

Betonarme Binalar İçin Artımsal İtme Analizi Esaslı Analitik Hasargörebilirlik Eğrilerinin Oluşturulması

Taner UÇAR*
Mustafa DÜZGÜN**

ÖZ

Muhtemel depremlerde binalarda oluşabilecek çeşitli hasar seviyelerinin önceden tahmin edilmesinde hasargörebilirlik eğrileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, İzmir'deki mevcut yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan ve konut amaçlı kullanılan, 3–8 katlı betonarme binalara ait mimari ve betonarme detaylar dikkate alınarak analitik hasargörebilirlik eğrileri oluşturulmuştur. Artımsal itme analizi binaların üç boyutlu hesap modelleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Binaların modal yerdeğiştirme istemi, Deprem Yönetmeliği-2007'de tanımlanan deprem düzeyleri için belirlenmiştir. Bina sınıfları için modal yerdeğiştirme cinsinden dört hasar sınırı tanımlanmıştır. Mevcut bina stokuna ait karakteristiklerinin dikkate alındığı ve iki parametrelili lognormal birikimli dağılım fonksiyonları ile ifade edilen hasargörebilirlik eğrileri sonuç ürün olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Mevcut yapı stoku, betonarme binalar, artımsal itme analizi, hasar sınırı, analitik hasargörebilirlik eğrileri

ABSTRACT

Derivation of Analytical Fragility Curves for RC Buildings Based on Nonlinear Pushover Analysis

Fragility curves are widely used in estimation of various damage states that may occur in buildings during possible earthquakes. In this study, analytical fragility curves are derived by considering architectural and structural details of three to eight story reinforced concrete buildings, which constitute the major part of the existing building stock in the city of İzmir and are used for residential purpose. Nonlinear static analyses are performed by generating 3D models of the buildings. Spectral displacement demand of the buildings is determined for different earthquake levels, which are defined in the Turkish Seismic Design Code-2007. Four limit states are defined for each building class in terms of spectral displacement. The fragility curves, which reflect general characteristics of the existing building stock and are expressed in the form of two-parameter lognormal distribution functions, are presented as an outcome.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 24.08.2011 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2013 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, İzmir - taner.ucar@deu.edu.tr

** Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - mustafa.duzgun@deu.edu.tr

Keywords: Existing building stock, reinforced concrete buildings, pushover analysis, damage limit state, analytical fragility curves

1. GİRİŞ

Büyük bölümü birinci derece deprem bölgesinde yer alan ülkemizde, özellikle son yıllarda meydana gelen şiddetli depremler, çoğunluğu betonarme binalardan oluşan mevcut yapı stokunda yeterli mühendislik hizmeti almamış ve depreme dayanıklı olmayan çok sayıda binanın çeşitli seviyelerde hasar görmesine ve/veya göçmesine neden olmuştur. Oluşan hasarın büyük kısmı binaların deprem performansı ile doğrudan ilişkili olup, depremde meydana gelen can ve mal kayıpları ile diğer ekonomik ve sosyal kayıpların da temel nedenidir. Türkiye gibi bir deprem ülkesinde, gelecekte de bu tip şiddetli depremlerin ve bunlara bağlı çeşitli hasar ve kayıpların oluşması kaçınılmazdır. Ayrıca birçok kentte yapılaşmanın giderek artması daha çok sayıda binanın deprem tehlikesine maruz kalmasına neden olmaktadır. Muhtemel depremlere hazırlık ve bu depremlerde meydana gelebilecek hasarın önceden tahmin edilmesi ve buna bağlı kayıpların azaltılmasına yönelik alınacak önlemlerin belirlenmesi bakımından, yeni yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımının yanı sıra deprem riski taşıyan bölgelerdeki mevcut bina stokunun deprem performansının ve hasargörebilirliğinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi gereklidir.

Mevcut bina stokunun ortaya çıkardığı sismik riskin belirlenmesi gelecek depremlere hazırlık bakımından acil bir konudur [1]. Kentlerin mevcut bina stoklarının deprem risklerinin önceden tahmini, gerek afet planlaması ve gerekse deprem zararlarının azaltılması konusunda yapılması gerekenlerin belirlenmesi açısından çok önemli bir rol oynamaktadır [2]. Mevcut binalarda oluşabilecek çeşitli hasar seviyeleri hakkında önceden bilgi sahibi olunması, olası ekonomik kayıplarını da güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi bakımından önemlidir. Ayrıca hasar görme olasılığı yüksek binaların belirlenmesi, bu binaların güçlendirilerek deprem performanslarının iyileştirilmesine ve böylece depreme dayanıklı binalar olarak geri kazanılmasına olanak sağlayacaktır.

Binalarda oluşabilecek hasarın önceden tahmin edilmesi ihtiyacı, deprem riski taşıyan pek çok yerleşim bölgesindeki mevcut binaların hasargörebilirliğinin belirlenmesini mühendislik çalışmalarında önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir [1–9]. Deprem mühendisliğindeki gelişmelere bağlı olarak binaların dinamik davranışlarının ve deprem performanslarının daha gerçekçi olarak belirlenebilmesi, deprem bölgelerindeki binalardaki hasar dağılımının belirlenmesine yönelik çalışmaların artmasına neden olmuştur [10–19].

Deprem afetinin etkisinin tahmini amacıyla yapılan çalışmaların iki temel bileşeni, deprem tehlikesinin tespiti ve yapı sistemlerinin hasargörebilirliğinin belirlenmesidir [3]. Hasargörebilirlik çalışmaları genellikle deprem hareketini temsil eden belli bir parametre ile yapısal hasar ilişkisini matematiksel olarak ifade etmeye yöneliktir [10]. Deprem-hasar ilişkisi çeşitli deprem parametreleri için olasılık dağılımları şeklinde verilmektedir. Bu amaca yönelik olarak en yaygın kullanılan araçlar hasar olasılık matrisleri ve hasargörebilirlik eğrileridir [5,10]. Hem deprem hareketinin, hem de yapıdaki hasar dağılımının rastsal özellikler içermesi yapısal davranışın deterministik bir yaklaşım yerine olasılıklı bir yaklaşımla ifade edilmesini gerektirmektedir [20].

Konu ile ilgili yapılan detaylı literatür araştırmalarında, hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasında genel yaklaşımın ilgili ülkenin yönetmeliklerine göre tasarlanan temsili veya gerçek birkaç düzlem çerçevelerin veya belirli bir bina sınıfını temsil ettiği kabul edilen mevcut bir veya birkaç binanın üç boyutlu dinamik analizi sonucu hasargörebilirlik eğrilerinin elde edilmesi şeklinde olduğu; ancak belirli bir bölgedeki çok sayıda farklı binaların tüm verilerini dikkate alan üç boyutlu hesap modelleri üzerinden gerçekleştirilen analizlerin çok az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, temsili veya gerçek düzlem çerçeve çözümlerinde, binaların yatay yükler altındaki davranışında önemli bir yere sahip olan bina geometrisi ve taşıyıcı elemanların plandaki yerleşiminin hasargörebilirliğe etkisinin dikkate alınmadığı belirlenmiştir. Ülkemizde deprem hasarlarının ve buna bağlı olarak oluşabilecek ekonomik kayıpların tahmin edilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, değişik ülkelerdeki binaların hasargörebilirlik bilgilerinden elde edilen verilerin ülkemizdeki bina stokuna uyarıldığı görülmektedir [1,3]. Ancak yapı stoku karakteristikleri arasındaki farklılıklar, elde edilen hasargörebilirlik eğrilerine de yansımakta ve sonuç olarak hasar ve kayıp tahminlerinde büyük yanlışmalara yol açabilmektedir [3]. Bu amaçla, ülkemiz genel ya da bölgesel yapı stoku koşullarına uygun daha gerçekçi hasargörebilirlik bilgilerine ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışmada, üç milyonun üzerinde nüfusa sahip İzmir kentinin gelecek depremlere hazırlanmasında önemli bir yere sahip olacağı düşünülen ve kentteki mevcut yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan betonarme binalara ait analitik hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada esas alınan bina verisi İzmir kentindeki bina stokunun önemli bir kısmını oluşturan ve konut amaçlı kullanılan, kat sayısı 3 ile 8 arasında değişen 30 adet gerçek betonarme binadan oluşmaktadır. Her kat sayısı için eşit sayıda (5 adet) bina dikkate alınmıştır. Çalışmada pilot bölge olarak Konak ve Karabağlar ilçeleri seçilmiştir. Hedef bina grubu olarak ise Deprem Yönetmeliği-1975'e [21] göre boyutlandırılmış ve yeni binalara göre depremde hasar görme olasılığının daha yüksek olduğu düşünülen binalar dikkate alınmıştır. Belirlenen pilot bölgelerdeki mevcut bina stokuna ait genel mühendislik uygulamalarını ve yapıım özelliklerini çalışmaya yansıtılabilmek amacıyla bölge dahilinde farklı güzergahlar belirlenerek bu güzergahlarda sokak taraması yapılmış ve analizlerde kullanılan binalar yerinde görülerek belirlenmiştir. Belirlenen binaların adres bilgileri ile belediye'deki bilgisayar programına girilerek ilgili binanın pafta, ada ve parsel numarası elde edilmiştir. Bu bilgilerle belediyenin proje arşivinden binalara ait mimari ve betonarme projeler temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan binaların artımsal itme analizleri binaların üç boyutlu hesap modelleri üzerinden SAP 2000 [22] analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Artımsal itme analizi yöntemi ile binaların modal kapasiteleri belirlenmiş ve buradan elde edilen verilere istatistiksel dağılımlar uygulanarak analitik hasargörebilirlik eğrileri elde edilmiştir. Hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasında esas alınan sınır hasar seviyeleri binaların idealleştirilmiş modal kapasite diyagramları üzerinden tanımlanmıştır. Binaların modal yerdeğiştirme istemleri, Deprem Yönetmeliği-2007'de [23] verilen üç farklı deprem düzeyi ve iki farklı yerel zemin sınıfı için hesaplanmıştır.

Oluşturulan hasargörebilirlik eğrileri iki parametrelili (ortalama ve standart sapma) lognormal birikimli dağılım fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Önceden tanımlanmış olan sınır hasar seviyesine ait modal yerdeğiştirme değerlerinin ortalaması ve lognormal dağılımına ait standart sapma değerleri kullanılarak dikkate alınan bina sınıfının farklı hasar

seviyeleri için olasılık yoğunluk fonksiyonları elde edilmiştir. Bu olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılarak deprem parametresi olarak seçilen modal yerdeğiştirmenin farklı değerleri için sınır hasar seviyelerine ulaşılması veya aşılması olasılıkları hesaplanmıştır. Modal yerdeğiştirmelerin yatay ekseninde, hesaplanan birikimli olasılıkların ise dūşey ekseninde belirtilmesiyle hasargörebilirlik eğrileri oluşturulmuştur.

2. BİNA VERİSİNİN TEMİNİ VE BİNALARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada esas alınan bina verisi İzmir kentindeki bina stokunun önemli bir kısmını oluşturan ve konut amaçlı kullanılan, kat sayısı 3 ile 8 arasında değişen 30 adet betonarme binadan oluşmaktadır. Çalışmada pilot bölge olarak Konak ve Karabağlar ilçeleri seçilmiştir. Hedef bina grubu olarak ise Deprem Yönetmeliği-1975'e [21] göre boyutlandırılmış betonarme binalar dikkate alınmıştır. Söz konusu binaların 1998 ve 2007 yıllarında yürürlüğe giren deprem yönetmeliklerine göre boyutlandırılmış binalara oranla depremde hasar görme olasılığının daha yüksek olduğu düşünölmektedir.

Çalışmada kullanılan ve yukarıda belirtilen özelliklere sahip binalar belirlenen pilot bölge sınırları dahilinde, pilot bölgeyi oldukça iyi temsil ettiği kabul edilebilecek dört farklı güzergah üzerinden seçilmiştir. İlgili belediye tarafından sağlanan araçla, belediyede görevli bir inşaat yüksek mühendisini ile birlikte seçilen güzergahlarda binaların belirlenmesi amacıyla sokak taraması geręekleştirilmiřtir. Sokak taramasında mümkün mertebe o civardaki binaları temsil edebilecek binalar seçilmeye dikkat edilmiştir. Ayrıca binalar söz konusu güzergahların birbirinden farklı sokaklarından belirlenmiştir. Bu şekilde pilot bölgedeki mevcut bina stokuna ait genel mühendislik uygulamaları ve yapım özellikleri çalışmaya yansıtılmıştır.

Seçilen binaların adres bilgileri elde edildikten sonra bu bilgiler belediyedeki bilgisayar programına girilerek ilgili binanın pafta, ada ve parsel numarası belirlenmiştir. Bu bilgilerle belediyenin proje arşivinden binalara ait mimari ve betonarme projeler elde edilmiştir. Sokak taramasında öncelikle değişik kat sayısına sahip çok sayıda bina belirlenmiştir. Benzer proje ve yapım özelliklerine sahip binalar arasından seçim yapılarak, belediye arşivinde projeleri bulunan 3-4-5-6-7-8 katlı olmak üzere her birinden 5'erli set halinde toplam 30 adet bina belirlenmiştir. 3-4-5-6 katlı binaların taşıyıcı sistemi çerçivedir. 7-8 katlı binalar ise perde-çerçeve sistemli binalardır. Projesi temin edilen 30 adet binanın geometrisini ve taşıyıcı elemanların yerleşimini gösteren kat kalıp planları, binaların projelerinde belirtilen veriler ve gereğinde yerinde yapılan incelemeler esas alınarak yeniden oluşturulmuştur. Dikkate alınan binalara ait genel özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de kullanılan bina kodlarında ilk rakam kat sayısını, ikinci rakam ise bina numarasını belirtmektedir. Kullanılan binaların geometri ve malzeme özellikleri ile betonarme detaylarının mevcut projeye tamamen uyduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla binaların tablodaki yapım yılı, oturma alanı, toplam yüksekliği ve malzeme özellikleri, binaların projelerinde belirtilen değerlerdir. Binaların taşıyıcı elemanlarının kesit boyutları, kesitlerdeki mevcut enine ve boyuna donatıların konum, miktar ve aralıkları binaların betonarme projelerinden çıkartılmıştır. Böylece İzmir kenti genelindeki mühendislik bilgi birikimi ve uygulama özelliklerini taşıyan 30 adet binadan oluşan önemli bir veri bankası oluşturulmuştur.

Tablo 1. Binaların genel özellikleri

Kat Sayısı	Bina Kodu	Yapım Yılı	Bina Oturma Alanı (m ²)	Toplam Bina Yüksekliği (m)	Malzeme
3	B3_1	1983	109.9	8.64	C14-S220
	B3_2	1990	177.8	8.50	C14-S220
	B3_3	1992	106.7	8.40	C16-S220
	B3_4	1995	184.0	8.40	C14-S220
	B3_5	1996	215.1	9.30	C14-S220
4	B4_1	1975	132.6	11.10	C14-S220
	B4_2	1981	163.1	11.70	C14-S220
	B4_3	1982	150.5	11.70	C14-S220
	B4_4	1984	252.3	11.40	C14-S220
	B4_5	1997	73.2	10.80	C16-S220
5	B5_1	1985	170.0	14.00	C16-S220
	B5_2	1989	199.4	14.30	C16-S220
	B5_3	1991	51.0	13.90	C14-S220
	B5_4	1991	169.4	13.50	C16-S220
	B5_5	1997	70.0	13.80	C14-S220
6	B6_1	1976	125.6	16.80	C14-S220
	B6_2	1985	112.5	15.80	C16-S220
	B6_3	1986	285.0	16.80	C14-S220
	B6_4	1995	260.0	16.30	C14-S220
	B6_5	1997	255.2	16.20	C18-S420
7	B7_1	1976	101.5	19.10	C16-S220
	B7_2	1977	177.9	18.55	C18-S220
	B7_3	1978	137.0	18.76	C18-S220
	B7_4	1994	314.3	18.90	C20-S420
	B7_5	1994	431.5	18.90	C20-S420
8	B8_1	1976	181.3	21.85	C18-S420
	B8_2	1978	140.8	21.75	C18-S420
	B8_3	1982	264.8	22.60	C14-S220
	B8_4	1982	322.0	21.80	C14-S220
	B8_5	1983	260.0	22.90	C18-S220

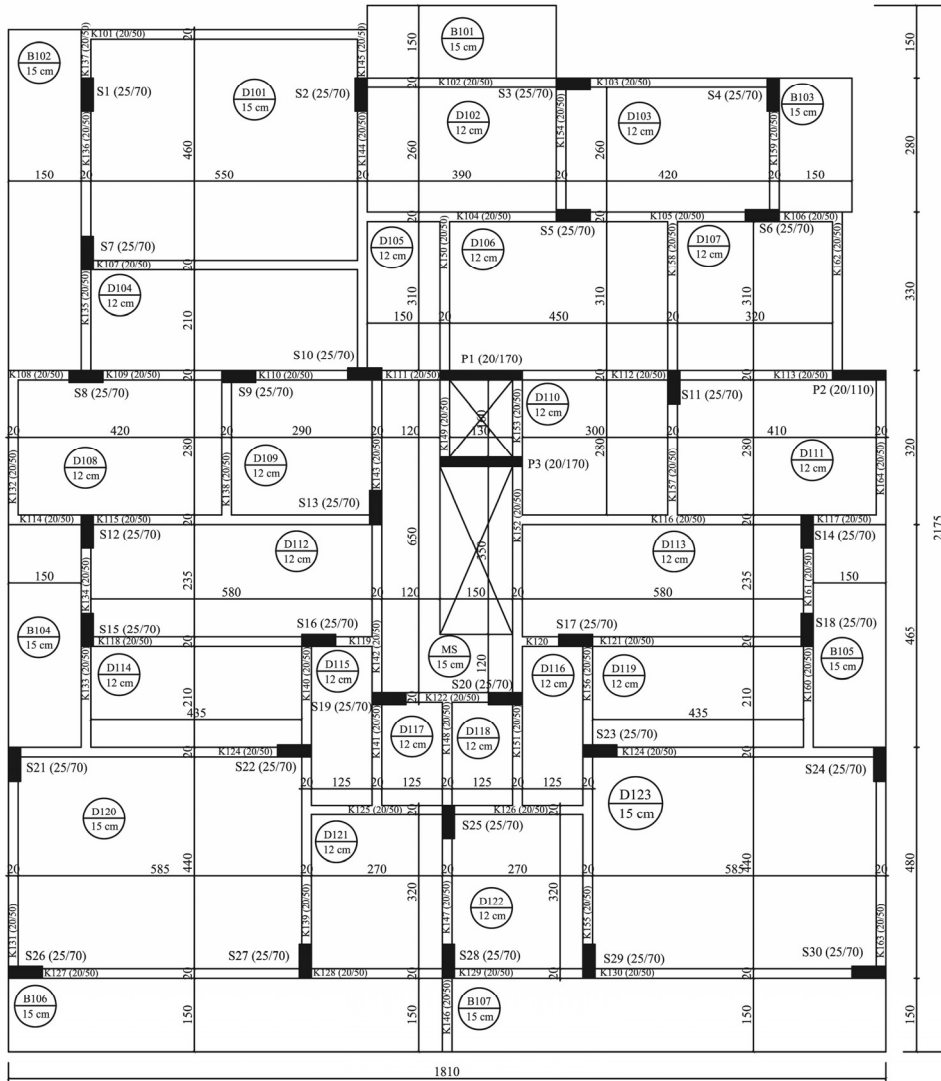
Çalışmada kullanılan 30 adet binada ve incelenen diğer projelerde öne çıkan bazı ortak özellikler, bu bölgedeki yapı karakteristیکlerini yansıtmaktadır. Bölgedeki 3-5 katlı binalar monolitik kiriş-kolon birleşimli çerçeve sistemli binalardır ve kat sayısı 6'dan az olan binalarda perde-çerçeve sistemin kullanımına rastlanmamıştır. Çerçeve sistemli 6-8 katlı binalar da bulunmakla birlikte, bu binalarda perde-çerçeve sistemin kullanımı yaygın olarak göze çarpmaktadır. Kolon enkesiti etkin gövde alanları toplamının binanın plan alanına oranı birbirine dik yatay doğrultuların birisi için çalışmada kullanılan 3-4 katlı binalarda 0.00409-0.01846 arasında, 5-6 katlı binalarda ise 0.00519-0.02118 arasında değişmektedir. Aynı oranın diğer yatay doğrultu için değişim aralığı ise 3-4 katlı binalarda 0.00613-0.01297, 5-6 katlı binalarda 0.00676-0.02'dir. 7-8 katlı binalarda, kolonlarla birlikte perde enkesit alanları toplamının binanın plan alanına oranının değişim aralığı birbirine dik yatay doğrultuların birisi için 0.00766-0.01119, diğeri için ise 0.00891-0.02505'dir. 7-8 katlı binalarda, perde enkesit alanlarının binanın plan alanı oranına değişim aralığı birbirine dik yatay doğrultuların birisi için 0-0.00815, diğer doğrultu için ise 0-0.00092'dir. Binaların tasarımında dikkate alınan hareketli yük miktarları 2 kN/m², 3.5 kN/m² ve 5 kN/m²'dir. Tipik kat yükseklikleri olarak ise 2.65 m, 2.70 m ve 2.80 m değerleri ön plana çıkmaktadır. Birinci katı ticari amaçla kullanılan binalarda bu katın yüksekliğinin 3.9 m'ye kadar yapıldığı gözlenmiştir. Yaygın olarak kullanılan döşeme kalınlıkları 10 cm, 12 cm ve 15 cm'dir. Bununla birlikte 13 cm ve 14 cm kalınlıktaki döşemelere de rastlanmaktadır. Söz konusu yıllarda yapılan binalarda en yaygın olarak kullanılan kiriş kesit boyutları 20/50 cm olmakla birlikte 25/50 cm'lik kirişlerin kullanımı da görülmektedir. Yüksekliği 55 cm ve 60 cm olan kirişlerde ise genellikle gövde donatısı kullanılmıştır. Kiriş ve kolon orta bölgelerinde tipik olarak iki kollu $\phi 8/20$ cm etriye kullanılmaktadır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ise aynı etriye 10 cm aralıkla uygulanmaktadır. Zemin katı ticari amaçla kullanılan bazı binaların zemin katlarında yatık kiriş uygulamasına da rastlanmaktadır. 3-5 katlı binalarda tekil temel, sürekli temel ve her iki temel tipinin birlikte kullanımı yaygındır. 6 ve daha çok katlı binalarda tekil temelin tek başına kullanımı görülmemiştir. 6 katlı binalarda genellikle sürekli temel uygulaması yapılırken, 7 ve 8 katlı binalarda kirişli radye de sıkça uygulanmaktadır. Şekil 1'de bu çalışmada kullanılan binalardan B7_4'ün kalıp planı verilmiştir.

3. BİNALARIN ARTIMSAL İTME ANALİZİ

Artımsal itme analizi, binalara ait kalıp planları esas alınarak oluşturulan üç boyutlu hesap modelleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Binaların tasarımında esas alınan malzeme özellikleri ile kiriş, kolon ve perde elemanlara ait enine ve boyuna donatı miktarları ve detayları binaların betonarme projelerinden elde edilmiştir. Binaların kat döşemeleri rijit diyafram olarak idealleştirilmiştir ve yüzeysel eleman olarak modellenmiştir. Değerlendirilen binalarda bulunan perde elemanlar kendileriyle aynı enkesit özelliklerine sahip eşdeğer kolon olarak modellenmiş ve perdelerin eğilme etkisi altındaki davranışlarının tam olarak elde edilebilmesi için rijit kiriş kullanılmıştır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamış, zemin kat kolon ve perdelerinin alt uçları tam ankastre kabul edilmiştir.

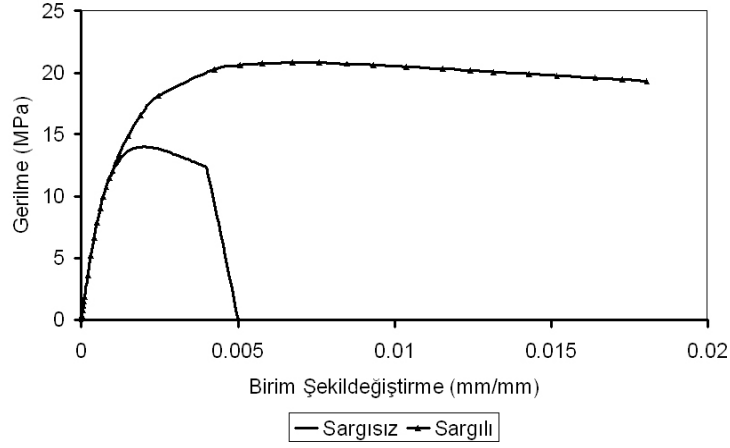
İç ve dış duvarların konumları binaların mimari projelerinde belirtildiği şekilde alınmıştır. Binaların dış kirişleri üzerinde 3.80 kN/m² duvar yükü (20 cm tuğla + sıva), iç kirişleri üzerinde ise 2.50 kN/m² duvar yükü (10 cm tuğla + sıva) kabul edilmiştir [24]. Döşemeler

üzerinde ise 1.50 kN/m^2 yük (sıva + kaplama) esas alınmıştır [24]. Dinamik serbestlik derecesi olarak her katın kütle merkezindeki birbirine dik iki yatay ötelenme ile kütle merkezinden geçen eksen etrafındaki dönme göz önüne ve kat kütleleri düşey yüklerle uyumlu olarak belirlenmiştir ($G + 0.3Q$). Eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitlikleri (EI)_e için Deprem Yönetmeliği-2007’de verilen değerler dikkate alınmıştır [23]. Kirişlerde eksenel yükün sıfır olduğu kabul edilmiştir. Kolon ve perde elemanlarda ise eksenel yük (N_D) çatlamamış kesitlere ait (EI)_o eğilme rijitliklerinin kullanıldığı bir ön düşey yük hesabı ($G + 0.3Q$) ile belirlenmiştir.



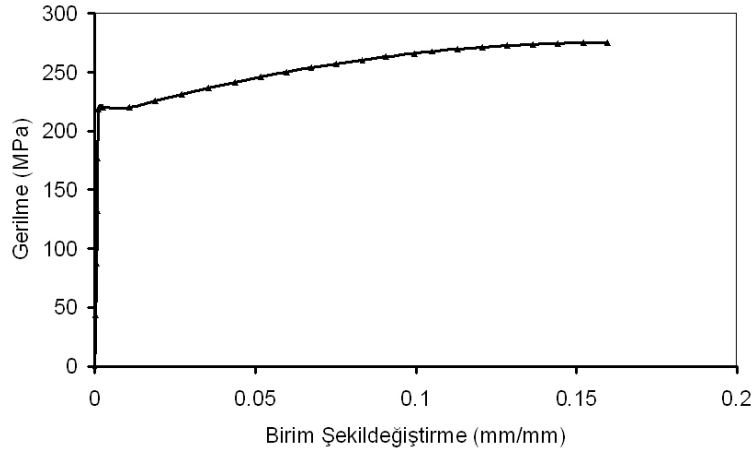
Şekil 1. B7_4'ün kat kalıp planı

Kiriş, kolon ve perde kesitlerinin doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde sargılı ve sargısız beton için Mander tarafından önerilen gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları kullanılmıştır [25]. C14 beton sınıfı için sargısız ve sargılı Mander beton modeline ait gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkileri dikkate alınarak oluşturulan gerilme-birim şekildeğiştirme eğrileri Şekil 2’de sunulmuştur. Kullanılan kesit 20/50 cm boyutlarında olup enine donatısı çift kollu $\phi 8/10$ cm etriyedir.



Şekil 2. Sargısız ve sargılı Mander beton modeline ait σ - ϵ ilişkileri

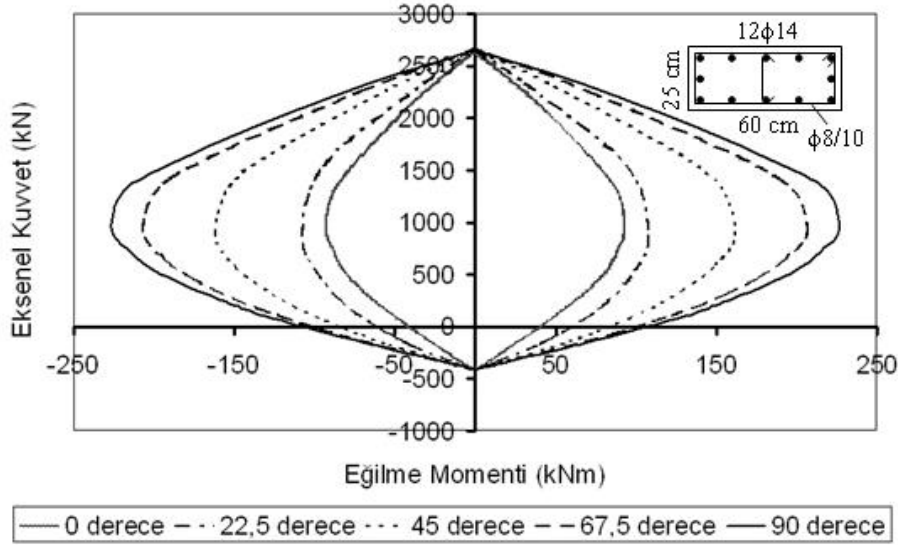
Donatı çeliği için kullanılan gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları ise Deprem Yönetmeliği-2007’deki gibi alınmıştır [23]. Şekil 3’de S220 donatı çeliğine ait gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 3. S220 donatı çeliğine ait σ - ϵ eğrisi

Artımsal itme analizinde plastik mafsal tanımlanacak kesitlerin doğrusal olmayan davranışının tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla plastikleşme ihtimali bulunan bütün kesitlerin iç kuvvet-plastik şekildeğiştirme bağıntıları XTRACT [26] programı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kiriş, kolon ve perde kesitlerinin doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde yaklaşık 17500 adet kesit analizi gerçekleştirilmiştir.

Malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışın idealleştirilmesinde yığılı plastik davranış modeli esas alınmıştır [23]. Plastik şekildeğiştirme bölgesinin boyu (L_p) çalışan doğrultudaki kesit boyutunun (h) yarısı olarak alınmıştır [23]. Plastik kesitlere ait iç kuvvet-plastik şekildeğiştirme bağıntıları, plastik dönme artışına bağlı olarak plastik eğilme momentinin artışı (pekleşme etkisi) de dikkate alınarak belirlenmiştir. Kolonlar için etkileşim diyagramları (akma yüzeyleri) üç boyutlu olarak oluşturulmuştur [24]. Bunun için XTRACT [26] programı kullanılarak kesitin yatay ekseninde (0°) ve yatay eksene göre 22.5° , 45° , 67.5° ve 90° (düşey eksen) açı yapan eksenlerde etkileşim diyagramları analizi yapılmıştır. Bu diyagramlar doğrusallaştırılarak analizin yapıldığı SAP 2000 [22] bilgisayar programına girilmiştir. Şekil 4’de C14/S220 malzemesi ile yapılmış bir kolona ait etkileşim diyagramları görülmektedir.



Şekil 4. Yatay ekseninde (0°) ve yataya göre 22.5° , 45° , 67.5° ve 90° (düşey eksen) açı yapan eksenlerde etkileşim diyagramları

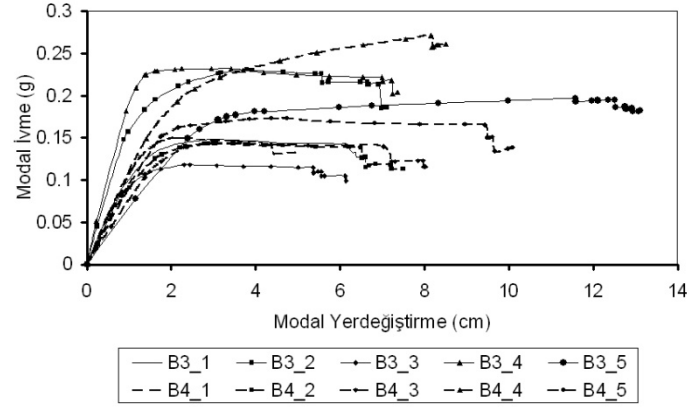
Kesitlerin kesme dayanımı, betonun ve kesme donatısının (etriyenin) katkısı dikkate alınarak TS 500’e [27] göre hesaplanmış ve kesme mafsalı tanımlanmıştır. Kesme mafsalları, kesit kesme kapasitesine ulaşır ulaşmaz göçme gerçekleşecek şekilde modellenmiştir. Bu tip mafsallarda herhangi bir plastik şekildeğiştirme söz konusu değildir.

Tanımlanan plastik mafsallar kolon ve kirişlerin net açıklıklarının uçlarına konulmuştur. Yatay yük altındaki perde türünden taşıyıcı sistem elemanlarda ise kritik kesit mesnet olup, bir tanedir [28].

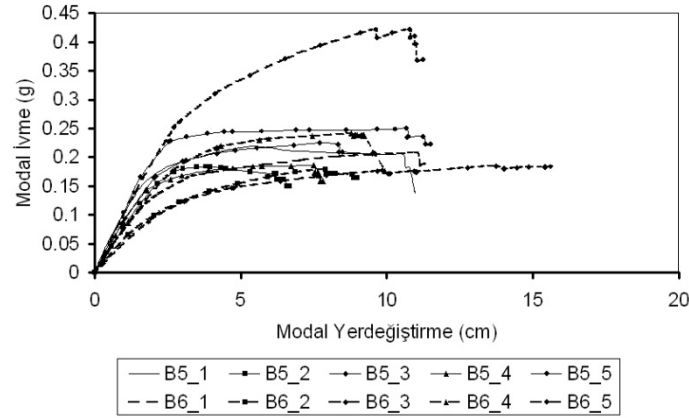
Artımsal itme analizlerinde, binaların birinci titreşim moduna ait etkin kütle oranları dikkate alınarak iki farklı yatay yük dağılımı kullanılmıştır. Buna göre birinci titreşim moduna ait etkin kütle oranı %70'in üzerinde kalan binaların artımsal itme analizinde göz önüne alınan deprem doğrultusundaki hakim doğal titreşim mod şekli genliği ile orantılı yatay yük dağılımı kullanılmıştır. Genel olarak birinci mod etkilerinin hakim olduğu düzgün yapılarda, yatay yük dağılımı bu mod şekline benzer bir dağılım olarak seçilebilmektedir. Yüksek mod etkilerinin önemli olabileceği yapılarda ise artımsal itme analizde kullanılacak yatay yük dağılımları, yüksek modların katılımını da içermelidir. Bu nedenle birinci titreşim moduna ait etkin kütle oranı %70'in altında kalan binaların artımsal itme analizinde yüksek modların katkılarını da dikkate alabilmek amacıyla üniform yatay yük dağılımı uygulanmıştır [29, 30].

Açıklanan kabuller altında binaların ilgili deprem doğrultusundaki itme eğrileri elde edilmiş ve itme eğrileri modal kapasite diyagramına dönüştürülmüştür. Çalışma kapsamında dikkate alınan tüm binaların artımsal itme analizleri SAP 2000 [22] bilgisayar programında binaların üç boyutlu hesap modelleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hasargörebilirlik eğrileri oluşturulan bina sınıfları için sınır hasar seviyelerinin belirlenmesinde esas alınan modal kapasite diyagramları 3-4 katlı binalar için Şekil 5'de, 5-6 katlı binalar için Şekil 6'da ve 7-8 katlı binalar için Şekil 7'de verilmiştir.

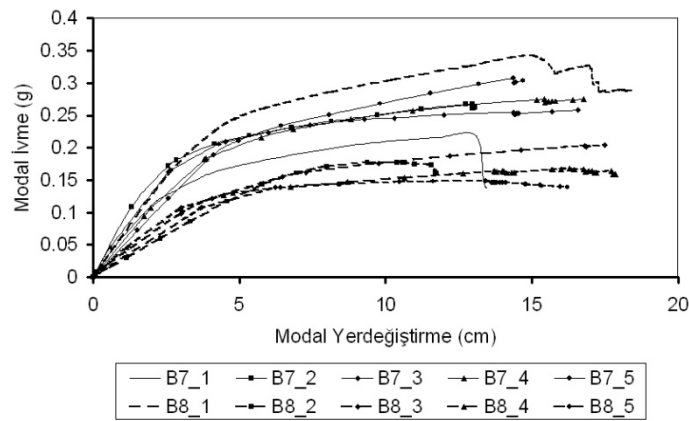
Çalışmada kullanılan binaların itme eğrileri değerlendirilerek mevcut bina stokunun genel karakteristikleri yansıtan önemli sonuçlar elde edilmiştir. Hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasında esas alınan itme eğrilerinin önemli parametreleri ve bunlara ait istatistikler Tablo 2'de verilmiştir. Binanın tepe noktasının en büyük yatay yerdeğiştirmesinin (δ_u) toplam bina yüksekliğine (H) oranı olarak hesaplanan bina yatay yerdeğiştirme kapasitesi tüm binalar için yaklaşık olarak %1 civarındadır. %2 oranı [11] ile kıyaslandığında söz konusu binaların yerdeğiştirme kapasitelerinin oldukça düşük olduğu söylenebilir. Binaların yatay yerdeğiştirme cinsinden süneklik kapasiteleri hesaplandığında ($\mu=\delta_u/\delta_y$), çerçeve sistemli binalar için bu değere ait ortalamanın 3.78; perde-çerçeve sistemli binalar için ise 3.28 olduğu görülmektedir. Burada δ_y , iki doğru parçası ile idealleştirilen itme eğrisinde, iki doğru parçasının kesiştiği noktadaki tepe noktası yerdeğiştirmesidir. Hesaplanan bu değerler, değerlendirilen binaların süneklik kapasitelerinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı, süneklik düzeyi yüksek olarak projelendirilen binalar için beklenen yerdeğiştirme sünekliği $\mu=5.333$ olarak hesaplanmaktadır. Süneklik düzeyi yüksek perde-çerçeve sistemler için ise $\mu=4.667$ gibi bir yerdeğiştirme sünekliği hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesabında dayanım fazlalığı katsayısı Deprem Yönetmeliği-2007'de belirtildiği gibi $D=1.5$ olarak alınmıştır [23].



Şekil 5. 3-4 katlı binaların modal kapasite diyagramları



Şekil 6. 5-6 katlı binaların modal kapasite diyagramları



Şekil 7. 7-8 katlı binaların modal kapasite diyagramları

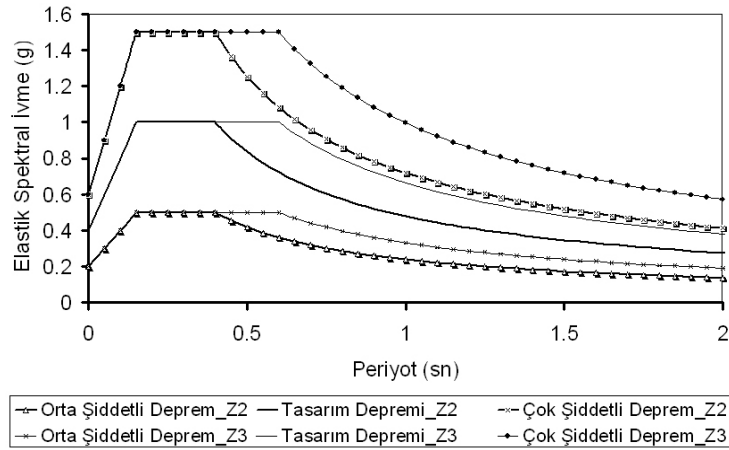
Tablo 2. Binaların itme eğrilerinin çeşitli parametrelere ait istatistikler

Bina Kodu	V_y/W	δ_y/H	δ_u/H	δ_u/δ_y
B3_1	0.13221	0.002281	0.008533	3.74090
B3_2	0.20446	0.002090	0.009904	4.73876
B3_3	0.10866	0.001556	0.007447	4.78599
B3_4	0.20807	0.002092	0.010458	4.99904
B3_5	0.17028	0.004234	0.015842	3.74162
Ortalama	0.16474	0.002451	0.010437	4.40126
B4_1	0.13155	0.001337	0.004342	3.24757
B4_2	0.12447	0.001636	0.006549	4.00306
B4_3	0.12909	0.002168	0.007273	3.35470
B4_4	0.19038	0.002837	0.010110	3.56362
B4_5	0.15122	0.002612	0.010645	4.07542
Ortalama	0.14534	0.002118	0.007784	3.64887
B5_1	0.17798	0.002336	0.009652	4.13185
B5_2	0.14381	0.002851	0.006594	2.31287
B5_3	0.17993	0.002632	0.008759	3.32789
B5_4	0.14849	0.002204	0.007205	3.26906
B5_5	0.20484	0.002590	0.010188	3.93359
Ortalama	0.17101	0.002523	0.008480	3.39505
B6_1	0.14463	0.002562	0.009152	3.57221
B6_2	0.10764	0.002028	0.006716	3.31164
B6_3	0.12464	0.002745	0.011270	4.10565
B6_4	0.17226	0.001730	0.004194	2.42428
B6_5	0.27146	0.002667	0.008323	3.12073
Ortalama	0.16413	0.002346	0.007931	3.30690
B7_1	0.14933	0.002709	0.009237	3.40975
B7_2	0.15967	0.001875	0.009336	4.97920
B7_3	0.17911	0.002264	0.010966	4.84364
B7_4	0.18546	0.003481	0.011608	3.33467
B7_5	0.19136	0.004023	0.010741	2.66990
Ortalama	0.17299	0.002870	0.010378	3.84743
B8_1	0.23003	0.002569	0.009793	3.81199
B8_2	0.12171	0.004684	0.008974	1.91588
B8_3	0.13461	0.003800	0.010859	2.85763
B8_4	0.11246	0.002184	0.010220	4.67949
B8_5	0.11689	0.001579	0.006503	4.11843
Ortalama	0.14314	0.002963	0.009270	3.47668

Dayanım açısından kıyaslama yapabilmek amacıyla da iki doğru parçası ile idealleştirilen itme eğrisinde, doğru parçalarının kesişim noktasındaki taban kesme kuvvetinin (V_y) toplam bina ağırlığına (W) oranı şeklinde belirlenen taban kesme kuvveti katsayısı tüm binalar için hesaplanmış ve sonuçları yine Tablo 2’de sunulmuştur. Deprem Yönetmeliği–1975 koşullarına göre boyutlandırılan bu binalar için hesaplanan taban kesme kuvveti katsayıları yönetmelikteki sınır değerleri ile kıyaslandığı vakit, binaların taban kesme kuvveti kapasitelerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Söz konusu binaların bir kısmı Deprem Yönetmeliği–1998 gereksinimlerini dahi sağlamaktadır. Bu sonuçlar dikkate alındığında, Deprem Yönetmeliği-1975’e uygun olarak boyutlandırılan bu binaların yatay yük kapasitelerinin yüksek olmasına rağmen yatay yerdeğiştirme ve süneklik kapasitelerinin düşük olduğu görülmektedir. Bu tip binalarda hasarın dayanım bakımından değil, yerdeğiştirmeye bağlı olarak ortaya çıkması beklenmektedir.

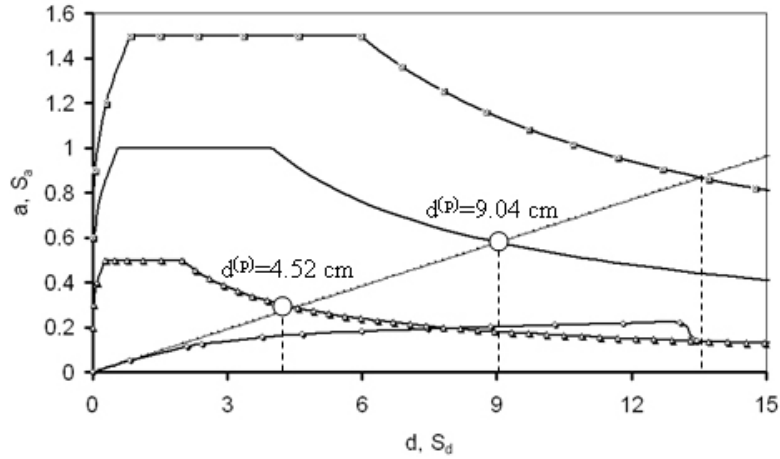
3.1 Binaların Modal Yerdeğiştirme İsteminin Belirlenmesi

Binaların modal yerdeğiştirme isteminin hesaplanmasında, Deprem Yönetmeliği-2007’de bina önem katsayısı $I=1$ olan binalar için 50 yıllık bir süre içinde farklı aşılma olasılıklarına sahip üç farklı deprem düzeyi dikkate alınmıştır. Şiddetli depreme karşılık gelen Tasarım Depremi’nin 50 yılda aşılma olasılığı %10’dur. Çalışma kapsamında, 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan deprem Orta Şiddetli Deprem olarak tanımlanmış ve bu depreme ait ivme spektrumunun ordinatları, Tasarım Depremi’ne ait spektrumun ordinatlarının yarısı olarak hesaplanmıştır. 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem ise Çok Şiddetli Deprem olarak tanımlanmış ve bu depremin ivme spektrumunun ordinatları, Tasarım Depremi’ne ait spektrumun ordinatlarının 1.5 katı olarak kabul edilmiştir [23]. Z2 ve Z3 yerel zemin sınıfları için üç farklı deprem düzeyine ait elastik ivme spektrumları Şekil 8’de gösterilmiştir. Elastik spektral ivme $S_{ac}(T)$ ’nin hesaplanmasında, etkin yer ivmesi katsayısı $A_0=0.40$ alınmıştır.



Şekil 8. Farklı deprem düzeyleri ve yerel zemin sınıfları için elastik ivme spektrumları

Oluşturulan elastik ivme spektrumları, binalara ait modal kapasite diyagramları ile birlikte kullanılarak binaların modal yerdeğiştirme istemleri, Deprem Yönetmeliği-2007'de açıklandığı gibi hesaplanmıştır [23]. Şekil 9'da Z2 yerel zemin sınıfı ve üç farklı deprem düzeyi için B7_1'nin modal yerdeğiştirme isteminin belirlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 9. B7_1'in modal yerdeğiştirme isteminin belirlenmesi

Tüm binaların iki farklı zemin sınıfı ve üç farklı deprem düzeyi için hesaplanan modal yerdeğiştirme istemleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Farklı deprem düzeyleri ve yerel zemin sınıfları için binaların modal yerdeğiştirme istemleri

Bina	Z2 Zemin Sınıfı			Z3 Zemin Sınıfı		
	Orta Şiddetli Deprem	Tasarım Depremi	Çok Şiddetli Deprem	Orta Şiddetli Deprem	Tasarım Depremi	Çok Şiddetli Deprem
	$d^{(p)}$ (cm)	$d^{(p)}$ (cm)	$d^{(p)}$ (cm)	$d^{(p)}$ (cm)	$d^{(p)}$ (cm)	$d^{(p)}$ (cm)
B3_1	2.947	5.970	Bulunamadı	4.057	Bulunamadı	Bulunamadı
B3_2	2.346	4.691	Bulunamadı	3.027	6.484	Bulunamadı
B3_3	3.391	Bulunamadı	Bulunamadı	4.680	Bulunamadı	Bulunamadı
B3_4	2.111	4.253	6.326	2.477	5.820	Bulunamadı
B3_5	4.395	8.760	Bulunamadı	6.058	12.146	Bulunamadı

Tablo 3. Farklı deprem düzeyleri ve yerel zemin sınıfları için binaların modal yerdeğiştirme istemleri (devam)

Bina	Z2 Zemin Sınıfı			Z3 Zemin Sınıfı		
	Orta Şiddetli Deprem	Tasarım Depremi	Çok Şiddetli Deprem	Orta Şiddetli Deprem	Tasarım Depremi	Çok Şiddetli Deprem
	d ^(p) (cm)	d ^(p) (cm)	d ^(p) (cm)	d ^(p) (cm)	d ^(p) (cm)	d ^(p) (cm)
B4_1	3.198	Bulunamadı	Bulunamadı	4.509	Bulunamadı	Bulunamadı
B4_2	3.536	Bulunamadı	Bulunamadı	4.869	Bulunamadı	Bulunamadı
B4_3	4.027	Bulunamadı	Bulunamadı	5.539	Bulunamadı	Bulunamadı
B4_4	3.168	6.319	Bulunamadı	4.536	Bulunamadı	Bulunamadı
B4_5	3.524	7.038	Bulunamadı	4.890	Bulunamadı	Bulunamadı
B5_1	3.162	6.315	9.519	4.536	8.728	Bulunamadı
B5_2	3.972	Bulunamadı	Bulunamadı	5.471	Bulunamadı	Bulunamadı
B5_3	3.670	7.352	Bulunamadı	5.077	Bulunamadı	Bulunamadı
B5_4	3.648	7.341	Bulunamadı	5.055	Bulunamadı	Bulunamadı
B5_5	3.169	6.716	10.037	4.635	9.271	Bulunamadı
B6_1	3.929	7.857	Bulunamadı	5.419	10.850	Bulunamadı
B6_2	4.464	Bulunamadı	Bulunamadı	6.170	Bulunamadı	Bulunamadı
B6_3	4.902	9.805	14.654	6.774	13.548	Bulunamadı
B6_4	4.137	8.274	Bulunamadı	5.730	Bulunamadı	Bulunamadı
B6_5	3.442	6.993	10.297	4.754	9.478	Bulunamadı
B7_1	4.520	9.040	Bulunamadı	6.266	12.485	Bulunamadı
B7_2	3.811	7.645	11.433	5.293	10.574	Bulunamadı
B7_3	4.127	8.013	11.975	5.541	11.070	Bulunamadı
B7_4	5.008	10.054	15.081	6.919	13.894	Bulunamadı
B7_5	5.441	10.839	Bulunamadı	7.494	Bulunamadı	Bulunamadı
B8_1	4.790	9.240	13.853	6.425	12.784	Bulunamadı
B8_2	7.768	Bulunamadı	Bulunamadı	10.767	Bulunamadı	Bulunamadı
B8_3	6.539	12.964	Bulunamadı	9.938	Bulunamadı	Bulunamadı
B8_4	6.070	12.141	Bulunamadı	8.382	17.017	Bulunamadı
B8_5	7.261	14.453	Bulunamadı	10.001	Bulunamadı	Bulunamadı

4. HASARGÖREBİLİRLİK EĞRİLERİ

Deprem tehlikesine maruz belli bir bölgede oluşabilecek yapısal hasarın dağılımı genellikle hasar olasılık matrisleri ve hasargörebilirlik eğrileri kullanılarak ifade edilmektedir. Hasar olasılık matrisi, hasar dağılımının tablo şeklinde gösterimidir. Tablodaki her bir kolon depremin şiddetini, bu kolonlardaki sayılar ise değişik hasar seviyelerindeki binaların oranını göstermektedir [31]. Hasar olasılık matrisi, farklı deprem şiddetleri için önceden tanımlanan hasar durumlarına ulaşılmasının ayrıklı olasılığını vermektedir. Hasargörebilirlik eğrileri ise, belirli bir deprem parametresine bağlı olarak (S_a , S_d , PGA vb.) belirli bir hasar seviyesine ulaşılması veya aşılması olasılığını ilişkilendiren ve deprem riskinin grafiksel olarak gösterimini sağlayan fonksiyonlardır. Belirli bir hasar seviyesine ait hasargörebilirlik eğrisi, seçilen bir yer hareketi parametresi için önceden belirlenmiş sınır hasar seviyesine ulaşılması veya aşılması koşullu olasılığının hesaplanması ile elde edilir. Hesaplanan koşullu olasılığın belirlenen yer hareketi parametresine karşılık çizilmesi, söz konusu hasar seviyesine ait hasargörebilirlik eğrisini tanımlamaktadır [2]. Hasargörebilirlik eğrilerinde yatay eksen seçilen deprem parametresini, düşey eksen ise hasarın önceden belirlenmiş hasar seviyelerine erişmesinin veya onları aşmasının birikimli olasılığını göstermektedir.

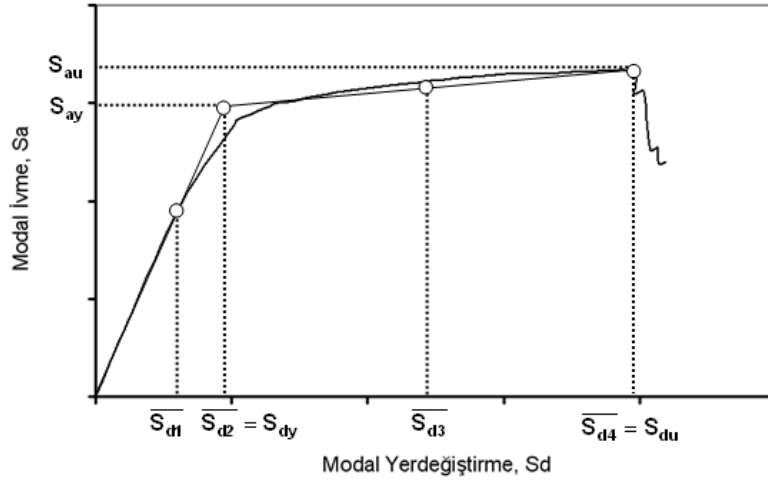
Hasargörebilirlik eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan mevcut yöntemler; deprem sonrası hasar inceleme çalışmalarına dayanan “ampirik yöntem”, belirli bir kişi veya kişilerin bilgi ve tecrübesine dayanan “uzman (bilirkişi) görüşü”, belirli bir veri setinin analitik olarak simülasyonuna dayalı “analitik yöntem” veya sözü edilen yöntemlerinin kombinasyonundan oluşan “karma yöntem” olarak sınıflandırılabilir [2, 32].

Analitik hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan kesin bir metodoloji ya da analiz yöntemi yoktur. Bu aşamada genel olarak yapının elastik sınır ötesindeki davranışının dikkate alınabildiği artımsal itme analizi veya doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi gibi dinamik analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Hangi analiz yöntemi kullanılırsa kullanılsın seçilecek yer hareketinin karakteristikleri, oluşturulacak analitik model, kullanılan malzemelerinin dayanımları, tanımlanacak sınır hasar seviyeleri vb. parametrelere bağlı olarak hasargörebilirlik analizleri çok sayıda belirsizlik içermektedir. Bu belirsizlikler içinden yapının deprem davranışını daha çok etkileyecek parametrenin seçilmesi ve analizlerde kullanılacak diğer parametrelerinin de hassas bir şekilde belirlenmesi önemlidir.

4.1 Sınır Hasar Seviyelerinin Belirlenmesi

Hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasında, sınır hasar seviyeleri hasargörebilirlik parametrelerini direkt etkilemektedir. İyi tanımlanmış sınır durumları, gerçek sismik davranışı yansıtan hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulması için vazgeçilmez unsurlardır [3]. Bu çalışmada modal yerdeğiştirme (S_d) cinsinden dört hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla Hafif Hasar Sınırı ($\overline{S_{d1}}$), Orta Hasar Sınırı ($\overline{S_{d2}}$), İleri Hasar Sınırı ($\overline{S_{d3}}$) ve Göçme (Çok Ağır Hasar) Sınıridir ($\overline{S_{d4}}$). Bu dört hasar sınırına karşılık beş farklı hasar bölgesi tanımlanmaktadır. Bunlar Hasarsızlık Bölgesi, Hafif Hasar Bölgesi, Orta Hasar Bölgesi, İleri Hasar Bölgesi ve Göçme (Çok Ağır Hasar) Bölgesi'dir.

Sınır hasar seviyelerinin binaların modal kapasite diyagramları üzerinden tanımlanması oldukça yaygın bir yaklaşımdır [1, 4, 11, 12, 33]. Bu çalışmada farklı bina sınıfları için Şekil 5-7’de verilen modal kapasite diyagramları FEMA 356’da [34] verilene benzer bir yöntemle iki doğru parçası ile idealleştirilmiş ve hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasında esas alınan sınır hasar seviyeleri idealleştirilmiş modal kapasite diyagramı üzerinden tanımlanmıştır. Bu durum tek bir diyagram kullanılarak Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. Sınır hasar seviyelerinin idealleştirilmiş modal kapasite diyagramı üzerinden tanımlanması

Buna göre Hafif Hasar sınırı, modal kapasite diyagramının doğrusallıktan ayrıldığı noktadaki modal yerdeğiştirme değeri olarak alınmıştır. Bu nokta yapı elemanlarında ilk akma durumuna karşılık gelir. Orta Hasar sınırı elastik rijitliği ve elastik ötesi rijitliği temsil eden iki doğru parçasının kesiştiği noktadaki modal yerdeğiştirme değeri olarak belirlenmiştir. Bu nokta aynı zamanda binanın akma taban kesme kuvveti kapasitesinin aşıldığı nokta olarak kabul edilmektedir. Göçme sınırı ise modal kapasite diyagramındaki nihai modal yerdeğiştirme değeri olarak alınmıştır. Bu noktaya gelindiğinde bina aşırı deformasyon sonucu göçer veya göçmeye çok yakın bir duruma gelir. İleri Hasar sınırı ise Orta Hasar sınırı ile Göçme sınırı arasındaki yolun yarısı olarak alınmıştır.

4.2 Hasargörebilirlik Eğrilerinin Oluşturulması

Depremde hasar-olasılık dağılımının lognormal dağılıma uyduğu varsayımına bağlı olarak hasargörebilirlik eğrileri genel olarak lognormal birikimli dağılım fonksiyonu ile ifade edilir. Buna göre ilgili hasar seviyesine ait hasargörebilirlik eğrisinin analitik ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P(d \geq ds_i | S_d) = \Phi \left(\frac{\ln(S_d) - \overline{S_{ds_i}}}{\beta_{ds_i}} \right) \quad (1)$$

Bu bağıntıda, P sembolik olarak hasarı temsil eden d'nin modal yerdeğiştirme S_d ile ifade edilen deprem parametresi için i'inci hasar seviyesine ait ds_i değerine ulaşma veya aşma olasılığını göstermektedir. $\overline{S_{ds_i}}$ bina hasarının ilgili hasar seviyesine (hafif, orta, ileri ve göçme) eriştiği duruma karşı gelen ortalama modal yerdeğiştirmeyi, β_{ds_i} ilgili sınır hasar seviyeleri için modal yerdeğiştirme değerlerinin doğal logaritmalarına ait standart sapmayı, Φ ise birikimli standart dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (1)'deki β_{ds_i} parametresi esas olarak üç bileşene ait belirsizleri ifade etmektedir. Bunlar talepteki belirsizlik, kapasitedeki belirsizlik ve modellemeden kaynaklanan belirsizliktir.

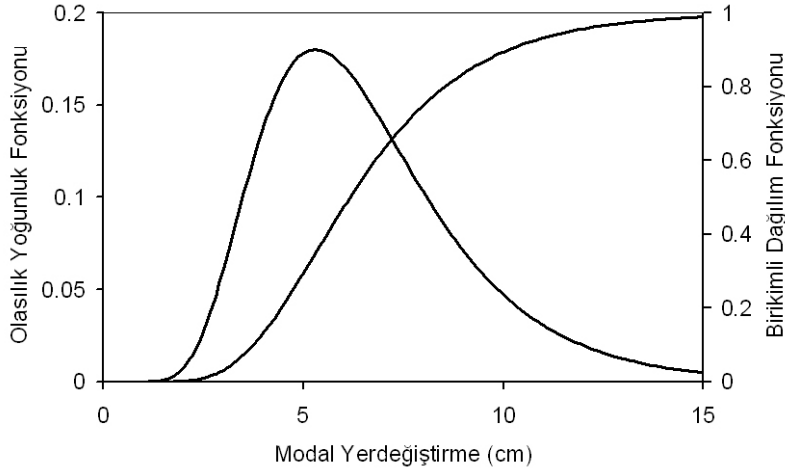
İlgili sınır hasar seviyelerine ait hasargörebilirlik eğrileri, $\overline{S_{ds_i}}$ ortalama modal yerdeğiştirme değeri ve β_{ds_i} standart sapma değeri gibi iki parametre ile tamamen tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada değişik bina sınıfları için binaların ideleştirilmiş modal kapasite diyagramlarından elde edilen $\overline{S_{ds_i}}$ değerleri ve ilgili β_{ds_i} değerleri Tablo 4'de her bir sınır hasar seviyesi için ayrı ayrı verilmiştir. Bu çalışmada üç boyutlu ve oldukça ayrıntılı olarak modellenen gerçek binaların zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinin gerçekleştirilmesindeki güçlüklerden dolayı yer hareketi kayıtları ile ilgili belirsizlik β_{ds_i} parametresine yansıtılamamıştır. Ayrıca analitik modelden kaynaklanan belirsizliklerin de standart sapma olarak β_{ds_i} parametresine yansıtılması önemlidir. Bu belirsizliklerle birlikte β_{ds_i} parametresinin değışeceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 4. Farklı hasar seviyelerine ortalama ve standart sapma değerleri

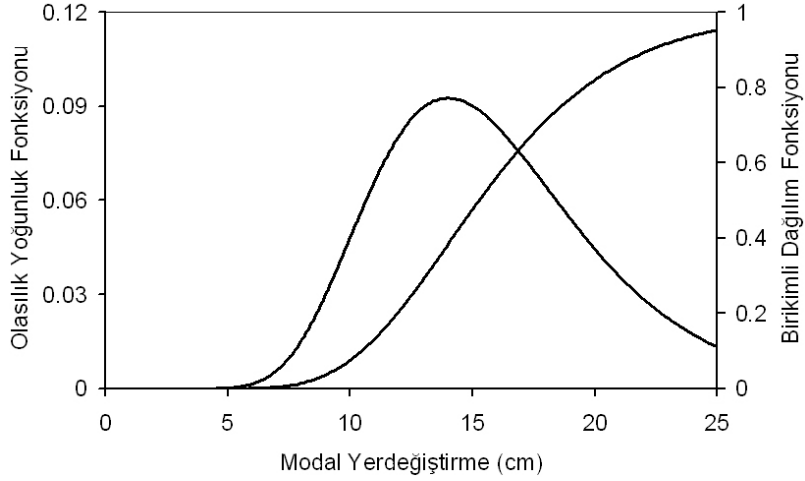
Bina Sınıfı	Sınır Hasar Seviyeleri							
	Hafif Hasar		Orta Hasar		İleri Hasar		Göçme	
	$\overline{S_{d1}}$ (cm)	β_1	$\overline{S_{d2}}$ (cm)	β_2	$\overline{S_{d3}}$ (cm)	β_3	$\overline{S_{d4}}$ (cm)	β_4
3-4 Katlı	0.719	0.4976	1.598	0.4103	4.554	0.3869	7.509	0.3872
5-6 Katlı	1.114	0.4302	2.528	0.3740	6.310	0.3872	10.091	0.4025
7-8 Katlı	2.432	0.5703	4.222	0.3669	9.824	0.2852	15.425	0.2943

Tanımlanan sınır hasar seviyelerine ait ortalama modal yerdeğiştirme değerleri ve lognormal dağılıma ait standart sapma değerleri kullanılarak her bir bina sınıfı için farklı hasar seviyelerine ait olasılık yoğunluk fonksiyonları elde edilmiştir. Oluşturulan olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılarak deprem parametresi olarak seçilen modal

yerdeğiştirmenin farklı değerleri için önceden tanımlanmış olan sınır hasar seviyelerine ulaşılması veya aşılması olasılıkları hesaplanmıştır. 5-6 katlı binaların ileri hasar seviyesine ait olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonlarının grafikleri Şekil 11’de ve 7-8 katlı binaların göçme seviyesine ait olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonlarının grafikleri ise Şekil 12’de verilmiştir.

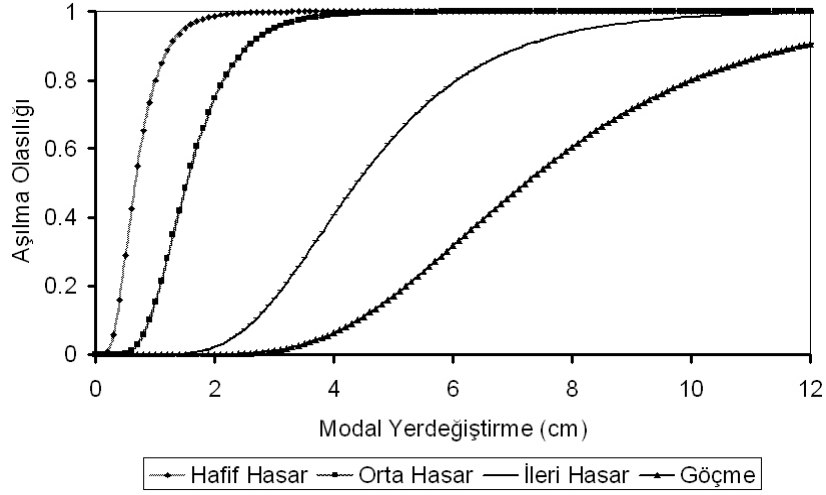


Şekil 11. 5-6 katlı binaların ileri hasar seviyesine ait olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonlarının grafikleri

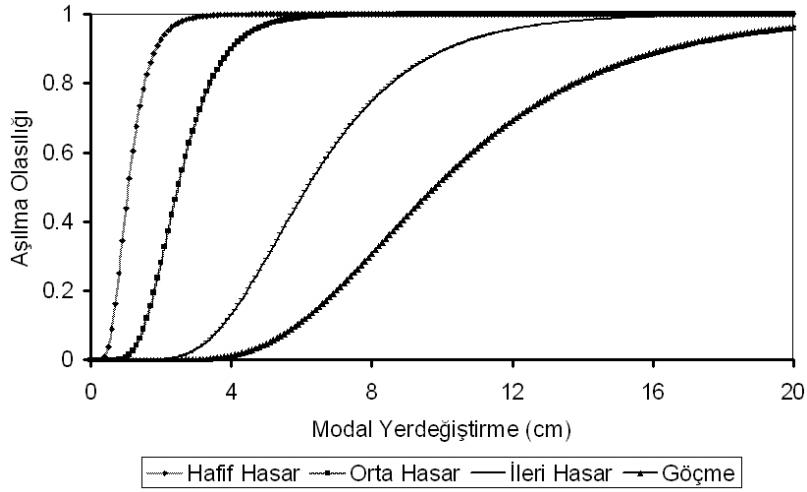


Şekil 12. 7-8 katlı binaların göçme hasar seviyesine ait olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonlarının grafikleri

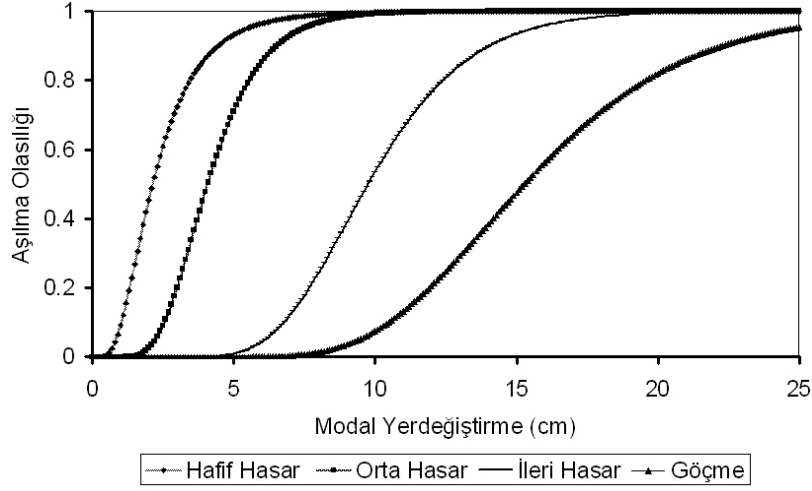
Farklı hasar seviyelerine ait birikimli dağılım fonksiyonları dikkate alınan bina sınıfları için aynı grafik üzerinde gösterilerek çalışmanın sonuç ürünü olan hasargörebilirlik eğrileri çizdirilmiştir. Elde edilen hasargörebilirlik eğriler 3-4 katlı binalar için Şekil 13’de, 5-6 katlı binalar için Şekil 14’de ve 7-8 katlı binalar için Şekil 15’de sunulmuştur.



Şekil 13. 3-4 katlı binalar için hasargörebilirlik eğrileri



Şekil 14. 5-6 katlı binalar için hasargörebilirlik eğrileri



Şekil 15. 7-8 katlı binalar için hasargörebilirlik eğrileri

5. SONUÇLAR

Binaların deprem performansı ile ilişkili hasara bağlı olarak ortaya çıkan can ve mal kayıpları ile diğer ekonomik ve sosyal kayıpların tahmin edilebilmesi ve bu kayıpların azaltılmasına yönelik önlemlerin alınabilmesi bakımından deprem riski taşıyan bölgelerdeki mevcut bina stokunun hasargörebilirliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaca yönelik olarak, önceden tanımlanan belirli bir hasar seviyesine ulaşılması veya aşılması olasılığını belirli bir deprem parametresi ile ilişkilendiren hasargörebilirlik eğrileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, hasargörebilirlik eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak, belli bir bölgede yerinde görülerek belirlenen gerçek binaların detaylı üç boyutlu hesap modelleri ile gerçekleştirilen artımsal itme analizlerinin sonuçları dikkate alınarak analitik hasargörebilirlik eğrileri oluşturulmuştur.

Oluşturulan hasargörebilirlik eğrileri incelendiğinde, her bina sınıfı için Hafif Hasar ve Orta Hasar seviyelerine ait hasargörebilirlik eğrilerinin birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni binanın taşıyıcı elemanlarında ilk plastik şekildeğiştirmeler meydana geldikten sonra, binanın modal yerdeğiştirmenin artan değerleri için hızlı bir şekilde akma taban kesme kuvveti kapasitesine erişmedir. Başka bir deyişle, binadaki hasar hızlı bir şekilde Hafif Hasar Bölgesi'ni terk edip, Orta Hasar Bölgesi'nde yoğunlaşmaktadır. Özellikle Hafif Hasar seviyesi için 3-4 katlı binaların hasargörebilirlik eğrileri ile 5-6 katlı binaların hasargörebilirlik eğrileri birbirine çok yaklaşımaktadır. Bu durum dikkate alınan bina sınıfları için kat sayısının Hafif Hasar seviyesi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

3-4 katlı bina grubu ile 5-6 katlı bina grubu için oluşturulan hasargörebilirlik eğrileri dikkate alınan tüm hasar seviyeleri için 7-8 katlı bina grubuna ait eğrilere oranla birbirine daha yakındır. Nispeten yüksek bina sınıfına sokulabilecek 7-8 katlı binaların hasargörebilirliği diğer bina sınıflarından ayrılmaktadır.

3-4 katlı binaların modal yerdeğiştirmenin 0 – 0.6 cm değer aralığı için Hasarsızlık Bölgesi'nde; 0.7 – 1.4 cm değer aralığı için Hafif Hasar Bölgesi'nde; 1.5 – 4.6 cm değer aralığı için Orta Hasar Bölgesi'nde; 4.7 – 6.7 cm değer aralığı için İleri Hasar Bölgesi'nde; 6.8 cm ve üzerindeki değerleri için ise Göçme (Çok Ağır Hasar) Bölgesi'nde bulunma olasılıkları, diğer hasar bölgelerinde bulunma olasılıklarına oranla daha fazladır.

5-6 katlı binaların modal yerdeğiştirmenin 0 - 1 cm değer aralığı için Hasarsızlık Bölgesi'nde; 1.1 – 2.4 cm değer aralığı için Hafif Hasar Bölgesi'nde; 2.5 – 6.6 cm değer aralığı için Orta Hasar Bölgesi'nde; 6.7 – 9.0 cm değer aralığı için İleri Hasar Bölgesi'nde; 9.1 cm ve üzerindeki değerleri için ise Göçme (Çok Ağır Hasar) Bölgesi'nde bulunma olasılıkları, diğer hasar bölgelerinde bulunma olasılıklarına oranla daha fazladır.

7-8 katlı binaların modal yerdeğiştirmenin 0 – 2.2 cm değer aralığı için Hasarsızlık Bölgesi'nde; 2.3 – 3.7 cm değer aralığı için Hafif Hasar Bölgesi'nde; 3.8 – 9.9 cm değer aralığı için Orta Hasar Bölgesi'nde; 10 – 14.8 cm değer aralığı için İleri Hasar Bölgesi'nde; 14.9 cm ve üzerindeki değerleri için ise Göçme (Çok Ağır Hasar) Bölgesi'nde bulunma olasılıkları, diğer hasar bölgelerinde bulunma olasılıklarına oranla daha fazladır.

Tüm bina sınıflarının modal yerdeğiştirmenin daha geniş değişim aralıkları için Orta Hasar Bölgesi'nde bulunma olasılıkları daha yüksektir. Bu hasar bölgesi, hafif hasardan ileri hasara geçiş bölgesidir.

Mevcut bina stokunun hasargörebilirliğinin belirlenmesinde tüm binaların tek tek ele alınıp değerlendirilmesi hem ekonomik ve pratik değildir, hem de fiziksel olarak mümkün görünmemektedir. Bu durumda söz konusu bina stokunu iyi bir şekilde temsil edebilecek binalara ait hasargörebilirlik bilgilerinin dikkate alınması kaçınılmazdır. Bu bağlamda çalışmada kullanılan bina sınıfları için oluşturulan hasargörebilirlik eğrileri, İzmir'deki ve Türkiye'deki bina stokunun önemli bir kısmını oluşturan benzer özellikteki binaların hasar potansiyellerinin belirlenmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Semboller

- A_0 : Etkin yer ivmesi katsayısı
 D : Dayanım fazlalığı katsayısı
 d : Sembolik olarak hasar
 ds_i : i. hasar seviyesine ait sembolik hasar sınırı
 $d^{(p)}$: Modal yerdeğiştirme istemi
 $(EI)_o$: Çatlamamış kesite ait eğilme rijitliği
 $(EI)_e$: Çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitliği
 G : Sabit yük
 H : Toplam bina yüksekliği
 h : Çalışan doğrultudaki kesit boyutu
 I : Bina önem katsayısı

- L_p : Plastik mafsal boyu
 N_D : Düşey yüklerden oluşan aksenal basınç kuvveti
 P : Sınır hasar seviyesine ulaşılması veya aşılması olasılığı
 PGA : En büyük yer ivmesi
 Q : Hareketli yük
 $S_{ac}(T)$: Elastik spektral ivme
 S_a : Modal ivme
 S_d : Modal yerdeğiştirme
 $\overline{S_{ds_i}}$: i. hasar seviyesine karşı gelen ortalama modal yerdeğiştirme
 $\overline{S_{d1}}$: Hafif hasar sınırı
 $\overline{S_{d2}}$: Orta hasar sınırı
 $\overline{S_{d3}}$: İleri hasar sınırı
 $\overline{S_{d4}}$: Göçme (çok ağır hasar) sınırı
 T : Bina doğal titreşim periyodu
 V_y : Binanın akma taban kesme kuvveti
 W : Toplam bina ağırlığı
 β_{ds_i} : i. hasar için modal yerdeğiştirmelerin doğal logaritmalarına ait standart sapma
 δ_u : Tepe noktasının nihai yatay yerdeğiştirmesi
 δ_y : Tepe noktasının akma yatay yerdeğiştirmesi
 ε : Birim şekildeğiştirme
 ϕ : Donatı çapı
 Φ : Birikimli standart dağılım fonksiyonu
 σ : Normal gerilme

Teşekkür

Yazarlar, binaların mimari ve betonarme projelerinin temini konusundaki anlayış ve sağladıkları kolaylıklardan dolayı Karabağlar ve Konak Belediye'lerine teşekkürü borç bilirlir.

Kaynaklar

- [1] Erberik, M.A., Fragility-Based Assessment of Typical Mid-Rise and Low-Rise RC Buildings in Turkey, *Engineering Structures*, 30, 5, 1360-1374, 2008.
- [2] Tüzün, C. ve Aydınöğlu, N., Gerçek Binaların Doğrusal Olmayan Analizlerinden Hasargörebilirlilik İlişkilerinin Elde Edilmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İTÜ, İstanbul, 2007.
- [3] Ay, B.Ö. ve Erberik, M.A., Türkiye’deki Az ve Orta Katlı Betonarme Yapıların Deprem Güvenliği Açısından İncelenmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İTÜ, İstanbul, 2007.
- [4] Barbat, A.H., Pujades, L.G. and Lantada, N., Seismic Damage Evaluation in Urban Areas Using the Capacity Spectrum Method: Application to Barcelona, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 10-11, 851-865, 2008.
- [5] Dumova-Jovanoska, E., Fragility Curves for Reinforced Concrete Structures in Skopje (Macedonia) Region, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 6, 455-466, 2000.
- [6] Multi-Hazard Loss Estimation Methodology–Earthquake Model: HAZUS-MH MR1. Advanced Engineering Building Module–Technical and User’s Manual, National Institute of Building Sciences for Federal Emergency Management Agency, Washington, DC., 2003.
- [7] Lang, K. and Bachmann, H., On the Seismic Vulnerability of Existing Buildings: A Case Study of the City of Basel, *Earthquake Spectra*, 20, 1, 43-66, 2004.
- [8] Liao, W.I., Loh, C.H. and Tsai, K.C., Study on the Fragility of Building Structures in Taiwan, *Natural Hazards*, 37, 1-2, 55-69, 2006.
- [9] Polese, M., Verderame, G.M., Mariniello, C., Iervolino, I. and Manfredi, G., Vulnerability Analysis for Gravity Load Designed RC Buildings in Naples–Italy, *Journal of Earthquake Engineering*, 12, 234-245, 2008.
- [10] Borzi, B., Pinho, R. and Crowley, H., Simplified Pushover-Based Vulnerability Analysis for Large-Scale Assessment of RC Buildings, *Engineering Structures*, 30, 3, 804-820, 2008.
- [11] Akkar, S., Sucuoğlu, H. and Yakut, A., Displacement-Based Fragility Functions for Low- and Mid-Rise Ordinary Concrete Buildings, *Earthquake Spectra*, 21, 4, 901-927, 2005.
- [12] Barbat, A.H., Lagomarsino, S. and Pujades, L.G., Vulnerability Assessment of Dwelling Buildings, *Assessing and Managing Earthquake Risk*, Editors: Oliveira, C.S., Roca, A. and Goula, X., Springer, Netherlands, 115-134, 2008.
- [13] Erberik, M.A. and Cullu, S., Assessment of Seismic Fragility Curves for Low- and Mid-Rise Reinforced Concrete Frame Buildings Using Duzce Field Database, *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*, Editors: Wasti, S.T. and Özcebe, G., Springer, Netherlands, 151-166, 2006.

- [14] Hueste, M.B.D. and Bai, J.W., Seismic Retrofit of a Reinforced Concrete Flat-Slab Structure: Part II – Seismic Fragility Analysis, *Engineering Structures*, 29, 6, 1178-1188, 2007.
- [15] Kappos, A.J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C. and Penelis, G., A Hybrid Method for the Vulnerability Assessment of R/C and URM Buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 4, 391-413, 2006.
- [16] Kirçil, M.S. and Polat, Z., Fragility Analysis of Mid Rise R/C Frame Buildings, *Engineering Structures*, 28, 9, 1335-1345, 2006.
- [17] Lagaros, N.D., Probabilistic Fragility Analysis: A Tool for Assessing Design Rules of RC Buildings, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 7, 1, 45-56, 2008.
- [18] Ramamoorthy, S.K., Gardoni, P. and Bracci, J.M., Probabilistic Demand Models and Fragility Curves for Reinforced Concrete Frames, *Journal of Structural Engineering*, 132, 10, 1563-1572, 2005.
- [19] Ramamoorthy, S.K., Gardoni, P. and Bracci, J.M., Seismic Fragility and Confidence Bounds for Gravity Load Designed Reinforced Concrete Frames of Varying Height, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 134, 4, 639-650, 2008.
- [20] Korkmaz, A. ve Aktaş, E., Betonarme Çerçeve Yapıların Olasılıklı Sismik Analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 1, 55-64, 2006.
- [21] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İmar ve İskan Bakanlığı, Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara, 1975.
- [22] SAP 2000 Nonlinear, Version 8.2.3, Structural Analysis Program, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA., 2003.
- [23] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [24] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik Örnekler Kitabı, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2006.
- [25] Mander, J.B., Priestley, M.J.N and Park, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Division (ASCE)*, 114, 8, 1804-1826, 1988.
- [26] XTRACT Educational 3.0.7, Imbsen Software Systems, Sacramento, 2006.
- [27] TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü Kurumu, Ankara, 2000.
- [28] Celep, Z., Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Beta Dağıtım, İstanbul, 2008.
- [29] Korkmaz, K.A., Yapı Sistemlerinin Güvenirlik Esaslı Performansa Bağlı Analizi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [30] Bozdağ, Ö. ve Düzgün, M., Mevcut Prefabrike Bir Binanın Deprem Performansının Artımsal İtme Analizi Yöntemleri İle Belirlenmesi, *Beton Prefabrikasyon*, Sayı 93, 5-13, 2010.

- [31] Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., Bruneau, M. and Rutenberg, A., Multi-Dimensional Fragility of Structures: Formulation and Evaluation, Technical Report MCEER-06-0002, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, NY, 2006.
- [32] Rossetto, T. and Elnashai, A., Derivation of Vulnerability Functions for European-Type RC Structures Based on Observational Data, *Engineering Structures*, 25, 1241-1263, 2003.
- [33] Erberik, M.A. and Elnashai, A.S., Fragility Analysis of Flat-Slab Structures, *Engineering Structures*, 26, 7, 937-948, 2004.
- [34] FEMA 356, NEHRP Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC., 2000.