

Sismik Yükler Altında Yumuşak Kat Etkisinin Yapıların Hasar Görebilirliğine Etkisi

^{*1}Abdullillah Yılmaz ve ²Mehmet Emin Öncü

^{*1}Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, yumuşak kat düzensizliğine sahip betonarme yapıların sismik yükler altındaki hasar görebilirlikleri Artımsal Dinamik Analiz (IDA) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı zemin kat yüksekliği ve dolgu duvar düzenine sahip altı farklı yapı modeli oluşturulmuş ve her bir yapı, çeşitli ölçeklenmiş yer hareketlerine maruz bırakılarak yapısal tepkileri analiz edilmiştir. Analizlerde hasar ölçütü olarak görel kat ötelenmesi, şiddet ölçütü olarak ise En Büyük Yer İvmesi (PGA) kullanılmıştır. Elde edilen IDA eğrileri doğrultusunda, her bir model için OP, IO, DC, LS ve CP performans seviyelerine karşılık gelen kırılma eğrileri türetilmiştir. Sonuçlar, zemin katta dolgu duvar eksikliği ve kat yüksekliği artışının yapının yatay rijitliğini azalttığını, bu durumun ise kırılma eğrileri önemli ölçüde artırarak daha düşük PGA seviyelerinde yüksek hasar olasılıklarına yol açtığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, yapı tasarımında geometrik ve dayanım yönünden sürekliliğin önemine dikkat çekmektedir.

Anahtar kelimeler: Yumuşak kat, kırılma, artımsal dinamik analiz, betonarme, dolgu duvar

Abstract

In this study, the seismic fragility of reinforced concrete structures with soft-story irregularities is evaluated using the Incremental Dynamic Analysis (IDA) method. Six structural models with varying ground story heights and infill wall configurations were developed and subjected to scaled ground motion records to assess their structural responses. Interstory drift ratio was used as the damage measure, while Peak Ground Acceleration (PGA) was selected as the intensity measure. Based on the IDA curves, fragility functions corresponding to the OP, IO, DC, LS, and CP performance levels were derived for each model. The results indicate that increasing ground story height and absence of infill walls in the lower stories significantly reduce lateral stiffness, leading to greater fragility and higher damage probabilities at lower PGA levels. These findings highlight the critical role of stiffness continuity and geometric regularity in ensuring seismic resilience of structures.

Keywords: Soft-story, fragility, incremental dynamic analysis; reinforced concrete, infill wall

1. Giriş

Türkiye, aktif tektonik kuşakta yer alması nedeniyle sürekli bir deprem tehlikesi altındadır. 2023 yılında Güney Anadolu Fay Hattı (GAF) üzerinde meydana gelen 7.6 Mw ve 7.7 Mw büyüklüğündeki depremler, doğal bir olayın kısa sürede büyük bir felakete dönüşebileceğini açıkça ortaya koymuştur. Gerek geçmişte yaşanan gerekse gelecekte meydana gelmesi muhtemel

*Corresponding author: Address: Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt Üniversitesi, Türkiye, E-mail address: abdullillah.yilmaz@siirt.edu.tr Phone: +904842121111

depremlerde, yapısal düzensizlikler içeren binalar — özellikle yumuşak kat ve zayıf kat gibi düzensizlikler barındıranlar — daha fazla hasar görmeye eğilimlidir. 2017 yılında gerçekleşen Pohang Depremi sırasında, piloti bölgesinde yer alan çok sayıda yapı farklı düzeylerde hasar almıştır. Bu hasarların büyük ölçüde yapısal düzensizliklerden kaynaklandığı belirlenmiştir [1]. Uluslararası Bina Kodu (IBC), yumuşak kat düzensizliğini; bir yapının belirli bir katının, alt veya üst katlara kıyasla yatay yüklere karşı önemli ölçüde daha düşük ya da daha yüksek rijitliğe sahip olması durumu olarak tanımlamaktadır [2]. Yumuşak kat oluşumunun başlıca nedenleri arasında; katlar arasındaki dolgu duvar oranının ani değişimi ve kat yüksekliklerinin farklılığı yer almaktadır. Literatürde yer alan birçok çalışma, bu tür yapısal düzensizliklere sahip betonarme binaların depremler sırasında düşük performans sergilediğini ortaya koymuştur [3–6]. Katlar arasındaki ani rijitlik değişimi, sismik enerjinin belirli bir katta yoğunlaşmasına neden olarak hasarın bu bölgede toplanmasına yol açmaktadır. Bu durum, günümüzde meydana gelen depremlerde de betonarme yapıların yıkımında belirleyici bir rol oynamaktadır [7–11]. Nitekim, 6 Şubat 2023'te merkez üsleri Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçeleri olan 7.7 Mw ve 7.6 Mw büyüklüğündeki depremler sırasında çok sayıda bina, özellikle yumuşak kat düzensizliği nedeniyle ağır hasar görmüştür [12]. Tüm bu olumsuzluklara rağmen, yumuşak kat düzensizliği bulunan yapıların hem ülkemizde hem de dünya genelinde hâlâ yaygın biçimde kullanılmakta olması, bu sorunun ciddiyetini daha da artırmaktadır [11].

Sismik risk değerlendirme süreci, gelecekte meydana gelebilecek öngörülemeyen depremler karşısında yapıların güvenlik ve performans seviyelerinin tahmin edilmesini amaçlamakta olup, bu süreçte genellikle olasılıksal yaklaşımlara başvurulmaktadır. Bu bağlamda, sismik kırılgenlik eğrileri, bölgesel sismik riskin ve olası kayıpların öngörülmesi ile deprem yönetmeliklerinin oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır [13]. Deprem sonrası yapılarda meydana gelebilecek hasarlar, çeşitli yöntemlerle geliştirilen kırılgenlik eğrileri yardımıyla tahmin edilebilmektedir. Temel olarak bu eğriler, yapı üzerine gelen sismik talebin, yapının kapasitesine eşit veya daha büyük olma olasılığını temsil eder. Kırılgenlik eğrileri, belirli bir yapı segmenti ya da yapı sınıfı için türetilabilmekte ve bu sayede yapısal sistemin deprem esnasında hasar görme olasılığına dair genel bir değerlendirme sunmaktadır [14]. Depremin şiddeti arttıkça farklı hasar seviyelerine ulaşma olasılığını tahmin etmeye olanak sağlayan bu eğrilerin doğru biçimde modellenmesi, sağlıklı bir hasar öngörüsü için hayati önemdedir [15]. Sismik kırılgenlik eğrilerinin elde edilmesinde çoğunlukla doğrusal olmayan dinamik analizler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kapasite spektrumu yöntemi (Capacity Spectrum Method - CSM) gibi doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri de analitik kırılgenlik eğrilerinin türetilmesinde alternatif bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır [14]. Shinozuka ve arkadaşları (2000b), çalışmalarında ATC (1996) tarafından belirlenen ilkeler doğrultusunda CSM yöntemini kullanarak doğrusal olmayan statik analiz yoluyla yapısal hasar olasılıklarını incelemişlerdir. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen kırılgenlik eğrileri ile doğrusal olmayan dinamik analiz sonucu elde edilen eğriler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Shinozuka ve ekibine göre, doğrusal olmayan dinamik analiz, yapıların elastik olmayan sismik taleplerinin öngörülmesinde en güvenilir yöntemlerden biri olup hem geometrik hem de malzeme bazlı doğrusal olmayan davranışları dikkate alarak yapıların deprem etkilerine karşı verdiği tepkileri en gerçekçi şekilde ortaya koymaktadır [14]. Farklı yer hareketi senaryolarına dayalı ivme kombinasyonlarının kullanıldığı bu analizler, görece düşük belirsizlik düzeyiyle yüksek doğrulukta sonuçlar sunabilmeleri nedeniyle, sismik değerlendirme çalışmalarında güçlü ve güvenilir bir yöntem olarak kabul edilmektedir [16].

Yapıların hasar görebilirliğinin değerlendirilebilmesi için kırılgenlik eğrilerinin oluşturulması gerekmektedir. Literatürde yapılan incelemeler, bu eğrilerin geliştirilmesinde yaygın olarak üç temel yöntemin kullanıldığını ortaya koymaktadır. Şekil 1’de de gösterildiği üzere bu yöntemler; ampirik yöntem [17,18], analitik yöntem [19,20], ve sezgisel yöntem [21] olarak sınıflandırılmaktadır [22].



Şekil 1. Kırılgenlik eğrilerinin geliştirilme teknikleri

Yeşilyurt (2021), tek katlı prefabrik betonarme sanayi yapılarının çeşitli yapısal ve geometrik parametreler dikkate alınarak hasar görebilirliklerini değerlendirmiştir [23]. Güvensoy (2023), tek katlı prefabrik yapıların farklı deprem yönetmeliklerine göre performansını, gerçek ivme kayıtları kullanarak incelemiş ve hasar görebilirlik eğrileri aracılığıyla bu yönetmelikleri karşılaştırmıştır [24]. Nemutlu (2023), Bingöl il merkezindeki konut tipi betonarme yapıların deprem performansını analiz etmiş; bu analiz sonucunda elde edilen verilere dayanarak bölgeye özgü kırılgenlik eğrileri geliştirmiştir [25]. Kim ve arkadaşları (2015), yapısal düzensizlik içeren pilotis binalar için artımsal dinamik analizler kullanarak sismik kırılgenlik fonksiyonları oluşturmuştur [1]. Akansel (2011), burulma düzensizliği bulunan perde duvarlı bir yapının hasar görebilirliğini araştıran bir çalışma gerçekleştirmiştir [26]. Del Gaudio ve çalışma arkadaşları (2020), son 50 yıla ait hasar verilerini esas alarak İtalya’daki betonarme yapı stoğunu temsil eden farklı bina sınıfları için hasar görebilirlik ve kırılgenlik eğrileri tanımlamıştır [15]. Yön [27], 2020 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, kırılgenlik eğrilerinden yararlanarak 2007 ve 2018 Türk Deprem Yönetmeliklerine göre betonarme binaların sismik kırılgenliğini değerlendirmiştir. Bu kapsamda, tipik beş ve yedi katlı betonarme binalar seçilmiş ve analizlerde Artımsal Dinamik Analiz (IDA) yöntemi kullanılmıştır. Zuccaro ve ekibi (2021), İtalya’daki yığma yapılar için hasar olasılık matrislerinden yararlanarak hasar görebilirlik eğrileri modeli geliştirmiştir [28]. Karaşin ve Öncü (2023) ise Bingöl ilinde yer alan bir okul binası için HAZUS 2022, 1998, DBYBHY-2007 ve 2018-TBDY yönetmeliklerine göre kırılgenlik eğrilerini belirlemiştir [29].

Bu çalışmanın amacı, yaygın olarak karşılaşılan, orta yükseklikteki yumuşak kat düzensizliğine sahip betonarme yapıların hasar görebilirliklerinin kırılgenlik eğrileri yardımıyla değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, kırılgenlik eğrileri oluşturulurken literatürde sıkça tercih edilen Artımsal Dinamik Analiz (Incremental Dynamic Analysis – IDA) yöntemi kullanılmıştır. Yapı davranışını etkileyen dolgu duvar varlığı ve kat yüksekliği değişimlerinin etkisini analiz edebilmek amacıyla dört farklı yapı senaryosu oluşturulmuştur. Birinci senaryoda, tüm kat yükseklikleri 3 metre olup, hiçbir katta dolgu duvar bulunmamaktadır ve referans olarak kullanılmıştır. İkinci senaryoda, yalnızca zemin kat yüksekliği artırılmış, diğer katlar 3 metre

olarak korunmuş ve tüm katlarda dolgu duvarı bulunmamaktadır; bu sayede kat yüksekliğinin etkisi izole şekilde incelenmiştir. Üçüncü senaryoda, tüm kat yükseklikleri 3 metre olup sadece zemin katta dolgu duvarı bulunmazken üst katlarda dolgu duvarları yer almaktadır; bu senaryo dolgu duvar eksikliğinin etkisini analiz etmeyi hedeflemektedir. Dördüncü ve son senaryoda ise hem zemin kat yüksekliği artırılmış hem de bu katta dolgu duvarı bulunmamaktadır; üst katlar ise 3 metre yüksekliğinde olup dolgu duvarlara sahiptir. Bu senaryo, zemin kata özgü geometrik ve dayanım kaynaklı düzensizliklerin birleşik etkisinin incelenmesini sağlamaktadır. Bu dört senaryo sayesinde, dolgu duvar varlığı ile kat yüksekliği değişimlerinin yapıların sismik davranışı üzerindeki bireysel ve birleşik etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. Yöntem ve Analiz Süreci

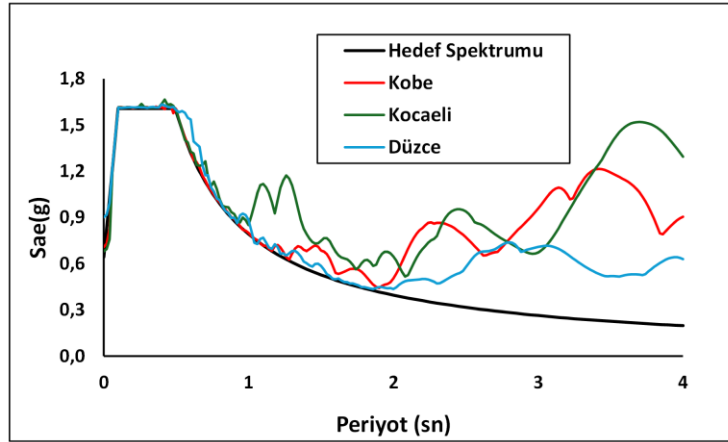
2.1. Artımsal dinamik analiz (IDA)

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yönteminin geliştirilmiş ve kapsamı genişletilmiş bir versiyonu olarak kabul edilen Artımsal Dinamik Analiz, sismik yükler altındaki yapıların dinamik tepkilerini değerlendirmede etkin bir araç olarak literatürde yerini almıştır [30]. İlk olarak Bertero [31] tarafından 1977 yılında önerilen bu yöntem, ilerleyen yıllarda Bazzurro ve Cornell [32], Bazzurro vd. [33], Vamvatsikos ve Cornell [34], Lin ve Baker [35], Jalayer vd. [36] ve Miano vd. [37] gibi birçok araştırmacı tarafından detaylı biçimde incelenmiş, geliştirilmiş ve alana önemli katkılar sağlamıştır.

Artımsal dinamik analizden önce gerçekleştirilmesi gereken temel adımlardan biri, uygun yer hareketi kayıtlarının seçilmesidir. Deprem kayıtlarının seçiminde dikkate alınması gereken çeşitli kriterler bulunmaktadır ve bunların başında depremin büyüklüğü gelmektedir. Literatürde birçok araştırmacı, analizlerde kullanılacak yer hareketi kayıtlarının 6.5 büyüklüğünden büyük depremlerden elde edilmesi gerektiğini; 6.5'in altındaki depremlerin ise genellikle yapısal olmayan hasarlara yol açtığını ifade etmiştir [40]. Artımsal dinamik analizlerde kullanılacak yer hareketlerinin sayısı konusunda ise farklı sismik standartlar (ATC, 1996; UBC, 1997; NEHRP, 2005) en az üç veya yedi adet yer hareketi kaydının tercih edilmesini önermektedir [38, 39]. Bunun yanı sıra, kayıt seçimi sırasında depremin büyüklüğü, pik yer ivmesi (PGA), yapının fay hattına olan mesafesi ve zemin sınıfı gibi parametrelerin dikkate alınması önem arz etmektedir [39]. Bu çalışmada, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) NGA veri tabanından temin edilen üç farklı kuvvetli yer hareketi seti kullanılmıştır. Seçilen yer hareketlerinin özellikleri Tablo 1'de sunulmakta; bu kayıtlar, SismoMatch yazılımı aracılığıyla ölçeklendirilmiş ve zemin tipiyle uyum sağlamak amacıyla hedef tepki spektrumuna göre, Şekil 2'de gösterildiği şekilde eşleştirilmiştir.

Tablo 1. Analizde kullanılan deprem kayıtlarına ilişkin bilgiler

No	Deprem	Deprem Yılı	İstasyon	Deprem Büyüklüğü (Mw)	(Vs) ₃₀ (m/sn)
1	Kocaeli, Türkiye	1999	Botas	7.51	341.56
2	Düzce, Türkiye	1999	Bursa Tofas	7.14	289.69
3	Kobe, Japonya	1995	OSAJ	6.90	256.05



Şekil 2. Yer hareketi kayıtlarının hedef tepki spektrumuna uygun şekilde ölçeklendirilmesi

2.2. Ötelenme

Ötelenmeler, bir yapının yanal yüklere karşı gösterdiği performansın değerlendirilmesinde ve yapısal çökme riski taşıyan kritik hasarların belirlenmesinde etkili bir parametre olarak kullanılmaktadır. Yüzde ötelenme değeri, analiz sonucunda elde edilen en büyük çatı yer değiştirmesinin yapının toplam yüksekliğine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır [38]. Bu çalışmada kırılmalık eğrilerinin oluşturulmasında, Xue ve ark. [40] tarafından yüzde ötelenmeye göre tanımlanan ve Kassem ve ark. [38] da benimsediği beş adet performans seviyesi kullanılmıştır. Bu performans seviyeleri; Kullanıma Devam (Operational – OP), Hemen Kullanım (Immediate Occupancy – IO), Kontrolü Hasar (Damage Control – DC), Can Güvenliği (Life Safety – LS) ve Çökmenin Önlenmesi (Collapse Prevention – CP) şeklinde sıralanmaktadır. Katlar arası görece ötelenmeye (kayma oranına) dayalı yapı performans değerlendirmesi kapsamında, OP için %0.5, IO için %1.0, DC için %1.5, LS için %2.0 ve CP için %2.5 oranında eşik değerler tanımlanmıştır [38, 40]. Kırılmalık eğrilerinin oluşturulmasında iki temel parametreye ihtiyaç duyulmaktadır: ortalama (μ) ve standart sapma (β).

Kırılmalık ya da hasar görülebilirlik eğrisi, belirli yer hareketi parametreleri altında farklı hasar düzeylerinin meydana gelme olasılığını ifade etmektedir. Bu tür eğrilerin oluşturulmasında, PGA (En Büyük Yer İvmesi), PGV (En Büyük Yer Hızı) veya spektral ivme gibi sismik talep parametreleri kullanılabilir. Bu çalışmada Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz yöntemi uygulandığı için, kırılmalık eğrilerinin oluşturulmasında sismik talep parametresi olarak PGA tercih edilmiştir. Bu çalışmada, analiz yöntemi olarak Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz kullanılmıştır. Bu nedenle, kırılmalık eğrilerinin oluşturulmasında yer hareketi şiddet ölçütü olarak En Büyük Yer İvmesi (PGA) tercih edilmiştir.

2.3. Hasar görülebilirlik analizleri için sayısal yapı modelleme

Hasar görülebilirlik analizleri kapsamında, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) esaslarına göre tasarlanmış betonarme bir çerçeve sistem ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, farklı yapı konfigürasyonlarını temsil eden altı farklı çerçeve modeli değerlendirilmiştir. Referans model olarak, tüm kat yüksekliklerinin sabit tutulduğu ve hiçbir katta dolgu duvar bulunmayan boş

çerçeve modeli (BÇ-I) kullanılmıştır. İkinci modelde, yalnızca zemin kat yüksekliği 3.5 metreye çıkarılmış ve yine tüm katlarda dolgu duvarı bulunmayan boş çerçeve (BÇ-II) incelenmiştir. Üçüncü modelde ise zemin kat yüksekliği 4.0 metre olarak artırılmış olup, diğer kat yükseklikleri sabit tutulmuş ve hiçbir katta dolgu duvarı yer almamaktadır (BÇ-III). Dördüncü modelde, tüm kat yükseklikleri sabit tutulmuş; zemin kat hariç diğer tüm katlarda dolgu duvar bulunan dolgu duvarlı çerçeve modeli (BÇ-IV) ele alınmıştır. Beşinci modelde, zemin kat yüksekliği 3.5 metre olarak belirlenmiş ve sadece zemin katta dolgu duvarı bulunmayan bir yapı konfigürasyonu oluşturulmuştur (BÇ-V). Altıncı ve son modelde ise zemin kat yüksekliği 4.0 metreye çıkarılmış, yine yalnızca zemin katta dolgu duvarı bulunmayan bir çerçeve modeli (BÇ-VI) analiz edilmiştir. Modellenen aks üzerindeki kolon ve kiriş boyutları sırasıyla 50×50 cm ve 45×45 cm olarak alınmıştır. Kiriş boyutları ise 25×50 cm olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, taşıyıcı sistem elemanlarında kullanılan betonarme kesitlerin malzeme özellikleri, TBDY 2018 esaslarına uygun şekilde tanımlanmıştır. Betonarme elemanlarda C25/30 sınıfı beton kullanılırken hem enine hem de boyuna donatı çeliği olarak B420C sınıfı çelik tercih edilmiştir. Çerçeve sistemi, sismik yüklerin yanı sıra, yerçekimi etkileri altında da analiz edilmiş olup; bu kapsamda ölü yük olarak 10 kN/m² ve hareketli yük olarak 5 kN/m² değerlerinde düşey yükler uygulanmıştır.

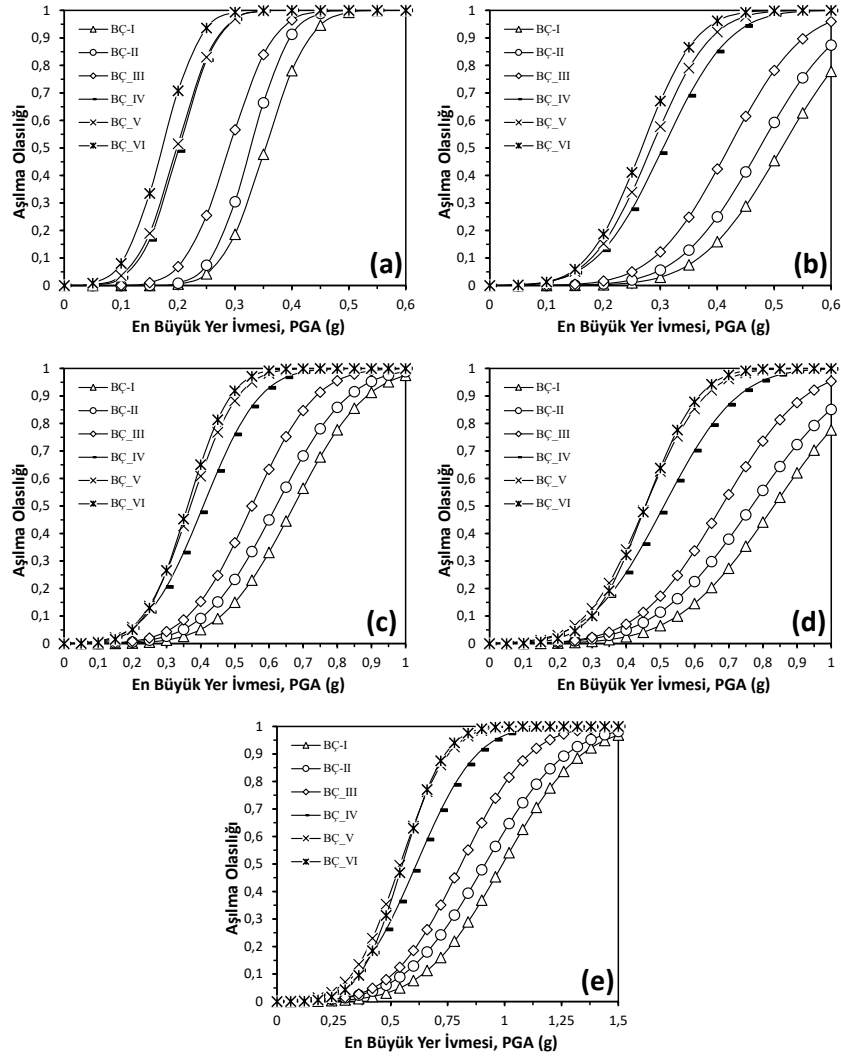
3. Bulgular ve Değerlendirmeler

Taşıyıcı sistemin, PGA = 1.0 g düzeyindeki kuvvetli yer hareketine maruz bırakılması durumunda, Can Güvenliği (LS) performans seviyesine ulaşma olasılıklarının zemin kat yüksekliği arttıkça belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Referans model olan BÇ-I için LS seviyesine ulaşma olasılığı %77 olarak hesaplanmıştır.

Zemin kat yüksekliği 3.5 metreye çıkarılan BÇ-II modelinde bu olasılık %85'e yükselirken, 4.0 metre olarak tanımlanan BÇ-III modelinde %95 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, artan kat yüksekliğinin yapısal rijitlikte neden olduğu azalma nedeniyle sismik talepler karşısında daha yüksek hasar olasılıklarıyla sonuçlandığını göstermektedir. Öte yandan, dolgu duvar içeren modeller (BÇ-IV, BÇ-V ve BÇ-VI) için LS seviyesine ulaşma olasılığı %100 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, Göçmenin Önlenmesi (CP) performans seviyesine ulaşma olasılığı da zemin kat yüksekliğindeki artışla birlikte yükselmektedir. Referans model BÇ-I için CP seviyesine ulaşma olasılığı %52 iken, bu oran BÇ-II modelinde %62'ye, BÇ-III modelinde ise %80'e çıkmaktadır. Dolgu duvar içeren BÇ-IV, BÇ-V ve BÇ-VI modellerinde ise CP seviyesine ulaşma olasılığı %97 ile %100 arasında değişmekte olup, bu durum yapısal düzensizliklerin ve rijitlik farklarının etkisiyle sismik performansın kırılmalıya dönüştüğünü göstermektedir (Şekil 3).

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, yumuşak kat düzensizliğine sahip betonarme yapıların sismik davranışları Artımsal Dinamik Analiz yöntemi ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda kırılmalı eğrileri oluşturulmuştur. Farklı zemin kat yüksekliği ve dolgu duvar konfigürasyonlarına sahip altı farklı yapı modeli üzerinden yapılan analizler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır: Zemin kat yüksekliğinin artırılması, yapıların yatay rijitliğini düşürerek sismik taleplere karşı daha kırıl-



Şekil 3. Farklı performans seviyelerine karşılık gelen hasar görebilirlik eğrileri: (a) Kullanıma Devam (OP), (b) Hemen Kullanım (IO), (c) Kontrollü Hasar (DC), (d) Can Güvenliği (LS), (e) Göçmenin Önlenmesi (CP)

gan hale gelmesine neden olmuştur. Yalnızca zemin katı yükseltilmiş modellerde, aynı hasar seviyesine ulaşmak için gerekli PGA değerlerinde anlamlı düşüşler gözlemlenmiştir. Zemin katta dolgu duvar bulunmaması, katlar arası rijitlik farkını artırarak yumuşak kat oluşumunu tetiklemiş; bu durum düşük şiddetli yer hareketlerinde dahi hasar oluşma olasılığını yükseltmiştir. Dolgu duvar içeren modellerde, düşük PGA seviyelerinde rijitlik artışı nedeniyle kısa vadede avantajlı bir davranış gözlenmiş olsa da yüksek şiddetli depremlerde bu rijitliğin ani kırılganlığa dönüştüğü tespit edilmiştir. Kırılganlık eğrileri, zemin kat yüksekliği ve dolgu duvar dağılımındaki düzensizliklerin yapıların Göçmenin Önlenmesi (CP) seviyesine ulaşma olasılıklarını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. CP seviyesine ulaşma olasılığı bazı modellerde %100'e kadar yükselmiştir. Elde edilen bulgular, yapı tasarımında kat yüksekliği ve dolgu duvar dağılımı gibi parametrelerin yalnızca mimari değil, aynı zamanda sismik performans açısından da kritik rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, hem yapı tasarım

sürecine katkı sağlamak hem de gelecekte gerçekleştirilecek benzer araştırmalara yol göstermek amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmaktadır: Yapısal tasarım aşamasında zemin kat yüksekliği standartlara uygun sınırlar içinde tutulmalı, özellikle ticari amaçla kat yüksekliği artırılan yapılarda yatay rijitlik kayıpları göz önünde bulundurularak gerekli mühendislik önlemleri alınmalıdır. Dolgu duvarların yapısal sistem üzerindeki etkisi, yalnızca dolgu elemanı olarak değil, yapının sismik performansına doğrudan etki eden bir unsur olarak ele alınmalı; bu duvarların modellenmesi yapı analizlerinde ihmal edilmemelidir. Yumuşak kat düzensizliği içeren yapıların performans analizi, geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri ile detaylı biçimde değerlendirilmelidir. Yüksek sismik tehlike bölgelerinde, zemin katta dolgu duvar eksikliği ve kat yüksekliği artışının birlikte değerlendirilerek yumuşak kat oluşumunu önleyici yapısal detaylar uygulanmalıdır. Gerekirse zemin katlarda ilave yatay ve düşey taşıyıcı elemanlar planlanmalıdır. Gelecek çalışmalarda, dolgu duvarların malzeme türü (tuğla, gaz beton, vb.), yerleşimi, açıklık oranı ve bağlanma şekli gibi parametrelerin kırılma davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Farklı zemin türleri, taşıyıcı sistem tipleri (çerçeve-perde sistemleri, kompozit sistemler) ve kat sayısına sahip yapılarla kapsam genişletilerek parametrik analizlerin yapılması, yumuşak kat etkisine dair genel geçer mühendislik çıkarımlarına ulaşılmasını sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] Kim T, Park JH, Yu E. Seismic fragility of low-rise piloti buildings based on 2017 Pohang earthquake damage. *Journal of Building Engineering* 2023;76:107032.
- [2] Matiyas S, Workeluel N, Mohanty T, Saha P. Review of different analysis and strengthening techniques of soft story buildings. *Mater Today Proc* 2023.
- [3] Rutenberg A, Jennings PC, Housner GW. The response of veterans hospital building 41 in the San Fernando earthquake. *Earthq Eng Struct Dyn* 1982;10:359–379.
- [4] Mahin SA, Bertero VV, Chopra AK, Collins RG. Response of the Olive view hospital main building during the San Fernando earthquake., Report No. EERC 76-22 (1976) 320.
- [5] Esteva L. Nonlinear Seismic Response of Soft-First-Story Buildings Subjected to Narrow-Band Accelerograms, *Earthquake Spectra* 1992;8:373–389.
- [6] Selvaduray G, Vukazich S, Arnold S, Tran J. Inventory of soft-first story multi-family dwellings in Santa Clara County., San Jose, CA. 2003.
- [7] Adalier K, Aydingun O. Structural engineering aspects of the June 27, 1998 Adana-Ceyhan (Turkey) earthquake, *Eng Struct* 2001;23:343–355.
- [8] Doğangün A. Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, *Eng Struct* 2004;26:841–856.

- [9] Sezen H, Whittaker AS, Elwood KJ, Mosalam KM. Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999, Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey, *Eng Struct* 2003;25(1):103–114.
- [10] Noorifard A, Tabeshpour MR, Saradj FM. New approximate method to identify soft story caused by infill walls, *Structures* 2020;24:922–939.
- [11] Izadpanah M, Zibasokhan H, Roussis PC, Asteris PG. Pure-bending yielding dissipater for the seismic retrofitting of reinforced concrete buildings with soft-story irregularity, *Structures* 2023;55:933–950.
- [12] Akbaş Ö, Çalışkan A. Deprem etkisinde hasar alan betonarme yapıların düzensizlik türleri yönü ile incelenmesi, in: *All Sciences Proceedings*, 2023: pp. 428–435.
- [13] Budak E. Collapse Fragility analysis of reinforced concrete tall buildings, PhD, Middle East Technical University, 2022.
- [14] Konor S. Fragility evaluation of steel truss railway bridges in Turkey, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, 2017.
- [15] Del Gaudio C, Di Ludovico M, Polese M, Manfredi G, Prota A, Ricci P, Verderame GM. Seismic fragility for Italian RC buildings based on damage data of the last 50 years, *Bulletin of Earthquake Engineering* 2020;18:2023–2059.
- [16] FEMA P-440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency 2005. 392.
- [17] Colombi M, Borzi B, Crowley H, Onida M, Meroni F, Pinho R. Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data, *Bulletin of Earthquake Engineering* 2008;6:485–504.
- [18] Lantada N, Irizarry J, Barbat AH, Goula X, Roca A, Susagna T, Pujades LG. Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method, *Bulletin of Earthquake Engineering* 2010;8:201–229.
- [19] Singhal A, Kiremidjian AS. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage, *Journal of Structural Engineering* 1996; 122(12):1459-1467.
- [20] Rossetto T, Elnashai A. A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures, *Eng Struct* 2005; 27(3):397-409.
- [21] Jaiswal K, Aspinall W, Perkins D, Wald DJ, Porter KA. Use of expert judgment elicitation to estimate seismic vulnerability of selected building types, 15 WCEE .2012.
- [22] Lallemand D, Kiremidjian A, Burton H. Statistical procedures for developing damage fragility curves David, *Earthq Eng Struct Dyn* 2015;44:1373–1389.

- [23] Yeşilyurt A. Prefabrik betonarme endüstriyel yapıların farklı zemin şartlarında hasar görebilirliği ve deprem risk değerlendirmesi. PhD, Gebze Teknik Üniversitesi, 2021.
- [24] Güvensoy G. Mevcut prefabrik sanayi yapılarının hasar görebilirlik eğrilerinin TBDY-2018, EC8-3 ve ASCE 41-17 yönetmeliklerine göre karşılaştırılması. Pamukkale Üniversitesi, 2023.
- [25] Nemutlu ÖF. Bingöl ili şehir merkezindeki binalarda deprem performansı, yapısal riskler ve kayıpların incelenmesi, PhD, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2023.
- [26] V.H. Akansel, Fragility of a shear wall building with torsional irregularity, Phd Thesis, METU, 2011.
- [27] Yön B. Seismic vulnerability assessment of RC buildings according to the 2007 and 2018 Turkish seismic codes. Earthquakes and Structures 2020; 18:709–718.
- [28] Zuccaro G, Perelli FL, De Gregorio D, Cacace F. Empirical vulnerability curves for Italian masonry buildings: evolution of vulnerability model from the DPM to curves as a function of acceleration. Bulletin of Earthquake Engineering 2021; 19:3077-3097.
- [29] Karasin IB, Öncü ME. Comparison of different codes using fragility analysis of a typical school building in Türkiye: Case study of Bingöl Çeltiksuyu. Earthquakes and Structures 2023;25: 235–247.
- [30] Kassem MM, Mohamed Nazri F, Noroozinejad Farsangi E. The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review. Ain Shams Engineering Journal 2020; 11(4):849-864.
- [31] Bertero VV. Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments. Structural Engineering and Structural Mechanics 1977;53:29–79.
- [32] Bazzurro P, Cornell CA. Seismic hazard analysis of nonlinear structures. I: Methodology. Journal of Structural Engineering 1994; 120(11), 3320-3344.
- [33] Bazzurro P, Cornell CA, Shome N, Carbello JE. Three Proposals for Characterizing MDOF Nonlinear Seismic Response. Journal of Structural Engineering 1998; 124(11):1281-1289.
- [34] Vamvatsikos D, Allin C. Incremental dynamic analysis. Earthq Eng Struct Dyn 2002; 31: 491–514.
- [35] Lin T, Baker JW. Introducing adaptive incremental dynamic analysis: A new tool for linking ground motion selection and structural response assessment, Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013. 805–811.

- [36] Jalayer F, De Risi R, Manfredi G. Bayesian Cloud Analysis: Efficient structural fragility assessment using linear regression. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2015; 13:1183–1203.
- [37] Miano A, Jalayer F, Ebrahimian H, Prota A. Cloud to IDA: Efficient fragility assessment with limited scaling. *Earthq Eng Struct Dyn* 2018; 47:1124–1147.
- [38] Kassem MM, Mohamed Nazri F, Noroozinejad Farsangi E. On the quantification of collapse margin of a retrofitted university building in Beirut using a probabilistic approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2020; 23:373–381.
- [39] Saruddin SNA, Nazri FM. Fragility curves for low- and mid-rise buildings in Malaysia. *Procedia Eng* 2015; 125:873–878.
- [40] Xue Q, Wu CW, Chen CC, Chen KC, The draft code for performance-based seismic design of buildings in Taiwan. *Eng Struct* 2008; 30:1535–1547.
- [41] Saruddin SNA, Nazri FM. Fragility curves for low- and mid-rise buildings in Malaysia. *Procedia Eng* 2015; 125:873–878.
- [42] FEMA, A Handbook for -seismic Evaluation of existing Building. 178, 1989.
- [43] T.S. Institution, Turkish Building Earthquake Code, Ministry of Industry and Technology 2018. 416.
- [44] ASCE, American Society of Civil Engineers, Fema 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building, Rehabilitation. 2000.
- [45] Garip ZŞ, Dibekoğlu Ş. Investigation of the effects of infill walls on behavior in reinforced concrete buildings under the influence of earthquake. *International Journal of Engineering Research and Development* 2023; 15(2):344-360.