

TÜRKİYE'DEKİ AZ VE ORTA KATLI BETONARME YAPILARIN DEPREM GÜVENLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

SEISMIC RISK ASSESSMENT OF LOW-RISE AND MID-RISE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN TURKEY

Bekir Özer AY¹ ve M. Altuğ ERBERİK²

ÖZET

Bu çalışmada, ülkemizdeki yapı stoğunun %75'ini oluşturan az ve orta katlı yapıların deprem güvenliği hasar potansiyeli eğrileri aracılığıyla incelenmiştir. Çalışmanın kapsamı 3, 5, 7 ve 9 katlı; yüklerin tamamının çerçeveler ile taşındığı betonarme sistemlerdir. Malzeme değişkenliği istatistikî yöntemler yardımı ile göz önüne alınmış, yapısal davranıştaki belirsizlikler, modellere, ülkemize özgü yapı karakteristikleri doğrultusunda aktarılmıştır. Buna göre oluşturulan iki boyutlu analitik modeller ülkemizdeki yapı stoğunun sismik performans özelliklerini yansıtabilmek için iyi, tipik ve zayıf olarak sınıflandırılmıştır. Yapılardaki kuvvetli yer hareketi talep istatistikleri, elastik ötesi zaman tanım alanı analizi ile elde edilmiş maksimum katlararası ötelenme değerleri ile verilmiştir. Farklı hasar seviyelerini ifade eden performans sınırları belirlenmiş, hasar potansiyeli eğrileri her bir yapı sınıfı için oluşturulmuştur. Elde edilen deprem güvenliği bilgisi belli bir deprem tehlikesi altında yapı performansının tahmini çalışmasına uygulanmıştır. Bu amaçla İstanbul'daki Fatih semti seçilmiştir. Böylece hem deprem dayanımı düşük konutlarda yaşayan kalabalık nüfusu, hem de depremselliği açıkça bilinen Fatih semtindeki az ve orta katlı betonarme çerçeveli yapıların deprem güvenliği incelenmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında görülmüştür ki, bu çalışmada elde edilen eğriler, yakın zamanda karşılaşılabileceğimiz olası deprem felaketlerinin etkilerinin araştırılması ve zararların azaltılmasına yönelik afet senaryosu, master plan ve deprem hasarının belirlenmesi çalışmalarında kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Hasar potansiyeli eğrisi, malzeme değişkenliği, deprem güvenliği

ABSTRACT

In this study, seismic safety of low-rise and mid-rise reinforced concrete structures, which constitute approximately 75% of the total building stock in Turkey is investigated by generating fragility curves. The scope of the study is 3, 5, 7 and 9-story reinforced concrete moment resisting frame structures. The uncertainties in material variability and the specific characteristics of construction practice are taken into account in the formation of structural simulations. Two dimensional analytical models are constructed accordingly and categorized as poor, typical or superior corresponding to the observed seismic performance of structures after major earthquakes in Turkey. The seismic demand statistics in terms of maximum interstory drift ratio are obtained for different sets of ground motion records by performing nonlinear time history analyses. The capacity is determined in terms of limit states and the corresponding fragility curves are obtained from the probability of reaching or exceeding each limit state for different levels of ground shaking. The generated fragility curves are employed in a regional loss estimation study. For this purpose, Fatih, a highly populated earthquake-prone district in Istanbul is selected. This study provides a reliable fragility-based database for earthquake damage and loss estimation studies in urban areas of Turkey.

Keywords: Fragility curve, material variability, seismic safety

¹ Proje Asistanı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, ozeray@gmail.com

² Yrd. Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, altug@metu.edu.tr

GİRİŞ

Deprem afetinin etkisinin tahmini amacıyla yapılan çalışmaların temel iki bileşeni, deprem tehlikesinin tespiti ve yapı sistemlerinin hasargörebilirliğinin belirlenmesidir. Yapı sistemlerinin hasargörebilirliği genel olarak mevcut bina stoğunun ve diğer inşaat yapılarının incelenmesi, sınıflandırılması ve hasar potansiyeli eğrilerinin elde edilmesi ile mümkündür. Buna göre afet senaryolarının hazırlanması aşamasında, yapıların hasar potansiyeli eğrileri çıkarılırken ülkemizdeki yapı stoğuna özgü hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Ancak bu durum genellikle göz ardı edilmiş, farklı ülkelerdeki yapı stoklarının hasargörebilirliğinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen veriler, ülkemizde deprem hasarlarının ve kayıplarının tahmin edilmesi için yapılan çalışmalara uyarlanmıştır. Ancak, yapı stoğu karakteristikleri arasındaki farklılıklar, elde edilen hasar potansiyeli eğrilerine de yansımakta ve sonuç olarak hasar ve kayıp tahminlerinde büyük yanlışlara yol açabilmektedir. Bu çalışmanın amacı, son yıllarda elde edilen ciddi bilgi birikimini, en gelişmiş hesap yöntemlerini kullanarak ve ülkemizin yapı karakteristiklerini dikkate alarak az ve orta katlı betonarme yapı stoğunun hasar potansiyellerinin belirlenmesidir.

Ülkemizdeki betonarme yapılar genellikle yeterli yanıl dayanım ve rijitliğe sahip olmayan, donatı detayları deprem davranışı açısından yetersiz, beton dayanımları düşük çerçevelerden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra bu yapılarda yumuşak kat, kısa kolon, kuvvetli kiriş zayıf kolon gibi sistem yetersizliklerinin de bulunması, deprem güvenliği yeterli olmayan büyük bir yapı stoğunu gündeme getirmektedir. Bu zayıflıklara sahip yapıların kuvvetli bir depremde sağlıklı davranış sergilemesini beklemek mümkün değildir (Özcebe vd., 2002).

ÇALIŞMADA KULLANILAN BİNA MODELLERİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Çalışmada 3, 5, 7 ve 9 katlı; yüklerin tamamının çerçeveler ile taşındığı betonarme sistemler incelenmektedir. Bu amaçla bina gruplarına ait iki boyutlu analitik modeller oluşturulmuştur. Analitik modellerin oluşturulması aşamasında göz önüne alınan tasarım ilkeleri ve bu modellerin analizi için kullanılan yöntem aşağıda detaylı bir şekilde verilmektedir.

Yer Hareketi Kayıtlarının Seçimi

Yapı hasargörebilirliğinin tayini yer hareketi değişkenliğinin analizlere en iyi şekilde aktarılmasını gerektirir. Bu çalışmada farklı yer hareketi seviyelerinin tanımlanması için üç farklı yer hareketi grubu oluşturulmuştur. Her bir grup farklı özelliklere sahip 20 deprem kaydından meydana gelir. Bu kayıtlar maksimum yer hızı seviyelerine göre ayrılmıştır. Buna göre, gruplar sırasıyla maksimum yer hızı 0–20 cm/s, 20–40 cm/s ve 40–60 cm/s olan kayıtları içerir. Toplam 60 deprem kaydının oluşturduğu 3 grup için aletsel büyüklük (M_w), deprem kaynağına olan uzaklık (D) değeri, maksimum yer ivmesi ($MYİ$) değeri ve maksimum yer hızı (MYH) değeri ile bunlara ait değişkenlik katsayıları (COV) Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yer hareketi gruplarının istatistiksel verileri

	Grup I		Grup II		Grup III	
	Ortalama	COV	Ortalama	COV	Ortalama	COV
M_w	6.2	0.07	6.6	0.06	6.9	0.06
D (km)	12.3	0.38	10.4	0.67	10.4	0.56
$MYİ$ (g)	0.16	0.35	0.34	0.31	0.44	0.38
MYH (cm/s)	11.17	0.49	29.14	0.22	48	0.13

Tasarım İlkeleri

Türk Deprem Yönetmeliği güncel tasarım spektrumları için genel anlamda yerel zemin koşullarını kullanırken, fay uzaklığı veya benzer birtakım şartları göz ardı etmektedir. Oysa sismik hasar tespiti için yapılacak çalışmalarda konum–mesafe–büyüklük gözetilerek hazırlanmış tasarım

spektrumları kullanmak daha uygundur (Kalkan ve Gülkan, 2004). Bu sebeple her biri 20 depremden oluşan 3 grup için tasarım spektrumları FEMA 356 (ASCE, 2000)' ya uygun olarak oluşturulmuştur.

Çalışmada Kullanılan Bina Modellerinin Tasarımı

Yüklerin tamamının betonarme çerçeveler ile taşındığı binalar, Türkiye'de en çok kullanılan yapısal sistemleri ifade eder. Dış kaplama veya bölme amaçlı kullanılan dolgu duvarlar ise bu çerçeveli sistemlerin tasarım ve hesabında dikkate alınmaz. Ülkemizdeki yapı stoğunun genel deprem performansını yansıtmayı hedefleyen bu çalışmada yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü analitik modellerin hazırlanması aşamasında; deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı betonarme binalar seçilmiş, dolgu duvarlar hesaba katılmamıştır.

Bu çalışma için seçilen yapı tipi az ve orta katlı betonarme çerçeve sistemli yapı tipidir. Tasarım ve analiz aşamasında kat sayısı 3, 5, 7 ve 9 olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşım doğrultusunda 3, 5, 7 ve 9 katlı yapıları temsil eden iki boyutlu analitik modeller hazırlanmıştır. Kat sayısı yapısal davranışta belirleyici parametre olduğu için çalışmanın ilk kısmında belirlenmiştir. Kat yüksekliği olarak pratikte oldukça sık karşılaşılan 3 m, kiriş açıklığı olarak 5 m seçilmiştir.

Yapısal analiz ve donatı hesabı için SAP 2000 (Computers and Structures, Inc., 2002) kullanılmış, analitik modellerin tasarımı yukarıda bahsedilen tasarım spektrumlarına ve şartnamelere uygun yapılmıştır.

Analiz Metodu

Bu çalışmada hasar potansiyeli eğrilerinin oluşturulmasında analitik yöntemler kullanılmıştır. Buna göre çalışmanın ilk aşamasında hazırlanan, az ve orta katlı betonarme yapıları temsil eden 3, 5, 7 ve 9 katlı analitik modellerin analizinde sonlu elemanlar metodunu kullanan yapısal analiz programı olan IDARC-2D (Valles vd., 1996) ve elastik-ötesi zaman tanım alanı yöntemi kullanılmıştır. Hasar potansiyeli eğrilerinin oluşması için gerekli tüm kapasite ve sismik performans talep analizleri bu platform kullanılarak oluşturulmuştur. Başlangıçta üç değişik yer hareketi grubu için tasarlanmış analitik modellerde, yapı stoğunun karakteristik özelliklerine uygun olarak çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklikler, yapılarda sıkça görülen taşıyıcı sistem zayıflıklarının, malzeme kalitesindeki yetersizliklerin ya da detaylandırma hatalarının analitik modele yansıtılmasından ibarettir. Yeni modellerin analizi sonrası elde edilen performans değerleri, hasar ve yer hareketini ifade eden parametrelerin belirlenmesinin ardından istatistikî bir çalışma ile ortaya çıkarılmıştır.

BİNALARIN SINIFLANDIRILMASI

Bu çalışma Türkiye'deki yapı stoğunun özelliklerini üç farklı alt sınıfa ayırarak yansıtmıştır. Buna göre iyi, tipik ve zayıf olarak belirlenen alt sınıflar ülkemizin yapı karakteristiklerini ve yapı kalitelerini belirtmektedir. Oluşturulan üç yapı sınıfının nitelikleri şöyle sıralanabilir:

İyi Yapı Sınıfı: Bu sınıfa dahil binalar mevcut deprem şartnamelerine göre tasarlanmış, arzu edilen özelliklere sahip yapılardır. Malzeme kalitesi iyi ve tasarımı deprem davranışına uygun olduğu için bu tür yapılar genelde yeterli sismik performans değerlerine sahip olurlar.

Tipik Yapı Sınıfı: Bu sınıf ülkemizin konut amaçlı kullanılan betonarme yapı stoğunun çoğunluğunu ifade eden özelliklere sahiptir. Genelde mühendislik hizmeti almış olmalarına karşın, deprem performansı açısından bazı önemli kusurları bulunur.

Zayıf Yapı Sınıfı: Mühendislik hizmeti hiç almamış veya deprem kuvvetlerine karşı tasarıma sahip olmayan binalardır. Son senelerde ülkemizde yaşanmış deprem afetleri bu tip yapı stoğunun sismik faaliyete karşı son derece hasargörebilir olduğunu bir kez daha kanıtlamıştır. Ciddi hasar gören hatta birçoğu yıkılan bu tip yapılarda daha önce bahsi geçen yapı kusurlarının birçoğu bir arada bulunur.

Yapı Sınıflarının Malzeme ve Davranış Özellikleri

Ülkemizdeki yapı stoğu; malzeme kalitesi, özellikleri ve işçilik açısından ciddi farklılıklar göstermektedir. Bunu hasar potansiyeli eğrilerine yansıtmak için önceden tanımlanmış yapı sınıflarına ait malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Buna göre yapılardaki deprem performansını etkileyen değişken malzeme parametreleri; beton dayanımı (f_c), çelik akma dayanımı (f_y), beton elastisite modülü (E_c) ve çelik elastisite modülü (E_s) olarak belirlenmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan ortalama karakteristik değerler ve değişkenlik katsayıları (COV) Tablo 2’de iyi, tipik ve zayıf yapı sınıfı için verilmiştir. Değişkenlerin normal dağılım gösterdiği kabul edilmiş, istatistikî parametreler daha önce malzeme değişkenliği üzerine yapılmış çalışmalar yardımı ile belirlenmiştir (Mosalam vd., 1997; Ghobarah vd., 1998). Çelik akma dayanımı ortalama değerleri hesaplanırken zayıf ve iyi yapı sınıfı için S220 ve S420 donatı çeliği karakteristik akma değerleri %15 arttırılmıştır. Tipik yapı sınıfı için ise ODTU statik laboratuvarında çelik deney elemanlarının malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan kupon testleri sonuçları da göz önüne alınarak ortalama değer hesaplanmıştır.

Tablo 2. Yapı alt sınıfları için istatistiksel malzeme özellikleri

Yapı Sınıfı	f_c		f_y		E_c		E_s	
	Ortalama (MPa)	COV	Ortalama (MPa)	COV	Ortalama (MPa)	COV	Ortalama (MPa)	COV
İYİ	20	0.16	480	0.10	21150	0.08	200000	0.03
TİPİK	15	0.18	365	0.11	18950	0.09	200000	0.04
ZAYIF	10	0.20	250	0.12	16400	0.10	200000	0.05

Tersinir Yükler Altındaki Davranış Özellikleri

Yer hareketine maruz kalmış yapıların gerçek performansının tespit edilmesi amacıyla pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda en çok kullanılan yöntem, yapısal elemanların tersinir yükler altındaki davranışlarını gerçek yapı performansı ile ilişkilendirmektir. Rijitlik azalımı, dayanım azalımı ve çevrimsel davranıştaki daralma, tersinir yükler altındaki yapı performansını etkiler. Bu çalışmada, analiz programı IDARC-2D’ye ait tersinir yük-deplasman modelleri, iyi, tipik ve zayıf yapı sınıflarının sismik performansının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

İyi yapı sınıfındaki binalarda, yapısal elemanların ardışık çevrimler sırasında dayanım ve rijitlik azalımına maruz kalmadığı kabul edilmiştir. Ayrıca çevrim modelinin enerji tüketim kapasitesi (çevrimlerin içinde kalan alan) oldukça yüksektir.

Tipik yapı sınıfındaki binalarda, deprem yüklerine maruz kalan elemanlarının dayanım ve rijitliğinde belli seviyede azalım olması beklenir. Ardışık çevrimler sırasında hem dayanımda hem de rijitlikte az da olsa bir azalım gözlemek mümkündür. Öte yandan her bir çevrim içinde kalan alan gittikçe küçülmektedir.

Zayıf yapı sınıfındaki binalarda, deprem yüklerine maruz kalan yapısal elemanların dayanım ve rijitliğinde çok ciddi azalımlar olması beklenmektedir. Kullanılan modellerde ardışık çevrimler sırasında hem dayanım hem de rijitlik açısından ciddi bir azalma gözlenmekte, ayrıca ikinci çevrimle birlikte modelin enerji tüketim kapasitesi de oldukça düşmektedir.

HASAR POTANSİYELİ EĞRİLERİNİN OLUŞTURULMASI

Hasar potansiyeli eğrileri, herhangi bir yapı tipinin, değişik yer hareketi seviyeleri altında önceden belirlenmiş hasar seviyelerini aşma olasılıklarını verir. Hasar potansiyeli eğrilerinin elde edilmesinde çoğunlukla analitik modellerden ve simülasyonlardan faydalanılmaktadır. Analitik yöntemlerin en büyük avantajı kısa sürede çok sayıda yapıyı analiz etme imkânıdır. Bu tip yöntemlerde önemli olan hazırlanan analitik modelin özellikleri ve bu model ile birlikte kullanılacak olan hesaplama metodudur. Bu çalışmada da analitik yöntemler esas alınmış, iki boyutlu çok serbestlik dereceli sistemler elastik olmayan zaman tanım alanı yöntemi ile analiz edilmiştir.

Kuvvetli Yer Hareketi Parametresinin Seçimi

Deprem şiddetini belirleyen parametrelerin ölçülmesi, deprem mühendisliğinin temel sorunlarından biridir; çünkü şiddet, yapılardaki yer hareketi merkezli hasarın anlamsal ifadesidir. MYH, ivme döngüsünü maksimum enerji ile birlikte yansıtır. Newmark–Hall yaklaşımına göre, maksimum hız, periyodu 0.5 ve 2.0 saniye arasında olan yapıların sismik spektral davranışlarını etkiler (Sucuoğlu vd., 1999). Bu çalışmada tasarım ve analizler için kullanılan depremler, MYH değerleri dikkate alınarak seçilmiş ve hasar potansiyeli eğrilerinde şiddet parametresi olarak MYH kullanılmıştır.

Yapısal Özelliklerin Örnekleme

Yapıların sismik davranışının tayini, deprem olayının rastlantısal doğası ve betonarme binalardaki malzeme değişkenliği gibi belirsizlikler sebebiyle oldukça zor ve zahmetli bir iştir. Bunca değişken nicelik ve belirsiz durum karşısında geneli yansıtan bir çalışma ancak örnekleme teknikleri ile mümkündür. Örnekleme en temel anlamda anakütleyi oluşturan elemanların, geneli en iyi ifade edecek şekilde seçilme işlemi olarak tanımlanabilir (Orhunbilge, 1997).

Latin Hypercube örnekleme (LHS) (McKay vd., 1979) metodu birden fazla değişkene uygulanabilen segmantasyona dayalı örnekleme tekniğidir. Bu çalışmada yapısal davranıştaki belirsizlikleri ve malzeme özelliklerindeki değişkenliği göz önüne alabilmek amacıyla LHS metodu uygulanmıştır.

Bu çalışmada anakütle (Türkiye’deki az ve orta katlı çerçeve sistemli betonarme yapı stoğu) öncelikle 3 sınıfa ayrılmış (iyi, tipik ve zayıf), her bir sınıf için 20 adet örnekleme değeri belirlenmiş (her bir aralık için ihtimal yoğunluk fonksiyonu altında kalan alan 0.05) ve LHS metodu uygulanmıştır.

Yapıların Hasar Sınırlarının Belirlenmesi

Hasar sınırları (ya da sınır durumları), hasar potansiyeli eğrilerinin oluşturulması aşamasında önemli rol oynamaktadır. İyi tanımlanmış sınır durumları, gerçek sismik davranışı yansıtan hasar potansiyeli eğrilerinin oluşturulması için vazgeçilmez unsurlardır.

Bu çalışmada üç hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla, Minimum Hasar Sınırı (HS1), Güvenlik Sınırı (HS2) ve Göçme Sınıridir (HS3). Üç hasar sınırına karşılık dört değişik hasar bölgesi tanımlanmaktadır. Bunlar; Hasarsızlık ya da Az Hasar (Minimum Hasar) Bölgesi (HB1), Belirgin (Orta) Hasar Bölgesi (HB2), İleri (Ağır) Hasar Bölgesi (HB3) ve de Göçme Bölgesi (HB4) olarak adlandırılmaktadır.

Hasar sınırlarının katlararası ötelenme oranları ile ifadesinde farklı yöntemler bir arada kullanılmıştır. Hasar sınırlarının tespitinde kullanılan ilk kriter, ilerleyen hasar oluşumunda yapının kolon ve kiriş elemanlarındaki çatlama, akma ve göçme gibi performans evrelerinin itme analizi sonucu elde edilen itme eğrileri üzerinde izlenmesi olmuştur. İtme eğrilerinde, eşdeğer deprem yükü, sabit ters üçgen yük dağılımı ile temsil edilmiş, yükün artırılması sayesinde yapının ilk durumdan (hasarsız) göçme anına kadar olan tüm performans seviyeleri gözlemlenmiştir. Ardışık kiriş akmaları birinci, kolon akmaları ikinci, birçok elemanda meydana gelen akma ve kiriş elemanlarındaki göçme ise üçüncü hasar sınırı olarak kabul edilmiştir. Hasar sınırlarının belirlenmesi amacıyla kullanılan bir diğer kriter ise, DiPasquale ve Çakmak (1987) tarafından geliştirilen rijitlik azalma indeksi (SI)’dir. Yapıda hasar arttıkça SI 0 değerinden 1 değerine doğru yaklaşır. Bu performans indeksi ile hasar sınırları tespit edilir. Hasar sınırlarının tayininde kullanılan son kriter ise süneklik kapasitesidir. Buna göre elde edilmiş artımsal itme eğrileri FEMA 356 (ASCE, 2000)’daki yöntem ile çift doğrusal hale getirilir ve süneklik kapasitesi hesaplanır. Elde edilen süneklik kapasiteleri literatürdeki çalışmalardan (Calvi, 1999; Booth vd., 2004) faydalanılarak hasar sınırlarının tespiti için kullanılmıştır. Örneğin Booth vd. (2004) tarafından yürütülen çalışma Marmara Bölgesi’nden altı farklı alan için yapılmış ve Türkiye’deki yapılar için ikinci hasar sınırı olarak 1.5 ve 3.0 arasında bir değer tespit edilirken; üçüncü hasar sınır bölgesi için 3.0 ve 6.0 arasında bir süneklik kapasitesi tespit edilmiştir. Yukarıda belirtilen kriterler göz önüne alınarak tüm yapılarda kritik kat olduğu kabul edilen birinci kattaki ötelenme cinsinden hesaplanan sınır durumlar Tablo 3’te verilmektedir.

Bu çalışmada tek bir hasar sınırı değeri yerine sabit dağılıma sahip değişken hasar sınırı değeri kullanılmıştır. Hasar sınırı için kesin bir tanım olmaması ve yapısal değişikliğin göz önüne alınabilmesi için bu yol benimsenmiştir. Buna göre her bir hasar sınırı değeri sabit dağılım gösteren alt ve üst sınırlar içerisinde rastlantısal değişen değerler olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak, yapısal kapasitedeki belirsizlikler de hasargörebilirlik çalışmasına istatistikî yöntemler ile yansıtılmaya çalışılmıştır. Tablo 3'te P zayıf, T tipik, S ise iyi yapı sınıfını ve MRF3–5–7–9 kat sayısını ifade etmektedir.

Tablo 3. Hasar potansiyeli eğrileri için kullanılan hasar sınır değerleri

Yapı Sınıfı	Maksimum Katlararası Ötelenme Oranı (%)					
	Birinci Hasar Sınırı		İkinci Hasar Sınırı		Üçüncü Hasar Sınırı	
	Alt Sınır Değeri	Üst Sınır Değeri	Alt Sınır Değeri	Üst Sınır Değeri	Alt Sınır Değeri	Üst Sınır Değeri
MRF3–P	0.26	0.34	0.52	0.80	1.19	1.64
MRF3–T	0.35	0.47	1.17	1.75	2.41	3.22
MRF3–S	0.43	0.58	1.07	1.54	2.93	3.89
MRF5–P	0.20	0.26	0.38	0.49	0.85	1.43
MRF5–T	0.26	0.36	0.58	0.95	1.84	2.50
MRF5–S	0.36	0.46	0.86	1.28	2.70	3.47
MRF7–P	0.17	0.22	0.38	0.50	0.61	0.89
MRF7–T	0.18	0.25	0.54	0.72	1.03	1.62
MRF7–S	0.22	0.29	0.51	0.73	1.93	2.76
MRF9–P	0.16	0.21	0.32	0.40	0.54	0.69
MRF9–T	0.16	0.21	0.45	0.57	0.90	1.49
MRF9–S	0.18	0.25	0.48	0.62	1.78	2.68

Hasar Potansiyeli Eğrilerinin Oluşturulması

İyi, tipik ve zayıf yapı sınıfları kapsamında 3, 5, 7 ve 9 katlı yapıları temsil eden analitik modeller, IDARC–2D bilgisayar programı aracılığıyla, zaman tanım alanı yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen maksimum kat ötelenmelerinin, kullanılan yer hareketi kayıtlarına ait MYH değerleri ile olan ilişkisi çıkartılmıştır. Herhangi bir MYH değerinde dikey olarak yer alan veriler, malzeme değişkenliği göz önüne alınarak oluşturulmuş simülasyonlardan elde edilen maksimum kat ötelenmesi (MKÖ) değerleridir. Doğal olarak yer hareketi parametresi arttıkça bu değerler de artış göstermektedir. Her dikey (sabit MYH değerine sahip) veri grubunun istatistiksel olarak normal dağılım gösterdiği kabul edilirse bu gruba ait ortalama ve standart sapma değerlerini hesaplamak mümkün olabilir. Böylece, her dikey veri grubu iki basit istatistiksel tanım parametresi ile temsil edilebilir. Bu istatistiksel veriler, hasar potansiyeli eğrilerinin oluşumu için aşılma olasılıklarının hesaplanmasında kullanılır. Aşılma olasılığı, matematiksel olarak;

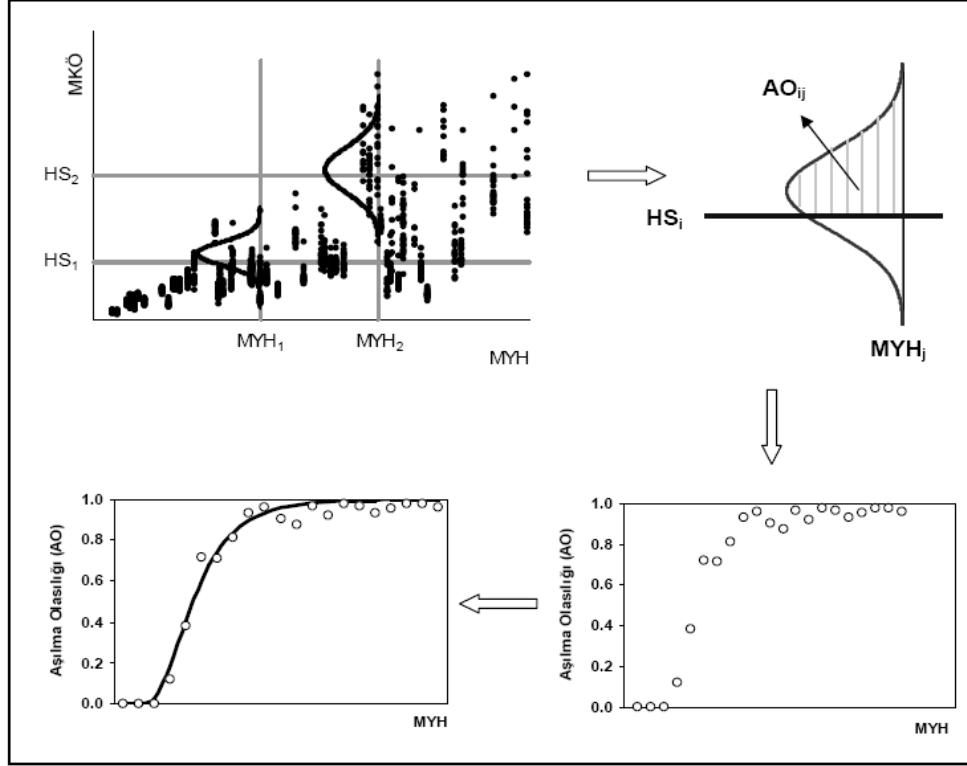
$$AO_{i,j} = P(MKÖ \geq HS_i | MYH_j) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yukarıdaki ifadede $AO_{i,j}$, j seviyesindeki MYH altında i'inci hasar sınırının (MKÖ cinsinden) aşılma olasılığını, HS_i , i'inci hasar sınırını ve MYH_j ise j'inci MYH seviyesini temsil eder. Aşılma olasılığının görsel olarak ifadesi Şekil 1'de yer almaktadır.

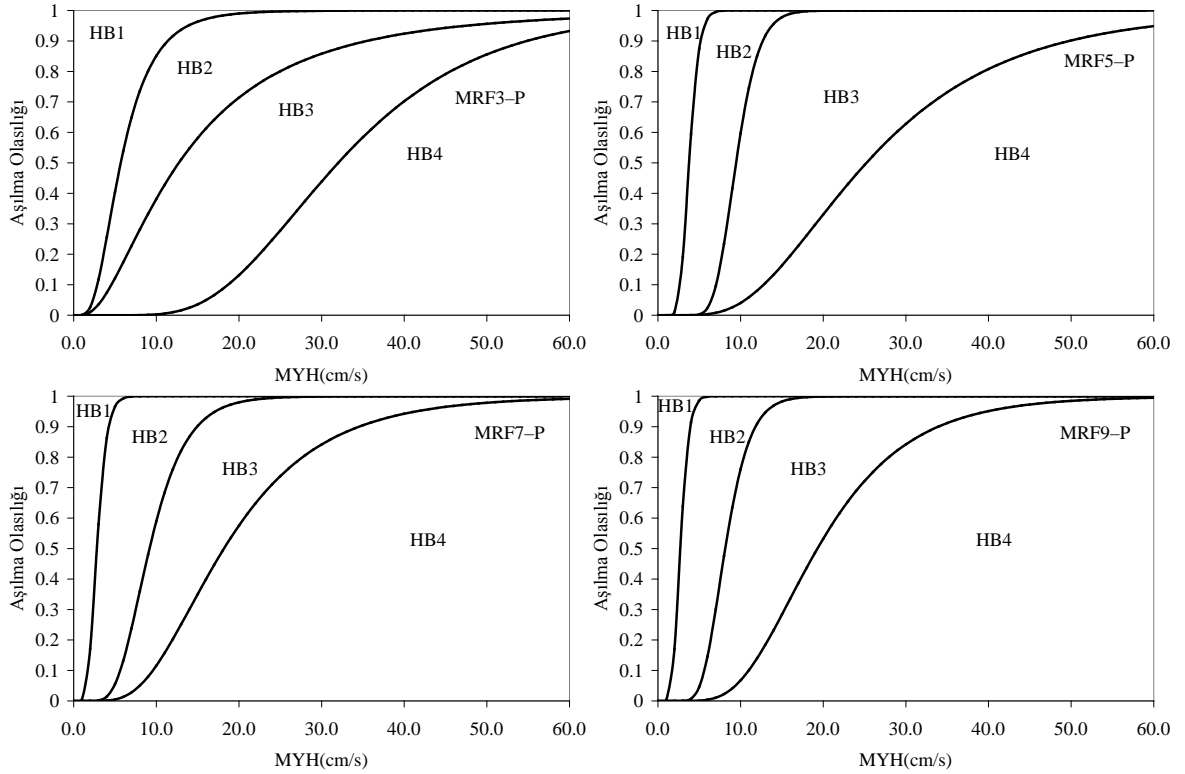
Tüm MYH seviyeleri için aşılma olasılıkları hesaplandığı zaman, AO–MYH koordinat sisteminde monotonik olarak artan noktalardan oluşan bir grafik elde edilir. Bu hasar potansiyeli eğrisinin ham hali olup genelde matematiksel olarak daha iyi ifade edilmesi amacıyla noktalara uygun bir eğri ile temsil edilir. Bu çalışmada hasar potansiyeli eğrileri lognormal kümülatif dağılım ile bulunmuştur.

Üç değişik yapı sınıfına ait 3, 5, 7 ve 9 katlı düzlemsel yapı modelleri kullanılarak elde edilen hasar potansiyeli eğrileri Şekil 2–4'te yer almaktadır. Elde edilen eğriler incelendiğinde iyi yapı sınıfına ait binalar için üçüncü sınır durumunun mevcut olmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebi bu yapıların tasarımında temel ilkelere eksiksiz uyulması sebebiyle göçme olasılığının MYH=60 cm/s ve daha düşük seviyeler için ihmal edilebilecek kadar az çıkmasıdır. Zayıf yapı sınıfındaki

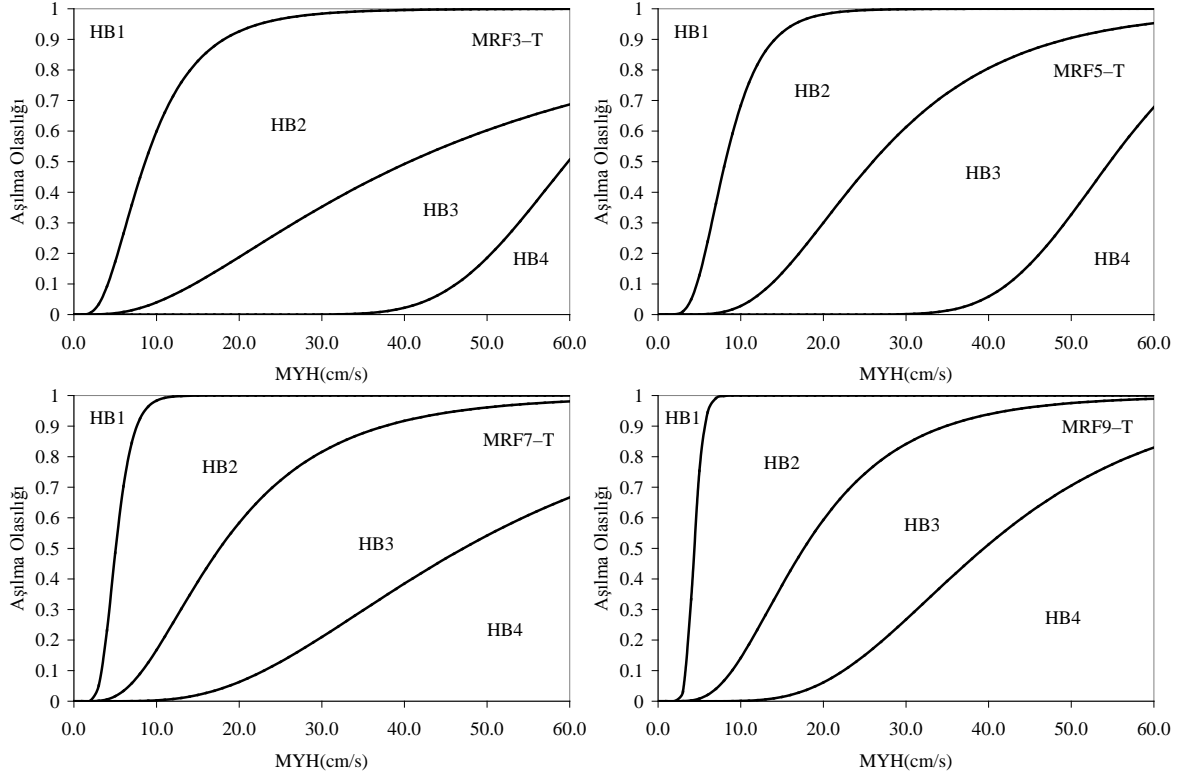
binalarda ise kat sayısı arttıkça birinci ve ikinci hasar sınırlarının birbirine yaklaştığı gözlenmektedir. Bunun sebebi yapı elemanlarının hasar görmeye başladıktan sonra çok hızlı bir şekilde belirgin hasardan ileri hasara geçiş yapmasıdır. Bir başka deyişle tasarım açısından zayıf yapılarda hafif hasar ile ağır hasar arasındaki tolerans çok azdır, yapı hızlı bir şekilde göçme riski ile karşı karşıya kalmaktadır.



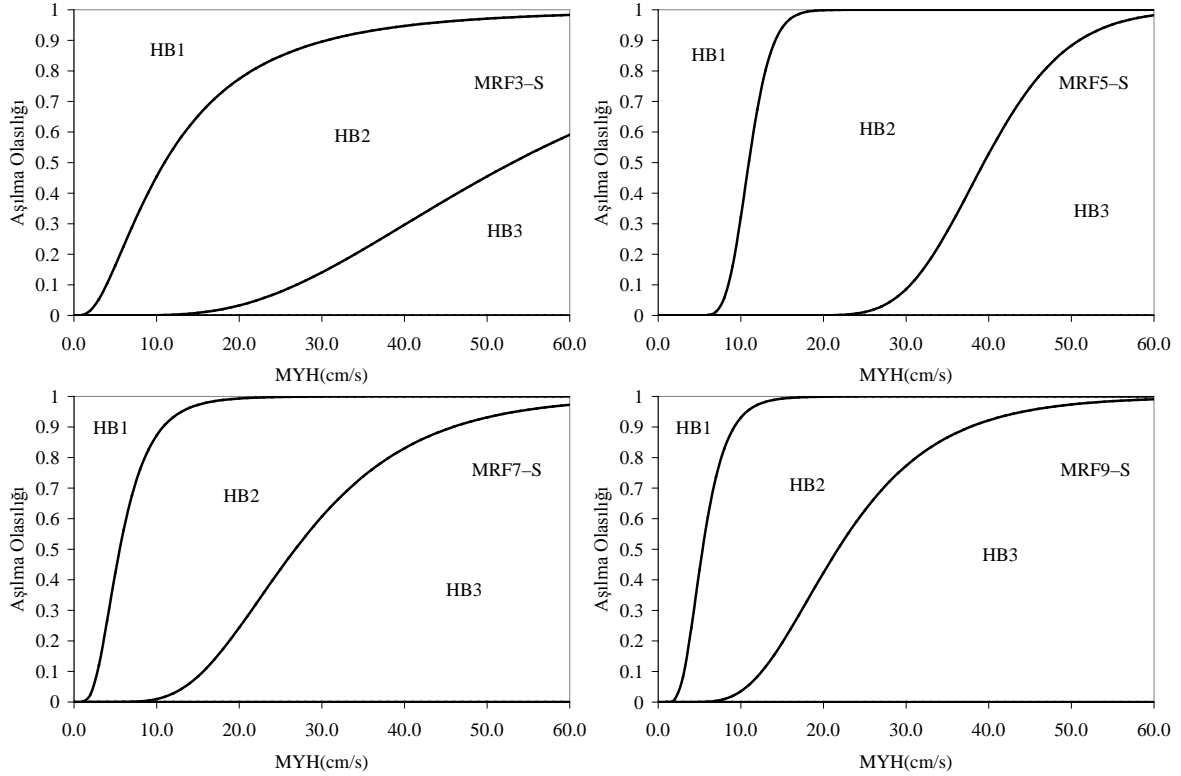
Şekil 1. Hasar potansiyeli eğrilerinin oluşturulması ile ilgili yöntemin şematik olarak gösterilmesi



Şekil 2. Zayıf yapı sınıfı hasar potansiyeli eğrileri



Şekil 3. Tipik yapı sınıfı hasar potansiyeli eğrileri



Şekil 4. İyi yapı sınıfı hasar potansiyeli eğrileri

Hasar Potansiyeli Eğrilerinin Karşılaştırılması

Hem iyi, hem tipik, hem de zayıf yapı grubuna ait binalarda kat sayısı arttıkça hasar olasılıkları da artmaktadır. Bir başka deyişle, aynı yapı grubuna ait ve aynı yer hareketi seviyesine (MYH

cinsinden) maruz kalan iki yapıdan, fazla kat sayısına sahip olan az kat sayısına sahip olan yapıya göre daha fazla hasar görmektedir. Bu sonuç ülkemiz yapı stoğunun karakteristik bir özelliği olan kat sayısı–hasar ilişkisini teyit etmektedir. Daha önce başka araştırmacılar tarafından da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Aydoğan, 2003; Akkar vd., 2005). Üç yapı stoğuna ait hasar tahminleri arasında büyük farklılıklar gözlenmektedir. Özellikle yüksek yer hareketi seviyesinde (MYH=60), kalite farklılıkları yapıyı bir anda az–orta hasar seviyelerinden ağır hasara hatta göçme bölgesine taşımaktadır. Bu geçişin zayıf yapı grubunda çok daha hızlı olduğu gözlenmektedir. Bunun en büyük sebebi, daha önce de belirtildiği gibi, zayıf yapılarda hafif hasar ile ağır hasar arasındaki toleransın çok az olmasıdır.

UYGULAMA ÇALIŞMASI

Deprem etkilerinin tahmini ve bu etkilerin hafifletilmesi için yapılan çalışmalarda yapı stoğunun hasargörebilirliğinin tespiti hayati önem taşımaktadır. Bu tür bir tespit, yerel yapı stoğunun karakteristik özelliklerinin belirlenmesi ve deprem tehlikesinin tayini ile mümkündür.

Bu çalışmada Türkiye’deki az ve orta katlı betonarme çerçeve yapıların hasargörebilirliği hasar potansiyeli eğrileri yardımı ile ortaya koyulmuştur. Çalışmanın bu kısmında, elde edilen hasargörebilirlik bilgisi bölgesel hasar tahmin çalışmalarına uygulanmıştır. Bu amaçla seçilen uygulama bölgesi; hem deprem dayanımı düşük konutlarda yaşayan kalabalık nüfusu olan, hem de depremselliği açıkça bilinen İstanbul’daki Fatih semtidir.

Fatih bölgesi bina envanteri, İstanbul Büyükşehir yapı stoğu hasargörebilirliğini inceleyen bir diğer proje için elde edilmiştir. Söz konusu çalışma mevcut yapı stoğunun çok aşamalı sismik değerlendirme çalışmasını konu alan NATO projesinin (Özcebe vd., 2003; Yakut vd., 2003) bir devamı niteliğindedir.

Bu çalışmada, az ve orta katlı betonarme çerçeve yapılar için elde edilen hasargörebilirlik bilgisi yukarıda bahsi geçen çalışma için ikinci kademe değerlendirme yöntemine alternatif olarak önerilebilir. Bu kısım, ikinci kademe değerlendirme çalışmasının bir uygulamasıdır.

Fatih Bölgesi Yapı Envanteri

Fatih bölgesi yapı envanteri 17108 adet betonarme bina hakkında bilgi içermektedir. Bu çalışmadaki hasar potansiyeli eğrileri, 3, 5, 7 ve 9 katlı yapılar için türetildiğinden, buna karşılık gelen bina bilgisi tüm envanter içerisinde taranmış ve çalışmada kullanılacak kısım ayıklanmıştır. Sonuç olarak 8516 bina bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Bu yapı stoğu içerisinde 9 katlı yapı olmadığını ifade etmek faydalı olacaktır. 73 adet 3 katlı, 6342 adet 5 katlı ve 1436 adet 7 katlı yapı mevcuttur.

Hızlı değerlendirme metodu sismik değerlendirme yöntemleri arasında en basit metottur. Herhangi bir analiz içermez. Amacı ikinci kademe değerlendirmesi yapılacak öncelikli binaları belirlemektir (Sucuoğlu ve Yazgan 2003). Hızlı değerlendirme metodu için kullanılan parametreler ve baz puanlar yardımı ile bina deprem puanı hesaplanır. Hızlı değerlendirme metodu sonunda elde edilen bina deprem puanlarının yapı sınıfı ve kat sayısına bağlı dökümü Tablo 4’te verilmiştir. Bu puanlar her bir binaya bir yapı sınıfı tayin etmek amacı ile kullanılabilir. Bu şekilde, elde edilen hasar potansiyeli eğrilerini kullanmak mümkün olacaktır. Burada kriter, bina deprem puanı (PAS) olarak kabul edilmiş; 100 ve üzerinde bir puana sahip binalar iyi, 50 ve 100 arasında puana sahip olan binalar tipik, 50’nin altında puana sahip binalar ise zayıf sınıfa dahil kabul edilmiştir. Buna göre 409 binanın iyi yapı sınıfına ait, 5460 binanın tipik yapı sınıfına ait ve 2647 binanın zayıf yapı sınıfına ait olduğu görülür.

Hasar Tayin Analizi

Bu çalışmada önerilen ikinci kademe değerlendirme metodu üç kısımdan oluşur. Bunlar, sismik tehlike tayini, bina envanteri ve hasar potansiyeli eğrileridir. Sismik tehlikenin tayini için İstanbul Büyükşehir Belediyesi aracılığıyla yürütülmüş diğer çalışmalar (Japan International Co-operation Agency ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002) baz alınmıştır. MYH deprem şiddet parametresi

olarak kabul edilmiş, 72 yıllık bir tekrar periyodu için hazırlanan senaryo deprem değerleri kullanılmıştır. Buna göre hasar tayin analizi üç kısımda gerçekleştirilir.

- 1) Binaların deprem puanı hızlı değerlendirme yöntemi ile belirlenir.
- 2) Binalar bu puanlara göre iyi, tipik ya da zayıf olarak sınıflandırılır.
- 3) Her bina için kat sayısı (3, 5, 7 ve 9) ve ait olduğu yapı sınıfı (iyi, tipik, zayıf) göz önüne alınarak belirlenen hasar potansiyeli eğrisi ile belli bir MYH değeri için hasar ihtimalleri bulunur.

Tablo 4. Kat sayısı ve yapı sınıfına göre bina sayısı

Bina Deprem Puanı	Yapı Sınıfı	3-Katlı	5- Katlı	7- Katlı
$100 \leq PAS$	İYİ	353	56	0
$90 \leq PAS < 100$	TİPİK	156	67	7
$80 \leq PAS < 90$		67	1454	15
$70 \leq PAS < 80$		94	808	193
$60 \leq PAS < 70$		17	1106	153
$50 < PAS < 60$		14	1120	189
$40 < PAS \leq 50$	ZAYIF	16	429	293
$30 < PAS \leq 40$		3	996	154
$20 < PAS \leq 30$		16	187	312
$10 < PAS \leq 20$		2	77	77
$0 < PAS \leq 10$		0	42	43

İkinci Kademe Değerlendirme

Hasar potansiyeli eğrileri kullanarak yapılan ikinci kademe değerlendirme sonuçları farklı her bir yapı için hasar ihtimallerini içerir. Bu önemli bilgi çeşitli yollardan elde edilebilir:

- 1) Hasar istatistiklerini ve sismik performansını nispeten kötü binaları tespit etmek için ihtimal esaslı bir kriter kullanılabilir. Örneğin, göçme olasılıkları (HS3) belli bir değer üzerinde olan binalar tespit edilirse Tablo 5 elde edilir.

Tablo 5. Göçme olasılıkları, yapı kalitesi ve kat sayısına göre binalar

	ZAYIF	TİPİK	İYİ		3-Kat	5- Kat	7- Kat
P (HS3 \geq 0.5)	2627	25	0	P (HS3 \geq 0.5)	45	1726	881
P (HS3 \geq 0.6)	2567	7	0	P (HS3 \geq 0.6)	37	1656	881
P (HS3 \geq 0.7)	2464	0	0	P (HS3 \geq 0.7)	37	1548	879
P (HS3 \geq 0.8)	1577	0	0	P (HS3 \geq 0.8)	37	661	879
P (HS3 \geq 0.9)	913	0	0	P (HS3 \geq 0.9)	37	73	803

Tablo 5'den görüleceği üzere göçme sınırının aşılma olasılığı %50'den yüksek binalarda yapı sınıfı kalitesi azaldıkça, bina sayısında ciddi bir artış gözükmektedir. Zayıf yapı sınıfına dahil birçok bina yüksek ihtimalle göçme bölgesine geçerken, iyi yapı sınıfı için göçme durumunda bina gözlenmemektedir. Bunun yanı sıra, kat sayısı arttıkça göçme sınırını (HS3) aşan bina sayısı da artmaktadır. Buna göre elden edilen veriler ve istatistikler detaylı değerlendirme kısmına rahatça aktarılabilir.

- 2) Bir diğer ikinci kademe değerlendirme yöntemi tek bir hasargörebilirlik değeri kullanmak olabilir. Buna göre belli bir sismik şiddet seviyesinde her bir yapı için hesaplanan hasar olasılıkları, hasar katsayıları ile çarpılarak tek bir hasargörebilirlik değerine ulaşılabilir. Örneğin Şekil 3'te verilen 5 katlı yapı için (MRF5-T) elde edilen hasar potansiyeli ihtimalleri Tablo 6'daki hasar katsayıları ile çarpılır ve hasargörebilirlik değeri hesaplanır.

Buna göre elde edilen hasargörebilirlik değeri (HD) 0 ile 1 arasında olur. Yüksek değer yapının belirlenmiş deprem şiddeti için hasargörebilirliğinin yüksek olduğuna işaret eder. Buna göre Fatih bölgesindeki yapıların kat sayısı, ait oldukları yapı stoğuna göre hasargörebilirlik değerleri ve buna karşılık gelen bina sayıları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Hasar katsayıları

Hasar Bölgesi	Katsayı
HB1	0
HB2	0.33
HB3	0.67
HB4	1.0

Tablo 7. Bina sayıları ve hasargörebilirlik değerleri

Hasargörebilirlik Değeri	MRF3P	MRF3T	MRF3S	MRF5P	MRF5T	MRF5S	MRF7P	MRF7T	MRF7S
$0.9 < HD \leq 1.0$	37	0	0	1548	0	0	879	0	0
$0.8 < HD \leq 0.9$	0	0	0	163	15	0	0	2	0
$0.7 < HD \leq 0.8$	0	31	0	20	0	0	0	484	0
$0.6 < HD \leq 0.7$	0	11	0	0	2611	0	0	69	0
$0.5 < HD \leq 0.6$	0	85	7	0	1816	10	0	2	0
$0.4 < HD \leq 0.5$	0	215	109	0	0	30	0	0	0
$0.3 < HD \leq 0.4$	0	6	197	0	113	16	0	0	0
$0.2 < HD \leq 0.3$	0	0	40	0	0	0	0	0	0
$0.1 < HD \leq 0.2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0 < HD \leq 0.1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tüm yapı stoğu için hasargörebilirlik değerleri hesaplandıktan sonra göreceli deprem performansının belirlenmesi için Tablo 7'de gösterildiği gibi belli bir sınır değer çizilir ve bu seviyenin altında kalan yapılar nispeten güvenli kabul edilirken, üstte kalanlar detaylı değerlendirme yöntemine tabi tutulur.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, Türkiye'deki az ve orta katlı betonarme çerçevesi yapıların hasargörebilirliğinin incelenmesi için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Fatih bölgesi için ikinci kademe değerlendirme amacı ile kullanılmıştır. Buna göre;

- Hasar potansiyeli eğrilerinin çıkarılmasında çeşitli metotlar kullanmak mümkündür. Sonunda elde edilen eğriler bu metotlara, yapısal modellemeye ve hasar ifadesine dair seçimler ile yakından ilgilidir. Bu tercih ve kabuller benzer analitik modeller ve sismik veri tabanı kullanılsa dahi, farklı araştırmacıların elde ettiği hasargörebilirlik sonuçlarında farklılıklara sebep olabilir.
- Yer hareketi değişkenliği hasar potansiyeli eğrilerine etki eden tüm belirsizliklerin arasında en baskın olanıdır. Yer hareketi belirsizliği ile karşılaştırıldığında yapısal belirsizlikler daha az etkili görünmektedir.
- Hasar sınırı değerlerini olasılık esaslı belirlemek gerekir. Aksi takdirde hasar sınırları söz konusu olduğunda kesin değerlere ulaşmak her zaman mümkün olamamaktadır.
- Elde edilen hasar potansiyeli eğrileri Türkiye'deki yapı stoğunun özellikleri göz önüne alınarak en detaylı analiz yöntemleri ile elde edildiğinden, oldukça yeni ve geleneksel çalışmalara alternatif araçlardır.
- Hasar potansiyeli eğrileri incelendiğinde yapısal hasarın azalan yapı kalitesi ile beraber arttığı görülür. Özellikle yüksek MYH seviyelerinde bu durum daha net ortaya çıkmaktadır.
- Yapısal hasar artan kat sayısı ile orantılı olarak artmaktadır. Türkiye'deki yapıların kat sayısı arttıkça genelde sismik tehlikelere karşı daha hasargörebilir olduğu diğer bazı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur.
- Yakın zamanda karşılaşılabileceğimiz olası deprem felaketlerinin etkilerinin araştırılması ve zararların azaltılmasına yönelik afet senaryosu, master plan ve deprem hasarının belirlenmesi çalışmalarında, hasar potansiyeli eğrilerinin kullanılabileceği görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Bütün sonuç ve değerlendirmeler yazarlara ait olup kurumu bağlamamaktadır.

KAYNAKLAR

- Akkar S, Sucuoğlu H, Yakut A (2005) “Displacement-based fragility functions for low and mid-rise ordinary concrete buildings”, *Earthquake Spectra*, 21(4), 901-92
- ASCE (2000) FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington DC
- Aydoğan V (2003) Seismic vulnerability assessment of existing reinforced concrete buildings in Turkey, M.Sc., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
- Booth E, Spence R, Bird J (2004) “Building Vulnerability Assessment using Pushover Methods – A Turkish Case Study”, *Proceedings of an International Workshop on Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation*, Bled Slovenia, 397-408
- Calvi G M (1999) “A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings”, *Journal of Earthquake Engineering*, 3 (3), 411-438
- Computers and Structures Inc. (2002) SAP 2000 Nonlinear, Version 8.0.8., Structural Analysis Program, Berkeley, CA
- DiPasquale E ve Çakmak AS (1987) Detection and assessment of seismic structural damage, Technical Report NCEER-87-0015, State University of New York, Buffalo, NY
- Ghobarah A, Aly N M, El-Attar M (1998) “Seismic Reliability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.2, No.4, 569-592
- Japan International Co-operation Agency ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi (2002) The Study on a Disaster Prevention / Mitigation Basic Plan in İstanbul including Seismic Microzonation in the Republic of Turkey, Final Report, Tokyo-İstanbul
- Kalkan E ve Gülkan P (2004) “Site-Dependent Spectra Derived From Ground Motion Records in Turkey”, *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute Vol. 20 (4), 1111-1138
- McKay MD, Conover WJ, Beckman RJ (1979) “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code”, *Technometrics*, Vol.21, 239-245
- Mosalam K, Ayala G, White R (1997) Development of Fragility Curves for Masonry Infill - Concrete Frame Buildings. Loss Assessment of Memphis Buildings, Technical Report NCEER 97-0018, Chapter 7.c: 139-158
- Orhunbilge N (1997) Örnekleme Yöntemleri ve Hipotez Testleri, İ.Ü. İşletme Fakültesi Yayınları, İstanbul
- Özcebe G, Ersoy U, Tankut T, Akyüz U, Erduran E, Keskin S, Mertol C (2002) “Mevcut Betonarme Binaların Deprem Güvenliklerinin Arttırılması”, *ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 14 Ekim, 13-21
- Özcebe G, Yücemem MS, Aydoğan V, Yakut A (2003) Preliminary Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Turkey – Part I: Statistical Model Based on Structural Characteristics, Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, NATO Science Series IV/29, 29-42
- Sucuoğlu H ve Yazgan U (2003) Simple Survey Procedures for Seismic Risk Assessment in: Urban Building Stocks, Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, NATO Science Series IV/29, 97-118
- Sucuoğlu H, Gülkan P, Erberik A, Akkar S (1999) “Measures of Ground Motion Intensity in Seismic Design”, *Proceedings of the Uğur Ersoy Symposium on Structural Engineering, 1999*. Ankara, Türkiye
- Valles RE, Reinhorn AM, Kunnath SK, Li C, Madan A (1996) IDARC-2D Version 4.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings, Technical Report NCEER-96-0010, Buffalo, NY
- Yakut A, Aydoğan V, Özcebe G, Yücemem MS (2003) Preliminary Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Turkey – Part II: Inclusion of Site Characteristics, Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, NATO Science Series IV/29, 43-58