

# İstanbul'daki 2000 Yılı Sonrası Binalar İçin Tasarıma Esas Deprem Seviyesi Altında Karşılaştırmalı Yapısal Hasar ve Mali Kayıp Tahminleri

Ufuk HANCILAR<sup>1</sup>  
Karin ŞEŞETİYAN<sup>2</sup>  
Eser ÇAKTI<sup>3</sup>

## ÖZ

*İstanbul Olası Deprem Kayıp Tahminleri* (2009) çalışması kapsamında derlenen İstanbul bina envanterinde yaklaşık 1,2 milyon bina bulunmaktadır. Bu binaların %15'i (180.000 civarı) 2000 yılı ve sonrasında inşa edilmiş, 5 ve üzeri katlı, betonarme çerçeve tipi yapılardır. Bu çalışmada, 2000 yılından sonra inşa edilen ve Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1998)'e [1] göre tasarlandıkları varsayılan bu binalar için, tasarıma esas deprem seviyesi altında yapısal hasar ve yapısal hasar kaynaklı mali kayıp tahminleri sunulmaktadır. Bu amaçla, ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) [2] yazılımının kapasite spektrumu yöntemini uygulayan Kentsel Deprem Kayıpları Tahmin Modülü (Hancılar vd., 2010) [3] kullanılmıştır. Spektral ivme ve yerdeğiştirmeye bağlı hasar analizlerinde deprem talebi %5 sönümlü ivme tepki spektrumu ile temsil edilirken bina yatay yük taşıyıcı sistemi kapasite eğrisi ile sunulur ve spektral yerdeğiştirmeler cinsinden kırılma fonksiyonları yoluyla farklı hasar seviyeleri için hasar olasılıkları hesaplanır. Analizlerde deprem etkileri, 50 yılda %10 aşılma olasılığı (475 yıllık yinelenme süresi) için Şeşetyan vd. (2016)'da [4] sunulan deprem tehlike modeli ile elde edilen zemin bağımlı spektral ivmeler (0,2s ve 1.0s için) kullanılarak oluşturulan tepki spektrumları ile dikkate alınmıştır. Hasar analizleri, bina kapasite eğrileri ve kırılma fonksiyonları için üç farklı model dikkate alınarak aynı deprem seviyesi altında gerçekleştirilmiştir: i) Hancılar ve Çaktı (2015)'te [5] sunulan, yapısal analizlere dayalı kapasite eğrileri ve kırılma fonksiyonları; ii) *İstanbul Olası Deprem Kayıp Tahminleri* (İBB-2009) [6] çalışmasında kullanılan, geçmiş analitik çalışmalara ve uzman görüşü/yorumuna dayanan yapısal kırılma fonksiyonları ile taşıyıcı sistem kapasite eğrileri ve iii) Benzer bina sınıfları için HAZUS-MH MR4 (2004)

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 06.07.2017 günü ulaşmıştır. 16.05.2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.326939>

1 Boğaziçi Üni., Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü - İstanbul - hancilar@boun.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-9180-7816>

2 Boğaziçi Üni., Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü - İstanbul - karin@boun.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0001-5109-6477>

2 Boğaziçi Üni., Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü - İstanbul - eser.cakti@boun.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0003-1381-1833>

Teknik Kılavuzu'nda [7] verilen kapasite eğrileri ve kırılgenlik fonksiyonları. Üç modele ait sonuçlar hasarlı bina sayıları ve dağılımları ile yapısal hasar kaynaklı mali kayıplar cinsinden karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapısal hasar, tasarıma esas deprem seviyesi, deprem riski, ekonomik kayıp, yeni binalar, İstanbul.

## ABSTRACT

### **Comparative Damage and Economic Loss Estimations under Design Basis Earthquake Level for Post-2000 Buildings in Istanbul**

The building inventory compiled within the framework of the study entitled *Probable Earthquake Losses for Istanbul* (2009) contains about 1.2 million buildings. 15% of them (approximately 180,000 buildings) are reinforced concrete (RC) frame type structures with 5 or more floors constructed after the year 2000, which can be assumed to be designed in accordance with the provisions of Turkish Earthquake Resistant Design Code (1998) [1]. This study presents a comparative damage assessment exercise for high-code buildings in Istanbul under the earthquake ground motion level with a 10% probability of exceedance in 50 years. Spectral acceleration-displacement based damage assessment methodology is implemented for the estimation of damage to these buildings with Urban Earthquake Loss Assessment Module of ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) software package [2], [3]. Regarding the ground motion input, we rely on the site-dependent mean ground motion values (i.e. 5%-damped spectral accelerations at 0.2s and 1s) for 475-year return period using the seismic hazard model given by Sesetyan et al. (2016) [4]. Damage analyses for the same level of ground motion are realized by alternating building capacity and fragility functions: i) Structural capacity and fragility functions for code complying RC frames by Hancilar and Cakti (2015) [5]; ii) Expert judgment based capacity and fragility functions for post-2000 buildings as of the study of *Probable Earthquake Losses for Istanbul* (IMM-2009) [6] and iii) High-code seismic design level structural capacity and fragility functions for RC frame building typologies of HAZUS-MH MR4 (2004) [7]. The results for three cases are compared in terms of number of damaged buildings and associated monetary losses.

**Keywords:** Structural damage, design basis earthquake, seismic risk, economic loss, high-code buildings, Istanbul.

## 1. GİRİŞ

Olası bir depremde oluşabilecek bina hasarları ve buna bağlı can kayıpları ile mali kayıpların envanter verisi (bina, nüfus gibi) kullanılarak değerlendirilmesi için, şiddet bazlı (makro-sismik) ve/veya analitik (mühendislik) modeller uygulanmaktadır. Geçmiş deprem gözlemlerinden elde edilen hasar verilerine dayanan makro-sismik yöntem ile bölgesel ölçekte hasarlı bina dağılımlarının tahmini gerçekleştirilebilir. Bu iş için şiddet bazlı ampirik hasar-görebilirlik ilişkilerinden yararlanılır [8]-[13]. Kentsel alanlarda mühendislik servisi olarak depreme dayanıklı tasarım ilkelerine göre tasarlanıp inşa edilen binalardan oluşan envanterlerin deprem riskinin değerlendirilmesi için, ki bu yeni binalar için geçmiş deprem

hasar verisi bulunmadığı da göz önüne alındığında, analitik yöntemler kullanılması uygun olacaktır.

Deprem riskinin analitik yöntemle değerlendirilebilmesi için risk altındaki unsurların envanterleri çıkarılarak sınıflandırılmalı ve belirlenen bina sınıfları için hasar-görebilirlik ilişkileri tanımlanmalıdır. Hasar-görebilirlik, deprem riski altındaki belirli bir fiziksel unsur ya da unsur grubunun (nüfus, bina, içme suyu boru hatları vb. gibi) uğrayacağı olası zararın/hasarın nicel ifadesidir. Risk altındaki bir elemanın hasar-görebilirlik fonksiyonları (hasar-görebilirlik/kırılma eğrileri) fiziksel ve sosyo-ekonomik şartlara bağlı olarak, bu elemanın deprem hareketine verdiği tepkinin değişik performans sınır durumlarını aşma olasılığını temsil eder. Analitik hasar-görebilirlik fonksiyonları, yapıların (bina sınıflarını temsilen) matematiksel olarak modellenerek deprem etkileri altında analizlerinin yapılması ve yapısal performans sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle elde edilir (örneğin [14]-[18]).

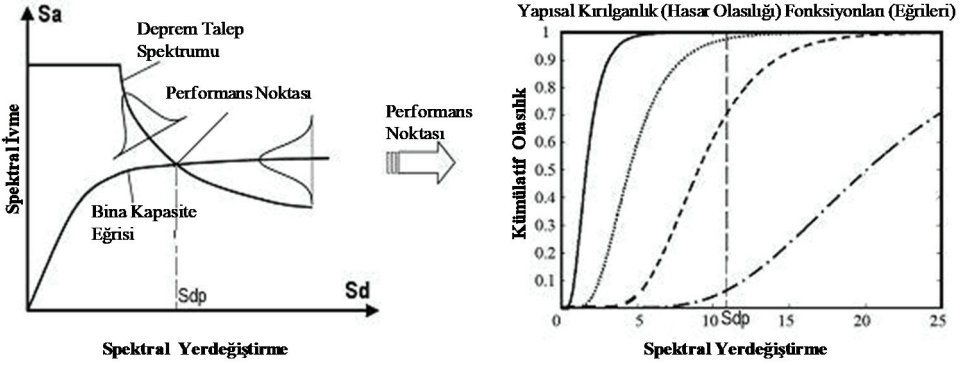
*İstanbul Olası Deprem Kayıp Tahminleri* (İBB-2009) çalışması [6] kapsamında derlenen İstanbul bina envanterinde yaklaşık 1,2 milyon bina vardır. Bu binaların %15'i (180.000 civarı) 2000 yılı ve sonrasında inşa edilmiş, 5 ve üzeri katlı, betonarme çerçeve tipi yapılardır. Bir önceki envanter ile karşılaştırıldığında, İstanbul metropolitan alan sınırlarının doğu-batı yönünde genişlediği ve, orta yükseklikteki (5 ila 8 katlı) ve yüksek (9 ila 19 katlı) bina sayılarında sırasıyla %53 ve %580 artış olduğu gözlenmektedir. Deprem kayıplarını tahmin etmeye yönelik İstanbul için gerçekleştirilen bu en son çalışmada (İBB-2009) [6], 2000-2008 yılları arasında inşa edilen binaların Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1998)'e [1] göre tasarlandıkları kabul edilmektedir. Bu durumda, söz konusu binaların 50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 olan tasarım depremi etkileri altında belli derecede hasar alarak *Can Güvenliği* performans düzeyini sağlamaları beklenebilir. Öte yandan, diğer mevcut tüm binalar gibi bu binalar için de hasar-görebilirlik/kırılma fonksiyonları ile taşıyıcı sistem kapasite eğrilerinin deprem risk analizlerinde kullanılmak üzere tanımlanmış olması gereklidir. İBB-2009 çalışmasında, 2000-2008 yıl bandındaki binalar için geçmiş analitik çalışmalara ve uzman görüşü/yorumuna dayanan yapısal kırılma fonksiyonları ile taşıyıcı sistem kapasite eğrileri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, Hancılar ve Çaktı (2015)'te [5] sunulan yapısal kırılma fonksiyonları ve kapasite eğrileri kullanılarak risk analizleri gerçekleştirilmiş, hasarlı bina sayısı dağılımları ve buna bağlı mali kayıp tahminleri hesaplanmıştır. Spektral ivme ve yerdeğiştirmeye bağlı risk analizlerinde deprem talep spektrumları, 50 yılda %10 aşılma olasılığı için Şeşetyan vd. (2016) [4] tarafından verilen deprem tehlike modeli ile elde edilen zemin bağımlı spektral ivmeler (0,2s ve 1.0s için) kullanılarak hesaplanmıştır. Analizler, aynı kuvvetli yer hareketi seviyesi için iki farklı hasar-görebilirlik modeli daha kullanılarak tekrarlanmıştır. İlk modelde İBB-2009 [6] çalışmasında kullanılan bina kapasite eğrileri ve kırılma fonksiyonları uygulanmış, diğer modelde ise benzer bina sınıfları için HAZUS-MH MR4 (2004)'de [7] verilen kapasite eğrileri ve kırılma fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Aynı deprem seviyesi altında üç hasar modelinden alınan sonuçlar hasarlı bina sayıları ve dağılımları ile yapısal hasar kaynaklı mali kayıplar cinsinden karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Spektral İvme ve Yerdeğiştirmelere Bağlı Risk Analizi

Kentsel alanda deprem risklerinin tahmininde yer sarsıntısı parametresi olarak spektral ivmeler ve yerdeğiştirmeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Spektral ivme-yerdeğiştirmeye bağlı hasar tahmin yöntemi, ABD'de geçtiğimiz yıllarda gerçekleştirilen HAZUS projesi (1999) [19] çerçevesinde modern yöntemler kullanılarak geliştirilmiştir. Yapısal hasar-görebilirliğin analitik olarak değerlendirilmesi, bina taşıyıcı sistem kapasitesinin depremin binadan talebiyle karşılaştırılarak binanın sismik performansının ortaya konmasına dayanır. Spektral ivme-yerdeğiştirmeye bağlı hasar tahmin yönteminin şematik bir gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1 - Spektral ivme ve yerdeğiştirmelere bağlı risk analiz algoritmasının grafiksel sunumu

Yöntemin ana bileşenleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Yapısal sistem sunumu: Bina Kapasite Spektrumu
- Deprem talep sunumu: Deprem Talep Spektrumu
- Yapısal davranış değerlendirmesi: Performans Noktası
- Olasılıksal hasar sunumu: Yapısal Kırılma Olasılığ/Hasar-görebilirlik Fonksiyonu

Bina taşıyıcı sistemlerinin deprem etkileri altında doğrusal olmayan muhtemel davranışları esas alınarak, her bina sınıfı için birer *Kapasite Spektrumu* ve binanın bulunduğu yer için tanımlanan ivme spektrumundan elde edilen *Deprem Talep Spektrumu* tanımlanmaktadır. *Kapasite Spektrumu* ve *Deprem Talep Spektrumu* eğrileri matematiksel olarak keşiştirilerek, binanın taşıma kapasitesine karşı gelen ve *Performans Noktası* olarak isimlendirilen spektral yerdeğiştirme değeri saptanmaktadır. Performans noktasının hesaplanmasında uluslararası alanda kabul gören ve yaygın olarak kullanılan řu üç yöntem kullanılmıştır:

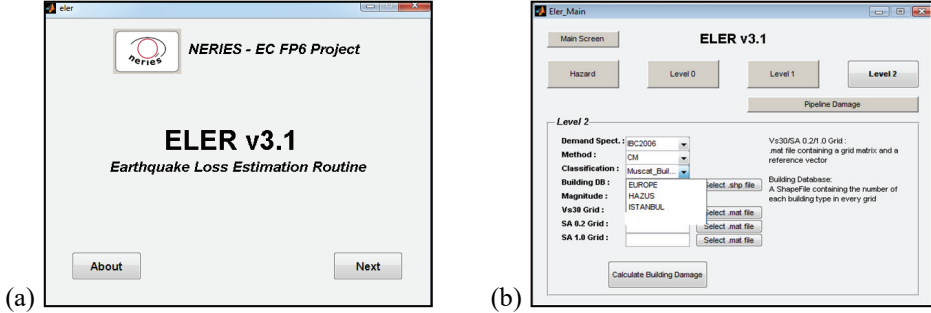
- Kapasite Spektrumu Yöntemi [20]
- Değiştirilmiş İvme-Deplasman Tepki Spektrumu Yöntemi [21]
- Katsayı Yöntemi [22]

Yukarıdaki üç yöntemden biri kullanılarak hesaplanan performans noktası, söz konusu bina sınıfı için tanımlanmış *Yapısal Kırılgenlik (Olasılıksal Hasar) Fonksiyonuna* girilerek binada oluşması beklenen hasar düzeyi olasılıksal olarak bulunur. Bina hasarları *hafif, orta, ağır ve çok ağır* olmak üzere gruplanarak hasarlı bina sayıları dağılım haritaları üretilir.

Spektral ivme ve yerdeğiştirmelere bağlı hasar değerlendirme yönteminin az, orta ve çok katlı farklı bina tiplerine uygulanabilirliği ile ilgili detaylar HAZUS (1999 ve 2004) teknik kılavuzlarında [7],[19] ve ilgili deprem mühendisliği literatüründe sunulmaktadır. Yöntemin uygulanmasında yapılan önemli varsayım; çok serbestlik dereceli binaların deprem davranışının eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem modeli ile idealize edilmesidir. Diğer taraftan, görece olarak daha yüksek olan ve daha uzun doğal titreşim periyoduna sahip binaların deprem etkileri altındaki davranışlarında üst mod katkılarının da rol oynadığı unutulmamalıdır.

## 2.2. Kullanılan Yazılım

Risk analizleri, Avrupa Birliği 6. Çerçeve Programı *NERIES* projesi kapsamında geliştirilen *ELER (Earthquake Loss Estimation Routine)* yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [2], [3], [23]. ELER, deprem kaynak parametrelerinden başlayarak önce deprem yer hareketini yerel zemin etkilerini göz önünde bulundurarak belirlemekte ve yer sarsıntısı dağılım haritalarını üretmekte, daha sonra bu yer hareketine maruz kalan bina envanteri ve altyapı sistemlerinde (içme suyu, doğal gaz, vb. boru hatları gibi) oluşacak hasarları ve dolaylı can ve mal kayıplarını ilgili kırılgenlik/hasar-görebilirlik fonksiyonlarını kullanarak tahmin etmektedir.



Şekil 2 - ELER-v3.1 Kullanıcı Arayüzü: a) Ana Ekran, b) Kentsel Deprem Kayıpları Tahmin Modülü (Level 2) Ekranı

Bölgesel ve kentsel ölçekte deprem kayıplarının gerçekçi bir şekilde tahmin edilebilmesini mümkün kılan ELER metodolojisi ve yazılım paketi, GEM (Global Earthquake Model) projesi kapsamında Pavia Üniversitesi-İtalya tarafından Los Angeles şehrinin senaryo bazlı deprem kayıplarının hesaplanmasında (2012) ve Yunanistan, Gürcistan, Ermenistan, Azerbaycan, Ürdün, Lübnan, İran, Pakistan, Abu Dhabi Emiriği ve Umman Sultanlığı'nda kentsel deprem risklerinin değerlendirilmesi uygulamalarında kullanılmıştır (2010-2014). 23 Ekim 2011 tarihinde meydana gelen Van Depremi'nden hemen sonra bölgesel ölçekte can kaybı ve yaralı sayıları ile hasarlı bina sayıları gerçeğe yakın bir şekilde ELER ile tahmin

edilebilmiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ile Boğaziçi Üniversitesi arasında imzalanan 'Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun Kapsamında Ortak Hizmet Uygulaması' başlıklı protokol çerçevesinde Türkiye genelinde kentsel dönüşüm uygulamalarına ışık tutmak üzere yüksek deprem riskine sahip bölgelerin belediyeler bazında deprem riski önceliklendirmesi yapılmış ve ayrıca seçilen üç ilde farklı senaryo depremleri sonucunda ortaya çıkması muhtemel can kaybı ve yaralı sayıları, hasarlı bina dağılımları ve yapısal hasarlardan kaynaklanan ekonomik kayıplar ELER ile hesaplanmıştır (2013-2016). ELER, en son olarak, 28 Avrupa Birliği ülkesinin deprem kayıplarının tahmin edilmesi amacıyla European Commission-Joint Research Centre ile birlikte gerçekleştirilen bir çalışmada kullanılmıştır [24].

Yazılımın Kentsel Deprem Kayıpları Tahmin Modülü, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında derlenen hücre bazlı bina envanteri ve nüfus verilerini, yerel zemin koşullarını temsilen kayma dalgası yayılım hızı ( $V_{s,30}$ ) verisini ve 0,2s ve 1s periyotları için spektral ivmelerin hücre bazlı coğrafi dağılım verisini kullanmaktadır. ELER kullanıcı arayüzüne ait görseller Şekil 2'de sunulmaktadır.

### **2.3. Mali Kayıpların Hesabı**

Yapısal hasar kaynaklı (direkt) mali kayıplar, bina inşa maliyetinin binanın hasar durumuna göre kabul edilen bir mali kayıp katılım katsayısı ile çarpılması sonucu hesaplanır. Farklı hasar seviyeleri için kabul edilen maliyete katılım katsayıları (İBB-2009) [6] çalışmasından alınmıştır (Tablo 1).

*Tablo 1 - Hasar durumuna göre mali kaybın hesabında dikkate alınan inşa maliyeti çarpanları*

<b>Hasar Durumu</b>	<b>Maliyete Katılım Katsayısı</b>
Çok Ağır	%100
Ağır	%80
Orta	%40
Hafif	%10
Hasarsız	0

Çalışmada analiz edilen bina sınıfları için ortalama inşa maliyetleri *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017 Yılı Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri* dikkate alınarak hesaplanmıştır.

## **3. BİNA ENVANTERİ VE ANALİZ GİRDİLERİ**

### **3.1. Bina Envanteri Sınıflandırması**

İstanbul bina envanterinin sınıflandırmasında dikkate alınan üç parametre:

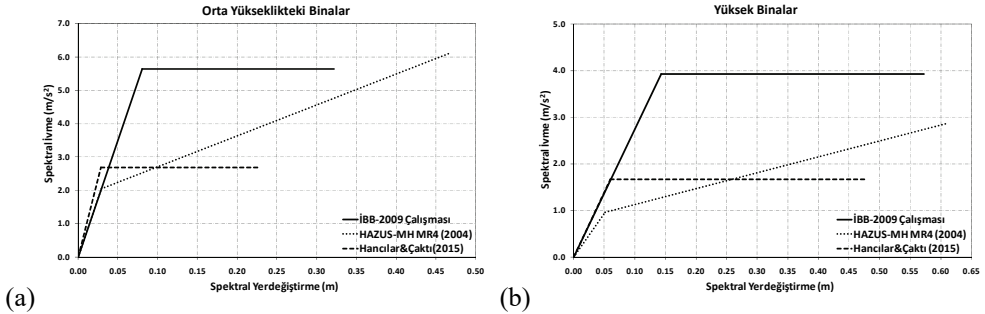
- Yatay yük taşıyıcı sistem tipi: Betonarme çerçeve; Betonarme perde duvar; Yığma; Prefabrik; Çelik.

- ii) Bina yüksekliği: Yüksek olmayan binalar (1 ila 4 katlı); Orta yükseklikteki binalar (5 ila 8 katlı); Yüksek binalar (9 ila 19 katlı).
- iii) İnşa yılı: 1979 öncesi (depreme dayanıklı tasarlanmadığı varsayılan binalar); 1980-2000 bandı (1975 yönetmeliğine göre tasarlandığı varsayılan binalar); 2000 yılı ve sonrası (1998 yönetmeliğine göre tasarlandığı varsayılan binalar).

Bu sınıflandırma sistemine göre CBS ortamında derlenerek 0,005x0,005 derecelik hücre sistemi içinde risk analizleri gerçekleştirilen, 2000 yılı ve sonrasında inşa edilmiş, betonarme çerçeve tipi orta yükseklikteki ve yüksek binaların sayıları sırasıyla 120.161 ve 60.257'dir.

### 3.2. Bina Kapasite Spektrumları (Eğrileri)

Bina kapasite spektrumu, doğrusal olmayan bina davranışı göz önünde tutularak, düşey ekseninde binaya etkileyen toplam eşdeğer deprem yükü, yatay ekseninde ise binanın karakteristik bir yerdeğiştirmesi (örneğin tepe yerdeğiştirmesi) alınarak çizilen *bina yatay yük taşıma kapasitesi eğrisinin*, yatay ekseninde *spektral yerdeğiştirme*, düşey ekseninde ise *spektral ivme* olacak biçimde dönüştürülmesi ile elde edilen bir eğri olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle, çok serbestlik dereceli bina taşıyıcı sisteminin deprem etkileri altındaki elastik ötesi (doğrusal olmayan) davranışının eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenmesi olarak ifade edilebilir. Bina kapasite spektrumunun temelini oluşturan bina yatay yük taşıma kapasitesi eğrisi, deprem mühendisliği literatüründe *İtme Analizi (Pushover Analysis)* adı verilen ve monotonik olarak arttırılan statik eşdeğer deprem yükleri altında bina taşıyıcı sistemi için yapılan doğrusal olmayan analiz sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeleri deprem yüklerinin fonksiyonu olarak gösteren eğri olarak tanımlanmaktadır. Bina yatay yük taşıma kapasitesi eğrisi, yatay yük taşıma kapasitesi düşey ekseninde, binanın tepe yerdeğiştirmesi yatay ekseninde olmak üzere çizilen egridir. İdealleştirilmiş (bi-lineer) kapasite spektrumu, bina yatay yük taşıma kapasitesi eğrisi eksenlerinin spektral ivme - yerdeğiştirme şeklinde dönüştürülmesi ile elde edilir.



Şekil 3 - Bina kapasite eğrileri: a) Orta yükseklikteki (5 ila 8 katlı) binalar, b) Yüksek binalar (9 ila 19 katlı)

Analizlerde kullanılan üç modele ait bi-lineer kapasite eğrileri Şekil 3'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Orta yükseklikteki bina sınıfı için İBB-2009 ve HAZUS-MH MR4 (2004) modelleri aynı elastik periyodu (0,75s) kullanırken Hancılar ve Çaktı (2015) modeli

kısmen daha kısa periyot (0,65s) kabul etmektedir. Yüksek bina sınıfı için ise İBB-2009 ve Hancılar ve Çaktı (2015) modelleri aynı (1,2s), HAZUS-MH MR4 (2004) modeli daha uzun (1,45s) elastik periyot kullanmaktadır. Her iki bina sınıfı için de en büyük dayanım kapasitesini İBB-2009 modeli ve en büyük elastik ötesi yerdeğiştirme kapasitesini HAZUS-MH MR4 (2004) modeli öngörmektedir.

### **3.3. Yapısal Kırılgnlık (Olasılıksal Hasar) Fonksiyonları**

Bina hasarı olasılık fonksiyonları (olasılıksal kırılgnlık fonksiyonları), binanın belirli deprem şiddeti altında tahmin edilen davranışını nitel olarak ifade eden bir deprem davranış parametresine bağlı olarak (örneğin katlar arası en büyük görelî yerdeğiştirme oranı, kat ivmeleri gibi), yapısal veya yapısal olmayan hasarların belirli hasar düzeylerine (hafif, orta, ağır, çok ağır) erişmesinin veya o düzeyleri aşmasının birikimli (kümülatif) olasılığını ifade eden fonksiyonlardır. Bina hasarı olasılık fonksiyonu X-Y düzleminde çizdirildiğinde, yatay eksenindeki değişken deprem talep parametresi (en büyük yer ivmesi, spektral yerdeğiştirme, vb.), düşey eksen ise yapısal hasarın belli bir hasar düzeyine erişmesinin veya aşmasının yığışimli olasılığını göstermektedir.

Deprem hasarlarının olasılıksal dağılımının log-normal dağılıma uyduğu varsayımı ile her bir hasar düzeyi için olasılık eğrisinin analitik ifadesi aşağıdaki biçimde yazılabilir [25], [26]:

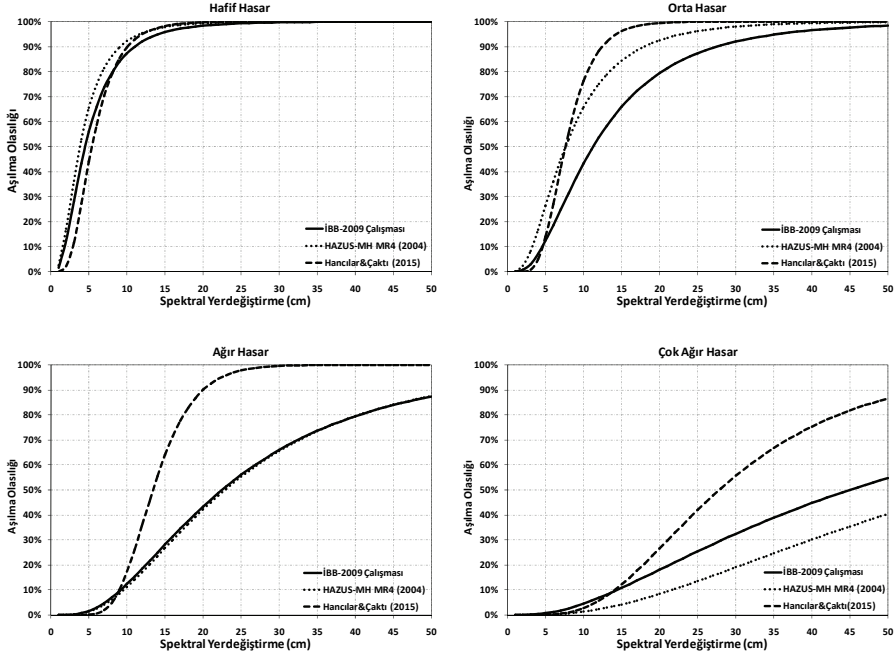
$$P \left[ \text{Hasar} \geq D_k | S_{dp} \right] = \Phi \left[ (1/\beta_k) \ln \left( S_{dp} / \bar{S}_{d,k} \right) \right] \quad (1)$$

Burada,  $D_k$ : hasar düzeyi (hafif, orta, ağır veya çok ağır);  $S_{dp}$ : performans noktası;  $\bar{S}_{d,k}$ : hasarın ilgili hasar düzeyine eriştiği duruma karşı gelen medyan spektral yerdeğiştirme değeri; ve  $\beta_k$ : ilgili hasar düzeyi için spektral yerdeğiştirme değerlerinin doğal logaritmalarına ait standart sapma; ve  $\Phi$  ise yığışimli (kümülatif) standart normal dağılım fonksiyonu olmak üzere, performans noktasının belirli bir değeri için hasarın belli bir düzeye erişme ve aşma olasılığı  $P$ 'dir. Bir log-normal yapısal kırılgnlık fonksiyonu iki parametre ile ifade edilebilir: medyan ve standart sapma. Bir hasar düzeyine erişilmesine neden olan medyan spektral yerdeğiştirme değeri,  $S_{d,k}$ , her bir bina sınıfı için belirlenmiş en büyük görelî yerdeğiştirme oranı eşik değerinin aşılmasına bağlı olarak istatistiksel analiz yoluyla hesaplanır. Bu istatistiksel modelde standart sapma  $\beta_k$  ise, ilgili hasar düzeyinin tanımındaki, binanın deprem yükü taşıma kapasitesinin tanımlanmasındaki ve oluşması muhtemel deprem yer hareketi değerinin hesaplanmasındaki belirlenmesindeki belirsizlikleri içermektedir.

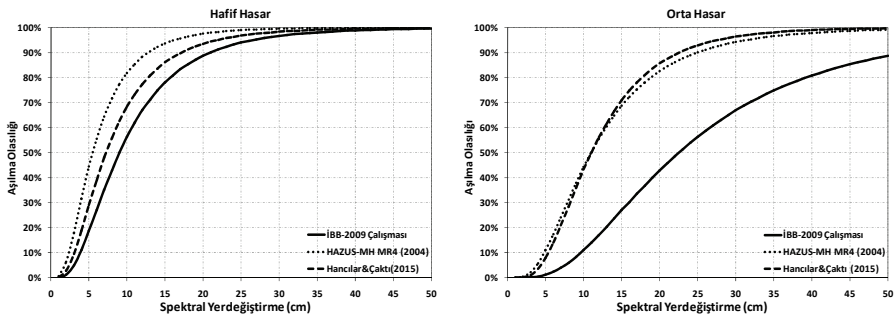
Analizlerde kullanılan üç modele ait kırılgnlık eğrileri dört farklı hasar seviyesi için (hafif, orta, ağır ve çok ağır hasar olmak üzere) Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmektedir. Hancılar ve Çaktı (2015), 34 farklı deprem sırasında alınan 734 ivme (yatay bileşen) kaydı altında, 1998 yönetmeliğine göre tasarlanmış betonarme çerçeve türü binaların doğrusal olmayan dinamik analizlerini gerçekleştirmiş ve analiz sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi sonucunda log-normal yapısal kırılgnlık fonksiyonlarını türetmişlerdir. Zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler, yayılı plastisite (distributed plasticity) yaklaşımı ve lifli kesitler (fiber sections) kullanılarak OpenSees (<http://opensees.berkeley.edu>) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. HAZUS-MH MR4 (2004) modeli için, çalışma binalarını temsilen (CIM ve CIH bina sınıflarına ait *high-code seismic design level* için verilen) ilgili parametreler



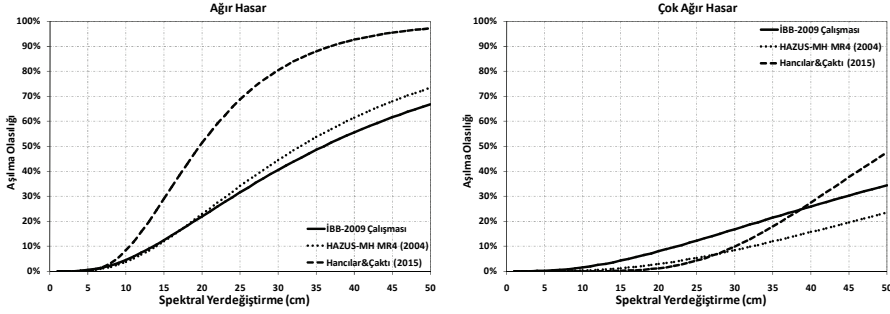
HAZUS teknik kılavuzundan alınmıştır. İBB-2009 çalışmasında ise, geçmiş analitik çalışmalar ve uzman görüşü/yorumu ışığında HAZUS'tan uyarlanan yapısal kırılmalık fonksiyonları kullanılmıştır. Sunulan üç modelde de, her bir hasar düzeyi, en büyük katlar arası görece yerdeğiştirme oranı medyan değerinin belli bir sınır değeri aşması durumu için tanımlanmaktadır. Bu sınır değerleri Tablo 2'de sunulmaktadır.



Şekil 4 - Orta yükseklikteki (5 ila 8 katlı) binalar için yapısal kırılmalık eğrileri



Şekil 5 - Yüksek (9 ila 19 katlı) binalar için yapısal kırılmalık eğrileri



*Şekil 5 - Yüksek (9 ila 19 katlı) binalar için yapısal kırılma olasılığı eğrileri (devam)*

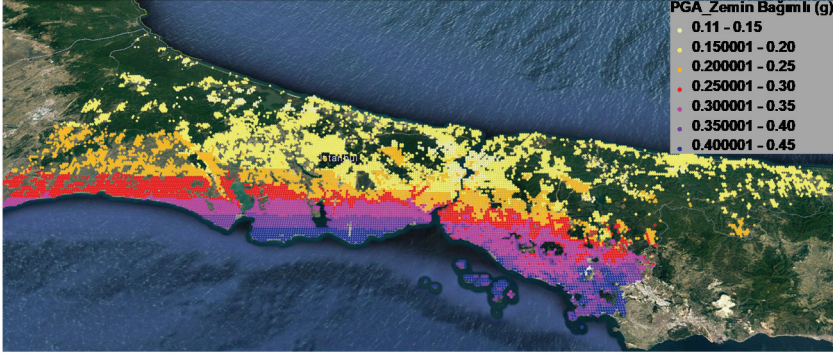
Şekillerden (Şekil 4 ve Şekil 5) gözlemlendiği üzere, spektral yerdeğiştirmenin belli bir değeri için, her üç model de *Hafif Hasar* düzeyi için birbirine yakın olasılıklar veriyor iken hasar düzeyi arttıkça modeller birbirinden farklılaşmaktadır. *Orta Hasar* düzeyi için İBB-2009 modeli diğer modellerden daha düşük hasar aşılma olasılıkları vermektedir. İBB-2009 ve HAZUS-MH MR4 (2004) modelleri *Ağır Hasar* olasılığını birbirine yakın hesaplarken Hancılar ve Çaktı (2015) modeli daha büyük olasılıklar öngörmektedir. Hem orta yükseklikteki hem de yüksek bina sınıfları için *Çok Ağır Hasar* (göçme) olasılığını HAZUS-MH MR4 (2004) modeli en düşük vermektedir.

*Tablo 2 - Hasar durumu tanımlamasında kullanılan en büyük katlar arası görelî yerdeğiştirme oranı sınır değerleri*

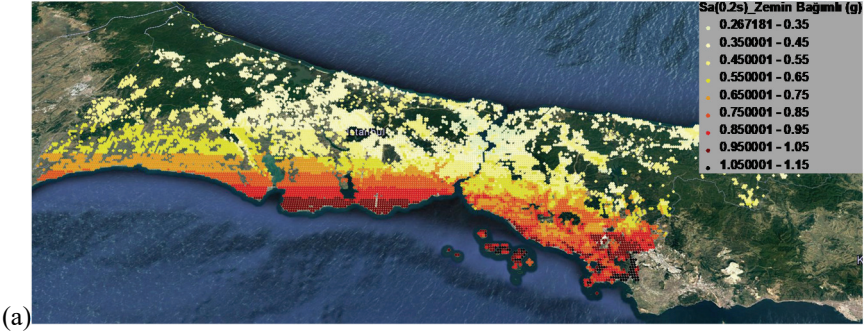
a) Orta Yükseklikteki (5 ila 8 katlı) Binalar			
Hasar Durumu	İBB-2009 Modeli	HAZUS-MH MR4 Modeli	Hancılar&Çaktı (2015) Modeli
Hafif	0.0040	0.0033	0.0033
Orta	0.0100	0.0067	0.0067
Ağır	0.0200	0.0200	0.0156
Çok Ağır	0.0400	0.0533	0.0400
b) Yüksek (9 ila 19 katlı) Binalar			
Hafif	0.0040	0.0025	0.0025
Orta	0.0100	0.0050	0.0050
Ağır	0.0160	0.0150	0.0117
Çok Ağır	0.0320	0.0400	0.0300

### 3.3. Deprem Talep Spektrumu

Deprem talep spektrumu, kuvvetli yer hareketinin %5 sönüm oranlı elastik ivme tepki spektrumunun bina taşıyıcı sisteminin elastik ötesi davranışı gözönüne alınarak yaklaşık biçimde azaltılması ile elde edilir. Çalışma alanı içindeki her bir coğrafi hücre için, %5 sönümlü tepki spektrumları Şeşetyan vd. (2016) deprem tehlike modeli ile elde edilen zemin bağımlı 0,2s ve 1s periyotlarındaki spektral ivme değerleri kullanılarak ELER yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 6 - 475 yıllık yinelenme süresi için zemin bağımlı en büyük yer ivmesi (PGA) değerlerinin dağılımı



Şekil 7 - 475 yıllık yinelenme süresi için zemin bağımlı spektral ivme değerlerinin dağılımı: a) Sa(0,2s), b) Sa(1s)

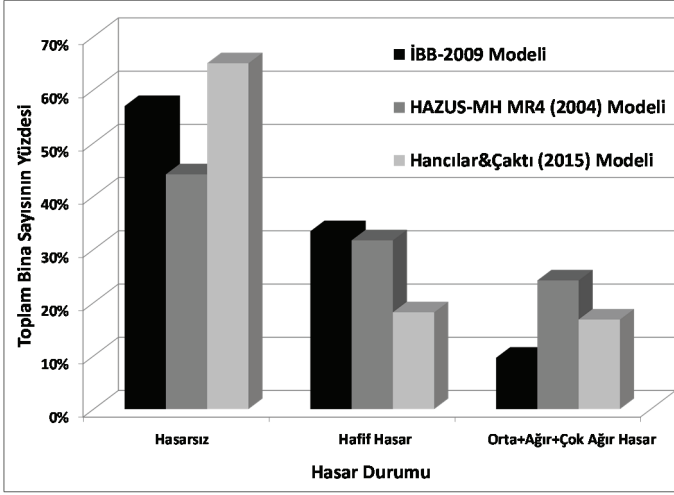
Şeşetyan vd. (2016), Türkiye deprem bölgeleri haritasının güncellenmesi çalışmaları çerçevesinde, güncel depremsellik ve fay veri tabanlarını, yeni kuvvetli yer hareketi tahmin modellerini ve alan kaynak modelleme yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri olasılıksal sismik tehlike analizleri sonucunda tüm Türkiye için mühendislik ana kayası olarak tanımlanan referans zemin koşulları için 72, 475 ve 2475 yıllık yinelenme sürelerine ait en büyük yer ivmesi ve %5 sönümlü spektral ivme değerlerini hesaplamışlardır. Bu çalışmada ise, aynı deprem tehlikesi modeli ve İstanbul ili yerel zemin koşullarını temsil eden hücre bazlı kayma dalgası yayılım hızı ( $V_{s,30}$ ) verisi kullanılarak 50 yılda %10 aşılma olasılığı altında İstanbul için zemin bağımlı en büyük yer ivmeleri (PGA) ve, 0,2s ve 1s periyotları için spektral ivmeler elde edilmiştir. Bahsedilen yer hareketi değerlerinin değişimini gösteren haritalar Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmaktadır. Buna göre, en büyük yer ivmelerinin 0,45g'ye kadar ulaşması beklenirken kısa ve 1 s periyotlu spektral ivmeler sırasıyla 1,15g ve 0,5g değerlerine kadar çıkabilmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

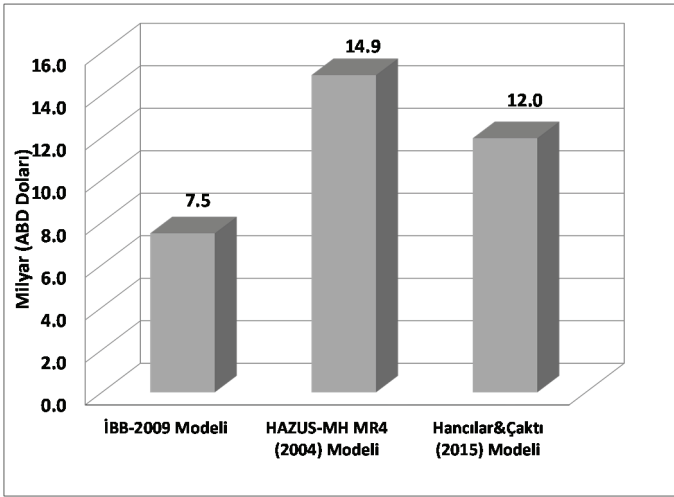
Analizler sonucunda üç modelden elde edilen hasarlı bina sayısı ve yapısal hasar kaynaklı mali kayıp tahminleri Tablo 3, Şekil 8 ve Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Orta ve üzeri hasar durumundaki bina sayısı tahminlerine bakıldığında en olumsuz tablo HAZUS-MH MR4 modelinden elde edilirken İBB-2009 modeli daha iyimser sonuçlar vermektedir. Bu durumun bir sonucu olarak, üç modelden elde edilen mali kayıp tahminlerinin de benzer biçimde sıralandığı görülebilir. Envanterdeki yaklaşık 180.000 binanın, sırasıyla İBB-2009, Hancılar ve Çaktı (2015), HAZUS-MH MR4 (2004) modellerine göre, %10, %17 ve %24'ünün orta ve üzeri hasar almasının beklendiği söylenebilir. Burada vurgulanması gereken bir konu, yer hareketi veya diğer bir ifadeyle deprem talep spektrumunun olasılıksal yöntem ile elde edilmiş olması nedeniyle, sonuç olarak sunulan hasar ve mali kayıp tahminlerinin de belirli bir anda meydana gelecek olan toplam kayıplar olmadığıdır. Bu sonuçlar, İstanbul'un farklı bölgelerinde deprem yer hareketi seviyesinin 50 yıl içinde %10 ihtimalle aşılması şartına bağlı olarak hesaplanan şartlı (conditional) hasar ve mali kayıp tahminlerini ifade etmektedir.

*Tablo 3 - Hasarlı bina sayısı tahminleri*

Hasar Durumu	İBB-2009 Modeli	HAZUS-MH MR4 Modeli	Hancılar&Çaktı (2015) Modeli
Hasarsız	102,713	79,582	117,237
Hafif	60,294	57,210	32,818
Orta	13,256	39,841	25,502
Ağır	2,619	3,445	4,651
Çok Ağır	1,538	340	211
<b>Orta+Ağır+Çok Ağır</b>	<b>17,413</b>	<b>43,626</b>	<b>30,364</b>



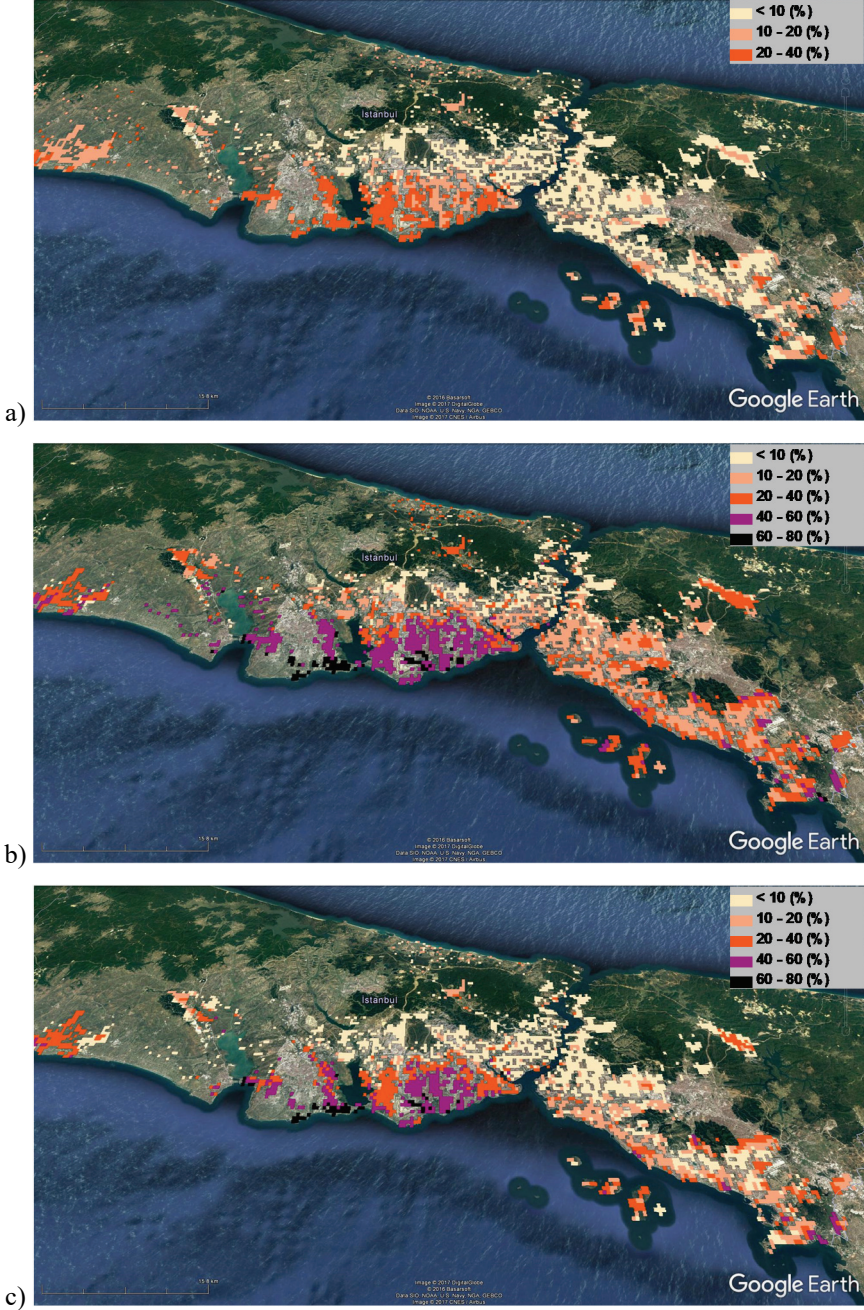
Şekil 8 - Farklı hasar durumundaki bina sayısı tahminlerinin çalışma kapsamında değerlendirilen toplam bina sayısına oranı



Şekil 9 - Yapısal hasar kaynaklı mali kayıp tahminleri

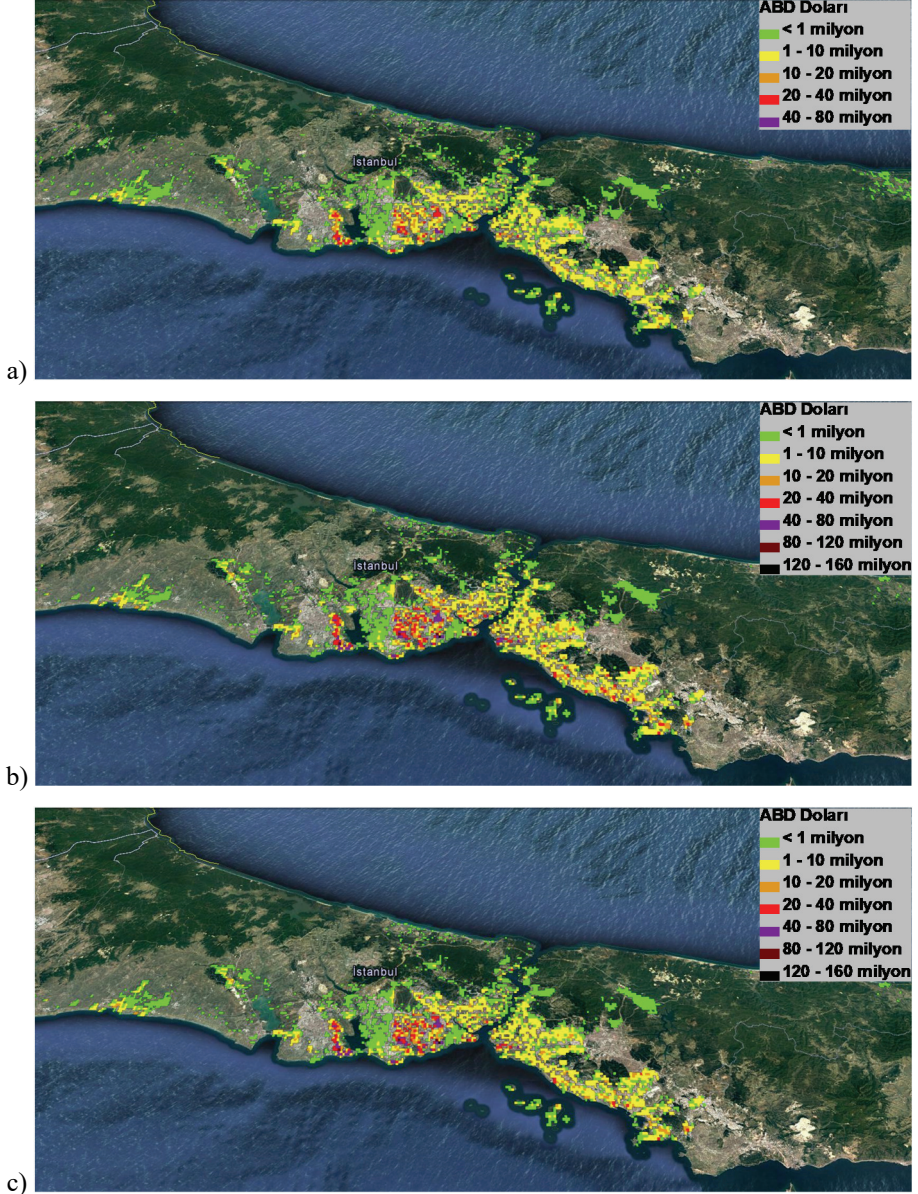
Orta ve üzeri hasar durumundaki bina sayılarının çalışma kapsamında değerlendirilen toplam bina sayısının yüzdesi cinsinden hücre bazlı dağılımları Şekil 10'da gösterilmektedir. Değerler, Hancılar ve Çaktı (2015) ve HAZUS-MH MR4 (2004) modellerine göre bazı hücrelerde %80 mertebelerine kadar çıkarken İBB-2009 modeline göre en çok %40'a ulaşmaktadır. Benzer karşılaştırmalar, Şekil 11'de sunulan mali kayıpların hücre bazlı dağılımları için de yapılabilir. Mali kayıp tahminleri orta yükseklikteki (5 ila 8 katlı) ve yüksek (9 ila 19 katlı) bina sınıfları için ortalama inşaat alanı kabul edilerek hesaplanan ve farklı modellerin sonuçlara nasıl yansıdığını göstermek üzere sunulan indikatif değerlerdir.





*Şekil 10 - Orta ve üzeri hasarlı bina sayılarının çalışma kapsamında değerlendirilen toplam bina sayısının yüzdesi cinsinden dağılımı: a) İBB-2009 modeli, b) HAZUS-MH MR4 (2004) modeli, c) Hancılar&Çakıtı (2015) modeli*

Deprem kayıp tahmin çalışmalarındaki belirsizliklerin en önemli nedenlerinden biri doğal denge içinde deprem oluşumlarının rassallığından (aleatory uncertainty) kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada sunulan tahminlerin farklılığı ise matematiksel modelleme (analitik) kaynaklı belirsizliklerin (epistemic uncertainty) bir sonucu olarak değerlendirilebilir.



Şekil 11 - Mali kayıp tahminleri dağılımı: a) İBB-2009 modeli, b) HAZUS-MH MR4 modeli, c) Hancılar&Çaktı (2015) modeli



### **Kaynaklar**

- [1] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 1998, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [2] ELER v3.1 - Earthquake Loss Estimation Routine, Technical Manual and Users Guide, Bogazici University, Department of Earthquake Engineering, İstanbul, 2010. ([http://www.koeri.boun.edu.tr/Haberler/NERIES%20ELER%20V3.1\\_6\\_176.depmuh](http://www.koeri.boun.edu.tr/Haberler/NERIES%20ELER%20V3.1_6_176.depmuh))
- [3] Hancılar, U., Tuzun, C., Yenidogan, C., Erdik, M.: ELER software - a new tool for urban earthquake loss assessment, Natural Hazards & Earth System Sciences 2010; 10: 2677-2696.
- [4] Şeşetyan, K., Demircioğlu, M.B., Duman, T.Y., Can, T., Tekin, S., Azak, T.E., Fercan, O.Z.: A probabilistic seismic hazard assessment for the Turkish territory-part I: the area source model, Bull. of Earthquake Eng., September 2016, published online.
- [5] Hancılar, U. Ve Çaktı, E.: Fragility functions for code complying RC frames via best correlated IM-EDP pairs, Bulletin of Earthquake Engineering 2015; 13(11): 3381-3400.
- [6] İBB-2009: İstanbul Olası Deprem Kayıp Tahminleri. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, Ekim 2009.
- [7] HAZUS-MH MR4: Technical Manual, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, DC, USA, 2004.
- [8] Spence R., Coburn A.W., Pomonis, A. 1992. Correlation of ground-motion with building damage: the definition of a new damage-based seismic Intensity scale. 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 551-556.
- [9] Sabetta F., Goretti A., Lucantoni A. 1998. Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground-motion. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.
- [10] Orsini G. (1999): A model for buildings' vulnerability assessment using the parameterless scale of seismic intensity (PSI). Earthquake Spectra 15(3): 463-483.
- [11] Rossetto T., Elnashai A. 2003. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. Engineering Structures 25: 1241-1263.
- [12] Colombi M., Borzi B., Crowley H., Onida M., Meroni F., Pinho R. (2008): Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data. Bulletin of Earthquake Engineering 6(3): 485-504.
- [13] Hancılar, U., Taucer F. and Corbane, C. Empirical fragility functions based on remote sensing and field data after the January 12, 2010 Haiti earthquake, Earthquake Spectra 2013; 29(4): 1275-1310.
- [14] Vacareanu R., Radoi R., Negulescu C., Aldea A. 2004. Seismic vulnerability of RC buildings in Bucharest, Romania. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.



- [15] Borzi B., Crowley H., Pinho R. 2008. The influence of infill panels on vulnerability curves for RC buildings. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [16] Erberik M.A. (2008): Fragility-based assessment of typical mid-rise and low-rise RC buildings in Turkey. *Engineering Structures* 30(5): 1360-1374.
- [17] Hancılar, U., Cakti, E., Erdik, M., Franco, G., Deodatis, G.: Earthquake vulnerability of school buildings: Probabilistic structural fragility analyses, *Soil Dynamics & Earthquake Engineering* 2014; 67: 169-178.
- [18] Hancılar, U., Safak, E. and Cakti, E.: An exercise on the derivation of fragility functions for tall buildings, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 2017.
- [19] HAZUS 99: User and technical manuals, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D.C., USA, 1999.
- [20] ATC 40: Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA, 1996.
- [21] FEMA 440: Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Federal Emergency Management Agency, Applied Technology Council, Washington D.C., USA, Rep. no.440,2005.
- [22] ASCE/SEI 41-06: Seismic rehabilitation of existing buildings, American Society of Civil Engineers, USA, 2006.
- [23] Erdik, M., Sesetyan, K., Demircioglu, M.B., Hancılar, U., Zulfikar, C., Cakti, E., Kamer, Y., Yenidogan, C., Tuzun, C., Cagnan, Z., Harmandar, E.: Rapid earthquake hazard and loss assessment for Euro-Mediterranean Region, *Acta Geophysica* 2010; 58(5): 855-892.
- [24] Corbane, C., Hancılar, U., Ehrlich, D., De Groeve, T.: Pan-European seismic risk assessment: a proof of concept using the Earthquake Loss Estimation Routine (ELER), *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017; 15(3): 1057-1083.
- [25] National Institute of Building Sciences - NIBS (1997): HAZUS: Hazards U.S.: Earthquake Loss Estimation Methodology, NIBS Document Numbers 5200-5203, Washington, D.C.
- [26] Kircher, C.A., Nassar, A.A., Kustu, O., Holmes, W.T.: Development of building damage functions for earthquake loss estimation, *Earthquake Spectra* 1997; 13(4): 663-682.

