo} = m_{1x} + m_{bx} \qquad K_2 = n_{izo} k_2 = n_{izo}(k_1 \times \alpha) \tag{3}$$



(a) (b)

Şekil 1. (a) Yapısal sistem ve (b) İzolasyon sistemi elemanları kuvvet-deplasman ilişkisi

3. MONTE CARLO SİMÜLASYONU VE RASTGELE DEĞİŞKEN PARAMETRELER

Referans izolasyon sisteminin Bölüm 2'deki gibi elde edilmesinin ardından; çalışmanın bu bölümünde karakteristik parametrelerinde Bölüm 1'de belirtildiği gibi çeşitli nedenlerle nominal değerlerden sapmalar gösteren izolasyon sistemi elemanlarının elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu elemanların oluşturduğu sistemler, "*üretilmiş izolasyon sistemleri*" olarak adlandırılmış olup; bu sistemleri oluşturan her bir izolatöre ait karakteristik parametreler, Monte Carlo Simülasyon Metodu kapsamında rastgele parametreler olarak üretilmiştir.

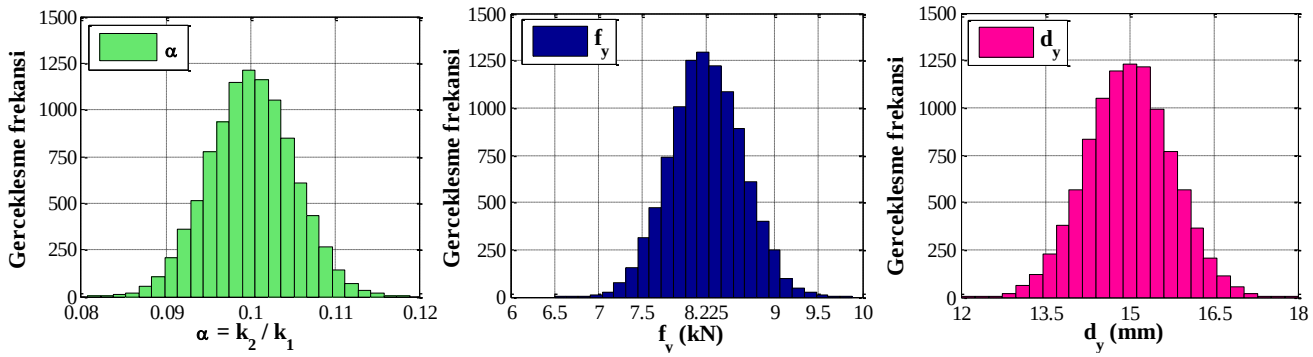
Monte Carlo Simülasyon Metodu, rastgele üretilen sayılardan faydalanarak; fiziksel ve matematiksel bazı sistemlerin simülasyonunda kullanılan bir metottur. Genelde incelenen sistemdeki rastgele değişkenlerin sisteme etkisini incelemek amacıyla kullanılan bu metot, sistemdeki mevcut rastgele değişkenlere karşılık gelen rastgele sayıları üreten bir algoritma ile çalışmaktadır. Bu metot, karmaşık mühendislik sistemlerinin risk ya da güvenilirliğini hesaplamak için sadece temel olasılık ve istatistik bilgilerine sahip mühendislere çok güçlü bir araç olarak sunulmaktadır (Haldar ve Mahadevan, 2000). Metot, incelenen problemdeki değişkenlerin rastgele bir şekilde değişmesi halinde ve dağılım bir fonksiyonla hesaplanabilecekse kullanılmakta olup; günümüzde hesaplamalı fizik, fiziksel kimya, istatistiksel fizik, parçacık fiziği gibi fiziki bilimlerin birçok alanında; mühendisliğin bir çok alanında hassaslık, olasılık ve risk analizlerinde; finans, telekomünikasyon alanlarında sıkça kullanılmaktadır.

Monte Carlo Simülasyon Metodu'nda problem, öncelikle tüm rastgele değişkenler cinsinden tanımlanır; ardından tüm rastgele değişkenlerin değerleri üretilir ve problem, tüm rastgele değişkenlerin her bir gerçekleşim seti için deterministik olarak çözülür. Metot ile normal dağılıma sahip R gibi bir rastgele değişkenin r_i değerlerini elde

edebilmek için öncelikle standart normal sayılar (s_i) üretilir. s_i standart normal sayılarının üretimi, MATLAB (MathWorks, 2009) "*randn*" komutu ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumda normal dağılımlı R değişkeni için μ_R ortalama değer, σ_R standart sapma değeri olmak üzere; her bir standart normal sayıya karşılık gelen r_i değeri, Denklem 4'deki gibi elde edilir. Bu denklemde σ_R için verilen eşitlikte cov, R rastgele değişkeninin standart sapma yüzdesini (varyasyon katsayısı) göstermektedir.

$$r_i = \mu_R + \sigma_R s_i \qquad \sigma_R = \mu_R . \text{cov} \tag{4}$$

Mevcut çalışmada Bölüm 2'de referans izolasyon sistemindeki yani nominal değerleri verilen α, f_y ve d_y parametreleri, izolasyon elemanlarının normal dağılıma uygun, rastgele, bağımsız değişkenleri olarak seçilmiştir. Söz konusu parametreler, sistemde bulunan her bir izolatör için ayrı ayrı olmak üzere, cov = % 5 olacak şekilde Denklem 4'deki gibi üretilmiştir. Çalışma kapsamında referans izolasyon sistemi parametrelerine ait nominal değerler simule edilerek, örnekleme ve detaylı sunum yapabilmek amacıyla, öncelikle simülasyon sayısı n = 10 olacak şekilde her bir izolatörü farklı α, f_y ve d_y değerlerine sahip 10 farklı izolasyon sistemi üretilmiştir. Elde edilen bu 10 izolasyon sistemi, Bölüm 2'de detayları verilen aynı üstyapı ile entegre edilerek 10 adet "*üretilmiş izolasyonlu yapı*" oluşturulmuştur. Bu çalışmada ayrıca, simülasyon sayısının önemini göstermek amacıyla n = 10,000 ve 50,000 alınarak, her bir izolatörü farklı α, f_y ve d_y değerlerine sahip 10,000 ve 50,000 adet farklı izolasyon sistemi de üretilmiştir. Elde edilen 10,000 ve 50,000 adet izolasyon sistemi yine aynı üstyapı ile entegre edilerek 10,000 ve 50,000 adet üretilmiş izolasyonlu yapı oluşturulmuştur. Simülasyon sayısının n = 10,000 olması halinde örnek teşkil etmesi amacıyla seçilmiş olan 1. izolatör (Bkz. Şekil 1a) için üretilen α, f_y ve d_y değerlerinin "*gerçekleşme frekansına*" bağlı olarak değişimlerini gösteren histogramlar, Şekil 2'de verildiği gibidir.



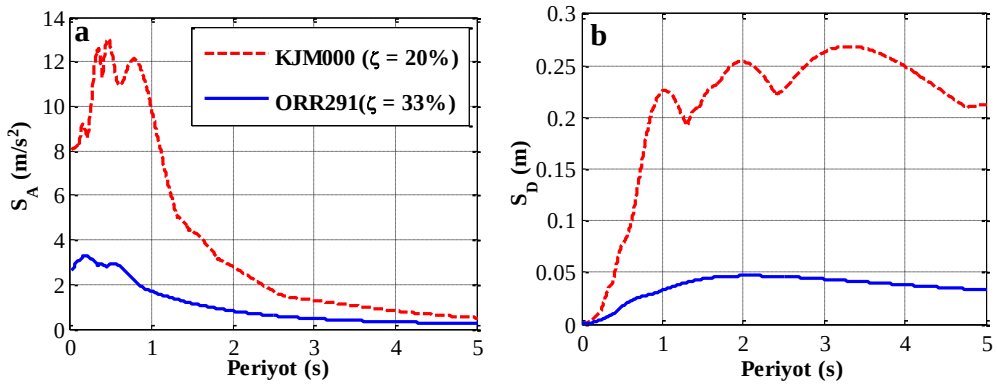
Şekil 2. n = 10,000 olması halinde 1. izolatör için üretilen α, f_y ve d_y değerlerine ait histogramlar

4. DEPREM KAYITLARI

Mevcut çalışmada göz önünde bulundurulan referans izolasyonlu yapı ve üretilmiş sistemlerle elde edilen tüm izolasyonlu yapılar, Tablo 1'de detayları verilen yer hareketi kayıtlarına maruz bırakılmıştır. Tablo 1'de de görüldüğü üzere, faya olan en yakın mesafesi (r) 0.6 km ve 24.9 km olan bu yer hareketi kayıtları sırasıyla yakın ve uzak kaynaklı depremlere örnek teşkil etmek amacıyla seçilmiş olup; mevcut çalışmada göz önünde bulundurulan tüm yapısal sistemlere sadece x ekseni doğrultusunda etkitilmiştir. Yer hareketi kayıtlarına ait ivme ve deplasman spektrumları ise, sırasıyla Şekil 4a ve 4b'de verilmiştir. Bölüm 2'de detayları verilen referans izolasyonlu yapıya ait eşdeğer periyot (T_{eff}) değerleri, yapının KJM000 ve ORR291 yer hareketi kayıtlarına maruz kalması halinde sırasıyla 2.43 s ve 1.66 s olarak elde edilmiş olup; eşdeğer sönüm oranları (β_{eff}) ise, sırasıyla % 20 ve % 33 olarak elde edilmiştir. Bu nedenle, KJM000 ve ORR291 yer hareketi kayıtları için ivme ve deplasman spektrumları, sönüm oranının (ζ) sırasıyla % 20 ve % 33 olması halinde verilmiştir.

Tablo 1. Deprem kayıtları

Bileşen	Deprem	Tarih	İstasyon	r (km)	PGA (g)	PGV(cm/s)	PGD (cm)
KJM000	KOBE	16.01.1995	KJMA	0.6	0.821	81.300	17.680
ORR291	SAN FERNANDO	09.02.1971	24278 Cas. - Old Rid. Rou.	24.9	0.268	25.900	4.670



Şekil 3. Deprem kayıtlarına ait (a) ivme spektrumları ve (b) deplasman spektrumları

5. BULGULAR

Bu bölümde, Bölüm 2 ve Bölüm 3'de detayları verilen sırasıyla referans izolasyonlu yapı ve üretilmiş izolasyonlu yapıların, x eksenleri doğrultusunda Bölüm 4'de belirtilen yer hareketi kayıtlarına maruz kalması halinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan, üç boyutlu dinamik analizler sonucunda elde edilen yapısal tepki parametrelerinden pik izolatör deplasmanları, pik toplam kat ivmeleri ve pik göreli kat öteleme oranları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Söz konusu dinamik analizler, sismik izolasyonlu yapıların doğrusal olmayan dinamik analizlerini üç boyutlu olarak gerçekleştirebilen 3D-BASIS (Nagarajaiah vd., 1990) programı ile gerçekleştirilmiştir.

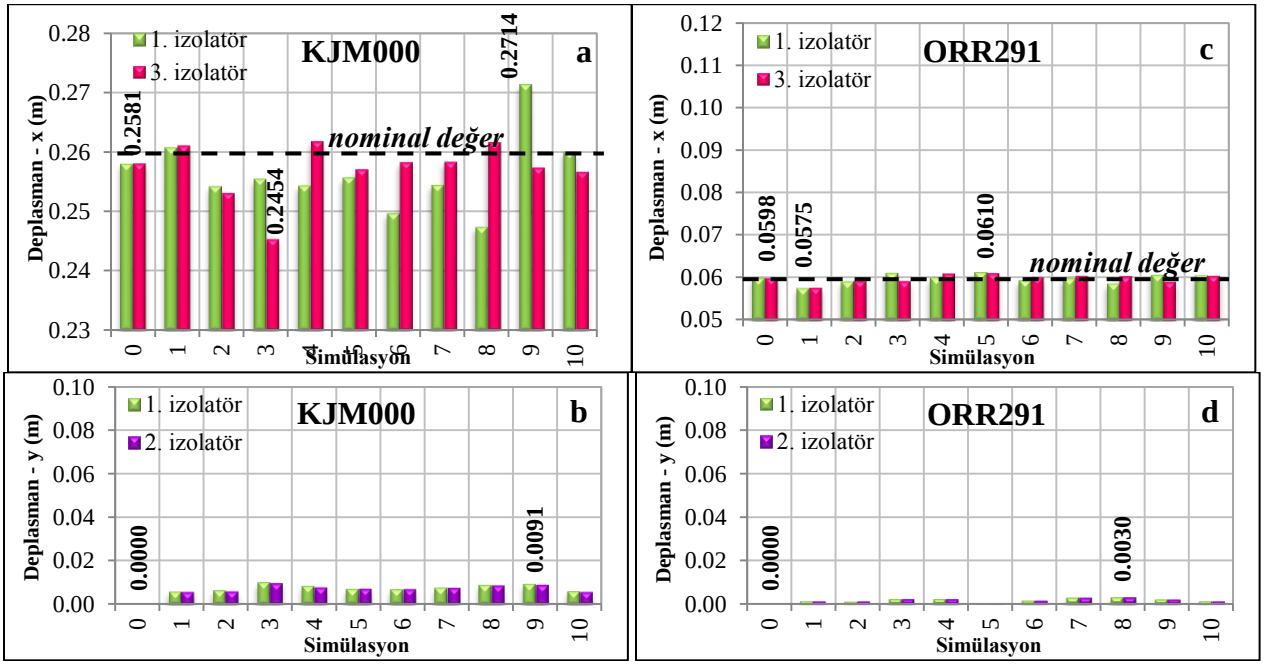
Mevcut çalışma kapsamında öncelikle, referans izolasyonlu yapı ve simülasyon sayısı n = 10 alınması suretiyle elde edilen, dört izolatörünün her biri farklı karakteristik özelliklere sahip 10 farklı izolasyon sistemi ile oluşturulan 10 farklı üretilmiş izolasyonlu yapı, sırasıyla KJM000 ve ORR291 yer hareketi kayıtlarına maruz bırakılmıştır. Referans izolasyonlu yapıya ait nominal değerler ve tüm üretilmiş izolasyonlu yapıların dinamik analizleri sonucunda elde edilen pik izolatör deplasmanları, pik toplam normal kat ivmeleri ve pik göreli normal kat öteleme oranları her iki yer hareketi için de x ve y yönlerinde ayrı ayrı olmak üzere sırasıyla Şekil 4, Şekil 6 ve Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 5, Şekil 7 ve Şekil 9'da ise, üretilmiş izolasyonlu yapılar için x doğrultusunda elde edilen sırasıyla pik izolatör deplasmanlarının, pik toplam normal kat ivmelerinin ve pik göreli normal kat öteleme oranlarının, referans izolasyonlu yapıdaki nominal değerlerinden sapma yüzdeleri verilmiştir. Bu sapma yüzdeleri, Denklem 5'deki gibi hesaplanmıştır. Bu denklemde C_i, i. simülasyon ile elde edilen üretilmiş izolasyonlu yapıya ait bir tepki parametresi değerini; C_r ilgili yapısal tepki parametresinin referans izolasyonlu yapıdaki değerini (nominal değer); SY_i ise, üretilmiş izolasyonlu yapıdaki söz konusu yapısal tepki parametresinin nominal değerinden sapmasını göstermektedir. Şekil 4 - 10 için geçerli olmak üzere bu grafiklerde yatay eksen, n = 1 ~ 10 aralığında ilgili simülasyon ile elde edilen üretilmiş izolasyonlu yapıyı, n = 0 için ise referans sistemi temsil etmektedir.

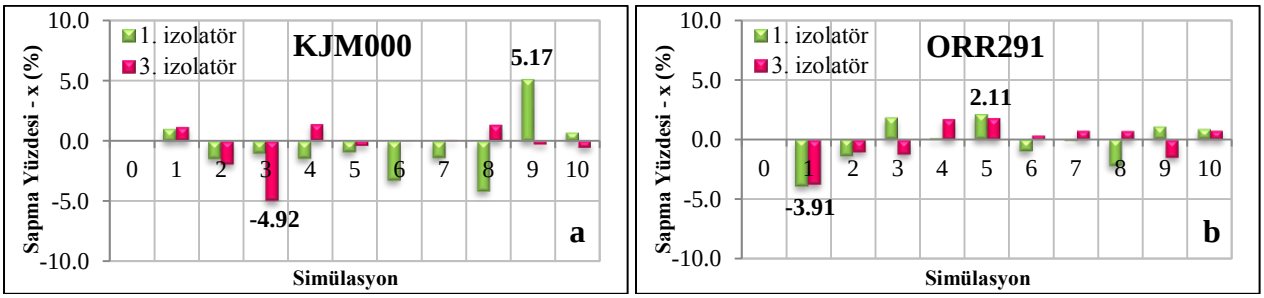
$$SY_i = 100 \times (C_i - C_r) / C_r \tag{5}$$

Şekil 4a'da görüldüğü üzere KJM000 deprem kaydı altında nominal değeri 0.2581 m olan pik izolatör deplasmanları, her birinde izolatör özelliklerinin farklı olduğu üretilmiş izolasyonlu yapıda farklı değerler alarak, 0.2454 m ~ 0.2714 m aralığında değişmektedir. Şekil 5a'da görüldüğü üzere, 10 simülasyon sonucunda elde edilen bu değerlerden en büyük olan 0.2714 m değerine karşılık olarak 9. simülasyonda sapma yüzdesi % 5.17 değerine ulaşmaktadır. Şekil 4c'de görüldüğü üzere ORR291 deprem kaydı altında nominal değeri 0.0598 m olan pik izolatör deplasmanları ise KJM000 kaydı altında elde edilen deplasmanlara oranla nominal değerlerinden daha az farklı olan değerler almaktadır. 5. simülasyonda elde edilen en büyük deplasman değerine karşılık olarak en büyük pozitif sapma % 2.11 değerine ulaşabilmektedir. Tüm yapısal sistemlerde aynı x aksı üzerindeki izolatörlerin x doğrultusu deplasmanları aynı oluğundan Şekil 4a ve 4c'de 1 ve 3 no'lu izolatörlerin (Bkz. Şekil 1a), pik deplasmanlarına yer verilmiştir.

Söz konusu yer hareketleri altında tüm yapılar için y doğrultusundaki pik izolatör deplasmanları ise Şekil 4b ve Şekil 4d'de verilmiştir. Aynı y aksı üzerindeki izolatörlerin y doğrultusu deplasmanları aynı olduğundan Şekil 4b ve 4d'de 1 ve 2 no'lu izolatörlerin (Bkz. Şekil 1a) pik deplasmanlarına yer verilmiştir. Nominal değerleri sıfır olan y doğrultusu deplasmanları, bu şekillerde görüldüğü üzere, aynı sistem içerisindeki izolatör özelliklerinin birbirinden farklı olması sebebiyle oluşan dış merkezlik neticesinde nominal değer olan sıfırdan farklı değerler almaktadırlar.

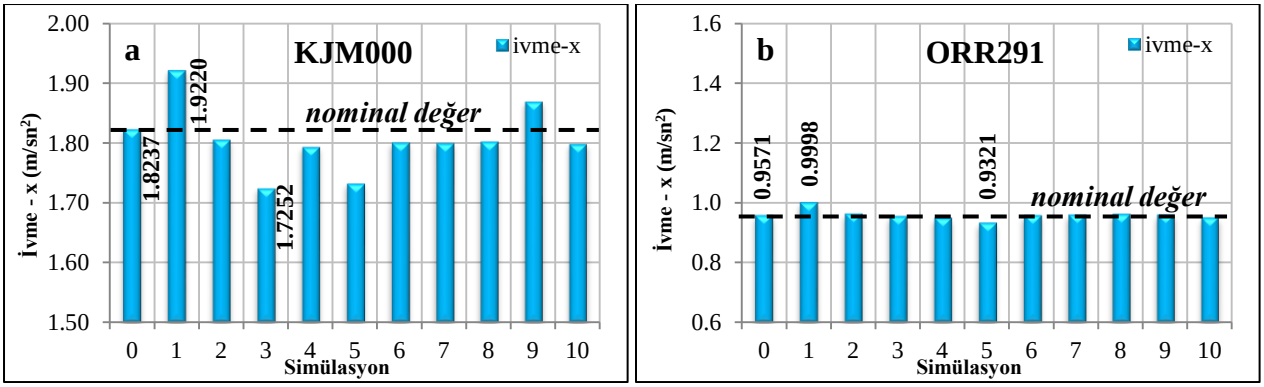


Şekil 4. Pik izolatör deplasmanları (a - b): KJM000, (c - d): ORR291

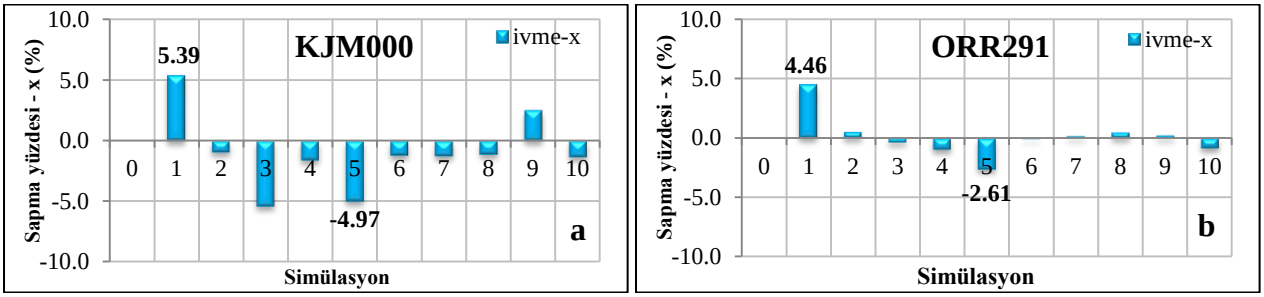


Şekil 5. Pik izolatör deplasmanlarının nominal pik izolatör deplasmanından sapma yüzdeleri (a): KJM000, (b): ORR291

Normal kat kütle merkezinde elde edilen x doğrultusu pik toplam kat ivmeleri, Şekil 6a ve Şekil 6b'de görüldüğü üzere, her iki yer hareketi kaydı altında pik izolatör deplasmanlarında olduğu gibi nominal değerlerinden farklı değerler almaktadırlar. Söz konusu tepki parametrelerinin nominal değeri, KJM000 kaydı altında 1.8237 m/sn^2 iken, simülasyonlar sonucunda 1.9220 m/sn^2 değerini aldığı görülmektedir. Şekil 7a'da görüldüğü üzere, bu değerin söz konusu tepki parametresi için 10 simülasyon sonucunda elde edilen en büyük sapma değeri olan % 5.39'a karşılık geldiği görülmektedir. Benzer şekilde ilgili tepki parametresinin nominal değeri ORR291 kaydı altında 0.9571 m/sn^2 iken, simülasyonlar sonucunda bu değerden % 4.46'lık (Şekil 7b) bir sapma yaparak en fazla 0.9998 m/sn^2 (Şekil 6b) değerini almaktadır.



Şekil 6. Normal kat kütle merkezi pik toplam ivmeleri (a): KJM000, (b): ORR291

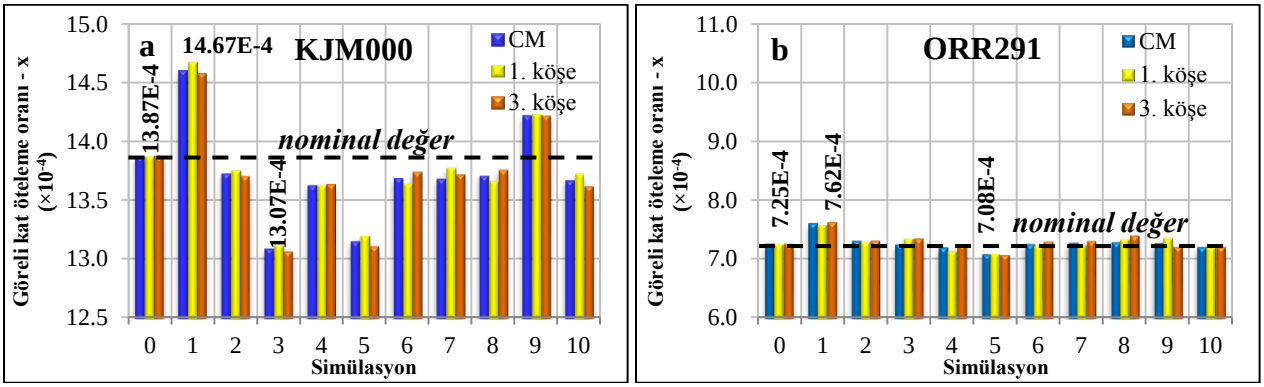


Şekil 7. Normal kat kütle merkezi pik toplam ivmelerinin normal kat nominal pik toplam ivmesinden sapma yüzdeleri (a): KJM000, (b): ORR291

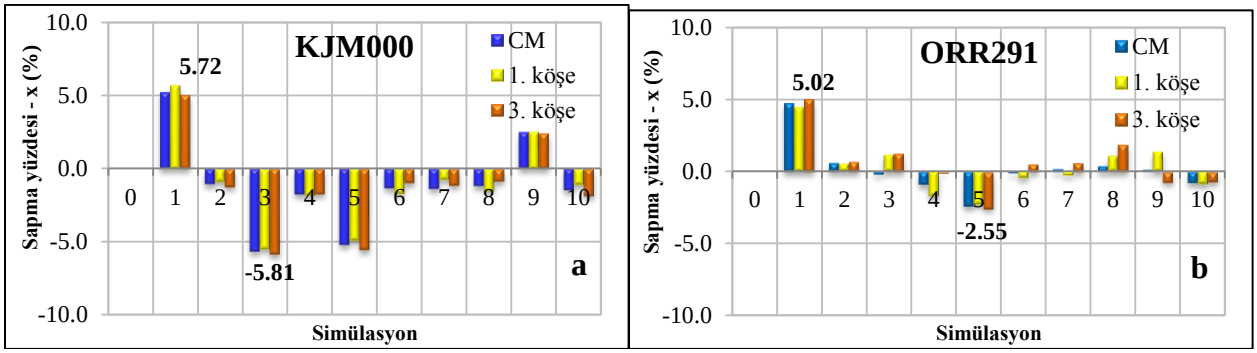
Normal katın izolasyon katına göre x doğrultusundaki öteleme oranları (Şekil 8a ve 8b), diğer yapısal tepki parametrelerinde olduğu gibi nominal değerlerinden farklı değerler almaktadır. Şekil 9a ve 9b'de görüldüğü üzere bu oranların nominal değerlerinden en büyük sapma yüzdeleri, KJM000 ve ORR291 kayıtları için sırasıyla % 5.72 ve % 5.02 olarak elde edilmiştir.

Mevcut çalışmanın 2. aşamasında, simülasyon sayısının önemini göstermek ve daha doğru sonuçlar almak amacıyla, ilk aşamada n = 10 simülasyon için gerçekleştirilen analizler, n = 10,000 adet simülasyon için de gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3'de belirtildiği üzere, izolatörlerin α, f_y, d_y rastgele bağımsız değişkenlerine ait standart sapma yüzdesi (cov = %5) sabit kalmak suretiyle 10,000 adet izolasyon sistemi üretilmiştir. Bu sistemlerin Bölüm 2'de özellikleri verilen aynı üstyapı ile entegre edilmesiyle oluşan 10,000 adet üretilmiş izolasyonlu yapının ilgili yapısal tepki parametreleri elde edilmiştir. Yapısal tepki parametrelerinin dağılımı, *"yığışımlı yoğunluk fonksiyonları"* (CDF) ile her iki yer hareketi için de Şekil 10'da verilmiştir. Bu aşamada, simülasyonlar sonucunda 3. izolatör pik deplasmanlarının, 1. izolatör pik deplasman değerlerinden daha büyük bir maksimum değere ulaşması nedeniyle 3. izolatöre ait CDF grafikleri (Şekil 10a ve 10d) verilmiştir. Pik göreli kat öteleme oranlarının, normal kat seviyesindeki noktalarda birbirine çok yakın değerler alması nedeniyle,

sadece kat kütle merkezindeki göreli kat öteleme oranlarına ait CDF (Şekil 10c ve 10f) verilmiştir. Belirli bir aralıkta değerler alan bir değişkenin tüm değerlerini içeren CDF, bu değişkene ait değerlerin yatay eksen üzerinde gösterilen belirli bir değerden daha düşük değerler alma olasılığını göstermektedir.



Şekil 8. Normal kat pik göreli öteleme oranları (a): KJM000, (b): ORR291

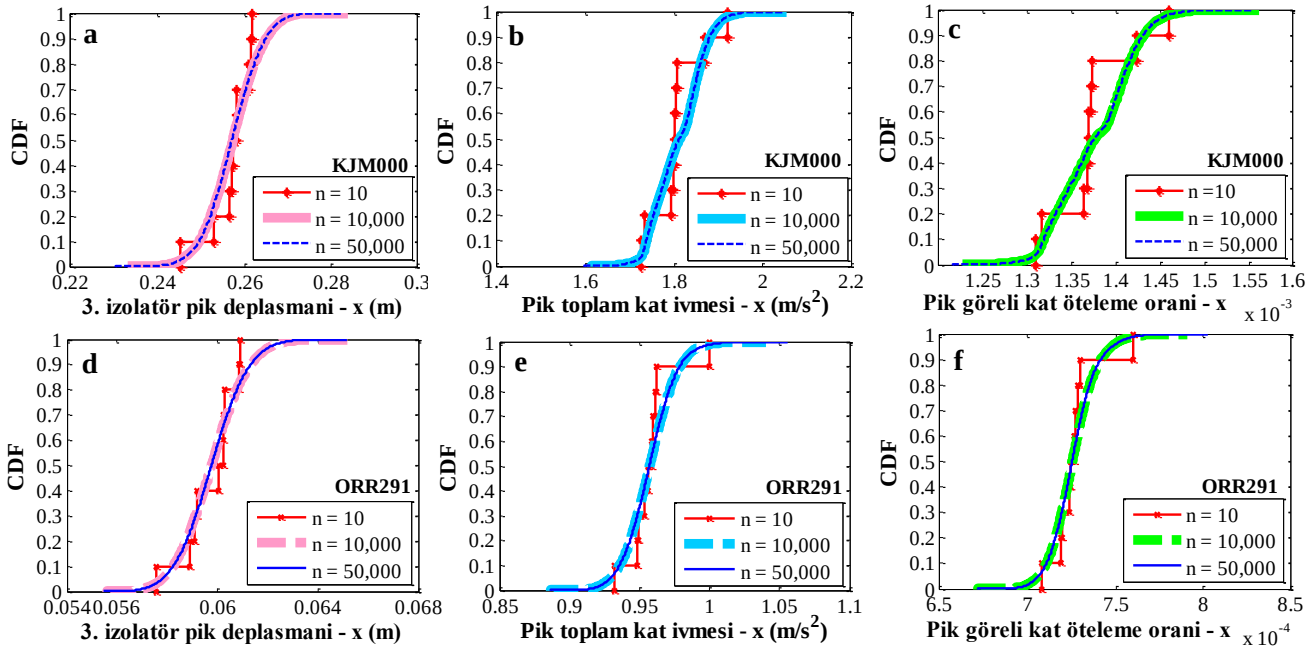


Şekil 9. Normal kat pik göreli öteleme oranlarının normal kat nominal pik göreli öteleme oranlarından sapma yüzdeleri (a): KJM000, (b): ORR291

Örneğin, üretilmiş izolasyonlu yapılar için ORR291 kaydı altında elde edilen 3. izolatör deplasmanlarına ait CDF grafiğini gösteren Şekil 10d'den görüldüğü üzere, 0.06 m deplasman değerine karşılık olarak CDF değeri 0.6 okunmaktadır. Buradan söz konusu üretilmiş yapıların ORR291 kaydına maruz kalması halinde 3. izolatör için elde edilen pik deplasmanların % 60'ının 0.06 m'den daha düşük değerler aldığı anlaşılmaktadır.

CDF grafiklerinin bir değişkene ait tüm değerleri içermesi nedeniyle, söz konusu değişken için elde edilen en küçük ve en büyük değerleri de, sırasıyla CDF = 0 ve CDF = 1 değerlerine karşılık yatay eksen üzerinden okumak mümkündür. Üretilmiş yapıların KJM000 kaydına maruz kalması halinde meydana gelebilecek 3. izolatör pik deplasmanlarının en büyüğü ve normal kat kütle merkezinde okunan pik toplam kat ivmesi ile pik göreli kat öteleme oranlarının en büyüğü, sırasıyla Şekil 10a, 10b ve 10c'den CDF = 1 değerine karşılık olarak 0.2839 m, 2.0547 m/sn^2 ve 15.61×10^{-4} olarak elde edilmektedir. Bu değerlerin nominal değerlerinden sapma yüzdeleri, Denklem 5 ile hesaplanırsa; sırasıyla % 9.996, % 12.667 ve %12.540 olarak elde edilmektedir. n = 10 olması halinde bu değerler % 5.17, % 5.39 ve % 5.72 sapma değerlerine karşılık olarak sırasıyla 0.2714 m, 1.9220 m/s^2 ve 14.60×10^{-4} idi. İstatistiksel açıdan anlamlı bir değerlendirme yapabilmek için simülasyon sayısını arttırdığımızda, göz önünde bulundurulan tüm parametreler için referans izolasyonlu yapıdaki nominal değerlerinden sapma yüzdeleri artmıştır. Benzer durum, ORR291 kaydı için elde edilen tepki parametreleri için geçerlidir.

Görüldüğü üzere; simülasyon sayısını arttırdığımızda, göz önünde bulundurulan tüm parametreler için elde edilen sapma yüzdeleri değişmektedir. Bu nedenle gerçekleştirilen simülasyonların doğruluğunu ve geçerliliğini tanımlamak için çalışmanın son aşaması olarak, simülasyon sayısı n = 50,000 alınmış ve çalışmanın ilk iki aşamasında gerçekleştirilen analizler, n = 50,000 için tekrarlanmıştır. 50,000 adet üretilmiş izolasyonlu yapının dinamik tepki parametreleri de her iki yer hareketi için yine Şekil 10'da verilmiştir. Söz konusu simülasyon



sayısı için oluşturulan KJM000 kaydı altında yapıların 3. izolatör pik deplasmanlarının en büyüğü, normal kat kütle merkezinde okunan pik toplam kat ivmesi ile pik göreli kat öteleme oranlarının en büyüğü, sırasıyla Şekil 10a, 10b ve 10c'den CDF = 1 değerine karşılık olarak sırasıyla 0.2830 m, 2.0481 m/s^2 ve 15.54×10^{-4} elde edilmektedir. Bu değerlerin nominal değerlerinden sapma yüzdeleri ise, sırasıyla % 9.647, %12.305 ve %12.040 elde edilmektedir.Görüldüğü üzere, bu değerler, n = 10,000 simülasyon sonucunda elde edilen değerler ile çok yakındır.

Şekil 10: n = 10; 10,000 ve 50,000 için tepki parametrelerine ait CDF grafikleri; (a-c): KJM000, (d-f): ORR291

6. SONUÇLAR

İzolasyon sistemi elemanlarına ait akma sonrası rijitliğin akma öncesi rijitliğe oranı, akma kuvveti ve akma deplasmanı gibi karakteristik parametrelerindeki rastgele değişimlerin, bu elemanların kullanıldığı yapısal sistemlerin tepki parametreleri üzerindeki olasılıksal etkisini incelemek amacıyla Monte Carlo Simülasyon Metodu ile gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda görülmüştür ki;

- İzolasyon sistemi elemanlarının karakteristik parametrelerinde, bu değerler için modelleme ve analiz aşamasında kullanılmak üzere tespit edilen değerlerden rastgele sapmalar olması halinde, altyapıyı oluşturan izolasyon sistemi deplasman değerleri ile üstyapı tepki parametrelerinden kat ivmesi ve göreli kat öteleme oranları etkilenmekte ve nominal değerlerinden sapmalar göstermektedirler.
- Bu etkilenme sonucunda dinamik tepki parametrelerinde meydana gelen maksimum değişimler, yapısal sistemin maruz kaldığı yer hareketine ve göz önünde bulundurulan tepki parametresinin türüne göre değişiklik göstermektedir.

- Ayrıca bu değişimler, problemi gerçekleştirmek için göz önünde bulundurulan simülasyon sayısına da bağlıdır. Mevcut çalışmanın ilk aşamasında gerçekleştirilen 10 simülasyon sonucunda, göz önünde bulundurulan üç yapısal tepki parametresi için de nominal değerlerden meydana gelen maksimum sapmaların, izolasyon sistemi karakteristik parametrelerinin standart sapma yüzdesine paralellik göstererek % 5 civarında olduğu tespit edilmiştir. Ancak istatistiksel olarak anlamlı sonuçların elde edilebilmesi amacıyla yapılan 10,000 ve 50,000 adet simülasyonun sonucunda, incelenen tepki parametrelerindeki maksimum sapmaların % 10 ~ 13'ler seviyesinde olduğu görülmüştür. Böylece, incelenen yapısal sistemin karmaşıklığına ve göz önünde bulundurulan rastgele değişken parametre sayısına bağlı olarak yeterli sayıda simülasyon yapılması gerektiği ortaya konmuştur.

Sismik izolasyonlu yapılarda istatistiksel olarak bir genelleme yapabilmek için mevcut çalışmada tek katlı basit bir yapısal model üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, uygulamada karşılaşılması mümkün olabilecek gerçekçi bir yapısal sistem üzerinde ve farklı karakteristik özelliklere sahip depremleri temsil edebilecek sayıda deprem kayıtları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmelidir. Bu detayların göz önüne alındığı kapsamlı bir çalışma, yazarlar tarafından halihazırda yürütülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'nin 20206 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü, kendilerine teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Alhan, C. ve Gavin, H. (2004). Parametric analysis of passive damping in base isolation, *Structures 2004 - Building on the Past, Securing the Future*. May 22-26. Nashville, Reston, VA: ASCE

De La Llera, J.C., Inaudi, J.A. (1994). Analysis of base-isolated buildings considering stiffness uncertainty in the isolation system, *5th National Conference on Earthquake Engineering*. July 10-14. Chicago, Earthquake Engineering Research Institute. 623-632.

Gazi (2010). Sismik İzolasyonlu Binaların Deprem Yükleri Altındaki Olasılıksal Davranışı. Doktora Tezi Önerisi. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Haldar, A. ve Mahadevan, S. (2000). Probability Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley & Sons, Danvers MA.

Jangid, R.S. ve Datta, T.K. (1992). Seismic behavior of torsionally coupled base isolated structure. *European Earthquake Engineering* 6:3, 3-13.

Jangid, R.S. ve Datta, T.K. (1995). Performance of base-isolation systems for asymmetric building subject to random-excitation. *Engineering Structures* 17:6, 443-454.

Kilar, V. ve Koren, D. (2004) Seismic behavior of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators. *Engineering Structures* 31, 910-921.

Lee, D.M. (1980). Base Isolation For Torsion Reduction in Asymmetric Structures Under Earthquake Loading. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics* 8, 349-359.

The MathWorks Inc. (2009) *Matlab: The Language of Technical Computing, Ver: 7.8.0.347 (R2009a)*, USA.

Nagarajaiah, S., Reinhorn A.M. ve Contantinou M.C. (1990). *3D-Basis: A general program for the nonlinear dynamic analysis of three dimensional base isolated buildings.* Buffalo: Department of Civil Engineering State University.

Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. ve Contantinou, M.C. (1993). Torsion in base-isolated structures with elastomeric isolation systems. *Journal of Structural Engineering* 119: 10.

Politopoulos, I., PHAM, H.K. (2009). Sensitivity of Seismically Isolated Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 38, 989-1007.

Shenton III, H.W. ve Holloway, E.S. (2000). Effect of stiffness variability on the response of isolated structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 29, 19-36.

Su, L., Goodarz, A. ve Tadjbakhsh, I. (1990). A comparative study of performances of various base isolation systems part II: sensitivity analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 19, 21-33

Tena-Colunga, A. ve Gomez-Soberon, L. (2002). Torsional response of base isolated structures due to asymmetries in the superstructure. *Engineering Structures* 24, 1587-1599.

Tena-Colunga, A. ve Zambrana-Rojas, C. (2006). Dynamic torsional amplifications of base isolated structures with eccentric isolation system. Engineering Structures 28, 72-83.

Tena-Colunga, A. ve Gomez-Soberon, L. (2007). Torsional amplifications in asymmetric base isolated structures. *Engineering Structures* 29, 237-247.