

Tek Katlı Betonarme Sanayi Yapıları İçin Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi

Ceyhun EREN*

ÖZ

Deprem hasarlarının önceden tahmin edilmesi, başta sigortacılık uygulamaları olmak üzere birçok alanı etkileyen önemli bir konudur. Bu çalışmada, tek katlı betonarme sanayi yapıları için 100'den fazla endüstriyel bina projesi incelenerek belirlenen değişkenlere bağlı hızlı bir deprem hasar tahmin yöntemi geliştirilmiştir. 2007 tarihli Türkiye Deprem Yönetmeliği'nde önerilen doğrusal elastik olmayan yapı performans analiz yöntemi kullanılarak 384 adet analitik hasar tahmin eğrisi elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, mevcut yöntemlere göre aynı deprem performansına sahip olacağı öngörülen yapıların, yeni yöntem kullanıldığında oldukça farklı hasar seviyelerine karşılık gelebildiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme sanayi yapıları, hızlı deprem hasarı hesaplama yöntemi, doğrusal elastik olmayan yapısal analiz, deprem PML değeri (Olası en yüksek hasar).

ABSTRACT

Rapid Loss Estimation Methodology for Single Storey Reinforced Concrete Industrial Buildings

Estimating earthquake losses is an important issue which affects many areas, mainly insurance applications. In this study, a rapid earthquake loss estimation methodology has been developed for single storey reinforced concrete industrial buildings by using parameters determined after investigating more than 100 industrial building projects. 384 analytical loss estimation curves were obtained by using non-linear structural performance analysis method proposed in 2007 Turkish Seismic Code. As a result of the study, it was observed that the buildings, which have the same seismic performances according to the existing methods, could correspond to different damage levels when this new methodology is used.

Keywords: Reinforced concrete industrial buildings, rapid earthquake loss estimation method, non-linear structural analysis, earthquake PML (Probable Maximum Loss).

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 19.03.2013 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2014 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ceyhun.eren@allianz.com.tr

1. GİRİŞ

Son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremlerden de görüldüğü üzere büyük çoğunluğu sıradan konut binaları gibi "Can Güvenliği" performans hedefine göre tasarlanan sanayi yapılarında, deprem hasarlarından dolayı oluşan ekonomik kayıplar oldukça yüksek seviyelere ulaşmıştır. 1999 İzmit Depremi ve 2011 Tohoku Depremleri'ne ait ekonomik kayıplar sırasıyla 1.5-3.5 milyar dolar [1] ve 20-30 milyar dolar [2] olarak belirlenmiştir. Geçmiş depremler göstermiştir ki bu tip binalar, yapısal ve yapısal olmayan hasarların yanında deprem sonrası yangınlar, zararlı kimyasal madde sızıntısı, yangın söndürme sisteminden kaynaklanan su hasarları ve uzun iş durması süreçleri gibi ikincil etkilere de maruz kalmaktadır. Olası bir büyük deprem sırasında yaşanması muhtemel tüm hasarları tahmin edebilmek için çok disiplinli bir yaklaşıma ihtiyaç duyulsa da yapısal hasarlar, hafif sanayi tipi binalarda yaşanabilecek dolaylı ya da dolaysız hasarların tahmin edilmesi için halen belirleyici olmaktadır.

Türkiye'nin önemli endüstriyel bölgelerinde yaşanan Adana-Ceyhan (1998), Kocaeli ve Düzce (1999) Depremleri sonrasında yapılan saha çalışmalarında özellikle prefabrik betonarme sanayi yapılarında, deprem performansı açısından önemli eksikliklerin bulunduğu gözlenmiştir [3]. Ek olarak, bu tip binaların büyük çoğunluğu yüksek deprem riskine (yıllık % 2) [4] sahip Marmara Bölgesi'nde bulunmaktadır.

Sigorta şirketleri, büyük bir depremden sonra karşı karşıya kalacakları deprem hasarlarını önceden tahmin edebilmek için hasar hesaplama yöntemleri kullanmak zorundadırlar. Bununla birlikte, toplam sigorta bedeli açısından portföylerinde oldukça yüksek bir orana sahip sanayi yapıları için çok daha gerçekçi deprem PML (Probable maximum loss - Olası en yüksek hasar) değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. PML terimi, olası bir büyük depremde yaşanabilecek en yüksek hasarın parasal değeri veya bu hasar tutarının toplam sigorta bedeline oranı şeklinde tanımlanabilir [5]. Deprem PML'i konusunda, ASTM (American Society for Testing and Materials) Kuruluşunun yayınladığı dökümanlar [6] bulunsa da genel kabul görmüş, yönetmeliklere girmiş bir hesaplama yöntemi halen mevcut değildir.

Deprem hasar tahmini çalışmaları ilk olarak 1925 Santa Barbara Depremi sonrasında, deprem sigortasının neredeyse hiç yapılmadığı bir dönemde, sigorta şirketlerinin portföylerindeki riskleri değerlendirmesi amacıyla başlatılmıştır. PML hesaplama yöntemlerinin tarihsel gelişimine bakıldığında, özellikle yapı ve deprem mühendislerinin sigorta şirketlerine destek vermeye başlamasıyla birlikte çalışmaların çok daha sistematik bir hale geldiği gözlenmiştir. John Freeman'ın 1932'de yayınlanan ünlü kitabı [7], deprem hasar tahmini konusunda yazılmış ilk kitap olarak kabul edilebilir. 1980'lere gelindiğinde iki önemli kitap daha yayınlanmıştır. Bunlardan ilki; Karl Steinbrugge tarafından 1982 yılında yayınlanan ve deprem PML hesabı konusunda ilk kez sistematik bir yöntemin sunulduğu, *Depremler, Volkanlar ve Tsunamiler: Tehlikelerin Anatomisi* isimli kitaptır [8, 9]. 1985 yılında ise Applied Technology Council (ATC) tarafından *Kaliforniya Deprem Hasar Hesaplama Çalışması* yayınlanmıştır. Genellikle ATC-13 olarak anılan çalışmada, uzman görüşleri yardımıyla oluşturulan modifiye edilmiş Mercalli Şiddeti (MMI)'ne dayanan hasar olasılık matrisleri kullanılarak deprem hasar tahmini yöntemi geliştirilmiştir [10, 9]. İlerleyen yıllarda, ATC-21 olarak da bilinen, FEMA 154 Raporu yayınlamış ve burada, ATC-13'te geliştirilen hasar olasılık matrisleri kullanılarak yeni bir puanlama sistemi geliştirilmiştir [11]. 1989 yılında yine FEMA tarafından deprem hasar tahmini çalışmalarına rehber niteliği taşıyan hasar hesaplama yöntemleri raporu yayınlanmıştır

(NRC, 1989) [12]. 1997 yılına gelindiğinde ise National Institute of Building Sciences tarafından deprem hasar tahmini konusunda o tarihe kadarki en analitik yaklaşım olarak kabul edilen, *HAZUS* isimli bir yazılım geliştirilmiştir. Bu çalışmada oluşturulan hasar görebilirlik eğrileri, MMI yerine spektral ivme ve spektral yerdeğiştirme kriterlerine dayandırılmıştır [13,14]. 2002 yılına gelindiğinde yeni bir puanlama sistemine sahip FEMA 154 raporunun ikinci versiyonu [11] yayınlanmış ve puanlama sistemi bu kez *HAZUS* Metodu'ndaki hasar görebilirlik eğrilerine dayandırılmıştır. Ancak değerlendirme sırasında kullanılan yumuşak kat, plan veya düşey düzensizlikler gibi kriterlerin "İyi" veya "Kötü" şeklindeki cevapları, literatürdeki diğer hızlı değerlendirme yöntemlerinin [15] çoğunda olduğu gibi kullanıcıya bırakılarak analitik bir yaklaşımdan uzaklaşmıştır.

Son on yıl içindeyse, deprem hasar tahmini konusunda özellikle sigorta şirketleri ve kamu kuruluşları için gerek deterministik gerekse olasılık hesaplarına dayanan yazılımlar ile çeşitli modeller geliştirilmiştir. Ancak bu modellerin büyük çoğunluğunda tekil bina analizi yerine bölgesel deprem hasar hesabına odaklanılmış, yapısal hasar görebilirlik eğrileri açısından da en belirleyici kriter olarak bina taşıyıcı sistemi kabul edilmiştir. Sınırlı bina modelleri nedeniyle tekil bina analizleri konusunda mevcut yöntemlerin sonuçları, farklı yapısal özelliklere sahip binalar için bile birebir aynı olabilmektedir.

Büyük çoğunluğu prefabrik betonarme olan Türkiye'deki sanayi yapılarının tekil olarak analiz edilmesine duyulan ihtiyacın bir diğer nedeni de yayınlanan yeni deprem yönetmelikleri ile birlikte tasarım kriterlerinin de zaman içinde değişmesidir. Özellikle prefabrik betonarme yapılar için deprem yükü azaltma katsayısının 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY-07)'de [16] 5'ten 3'e düşürülmesi bu tip yapıların yürürlükteki deprem yönetmeliğinden önce veya sonra inşa edilmiş olmasına göre farklı deprem performansı göstermelerine neden olabilir.

Detaylı bir şekilde irdelenen ihtiyaçtan hareketle bu çalışmanın konusu, tek katlı betonarme sanayi yapıları için analitik bir şekilde deprem hasar tahmini yapabilmek amacıyla deprem mühendisliği konusunda uzman olmayan kişiler tarafından da kullanılabilir hızlı, kolay ve de güvenilir bir yöntem geliştirmektir.

Günümüzde, zaman tanım aralığında yapılan doğrusal olmayan analizlerle binaların olası bir büyük deprem sırasındaki davranışlarını gerçeğe oldukça yakın bir şekilde hesaplamak mümkün olabilmektedir. Ancak gerek deprem kayıtlarını elde etmekteki zorluk gerekse bu tip çalışmaların, yoğun bilgi birikimi ve uzun zaman gerektirmesinden ötürü uygulamaya yönelik daha basit yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, mevcut binaların değerlendirilmesi için DBYBHY-07'de önerilen doğrusal olmayan statik itme analiz yöntemi kullanılmıştır. İzlenecek temel adımlar aşağıda özetlenmiştir;

- İlk olarak; Türkiye'nin farklı bölgelerinde inşa edilmiş 100'den fazla sanayi yapısının incelenmesine yönelik saha ziyaretleri yapılmıştır. Farklı bölgelerde faaliyet gösteren prefabrik betonarme yapı elemanı üreticileri ile görüşmeler yapılmış, hazırlanan anketler ile çalışmaya yön verecek teknik bilgiler temin edilmiştir. Böylece, tek katlı betonarme sanayi yapılarında yükseklik, yatay ve dikey açıklık, çatı detayları, kolon ve kiriş kesit özellikleri, donatı oranları, malzeme bilgileri gibi yapısal ve mimari detaylar ile bu değişkenlerin en küçük ve en yüksek değerleri belirlenmiştir.

Tek Katlı Betonarme Sanayi Yapıları İçin Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi

- Sonrasında, tüm bu değişkenlerin hedef yapıların deprem performansları üzerindeki etkileri analiz edilerek hızlı hasar tahmini yönteminde kullanılacak temel değişkenler belirlenmiştir.
- Özellikle çatı taşıyıcı sistemleri ile çatı örtüleri gibi temel yapı elemanları ve yapı malzemeleri için ağırlık hesabına yönelik kapsamlı araştırma ve çalışmalar yürütülmüştür.
- Belirlenen özelliklerdeki tek katlı sanayi yapıları için modeller oluşturulduktan sonra DBYBHY-07’de önerilen doğrusal olmayan itme analiz yöntemi kullanılarak performans analizlerine başlanmıştır. Bu analizler sırasında, kesit özellikleri ve yükseklik değerleri sabit tutularak aynı deprem yükü altında her üç hasar seviyesine karşılık gelen kritik kütle değerleri (eksenel yük) hesaplanmıştır. Kütle değerindeki her değişim moment-eğrilik ilişkisini ve sonucunda birim şekildeğiştirme değerlerini de değiştirdiğinden kritik kütle hesabında iteratif analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu çok yönlü analizi gerçekleştirebilmek için özel bir yazılım geliştirilmiştir.
- Eksenel yük oranlarının değişimi sırasında, Etkin Rijitlik değeri bulunurken DBYBHY-07’de belirtilen oranlar kullanılmıştır. İkincil moment etkilerinin de hesaba katılabilmesi amacıyla $P-\Delta$ etkileri de dikkate alınmıştır.
- Aynı prosedür, DBYBHY-07’de tanımlanan dört farklı deprem bölgesi ve dört farklı zemin sınıfı için tekrarlanmıştır. Sonuç olarak; değişkenleri kolon yükseliği ve eksenel yük olan toplam 384 adet analitik hasar tahmin eğrisi elde edilmiştir.
- Çalışmanın sonuna yeni geliştirilen yöntemin sonuçları, aynı taşıyıcı sisteme sahip ancak farklı yapısal özellikleri bulunan örnek sanayi yapıları seçilerek mevcut yöntemlerle karşılaştırılmış, gerçek hasar verileri ile ilişkisi araştırılmıştır.

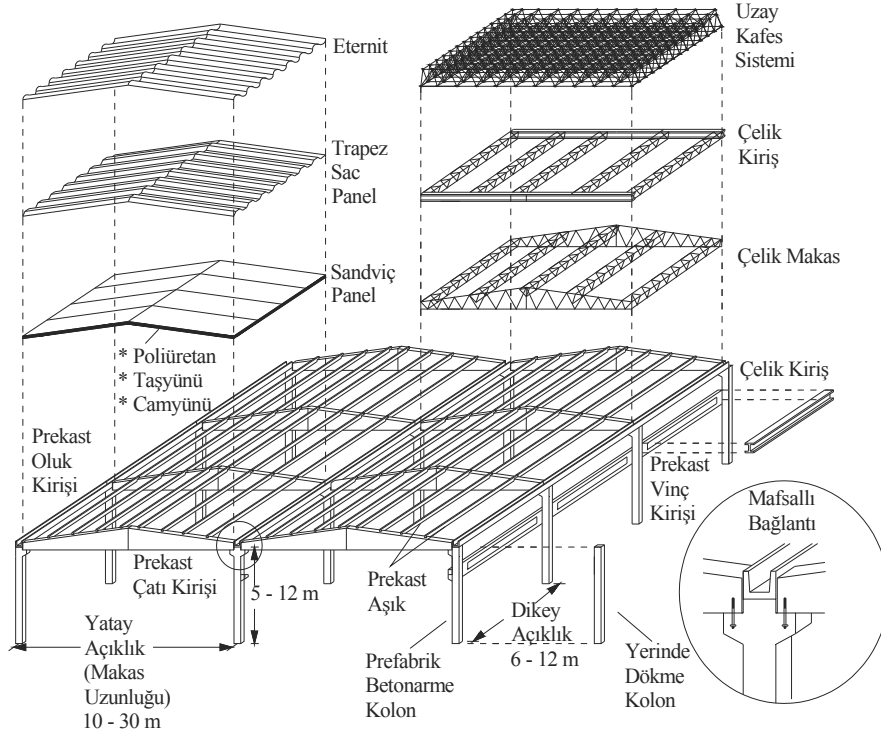
2. BİNA ENVANTER ANALİZİ

Saha çalışmaları ile prefabrik yapı üreticilerinden temin edilen projelerin detaylı olarak incelenmesi sonucu çalışma kapsamındaki bina envanteri, çatı sistemine mafsallı olarak bağlı, birbirine eş kare kesitli kolonlara sahip prefabrik betonarme ve yerinde dökme tek katlı betonarme sanayi yapıları olarak belirlenmiştir.

2.1 Türkiye’deki Betonarme Sanayi Tipi Yapıların Sınıflandırılması

Türkiye’deki sanayi tipi yapıların büyük çoğunluğunu, üretim ve depolama amacıyla kullanılan tek katlı prefabrik betonarme binalar (sanayi tipi yapıların yaklaşık % 90’ı) [17] ile hafif çatı sistemlerini taşıyan yerinde dökme tekil kolonlara sahip betonarme binaların oluşturduğu gözlenmiştir. Hızlı ve düşük maliyetle inşa edilebilmeleri nedeniyle sıkça tercih edilen prefabrik betonarme yapıların mimari ve yapısal özelliklerinin yanında performanslarına ilişkin özellikle Ceyhan (1998), Kocaeli ve Düzce (1999) depremlerinden sonra hazırlanmış kapsamlı çalışmalar mevcuttur [18]. Ancak, DBYBHY-07’den sonra, bu yapısal özelliklerde önemli değişiklikler yaşandığı gözlenmiştir. Son yıllarda inşa edilen sanayi tipi betonarme yapılarda daha büyük kolon kesitleri kullanıldığı söylenebilir.

Bu tip yapılara etki eden yanal ve dikey yükler, temel seviyesinde rijit, üst seviyede ise çatıya mafsallı bağlantıya sahip ters sarkaç olarak tanımlanan kolonlar tarafından karşılanmaktadır. Prekast çatı ve oluk kirişleri ile çelik çatılar, kolonlara mafsallı bir şekilde bağlandığından çatı düzlemindeki her çerçevenin birbirinden bağımsız olarak davrandığı söylenebilir [18]. Şekil 1, Türkiye’de karşılaşılan sanayi tipi betonarme yapıların genel özelliklerini yansıtmaktadır.



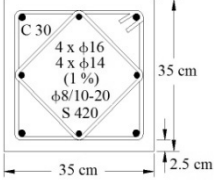
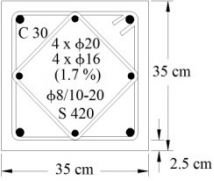
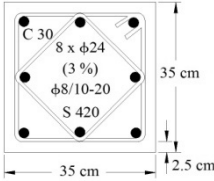
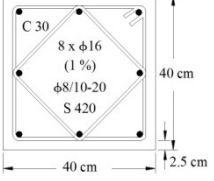
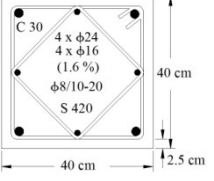
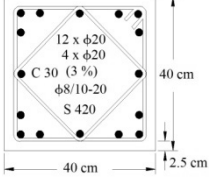
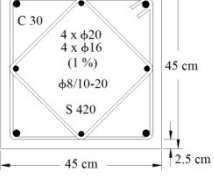
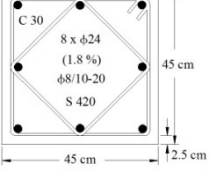
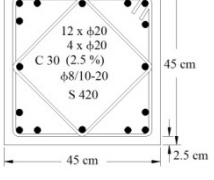
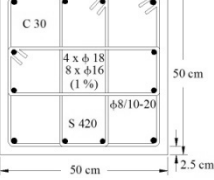
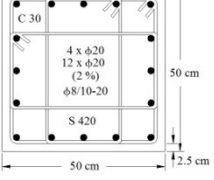
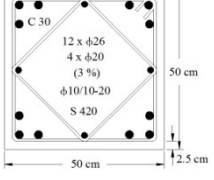
Şekil 1: Türkiye’deki tek katlı betonarme sanayi yapılarının örnek planı

Yapılan saha çalışmaları ve incelenen anketlere göre yapısal değişkenlerin en küçük ve en büyük değerleri belirlenmiştir. İncelenen yapıların büyük bölümünde kare kesitli kolonlar kullanıldığı ve kesitlerin prefabrik betonarme yapılar için 35x35 ile 70x70 cm; yerinde dökme betonarme yapılar içinse 50x50 ile 80x80 cm arasında değiştiği gözlenmiştir. Kolon yükseklikleri ise her iki yapı türü için de 5 ile 12 m arasındadır. Yatay açıklıklar prefabrik betonarme yapılar için 10 m ile 30 m; yerinde dökme betonarme yapılar içinse 10 m ile 24 m arasında değişmektedir. Prefabrik betonarme yapılar için 6 m ile 12 m arasında değişen dikey açıklık, yerinde dökme betonarme yapılar için 24 m’ye kadar çıkabilmektedir. Gerek enine gerekse boyuna donatı için kullanılan çelik sınıfının S420 (Sıcak haddelenmiş nervürlü çelik, $f_{yk} = f_{ywk} = 420$ MPa) olduğu gözlenmiştir. Prefabrik betonarme kolon kesitlerindeki boyuna donatı oranının genellikle % 1.6 ile % 2 arasında değiştiği ve nadiren

Tek Katlı Betonarme Sanayi Yapıları İçin Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi

de olsa % 3'e çıkabildiği, yerinde dökme betonarme kolonlar içinse DBYBHY-07'ye göre en küçük donatı oranı olan % 1'in kullanıldığı görülmüştür. Genellikle 8 mm olan etriye çaplarının hakim boyuna donatı çapı arttıkça 10-12 mm'ye çıktığı, en kritik bölgedeki etriye sıklığının ise neredeyse tüm kolon kesitlerinde 10 cm olduğu gözlenmiştir. Kalite kontrol seviyesi yüksek bu tip yapıların statik projeleri incelendiğinde, kolonların büyük çoğunluğunda C30 ($f_{ck} = 30$ MPa) beton sınıfı kullanıldığı, kesitlerin neredeyse tamamında 2.5 cm'lik paspayı bulunduğu görülmüştür. Prefabrik betonarme olanlarda prekast kiriş ve aşık sistemi yaygın olarak kullanılırken yerinde dökme betonarme yapıların çoğunda uzay kafes çatı sistemi bulunmaktadır. Çatı örtülerinde ise genellikle poliüretan veya taşyünü izoleli sandviç paneller kullanılmaktadır. Alt ucu rijit, üst ucu mafsallı kolonlardan oluşan çalışmaya konu yapı türleri, farklı donatı oranlarına sahip kesit boyutlarına göre değişen kolon tiplerine indirgenmiştir. Saha çalışmaları ve uygulama projelerinin incelenmesiyle gerçeğe mümkün olduğunca yakın olarak 24 farklı kolon tipi belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: Çalışma kapsamında kullanılan yapı türlerine ait kolon tipleri

Tip	Kolon Boyutu (cm)	Donatı Oranı		
		a) En küçük	b) Orta	c) Yüksek
1	35x35			
2	40x40			
3	45x45			
4	50x50			

Tablo 1: Çalışma kapsamında kullanılan yapı türlerine ait kolon tipleri (Devam)

5	55x55			
6	60x60			
7	70x70			
8	80x80			

2.2 Mevcut Deprem Hasar Tahmini Yöntemlerinde Kullanılan Yapı Sınıfları

Mevcut deprem hasar tahmini yöntemlerinde kullanılan bina envanterleri, ahşap yapıdan az veya çok katlı betonarme yapılara kadar oldukça geniş bir spektruma sahip olsa da içeriğinde, çalışmaya konu olan tek katlı prefabrik betonarme sanayi yapıları için HAZUS yöntemi hariç yalnızca tek bir seçenek bulunmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2: Bu çalışmada incelenen yapı türlerine, mevcut yöntemlerde karşılık gelen yapı sınıflandırması [7, 8, 10, 11, 13]

Metod	Yapı Sınıfı	Açıklama
John Freeman	9	Betonarme çerçeve ve kolonlara sahip ticari binalar
Karl V. Steinbrugge	4C	Prefabrik Yapılar
ATC-13	81	Prefabrik betonarme – Az katlı
FEMA 154	PC2	Prefabrik betonarme çerçeve
HAZUS	PC2L	Prefabrik betonarme çerçeveler (Az katlı) (Yönetmelik alt sınırında veya üstü seviyede tasarım)

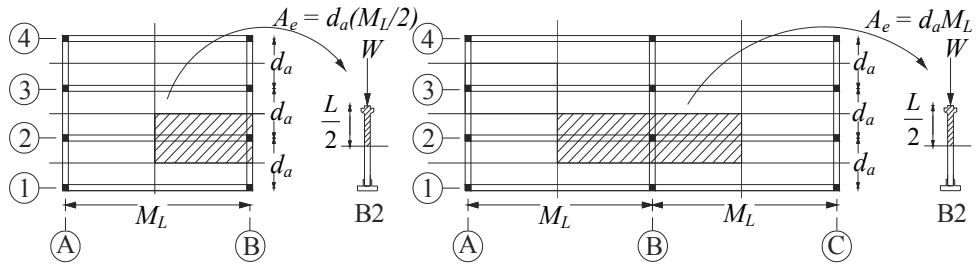
3. BİNA PERFORMANS ANALİZİ

Binaların deprem performansını, binaların kendisinin belirlediği gerçeğinden hareketle binanın hasar görebilirliğinin yapının ağırlığı ve rijitliği ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Yapısal özellikler ile birlikte malzeme özellikleri de sabit tutulduğunda rijitliğin yükseklik ile ilişkili olacağı açıktır. Bu çalışmada, bina deprem performansını hızlı ve güvenli bir şekilde belirleyebilmek için farklı donatı oranı ve boyutlara sahip her bir kesit için farklı deprem bölgeleri ve farklı zemin sınıflarına göre değişen hasar tahmin eğrileri elde edilmiştir. Hasar tahmin eğrileri, prefabrik betonarme yapılar için DBYBHY-07'ye göre en küçük kolon kesiti tespit çalışmasına [19] benzer şekilde iki temel değişken, yükseklik ve eksenel yük değerlerine göre çizilmiştir.

3.1 Geliştirilen Bina Modelleri

Çatı taşıyıcı sistemi ile kolon bağlantılarının mafsallı olması sayesinde çalışmada yürütülen analitik hesaplar, üç boyutlu bina modellerini, Tek Serbestlik Dereceli Sistemlere (TSDS) dönüştürerek yapılmıştır. Ek olarak; bu tip yapılarda yatay açıklık doğrultusundaki düzlem daha kritik olsa da bina envanterindeki yapıların kolon kesitleri kare olduğundan yüklenme yönü, yapısal analiz açısından herhangi bir farklılık yaratmamaktadır [20]. Bununla birlikte, inşaat yöntemleri farklı olsa da prefabrik betonarme yapılar ile yerinde dökme betonarme yapıların analizleri sırasında kullanılan yapısal modeller arasında fark yoktur. Ayrıca bu tip yapılarda, çok yaygın olmasa da kat sayısını arttırmak amacıyla yatay açıklık doğrultusunda ara kat kirişi ile döşeme sistemine rastlanabilmektedir. Bu gibi durumlarda bina modelleri TSDS özellikleri taşımayacağından önerilen yöntemin kullanılması uygun olmayacaktır.

Kullanılan yapısal modellerde, toplam kütlelerin çatı seviyesinde yoğunlaştığı varsayılmıştır. Bu nedenle, yatay ve dikey açıklık gibi temel çerçeve özelliklerinin yanında çatı taşıyıcı sistemi, çatı örtüsü ve izolasyon malzemelerinin de ağırlıklarının bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Yatay ve dikey açıklık, çatı taşıyıcı sistemi özellikleri gibi kriterlerin temin edilmesiyle birlikte yapıdaki her bir kolona etki eden eksenel yük hesaplanabilir.



Şekil 2: Yatay açıklık sayısına göre etkili alanın belirlenmesi

Eksenel yük (W) hesabında, çatı ağırlığının yanında yapının yatayda kaç adet açıklığa sahip olduğu da büyük önem taşımaktadır. En elverişsiz durumun yansıtılabilmesi amacıyla hasar tahmin modelinde referans alınan çerçevenin binanın orta kısmında yer aldığı varsayılmıştır. Bu nedenle etkin alan (A_e), yatayda tek açıklığa sahip yapılar için makas uzunluğu (M_L) ile dikey açıklık mesafelerinin çarpımının yarısı olarak hesaplanabilirken yatayda iki veya daha fazla açıklığa sahip binalar içinse basitçe makas uzunluğu ile dikey açıklık mesafesi (d_a) çarpımına eşit olmaktadır. Her iki durumda da kolon boylarının yarısı hesaba katılırken kiriş, oluk kirişi ve aşık ağırlıkları, yataydaki açıklık sayısına göre değişkenlik göstermektedir (Denklem 1). Yataydaki açıklık sayısının etkili alan hesabını nasıl etkilediği Şekil 2'den görülebilir. Her iki örnekte de kritik kolon B2 olarak adlandırılmıştır.

$$W = \underbrace{W_{Çatı} + W_{Aşık}}_{Alan\ Etkili} + W_{Kiriş} + W_{Oluk\ Kirişi} + \frac{W_{Kolon}}{2} \quad (1)$$

Eksenel yük hesabında büyük önem taşıyan kiriş, aşık gibi çatı taşıyıcı sistemleri ile izolasyon malzemesi de dahil çatı örtüsü ağırlıklarının ortalama değerleri, yürütülen saha çalışmaları, yapı elemanı üreticileriyle yapılan görüşmeler sırasında elde edilen projeler ve bu konuda daha önce yapılmış çalışmalar [21] incelenerek hesaplanmıştır.

3.2 Yapısal Hasar Hesaplaması

Literatürdeki hasar tahmin yöntemlerinin büyük çoğunluğunda, yapısal hasarlar belirlenirken görelî kat yerdeğiştirme sınırları kullanılmaktadır. Bu sınır değerler binaların taşıyıcı sistemlerine göre belirlenmektedir. Bu nedenle farklı donatı oranı veya kesitlere sahip olsalar da aynı taşıyıcı sisteme sahip binalarda aynı hasar sınır değerleri kullanılmakta, bu ise önemli yapısal değişkenlerin hesaba katılmamasına neden olmaktadır.

Ek olarak, prefabrik betonarme yapıların deprem davranışlarının tespiti için yürütülen gerçek boyutlu deneysel çalışmaların [22] da gösterdiği gibi bu tip yapıların akma ve nihai kat yerdeğiştirmesi oranları, sırasıyla %3 ve % 7 mertebesinde olabilmektedir. Bu değerler, DBYBHY-07'de en küçük hasar ve göçme hasar sınırları için önerilen görelî kat yerdeğiştirmesi oranlarının (En küçük hasar için % 1; göçme için % 4) [16] oldukça üzerindedir.

1998 Adana-Ceyhan ve 1999 Marmara Depremleri sırasında betonarme sanayi yapılarında önemli deprem hasarları yaşanmıştır. Türkiye Prefabrik Yapı Üreticiler Birliği tarafından hazırlanan raporda, 1999 Kocaeli Depremi sırasında 98 prefabrik sanayi yapısından 16'sının tamamen; 8'inin ise kısmen çöktüğü belirtilmiştir [23]. Yapılan saha araştırmaları ve teorik çalışmaları, bu tip yapılardaki hasarların, yetersiz rijitlik ve kolon-kiriş birleşim yerlerindeki bağlantı problemlerinden kaynaklandığını göstermiştir [24]. Özellikle kolonların yetersiz rijitliği nedeniyle meydana gelen büyük yerdeğiştirmelerinin önemli yapısal hasarlara yol açtığı birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır [25, 18]. Bu çalışmada, kolon kiriş birleşim yerlerindeki zayıflıklar nedeniyle meydana gelen hasarlar, prefabrik betonarme sanayi yapıları için hasar görülebilirlik eğrileri oluşturulması için

Tek Katlı Betonarme Sanayi Yapıları İçin Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi

yapılan önceki çalışmalara [18] benzer şekilde kapsam dışında tutulmuştur. Bunun yerine, kolonlarda eğilme nedeniyle meydana gelebilecek hasarlar hesaba katılmıştır.

Yapı elemanlarındaki farklı hasar seviyelerine karşılık gelen En Küçük Hasar Sınırı (MN), Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ) olarak tanımlanan sınır yerdeğiştirme değerleri bulunurken DBYBHY-07’de önerilen çelik ve betonda oluşacak birim şekildeğiştirme değerleri temel alınmıştır (Tablo 3). Betondaki birim şekildeğiştirme sınır değerleri bulunurken enine donatının hacimsel oranı (ρ_s) ve bu oranın olması gereken en küçük değeri (ρ_{sm}) de dikkate alınmıştır. Bu sınır değerler, itme analizleri sırasında her bir kolon kesiti için hasar seviyelerine karşılık gelen sınır yerdeğiştirme değerleri bulunurken kullanılmıştır. Hasar seviyeleri, HAZUS çalışmasındakiyle paralel olacak şekilde Düşük, Orta, Yüksek ve Ağır olarak belirlenmiştir.

Tablo 3: Farklı hasar seviyelerine göre beton ve donatı çeliğinin birim şekildeğiştirmesine yönelik kullanılan sınır değerler [16]

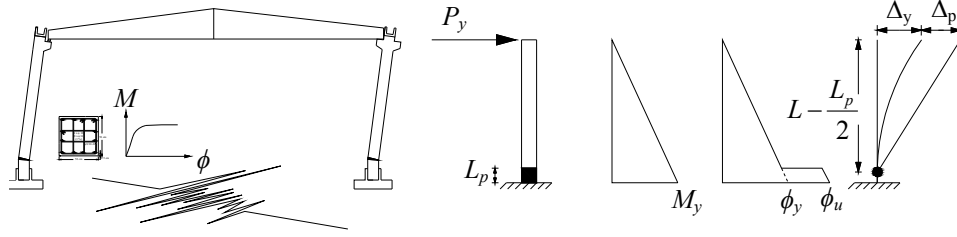
Malz. Cinsi	Birim Şekildeğiştirme Sınır Değerleri		
	En Küçük Hasar Sınırı	Güvenlik Sınırı	Göçme Sınırı
Beton	0.0035	$0.0035+0.01(\rho_s/\rho_{sm}) \leq 0.0135$	$0.004+0.014(\rho_s/\rho_{sm}) \leq 0.018$
Donatı Çeliği	0.01	0.04	0.06

Yapısal hasar hesaplaması ile ilgili bir diğer önemli problem de belirlenen hasar seviyelerinin maddi kayba dönüştürülmesidir. Bu kayıp, genellikle meydana gelen hasarın onarılma maliyetinin binanın yeniden inşa edilme maliyetine oranı şeklinde ifade edilir [26]. Literatürde bu konu hakkında birçok çalışma bulunsa da elde edilen hasar yüzdelerinde önemli farklılıklar gözlenmiştir. Bu çalışmada, hasar seviyelerine karşılık gelen yapısal maddi kayıp yüzdeleri için 1999 Kocaeli ve Düzce Depremleri sırasında betonarme binalarda meydana gelen gerçek hasarlarla da örtüşen betonarme binalar için oluşturulmuş Gürpınar (1978) Merkezi Hasar Yüzdeleri kullanılmıştır [27] (Tablo 4).

Tablo 4: Hasar oranları karşılaştırma tablosu [26, 27]

Hasar Seviyesi	Merkezi Hasar Yüzdeleri (%)				
	Gürpınar (1978)	HAZUS (1997)	Bommer (2002)	DEE-KOERI (2003)	Yücmen (2005)
Yok	0	0	0	5	0
Düşük	5	2	2	20	5
Orta	30	10	10	50	30
Yüksek	70	50	75	80	85
Ağır	100	100	75	100	85

Farklı hasar seviyelerine karşılık gelen sınır yerdeğiştirme değerlerinin hesaplanmasındaki önemli kriterlerden biri moment-eğrilik ilişkisinin tespitidir. Hasar tahmin eğrilerinin çizilebilmesi için her bir yükselik değerine karşılık gelen eksenel yük değerlerinin hesaplanması gerektiğinden her kütle değişimi sırasında yeni bir moment-eğrilik ilişkisi tanımlanmıştır.



Şekil 3: Deprem kuvveti altında plastik şekildeğiştirme etkisinin gösterimi [3]

Moment-eğrilik ilişkisi bulunurken plastik mafsallık hipotezi kullanılmıştır. Yapı modeli, plastik mafsallık bölgesi ve moment-eğrilik ilişkisi şematik olarak Şekil 3'te gösterilmiştir. Geliştirilen özel bir yazılım yardımıyla hesaplanan moment-eğrilik ilişkisinde varsayılan malzeme modelleri için (sargılı ve sargısız beton ve çelik) DBYBHY-07'de önerilen modeller kullanılmıştır. Δ_y , akma yerdeğiştirmesini; Δ_p , plastik yerdeğiştirmeyi göstermektedir.

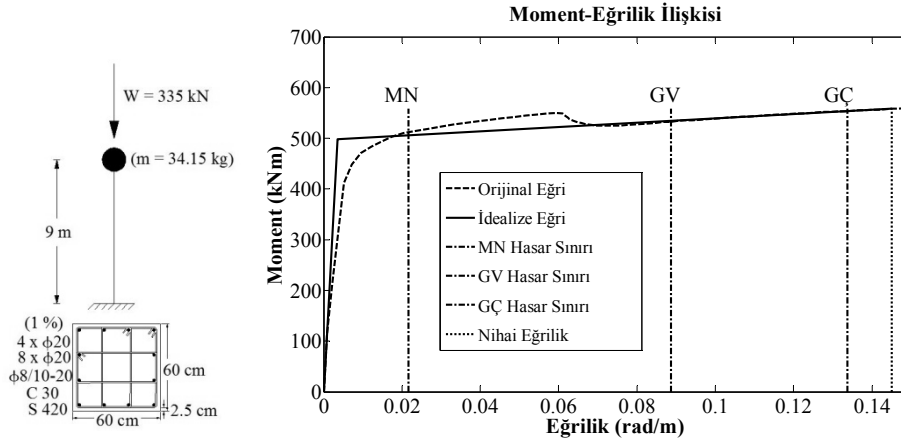
Kolon kapasite eğrisini mümkün olduğunca gerçeğe yakın çizilebilmek amacıyla moment-eğrilik ilişkisi, çelikteki pekleşme etkileri de gözönünde bulundurularak çift eğimli doğrusal olarak çizilmiştir. Akma eğrilik değeri (ϕ_y), kesit akma momentinin (M_y) etkin eğilme rijitliğine (EI_{eff}) bölünmesiyle hesaplanmıştır;

$$\phi_y = \frac{M_y}{EI_{eff}} \quad (2)$$

Moment-eğrilik ilişkisinin ideal hale getirilmesi sırasında, eğrinin ilk eğimi donatı çeliğinde akma olduğu andaki eğime eşit olarak alınmıştır. Akma momenti ve nihai moment değerleri bulunurken ise eşit alan metodu kullanılmıştır. Nihai eğrilik (ϕ_u), betonun nihai şekildeğiştirmeye (ϵ_{cu}) ulaştığı andaki ya da çelikteki birim şekildeğiştirmenin, ilgili modellerin deney sonuçları [22] ile de uyumlu olan, % 8'e eşit olduğu andaki eğrilik değeri olarak alınmıştır. Nihai eğrilik, birim şekildeğiştirme sınır değerlerine göre hesaplanan göçme sınır eğriliğinden küçük olması durumunda, göçme eğriliği olarak kabul edilmiştir (Şekil 4).

Betonarme kolonlar için plastik mafsallık boyu hesabı konusunda literatürde birçok çalışma bulunsa da bu çalışmada plastik mafsallık boyu, L_p , DBYBHY-07'de önerildiği gibi kolon etkili kesit uzunluğunun yarısı olarak kabul edilmiştir [16]. Ek olarak, prefabrik betonarme yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi konusunda yapılan deneysel çalışmalarla

analitik çalışmaların karşılaştırılması sırasında plastik mafsal boyu enkesit uzunluğunun yarısı olarak alındığında birbirine son derece yakın yerdeğiştirme değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir [22]. Bu tip yapıların sahip olduğu yüksek süneklik düzeyleri sayesinde kesme şekildeğiştirmeleri [3] ile yapıların simetrik plana sahip birbirinden bağımsız çerçevelerden oluşmasından ötürü de burulma etkileri ihmal edilmiştir.

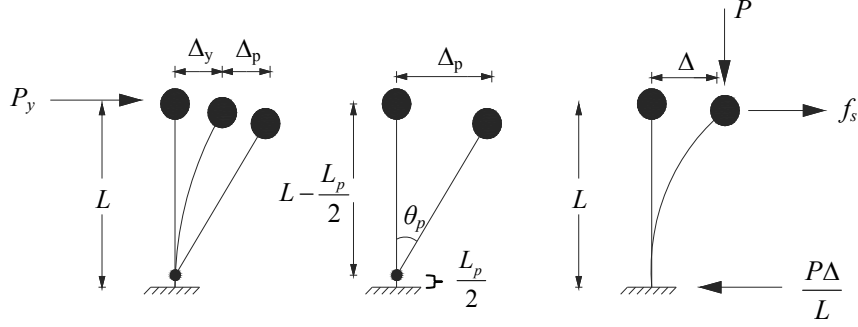


Şekil 4: Belirli eksenel yük altındaki örnek bir kolon (9 m yüksekliğinde Tip 6a) için çift eğimli doğrusal moment-eğrilik ilişkisi

Etkin Eğilme Rijitliği (EI_{eff}) hesabında, çatlamış kesitler için DBYBHY-07’de önerilen katsayılar kullanılmıştır. Kesit üzerindeki eksenel yük, W ’nin, kesit alanının (A_c) betonun karakteristik dayanımıyla (f_{cm}) çarpımına bölünmesiyle elde edilen eksenel yük oranı 0.1’den büyük veya eşit ise etkin eğilme rijitlik katsayısı, 0.4; eksenel yük oranının 0.4’ten büyük veya eşit olması durumunda, 0.8 olarak kabul edilmiş; aradaki değerler içinse interpolasyon yapılmıştır [16]. Özellikle tek katlı sanayi yapılarında eksenel yük düzeyleri düşük olsa da çalışma kapsamında farklı özelliklere sahip kolonlar her üç hasar seviyesi için de incelendiğinden tüm analizler sırasında eksenel yük oranları da kontrol edilmiştir.

3.3 Kapasite (İtme) Analizi

Bina kapasite analizi kısaca, binanın yük taşıma kapasitesinin yapısal elemanlardaki şekildeğiştirmelere göre değişiminin ortaya çıkarılmasıdır. Genellikle itme analizi olarak da adlandırılan bu yöntem, binanın olası bir büyük deprem karşısında göstereceği performansın önceden tahmin edilebilmesi açısından önemli araçlardan biridir. Binanın yatay yük kapasitesi (P_y) ile karşılık gelen tepe yerdeğiştirmesi (Δ) baz alınarak çizilen çift eğimli doğrusal eğri ile temsil edilir. Bu yaklaşım, özellikle kare kesite sahip ters sarkaç tipindeki yapı modelleri için deneysel sonuçlara oldukça yakın değerler vermektedir [22].



Şekil 5: Plastik şekildeğiştirme hesabında kullanılan ve $P-\Delta$ etkisi altındaki TSDS modeli

Alt ucu rijit, üst ucu mafsallı kolonlar için elastik (Δ_y) ve plastik (Δ_p) yerdeğiştirme değerleri Denklem 3 ve Denklem 4'te belirtilen formüller yardımıyla hesaplanabilir.

$$\Delta_y = \frac{P_y L^3}{3EI} \quad \Rightarrow \quad \Delta_y = \frac{M_y L^2}{3EI} = \phi_y \frac{L^2}{3} \quad (3)$$

$$\Delta_p = L_p \phi_p \left(L - \frac{L_p}{2} \right) \quad (4)$$

Plastik eğrilik istemi, (ϕ_p) kolon kesitlerinde yaşanan plastik dönme istemine, (θ_p) bağlı olarak Denklem 5 yardımıyla hesaplanabilir. ϕ , elastik ötesi herhangi bir eğrilik değeridir.

$$\phi_p = \frac{\theta_p}{L_p} = \phi - \phi_y \quad (5)$$

Elastik ve plastik şekildeğiştirmelerin bulunması ile birlikte toplam tepe yerdeğiştirmesi, akma (V_y) ve nihai (V_u) yatay yük kapasiteleri, Denklem 6 ve Denklem 7 ile sırasıyla bulunabilir.

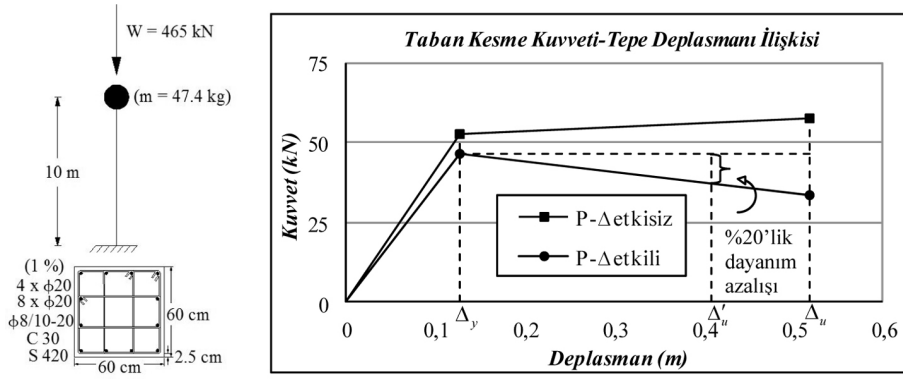
$$\Delta = \Delta_y + \Delta_p \quad (6)$$

$$V_y = \frac{M_y}{L}; V_u = \frac{M_u}{L} \quad (7)$$

Süneklik düzeyi yüksek kolonlar, büyük eksenel yükler altında P-Δ etkileri olarak adlandırılan ikincil moment yüklemelerine de maruz kalırlar. Bu etkiler karşısında hem kolon rijitliği (k) hem de taşıma gücünde azalma meydana gelir. Denklem 8’de, eşdeğer statik kuvvet (f_s) kullanılarak yeni rijitlik (k') değeri; Denklem 9 ile de akma ve nihai yatay yük taşıma kapasitelerinin yeni değerleri hesaplanabilir. P-Δ etkilerinden ötürü kesitin dayanımındaki azalmayı da hesaba katabilmek için prefabrik betonarme kolonlar üzerinde yapılan deney sonuçlarıyla [22] da uyumlu olacak şekilde dayanımdaki azalmanın % 20 olduğu andaki tepe yerdeğiştirme, yeni nihai yerdeğiştirme değeri olarak kabul edilmiştir.

$$f_s = k\Delta - \frac{P\Delta}{L} = k'\Delta \quad \left(k' = k - \frac{P}{L} \right) \quad (8)$$

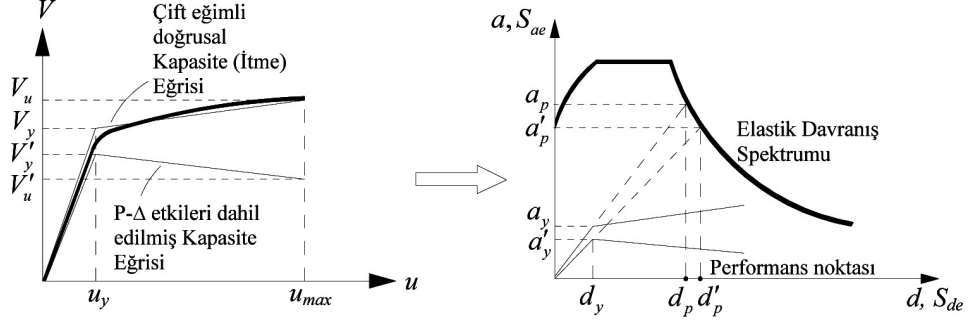
$$V'_y = V_y - \frac{P\Delta_y}{L}; V'_u = V_u - \frac{P\Delta_u}{L} \quad (9)$$



Şekil 6: 465 kN'luk eksenel yük altındaki, Tip 6a kesite sahip 10 m yüksekliğindeki bir kolona ait P-Δ etkilerinin de gösterildiği örnek bir kapasite (itme) eğrisi

3.4 Yapısal Performans Analizi

Yapının belirli bir deprem yükü karşısındaki performans noktasını bulabilmek için ilk olarak kapasite eğrisi, deprem istemi ile aynı grafik üzerine çizilir. Bu işlem sırasında, taban kesme kuvveti (V) spektral ivmeye (a , S_{ae}); tepe yerdeğiştirme (u) ise modal değişkenler kullanılarak elastik spektral yerdeğiştirmeye (d , S_{de}) dönüştürülür. Sonrasında ise deprem istemi ile bina kapasitesi karşılaştırılarak performans noktası (d_p) bulunur. ATC-40 vb. yönetmeliklerde, depremin elastik spektrum eğrisi, sönüm oranları değiştirilerek kapasite eğrisi ile kesiştiği nokta dikkate alınırken [28] bu çalışmada, kapasite eğrisinin ilk doğrusu ile aynı eğimde (rijitlik) çizilen bir doğruyla DBYBHY-07’de 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (475 yılda bir olan) şiddetli bir deprem için tanımlanmış elastik davranış spektrum eğrisinin kesişim noktası yapının performans noktası olarak kabul edilmiştir.



Şekil 7: Çalışmada kullanılan yapı performansı belirleme analizinin grafiksel gösterimi

Çalışmaya konu yapıların deprem performansları belirlenirken öncelikle P- Δ etkileri de dikkate alınarak yeni rijitlik değeri hesaplanmıştır. Sonrasında bu yeni rijitlik değeri ile aynı eğimde çizilen bir doğru ile elastik spektrum eğrisi kesiştirilmiştir. Başlangıç rijitliği çok büyük olmayan, diğer bir deyişle doğal titreşim periyodu (T) sınır periyodundan (T_s) daha uzun olan ($T > T_s$) görece esnek sistemlerde, Eşit Yerdeğiştirme Kuralı kullanılarak elastik yerdeğiştirmenin (S_{de}) elastik olmayan yerdeğiştirmeye (S_{di}) eşit olduğu kabul edilmiştir. Başlangıç rijitliği çok büyük olan, diğer bir deyişle doğal titreşim periyodu sınır periyodundan daha kısa olan ($T < T_s$) görece rijit sistemlerde ise elastik olmayan yerdeğiştirme, elastik yerdeğiştirmeden belirli oranda daha büyük olmaktadır (Denklem 10). Dayanım azaltma katsayısına (R_y) bağlı olarak değişen spektral yerdeğiştirme oranı (C_R) DBYBHY-07’de önerildiği gibi Denklem 11 ile hesaplanabilir [16].

$$S_{di} = C_R S_{de} \quad (10)$$

$$C_R = \frac{1 + (R_y - 1) T_s / T}{R_y} \quad (11)$$

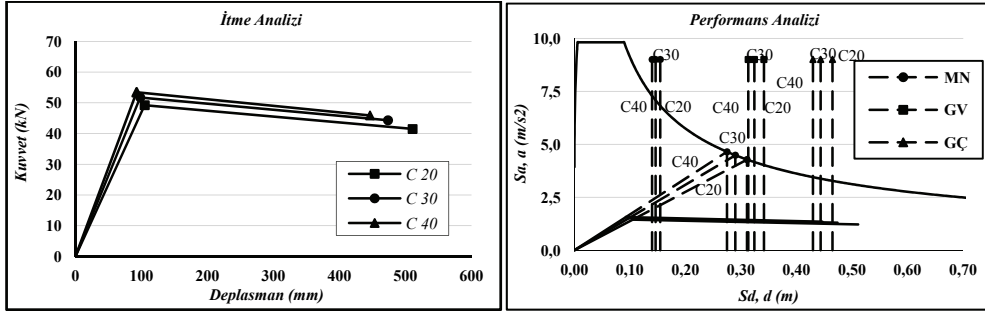
Deprem yüklerinin belirlenmesi için kullanılan Elastik Spektral İvme, $S_{ae}(T)$; Spektral İvme Katsayısı, $A(T)$ ile yerçekimi ivmesi, g 'nin çarpımına eşittir. Spektral ivme katsayısı, Denklem 13’te gösterildiği gibi DBYBHY-07’den alınan Etkin Yer İvmesi Katsayısı (A_o), bina önem katsayısı (I) ile yerel zemin koşulları ve bina doğal periyodu, T 'ye bağlı olarak hesaplanan Spektrum Katsayısı, $S(T)$ 'nin çarpımına eşittir [16].

$$S_{ae}(T) = A(T)g \quad (12)$$

$$A(T) = A_o(I)S(T) \quad (13)$$

3.5 Analiz Kriterlerinin Belirlenmesi

Yapısal değişkenlerle ilgili olarak gerçekleştirilen hassasiyet çalışması sonucu bina deprem performansına en çok etkisi olanlar, kolon kesiti, donatı oranı, kolon yüksekliği, eksenel yük, deprem bölgesi ve zemin sınıfı olarak belirlenmiştir. Etriye çapı ve sıklığının da bina performansı üzerinde önemli etkileri olduğu gözlenirse de incelenen yapıların neredeyse tamamında sarılma bölgesindeki aralığın aynı olduğu, çapın ise kolon kesitine göre değiştiği gözlenmiştir. Bir diğer önemli değişken olan beton sınıfının ise çalışmaya konu yapı türlerinin deprem performansları üzerinde önemli bir farklılık yaratmadığı görülmüştür. Bu sonuca varılırken aynı yapısal özelliklere sahip modellerin, farklı beton sınıfları (C20, C30, C40) kullanılarak kapasite analizleri yapılmış ve performans noktaları belirlenmiştir. Farklı beton sınıfları kullanılan yapıların performans noktalarının her dört deprem bölgesi ve dört zemin sınıfı için de aynı hasar seviyesine karşılık geldiği görülmüştür.



Şekil 8: 335 kN'lık eksenel yük altındaki betonarme kolonların (Tip 6a) farklı beton sınıfları kullanılarak yapılan itme analizleri ve deprem performanslarının karşılaştırılması

Farklı beton sınıflarına sahip kolonlar için aynı grafik üzerinde çizilen kapasite eğrilerinde (Şekil 8) az da olsa farklılıklar bulunsa da performans noktalarının aynı hasar seviyesine denk geldiği gözlenmiştir (Tablo 5). Bunun en önemli nedeni, eksenel yük oranı düşük olan bu tip kolonların beton sınıfları farklı olsa da moment-eğrilik ilişkilerinin benzer olmasıdır [29]. Ek olarak, kolon etkileşim grafiği incelendiğinde, göçme yerdeğiştirmesine götürecek eksenel yük karşısında bile kesitlerin nihai moment kapasitesi dengeli noktanın altında kaldığından bu tip kolonların sıradan bir giriş gibi davrandığı söylenebilir.

Tablo 5: Farklı beton sınıfına sahip betonarme kolonların deprem performanslarının karşılaştırılması

Beton Sınıfı	T (sn)	M_y (kNm)	M_u (kNm)	Δ_{MN} (mm)	Δ_{GV} (mm)	$\Delta_{GÇ}$ (mm)	S_{di} (mm)	Hasar Seviyesi
C20	1.694	478.4	544.7	154.4	341.1	464.6	310.7	Orta
C30	1.598	498.5	557.8	145.9	323.9	443.4	289.8	Orta
C40	1.528	512.3	565.9	139.8	312.8	429.3	274.7	Orta

Sonuç olarak; geliştirilen hızlı deprem hasar tahmini yönteminde kullanılan değişkenler, deprem bölgesi, zemin sınıfı, kolon yüksekliği, kolon kesit özellikleri, boyuna donatı oranı ile yatay ve dikey açıklık, çatı taşıyıcı sistemi ve çatı örtüsü ile ilişkili eksenel yük olarak belirlenmiştir. Tüm bu değişkenler, farklı seçenekleri ile birlikte Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6: Önerilen Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi için yapısal veri toplama tablosu

Kolon Kesiti (cm)	Donatı Oranı	Makas Sayısı	Yatay Açıklık (m)	Dikey Açıklık (m)	Yükseklik (m)
<input type="checkbox"/> 35x35					
<input type="checkbox"/> 40x40					
<input type="checkbox"/> 45x45					
<input type="checkbox"/> 50x50	<input type="checkbox"/> Min.	<input type="checkbox"/> =1
<input type="checkbox"/> 55x55	<input type="checkbox"/> Orta	<input type="checkbox"/> ≥2	(10-30)	(6-24)	(5-12)
<input type="checkbox"/> 60x60	<input type="checkbox"/> Yük.				
<input type="checkbox"/> 70x70					
<input type="checkbox"/> 80x80					
Çatı Taşıyıcı Sistemi			Çatı Örtüsü		
<input type="checkbox"/> Prekast Kiriş	<input type="checkbox"/> Oluk Kirişi	<input type="checkbox"/> Aşık	<input type="checkbox"/> Sandviç Panel	İzolasyon	
<input type="checkbox"/> Çelik Kiriş			<input type="checkbox"/> Eternit	<input type="checkbox"/> Poliüretan	
<input type="checkbox"/> Uzak Kafes	<input type="checkbox"/> PBA	<input type="checkbox"/> PBA	<input type="checkbox"/> Trapez Sac	<input type="checkbox"/> Taşyünü	
<input type="checkbox"/> Çelik Makas	<input type="checkbox"/> Çelik	<input type="checkbox"/> Çelik	<input type="checkbox"/> Sac	<input type="checkbox"/> Camyünü	
	<input type="checkbox"/> Yok	<input type="checkbox"/> Yok			

4. YAPISAL HASAR TAHMİN EĞRİLERİ

Bu çalışmada hedeflenen, bilinen deprem bölgesi ve zemin sınıfı için bir yapının belirli değişkenler ile hızlı bir şekilde yapısal hasar seviyesinin tespit edilmesi olduğundan, oluşturulan hasar tahmin eğrilerinde olasılık kavramı, sigorta sektöründe deprem PML'i hesabı sırasında temel alınan 475 yılda bir olacak (50 yıl içinde aşılma olasılığı % 10 olan) şiddetli bir depremin olasılığı ile sabit tutulmuştur. Bunun yerine deprem bölgesi, zemin sınıfı, kolon boyutları ve boyuna donatı oranına göre değişen eğriler, yapının performansını tanımlayan yükseklik ve eksenel yük gibi iki önemli değişken kullanılarak çizilmiştir.

4.1 Kritik Kütle Hesabı

Kritik kütle hesabı, kolon kesit özellikleri, donatı oranı, kolon yüksekliği gibi belirli değişkenler sabit tutularak DBYBHY-07'de belirtilen her üç hasar seviyesine karşılık gelen tepe yerdeğiştirmesini yaratacak kütle bulunması olarak tanımlanabilir. Binanın kütlesi

değiştiğinde yapı periyodu da değişeceğinden aynı deprem karşısında talep edilecek elastik ötesi yerdeğiştirme değeri de değişecektir. Bu durumda problem, belirli bir senaryo depremi karşısında yapı modelinin, moment-eğrilik analizleri yardımıyla bulunacak hasar seviyelerine karşılık gelen sınır yerdeğiştirmeler ile birebir aynı yatay yerdeğiştirmeyi yapmasını sağlayacak eksenel yükün hesaplanması olarak sadeleştirilebilir. Her kütle değişiminde, moment-eğrilik ilişkisine bağlı olarak hasar seviyelerine karşılık gelen sınır yerdeğiştirmeler de değiştiğinden, en iyi periyot çiftlerinin bulunabilmesi için iteratif bir yöntem izlenmiştir. Kritik periyot bulunduktan sonra buna karşılık gelen eksenel yük değeri o hasar seviyesi için kritik ağırlık olarak kaydedilmiştir. Doğal titreşim periyodu (T) sınır periyodundan (T_s) daha uzun olan ($T > T_s$) görelî esnek bir sistem için kritik periyodun nasıl hesaplandığı Denklem 14a ve Denklem 14b’de görülebilir.

$$\Delta_{Hasar} = S_{di} = S_{de} = \frac{S_{ae}}{w^2} \quad (T > T_s) \quad w_s^2 = \left(\frac{2\pi}{T_s}\right)^2 \quad (14a)$$

$$\frac{\phi_y L^2}{3} + L_p (\phi - \phi_y) \left(L - \frac{L_p}{2}\right) = \frac{A_o(I)(2.5) \left(\frac{T_B}{T}\right)^{0.8}}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2} \quad (T > T_s) \quad (14b)$$

Hesaplamalar sırasında, P- Δ etkileri de dikkate alındığından her adımda değiştirilen eksenel yük ve karşılık gelen tepe yerdeğiştirmesinden ötürü azalacak yeni rijitlik değeri kullanılmıştır. Ayrıca dayanımdaki azalmadan ötürü hesaplanan yeni nihai yerdeğiştirme değerinin, göçme birim şekil değiştirmesine karşılık gelen yerdeğiştirme değerinden küçük olması durumunda ise yeni nihai yerdeğiştirme değeri, göçme yerdeğiştirme istemi olarak kabul edilmiştir. P- Δ etkilerinin yarattığı farklılıklar, Tablo 7’de gösterilmiştir. Bunlardan en önemlisi, P- Δ etkileri mevcut değilken kolon kesitindeki hasar, ‘‘Yüksek’’ seviyede olabilirken, P- Δ etkileri hesaba katıldığında kolonda ‘‘Göçme’’ yaşanabilmesidir.

Tablo 7: P- Δ etkisinin, 465 kN’luk eksenel yük altındaki 10 m yüksekliğinde olan Tip 6a kolonunun (1. Derece deprem bölgesi ve Z3 zemin sınıfı özelliklerine tabi) deprem performansı üzerinde yarattığı farklılıklar

P- Δ Etkisi	T (sn)	V_y (kN)	V_u (kN)	Δ_{MN} (mm)	Δ_{GV} (mm)	$\Delta_{GÇ}$ (mm)	Δ_u (mm)	S_{di} (mm)	a_y (m/s ²)
Yok	2.13	52.51	57.78	181.0	382.4	517.8	519.9	409.3	1.11
Var	2.26	46,59	33.60	181.0	382.4	409.1	409.1	439.8	0.98

Analizler sırasında istenilen kütle değerleri bulunmaya çalışılırken her eksenel yük değişimine karşılık moment-eğrilik ve etkin eğilme rijitliği, P- Δ etkilerinden ötürü periyot ve belli kolon yüksekliklerinden sonra nihai yerdeğiştirme de değiştiğinden iterasyon adımlarının yürütülebilmesi için özel bir yazılım geliştirilmiştir. İterasyonlar sırasında

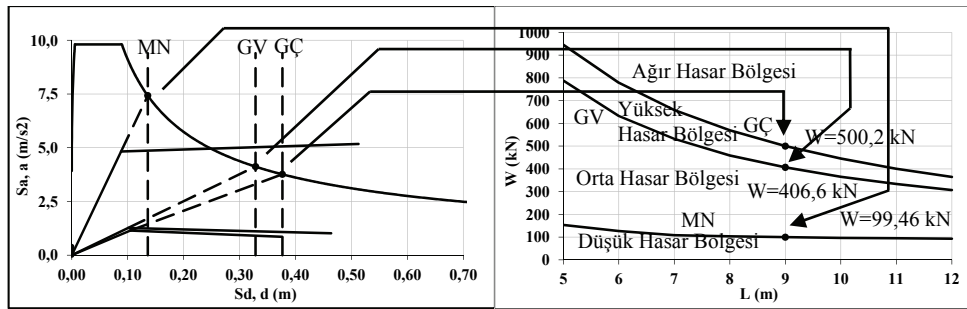
varsayılan kütle değerleri 1 kg ile 300 kg arasında seçilerek depremin talep ettiği elastik olmayan yerdeğiştirme değeri, farklı hasar seviyelerine karşılık gelen yerdeğiştirme değerlerine yaklaştıkça kütle değişim aralığı azaltılmıştır. Hasar seviyelerine karşılık gelen yerdeğiştirme ile belirli kütle altında yapılan yatay yerdeğiştirme arasındaki fark % 0.1 ve altında kaldığı anda iterasyon sonlandırılmıştır. Tablo 8, geliştirilen yazılımın Tip 6a kesitine sahip, ters sarkaç tipindeki betonarme kolonun kritik ağırlık hesabındaki 9 m'lik yüksekliğe karşılık gelen örnek çıktılarını göstermektedir. Deprem istemi için 1. Derece Deprem Bölgesi ve Z3 zemin sınıfına karşılık gelen elastik spektrum eğrisi kullanılmıştır.

Tablo 8: 1. Derece deprem bölgesi ve Z3 zemin sınıfı koşullarına tabi 9 m yüksekliğindeki Tip 6a kolon kesiti için her üç hasar seviyesine karşılık gelen kritik kütle tespit örneği

İtr.	T (sn)	Eks. Yük (kN)	Eks. Yük Oranı (%)	M_v (kNm)	M_u (kNm)	ϕ_y (rad/m)	ϕ_{Hasar} (rad/m)	Δ_{Hasar} (mm)	S_{di} (mm)
1	0.265	9.810	0.09	429.72	503.65	0.00313	0.02105	132.1	17.39
2	0.910	113.7	1.05	451.74	521.54	0.00329	0.02126	136.5	147.4
3	0.667	61.73	0.57	440.49	512.88	0.00321	0.02115	134.2	101.6
4	0.797	87.69	0.81	446.00	517.30	0.00325	0.02121	135.3	125.8
5	0.855	100.7	0.93	448.78	519.50	0.00327	0.02123	135.9	136.8
6	0.826	94.18	0.87	447.54	518.25	0.00326	0.02122	135.6	131.4
7	0.841	97.43	0.90	448.19	518.81	0.00326	0.02122	135.8	134.1
8	0.848	99.05	0.92	448.63	519.10	0.00327	0.02123	135.9	135.5
9	0.852	99.86	0.92	448.89	519.19	0.00327	0.02123	135.9	136.2
10	0.850	99.46	0.92	448.48	519.35	0.00326	0.02123	135.8	135.8
11	1.512	302.1	2.80	491.59	552.57	0.00358	0.08838	321.8	271.2
12	1.766	403.5	3.74	512.50	568.43	0.00373	0.08943	328.3	326.8
13	1.884	454.1	4.20	522.94	576.17	0.00381	0.08998	331.6	353.1
14	1.826	428.8	3.97	517.53	572.46	0.00377	0.08970	329.9	340.1
15	1.796	416.1	3.85	515.15	570.32	0.00375	0.08956	329.1	333.4
16	1.781	409.8	3.79	513.60	569.53	0.00374	0.08950	328.6	330.1
17	1.774	406.6	3.77	513.15	568.93	0.00374	0.08946	328.5	328.5
18	2.023	516.5	4.78	535.75	585.61	0.00390	0.13352	364.4	384.6
19	1.901	461.5	4.27	524.40	577.34	0.00382	0.13588	409.1	356.9
20	1.962	489.0	4.53	529.87	581.64	0.00386	0.13510	385.5	370.8
21	1.993	502.7	4.65	532.81	583.64	0.00388	0.13430	374.5	377.7
22	1.978	495.9	4.59	531.35	582.62	0.00387	0.13471	379.8	374.3
23	1.985	499.3	4.62	532.21	583.02	0.00387	0.13455	376.7	376.0
24	1.989	501.0	4.64	532.34	583.43	0.00387	0.13438	376.1	376.9
25	1.987	500.2	4.63	532.36	583.16	0.00388	0.13449	376.1	376.4

4.2 Hasar Tahmin Eğrilerinin Çizilmesi

Detaylı olarak irdelenen yöntemler yardımıyla kolon yüksekliklerini, 5 ile 7 m arasında 25 cm'de bir, 7 ile 12 m arasında ise 1'er m'lik aralıklarla arttırarak kritik kütle değerleri hesaplanmıştır. Bu kütle değerleri kritik eksenel yük değerlerine çevrilerek karşılık gelen yükseklik değerleriyle birlikte hasar tahmin eğrilerinin çizilmesinde kullanılmıştır (Şekil 9). Aynı iterasyon adımları her bir kesit tipi, 4 farklı deprem bölgesi ve 4 farklı zemin sınıfı için tekrarlanarak, hasar seviyelerine karşılık gelen yükseklik-eksenel yük çiftleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Analizler sonunda toplam 384 farklı hasar tahmin eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 9: 1. Derece deprem bölgesi ve Z3 zemin sınıfı koşullarındaki 60x60 cm'lik %1 donatı oranına sahip kolon kesiti (Tip 6a) için hasar tahmin eğrisi çiziminin grafiksel gösterimi

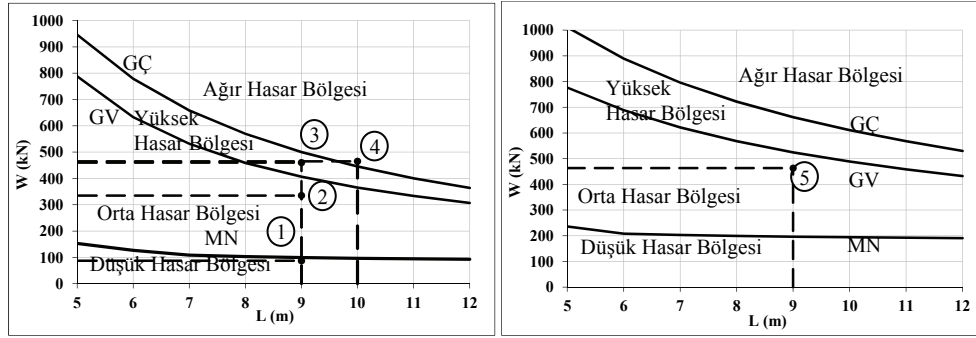
4.3 Geliştirilen Yeni Yöntem Kullanılarak Yapılan Analiz Örnekleri

Geliştirilen yeni yöntemin gerek kullanım kolaylığının gerekse hızı ve hassasiyetinin ölçülebilmesi için 1. Derece Deprem Bölgesi ve Z3 sınıfına giren zemin üzerine inşa edildiği varsayılan 5 farklı örnek sanayi yapısı (Tablo 9) seçilerek yeni yöntem ile yapısal analizler yapılmıştır.

Tablo 9: Örnek sanayi yapılarının mimari ve yapısal özellikleri

No	Kolon Kesiti (cm)	Yatay Açıklık (m)	Dikey Açıklık (m)	L (m)	Çatı Yapısı			Eks. Yük (kN)
					Taşıyıcı Sistem	Kaplama		
1	60 x 60 ($\rho = \%1$)	(≥ 2) 10	10	9	Çelik Kirişi IPE550	Çelik Aşık	Sandviç Panel (Poliüretan)	87
2	60 x 60 ($\rho = \%1$)	(≥ 2) 22	10	9	Prekast Kiriş	Prekast Aşık	Sandviç Panel (Poliüretan)	335
3	60 x 60 ($\rho = \%1$)	(≥ 2) 24	12	9	Prekast Kiriş	Prekast Aşık	Sandviç Panel (Taşyünü)	460
4	60 x 60 ($\rho = \%1$)	(≥ 2) 24	12	10	Prekast Kiriş	Prekast Aşık	Sandviç Panel (Taşyünü)	465
5	60 x 60 ($\rho = \%2$)	(≥ 2) 24	12	9	Prekast Kiriş	Prekast Aşık	Sandviç Panel (Taşyünü)	463

Örnek sanayi yapılarının ağırlıkları hesaplandıktan sonra buldukları deprem bölgesi ve zemin sınıfına uygun bina envanterindeki kolon kesit tiplerine ait hasar tahmin eğrileri seçilmiştir. Bu eğriler üzerinden aksel yük ve kolon yüksekliklerinin kesişim noktası bulunarak yapısal hasar seviyesi, hızlı ve kolay bir şekilde belirlenmiştir (Şekil 10). Bu hasar seviyelerine karşılık gelen hasar yüzdeleri, deprem PML'i olarak kabul edilmiştir.



a) Tip 6a'ya ait hasar tahmin eğrisi (D1, Z3) b) Tip 6b'ye ait hasar tahmin eğrisi (D1, Z3)

Şekil 10: Örnek sanayi yapılarının hasar seviyelerinin geliştirilen analitik hasar tahmin eğrileri kullanılarak belirlenmesi

4.4 Analiz Çıktılarının Mevcut Hasar Tahmin Yöntemleri İle Karşılaştırılması

Deprem hasar tahmini konusunda ilk çalışma olarak kabul edilen John Freeman'ın yöntemine göre farklı yapı sınıfları için oluşturulan tabloda betonarme sanayi yapıları için PML değerinin % 10 ile % 20 arasında değiştiği belirtilmiştir [7]. Çalışmaya konu prefabrik betonarme yapıların PML değeri güvenli tarafta kalmak adına % 20 olarak kabul edilmiştir.

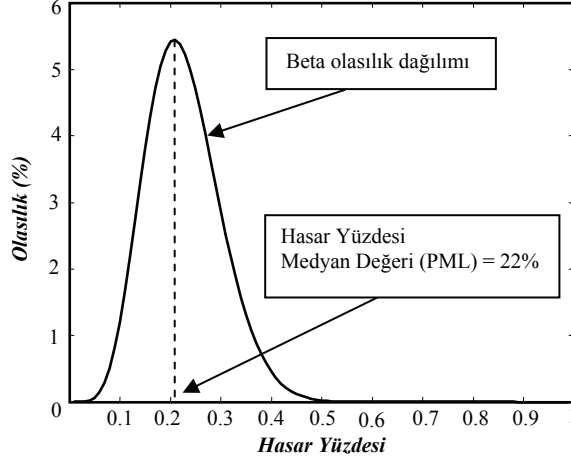
Karl Steinbrugge tarafından geliştirilen yöntemde göre Sınıf 4C olarak adlandırılan prefabrik betonarme sanayi yapıları için deprem PML değeri, hasar belirleme faktörleri de kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [8].

$$PML = 60 \times [1 + (-10 + 5 + 10) / 100] = \% 63$$

FEMA 154 Yöntemi deprem hasar tahmininden çok bina deprem performansının belirlenmesine yönelik hızlı bir puanlama sistemidir. Temel puanı 2.4 olan çalışmaya konu prefabrik betonarme yapıların (PC2) puanı, yatayda veya dikeyde herhangi bir düzensizlik bulunmadığından yalnızca Z3 Zemin Sınıfı nedeniyle 0.4 puanlık bir azalma ile 2.0 olarak hesaplanmıştır. Bu puan da eşik değer olan % 60'lık PML değerine karşılık gelmiştir [11].

Çok sayıda uzmandan görüş alınarak oluşturulan MMI'ya göre değişen hasar olasılık matrislerine dayanan ATC-13'te PML değeri hesaplanırken beta dağılımına göre çizilen hasar eğrileri kullanılmıştır. Faaliyet Sınıfı 81 olan az katlı standart prefabrik betonarme yapılar için 1. Derece Deprem Bölgesi'ne karşılık gelen MM IX'a ait beta değişkenleri 7.16

ve 24.4 olan [10] hasar eğrisi çizildiğinde, örnek yapıların tamamı için deprem PML'i olarak kabul edilebilecek medyan değerinin yaklaşık % 22 olduğu görülmüştür (Şekil 11).



Şekil 11: MMI değeri IX olan bir deprem koşullarına tabi az katlı prefabrik betonarme yapılara (Standart yapı tipi, Sınıf 81) ait hasar yüzdesinin olasılıksal dağılımı

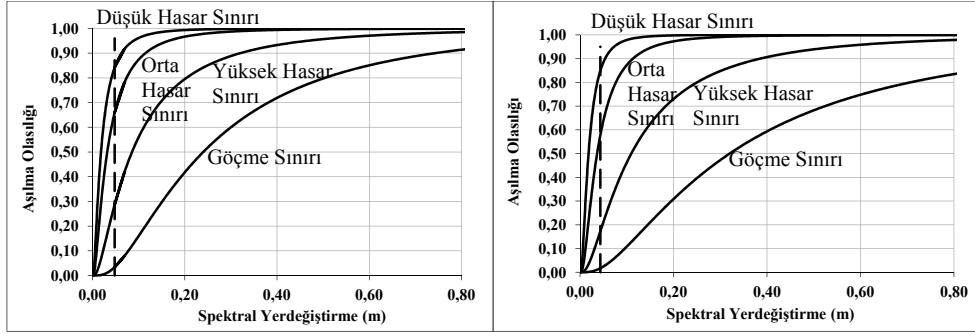
Deprem hasar tahminine analitik bir yaklaşım getiren HAZUS Metodu'na göre PML hesabı yapılırken öncelikle çalışmaya konu prefabrik betonarme yapılar (PC2L) için tanımlanmış medyan ve beta değişkenleri kullanılarak normal dağılıma göre hasar görebilirlik eğrileri çizilmiştir. Sonrasında, bu sınıftaki yapılar için yöntemde belirtilen periyot değerleri kullanılarak DBYBHY-07'deki tasarım ivme spektrum eğrisi yardımıyla 1. derece deprem bölgesi ve Z3 zemin sınıfına göre depremin talep ettiği elastik olmayan spektral yerdeğiştirme hesaplanmıştır (Şekil 12). Bu değerler, hasar görebilirlik eğrileri ile kesleştirildiğinde her bir hasar seviyesine karşılık gelen aşılma olasılıkları bulunmuştur. Yapının tasarım seviyesine göre değişen PML değerleri, aşılma olasılıkları ve hasar yüzdeleri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$PML = 0.17x(0)+0.18x(0.05)+0.37x(0.1)+0.25x(0.5)+0.03x(1) = \% 20 \quad (a)$$

$$PML = 0.14x(0)+0.27x(0.05)+0.41x(0.1)+0.16x(0.5) +0.02x(1) = \% 15 \quad (b)$$

Yeni geliştirilen yöntem, mevcut hasar tahmin yöntemleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen analiz sonuçlarının birbirinden oldukça farklı olduğu gözlenmiştir. Aynı boyutlardaki kolon kesitine sahip örnek betonarme sanayi yapılarının hasar seviyeleri, yeni geliştirilen yöntemde göre farklı değişkenler seçildiğinde "Düşük" seviyeden "Ağır (Göçme)" seviyeye bile çıkabilirken taşıyıcı sistemin aynı olmasından ötürü mevcut yöntemlere göre hasar seviyelerinde belirgin farklılıklar oluşmamaktadır (Tablo 10). İçlerinden yalnızca HAZUS Metodu'nda yapının Yönetmelik koşullarının üzerinde tasarım

yapılan binalar için ayrı sonuç verdiği ve bu tip yapılarda PML oranının düştüğü söylenebilir.



a) Yönetmelik alt sınırlarına göre tasarım b) Yönetmelik koşulları üzerinde tasarım
Şekil 12: Prefabrik betonarme yapılar için HAZUS Yapısal Hasar Görebilirlik Eğrileri

Tablo 10: Farklı deprem hasar tahmini yöntemleri kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırılması

No	John Freeman	Karl V. Steinbrugge	ATC-13	FEMA 154 v:2	HAZUS	Yeni Metod	
	PML (%)	PML (%)	PML (%)	PML (%)	PML (%)	Hasar Sınırı	PML (%)
1	20	63	22	60	20	Düşük	5
2	20	63	22	60	20	Orta	30
3	20	63	22	60	20	Yüksek	70
4	20	63	22	60	20	Ağır	100
5	20	63	22	60	15	Orta	30

4.5 Geliştirilen Yöntemin Hasar Yaşanan Sanayi Yapıları ile Karşılaştırılması

Geliştirilen yöntemin hasar yaşanan binalar üzerinde uygulanarak sonuçlarının karşılaştırılması, yöntemin hassasiyetinin belirlenebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, 1999 Kocaeli Depremi'nde "Ağır" hasar yaşanan tek katlı prefabrik betonarme sanayi yapısının detaylı yapısal bilgilerine (Tablo 11) ulaşılarak geliştirilen yöntem yardımıyla yapısal performans analizi yapılmıştır. Yapının, 1. Derece Deprem Bölgesi ve Z3 sınıfına giren zemin üzerine inşa edildiği belirtilmiştir [30].

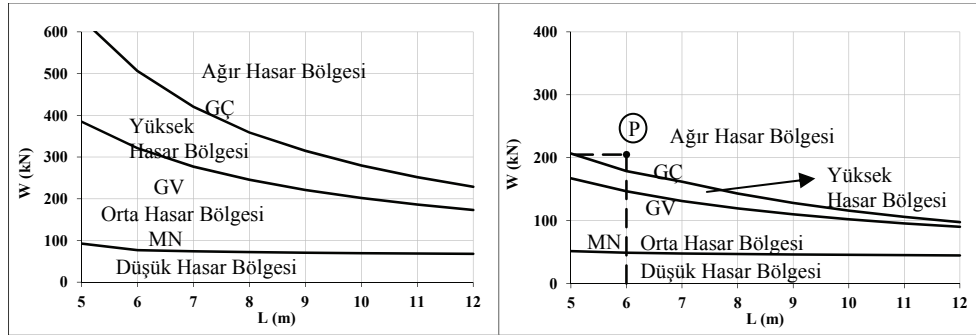
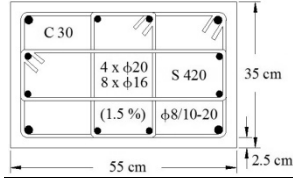
Söz konusu sanayi yapısının kolon kesiti kare olmadığından performans analizi öncesinde geliştirilen yöntem yardımıyla, yapının bulunduğu deprem bölgesi ve zemin sınıfına uygun olarak yatay ve dikey açıklık doğrultuları için ayrı ayrı hasar tahmin eğrileri çizilmiştir. Yapıda meydana gelebilecek en yüksek hasar tahmini için kesit boyutlarına göre değişen bu

Tek Katlı Betonarme Sanayi Yapıları İçin Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi

eğrilerden en elverişsiz olanı seçilerek yapının mimari ve yapısal özelliklerine göre hesaplanan aksenal yük ile kolon yüksekliği değerleri keşitirildiğinde, yapının "Göçme Sınırı"nın ötesinde, "Ağır Hasar Bölgesi"nde bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 13).

Tablo 11: Hasar yaşanan sanayi yapısının mimari ve yapısal özellikleri [30]

Kolon Kesiti (cm)	Yatay Açıklık (m)	Dikey Açıklık (m)	L (m)	Çatı Yapısı			Eks. Yük (kN)
				Taşıyıcı Sistem	Kaplama		
35 x 55 ($\rho = \%1.5$)	(2)	6	6	Prekast Kiriş	Prekast Aşık	Yok	205
				(Yapının orta bölümlerinde 2 ad. vinç kirişi mevcuttur.)			



a) Yatay açıklık doğrultusu için (D1, Z3) b) Dikey açıklık doğrultusu için (D1, Z3)

Şekil 13: Hasar yaşanan sanayi yapısının geliştirilen yöntemle elde edilen analitik hasar tahmin eğrileri kullanılarak yapısal performansının belirlenmesi

Tek katlı sanayi yapılarında yaşanan hasarlar incelendiğinde, birbirine eş çerçevelerden oluşan simetrik kolon kesitlerine sahip bu tip yapılarda burulma tipi hasarlara rastlanılmadığı, bununla birlikte yatay açıklık sayısı 2 veya daha fazla olduğunda, meydana gelen hasarların orta bölümdeki kolonlarda yoğunlaştığı gözlenmiştir [30]. Edinilen bu bilgi, geliştirilen yöntem sırasında kritik kolon seçiminin doğru bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Ek olarak, daha büyük kolon kesitine sahip sanayi yapılarında, son yıllarda meydana gelen depremler sırasında daha az hasar yaşandığı gözlenmiştir [31]. Geliştirilen hasar tahmin eğrilerinin kesit boyutları arttıkça yukarı yönlü hareket etmesi ve aynı hasar seviyesi için daha yüksek aksenal yüklere gerek duyulması, literatürde bulunan gerçek hasar araştırmalarından elde edilen bu verilerle de örtüştüğü söylenebilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, betonarme sanayi yapıları için deprem mühendisliği'nde uzman olmayan kişilerce de kullanılabilir kolay, hızlı ve de analitik bir yapısal deprem hasar (PML) tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analiz sonuçlarına göre deprem performansını en çok etkileyen değişkenlerin, kolon kesiti, boyuna ve enine donatı oranı, etriye aralığı, kolon yüksekliği, eksenel yük, deprem bölgesi ve zemin sınıfı olduğu görülmüştür. Beton sınıfının ise çalışmaya konu yapı türlerinin deprem performanslarında büyük farklılıklar yaratmadığı tespit edilmiştir. Yöntemde kullanılan hasar tahmin eğrileri, DBYBHY-07'de önerilen bina performans değerlendirme prosedürüne uygun şekilde, bir diğer önemli konu, P-Δ etkilerini de hesaba katarak özel bir yazılım yardımıyla elde edilmiştir. Çizilen bu eğrilere ilişkin tespit edilen önemli hususlar aşağıda özetlenmiştir;

- Diğer değişkenler sabitken boyuna donatı oranı arttırıldığında, En Küçük Hasar Sınırı'nın yukarı doğru kayarak kolon yükseliği eksenine paralel hale geldiği, Güvenlik Sınırı ve Göçme Sınırı'nın ise düşük kolon yüksekliklerinde sınırlı oranda olsa da özellikle kolon yükseklikleri arttıkça yukarı doğru hareket ettikleri gözlenmiştir (Aynı hasar seviyesi için daha büyük eksenel yük gerekmektedir.).
- Yalnızca kesit boyutları arttırıldığında, aynı hasar seviyesine karşılık gelen eğrilerin birbirlerine yakın oranlarda yukarı doğru kaydığı gözlenmiştir.
- Yalnızca kolon yükseklikleri arttırıldığında, dayanımdaki azalma nedeniyle P-Δ etkisinin hakim olduğu ve DBYBHY-07'de Göçme Sınırı için önerilen birim şekildeğiştirmeye karşılık gelen sınır eğrilik değerine henüz ulaşmadan kesitin göçebildiği gözlenmiştir.

Çalışmanın sonunda yapılan örnek analizlerde, mevcut hızlı hasar tahmini yöntemlerine göre (HAZUS Metodu hariç) aynı hasar seviyesine karşılık gelen sanayi yapılarının yeni yöntem kullanıldığında oldukça farklı yapısal hasar seviyelerine sahip olabilecekleri gözlenmiştir.

Geliştirilen yöntemin güvenilirliğinin araştırılması bakımından analiz sonuçları, hasar yaşanan sanayi tipi yapılarla karşılaştırıldığında ise mevcut çalışmalarda paylaşılan yapısal bilgiler sınırlı seviyede olsa da özellikle kısmen veya tamamen yıkılan binaların, geliştirilen yöntemde göre de "Göçme Sınırı"nın ötesinde değerlendirildiği gözlenmiştir. Ek olarak, deprem hasarları incelendiğinde, kolon kesitleri arttıkça meydana gelen hasarların azalması tespitinin de geliştirilen hasar tahmin eğrilerindeki değişim ile tutarlı olduğu söylenebilir.

Semboller

A_c	: Kesit alanı
A_e	: Etkin alan
A_o	: Etkin yer ivmesi katsayısı
$A(T)$: Spektral ivme katsayısı
ASTM	: American Society for Testing and Materials (ABD Malzeme ve Test Derneği)

Tek Katlı Betonarme Sanayi Yapıları İçin Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi

ATC	: Applied Technology Council (Uygulamalı Teknoloji Konseyi)
a, S_{ae}	: Elastik spektral ivme
a_p	: Performans noktasına karşılık gelen spektral ivme
a_y	: Akma noktasına karşılık gelen spektral ivme
C_R	: Spektral yerdeğiştirme oranı
d, S_{de}	: Elastik spektral yerdeğiştirme
d_a	: Dikey açıklık mesafesi
DBYBHY-07	: 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliği
d_p	: Performans noktasına karşılık gelen spektral yerdeğiştirme
d_y	: Akma ivmesine karşılık gelen spektral yerdeğiştirme
EI_{eff}	: Etkin eğilme rijitliği
FEMA	: Federal Emergency Management Agency (Federal Acil Durum Yönetimi Kurumu)
f_{yk}	: Boyuna donatının karakteristik dayanımı
f_{ywk}	: Enine donatının karakteristik dayanımı
f_{ck}, f_{cm}	: Betonun karakteristik dayanımı
f_s	: Eşdeğer statik kuvvet
g	: Yerçekimi ivmesi
HAZUS	: Hazards - United States (ABD Tehlike Analiz Programı)
I	: Bina önem katsayısı
k	: Rijitlik katsayısı
L	: Kolon yüksekliği
L_p	: Plastik mafsal boyu
m	: Kütle
MMI	: Modifiye edilmiş Mercalli Şiddeti
M_L	: Makas uzunluğu – Yatay açıklık mesafesi
M_u	: Nihai moment
M_y	: Akma momenti
W	: Kolona etkiyen eksenel yük
PBA	: Prefabrik betonarme
PML	: Probable Maximum Loss - Olası en yüksek hasar
P_y	: Yatay yük kapasitesi
R_y	: Dayanım azaltma katsayısı
$S(T)$: Spektrum katsayısı
S_{di}	: Elastik olmayan spektral yerdeğiştirme

T	: Doğal titreşim periyodu
T_S	: Sınır periyodu
TSDS	: Tek serbestlik dereceli sistem
u	: Tepe yerdeğiştirmesi
u_y	: Akma noktasına karşılık gelen tepe yerdeğiştirmesi
u_{max}	: En büyük tepe yerdeğiştirmesi
V	: Taban kesme kuvveti
V_y	: Akma noktasına karşılık gelen yatay yük kapasitesi
V_u	: Nihai yatay yük kapasitesi
w	: Doğal açısal frekans
w_S	: Sınır periyoduna karşılık gelen açısal frekans
$\Delta_{GÇ}$: Göçme Sınırı'na karşılık gelen yerdeğiştirme
Δ_{GV}	: Güvenlik Sınırı'na karşılık gelen yerdeğiştirme
Δ_{Hasar}	: Herhangi bir hasar sınırına karşılık gelen yerdeğiştirme
Δ_{MN}	: En Küçük Hasar Sınırı'na karşılık gelen yerdeğiştirme
Δ_p	: Plastik yerdeğiştirme
Δ_y	: Akma noktasına karşılık gelen yerdeğiştirme
θ_p	: Kolon kesitlerinde yaşanan plastik dönme istemi
ρ_s	: Enine donatının hacimsel oranı
ρ_{sm}	: 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliği'ne göre en küçük enine donatı oranı
ϕ_{Hasar}	: Herhangi bir hasar sınırına karşılık gelen eğrilik
ϕ_p	: Plastik eğrilik istemi
ϕ_u	: Nihai eğrilik
ϕ_y	: Akma eğriliği

Teşekkür

Bu çalışmadaki değerli katkılarından ötürü BÜ İnşaat Mühendisliği Öğretim Üyelerinden Doç. Dr. Hilmi Luş, Yrd. Doç. Dr. Kutay Orakçal ve İTÜ İnşaat Fakültesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Alper İlki ile BÜ Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nden Dr. Cüneyt Tüzün'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Engin programcılık bilgisi ile desteğini esirgemeyen BÜ Doktora Öğrencisi, Tarık Tufan'a da ayrıca teşekkür ederim.

Kaynaklar

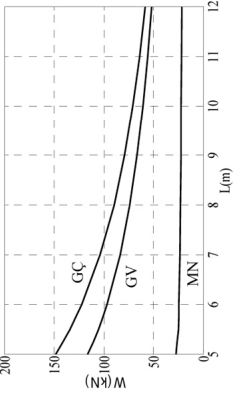
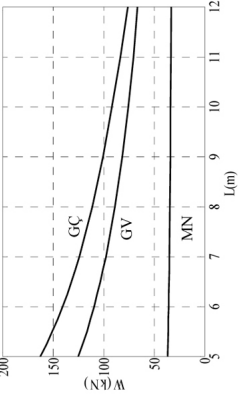
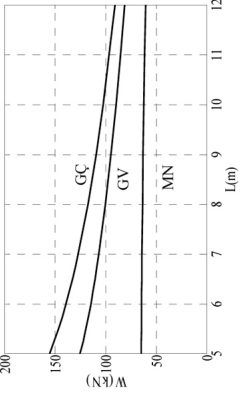
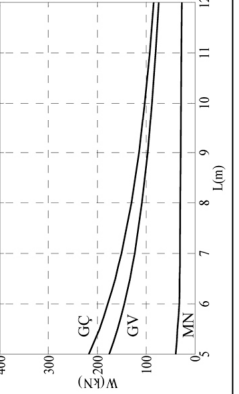
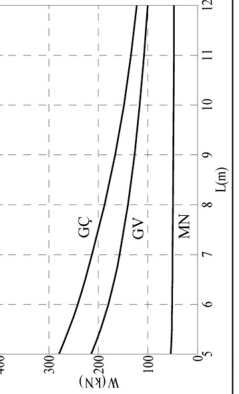
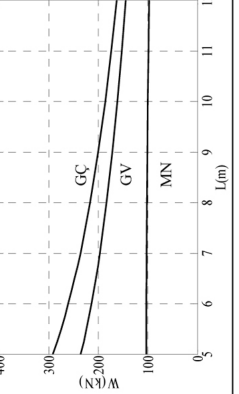
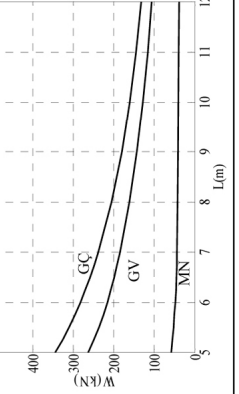
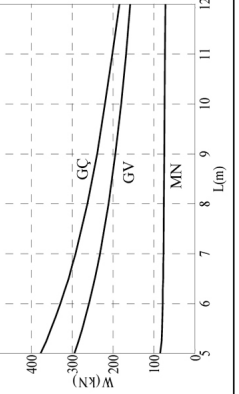
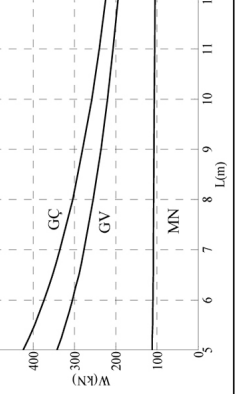
- [1] RMS Event Report, Kocaeli, Turkey Earthquake, http://www.rms.com/Publications/Turkey_Event.pdf, 2000.

- [2] Air Worldwide Damage Survey Report, Tohoku, Japan Earthquake, [http://www.air-worldwide.com/Publications/Presentations/AIR-Surveys-Damage-from-the-Tohoku-Earthquake-and-Tsunami-\(Summary-and-Slideshow\)](http://www.air-worldwide.com/Publications/Presentations/AIR-Surveys-Damage-from-the-Tohoku-Earthquake-and-Tsunami-(Summary-and-Slideshow)), 2011.
- [3] Kayhan, A.H., Şenel, Ş.M., Fragility Based Damage Assessment in Existing Precast Industrial Buildings: A Case Study for Turkey, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 34, No.1, 2010.
- [4] Durukal, E., Erdik M., Uçkan, E., Earthquake Risk to Industry in İstanbul and its Management, Springer, *Nat Hazards*, 44:199-212, 2008.
- [5] Yao, T., P., J., Probabilistic Methods for The Evaluation of Seismic Damage of Existing Structures, Purdue University, West Lafayette, 1981.
- [6] ASTM, ASTM E2026-07, Standard Guide for the Estimation of Probable Loss to Buildings from Earthquakes, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 2007.
- [7] Freeman, J., R., Earthquake Damage and Earthquake Insurance: Studies of a Rational Basis for Earthquake Insurance, also Studies of Engineering Data for Earthquake-Resisting Construction, New York: McGraw-Hill, 1932.
- [8] Steinbrugge, K., V., Earthquake, Volcanoes, and Tsunamis: An Anatomy of Hazards, New York: Skandia America Group, 1982.
- [9] Kircher, C., A., Reitherman, R.,K., Whitman, R.,V., Arnold, C., Estimation of Earthquake Losses to Buildings, *Earthquake Spectra* Volume 13, No. 4, pp 703-720, Earthquake Research Institute, Oakland, California, 1997.
- [10] Applied Technology Council (ATC), Earthquake Damage Evaluation for California, ATC 13, Redwood City, California, 1985.
- [11] Federal Emergency Management Agency (FEMA), Second Edition Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage, FEMA 154, Washington, DC, 2002.
- [12] Whitman, R., V., Anagos, T., Kricher, C., A., Lagorio, H., J., Lawson, R., S., Schneider, P., Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology, *Earthquake Spectra* Volume 13, No. 4, Earthquake Research Institute, Oakland, California, 1997.
- [13] Federal Emergency Management Agency (FEMA), HAZUS 99, Earthquake Loss Estimation Methodology, Washington, DC, 2001.
- [14] Kircher, C., A., Nassar, A., A., Kustu, O., Holmes, W., T., Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation, *Earthquake Spectra* Volume 13, No. 4, Earthquake Research Institute, Oakland, California, 1997.
- [15] Tezcan, S., Bal, E., Karakoç, C., Günay, G., Yalçın, C., Binaların Depremde Göçme Risklerini Tayine Yarayan Hızlı Puanlama Yöntemleri Mukayeseli Değerlendirme Raporu, Kadıköy Belediye Başkanlığı, Çevre Koruma Müdürlüğü, İstanbul, 2007.

- [16] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2007.
- [17] Karaesmen, E, Prefabrication in Turkey: Facts and Figures, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2001
- [18] Kayhan, A., H., Şenel, Ş., M., Tek Katlı Prefabrikte Sanayi Yapıları için Hasar Görebilirlik Eğrileri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, Cilt 21, Sayı 4, 2010.
- [19] Zorbozan, M., Aydemir, C., Tek Katlı Prefabrikte Yapılarda Etkin Kat Yerdeğiştirme ve İkinci Mertebe Koşullarını Sağlayan en Küçük Kolon Kesitlerinin Saptanması, Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı: 87, Türkiye Prefabrik Birliği, Ankara, 2008.
- [20] Kayhan, A., H., Şenel, Ş., M., Performance Evaluation of Single-spanned, Single-storeyed Precast Industrial Buildings, 2005 Kocaeli Earthquake Symposium, 2005.
- [21] Odabaşı, Y., Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları, Beta Basım Yayım Dağıtım, 2000.
- [22] Fischinger, M., Kramar, M., Isakovic, T., Cyclic response of slender RC columns typical of precast industrial buildings, Springer Science and Business Media B.V. (2008), Earthquake Engineering 6:519-534, 2008.
- [23] Ataköy, H., 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi ve TPB Üyeleri Tarafından Yapılan Prefabrikte Yapılar, Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı: 52, 5-14, Türkiye Prefabrik Birliği, Ankara, 2000.
- [24] Zorbozan, M., Barka, G., Sarıfakıoğlu, F., Ceyhan Depreminde Prefabrik Yapılarda Görülen Hasarlar, Nedenleri ve Çözüm Önerileri, Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı: 48, 20-24, Türkiye Prefabrik Birliği, Ankara, 1998.
- [25] Posada, M., Wood, S., L., Seismic Performance of Precast Industrial Buildings in Turkey, 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, 2002.
- [26] Durukal E., Erdik, M., Sesetyan, K., Fahjan, Y., Building Loss Estimation for Earthquake Insurance Pricing, Proceedings Of The 1906 Earthquake Conference, CD, Paper No: 1311, EERI, Oakland, 2006.
- [27] Deniz, A., Estimation of Earthquake Insurance Premium Rates Based On Stochastic Methods, MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2006.
- [28] Applied Technology Council (ATC), Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC 40, Redwood City, California, 1996.
- [29] Ersoy, U., Betonarme Cilt: 1 Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Evrim Yayınları, 1985.
- [30] Arslan, M., H., Korkmaz H., Gülay F., G., Damage and failure pattern of prefabricated structures after major earthquakes in Turkey and shortfalls of the Turkish Earthquake Code, Engineering Failure Analysis, Elsevier, 13, 2006.
- [31] Ozden, S., Barka, G., Ataköy, H., Hancioğlu, B., Ozkan, U., Earthquake Experience of Turkish Precast Industry, Proceedings of The 4th ECCOMAS Thematic Conference, Kos Island, Greece, 2013.

Tek Katlı Betonarme Sanayi Yapıları İçin Hızlı Hasar Hesaplama Yöntemi

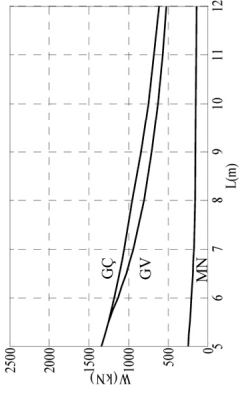
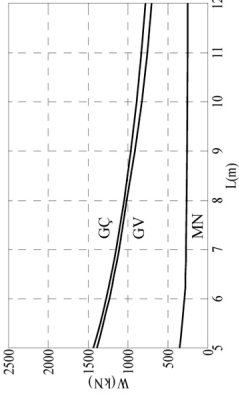
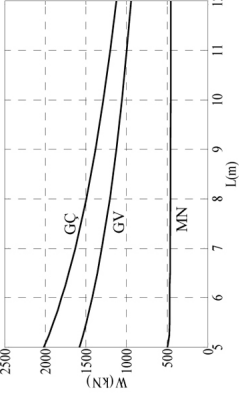
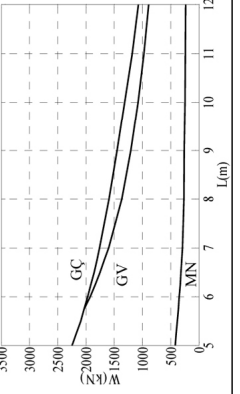
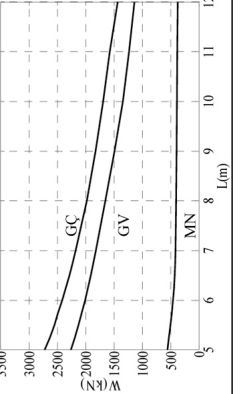
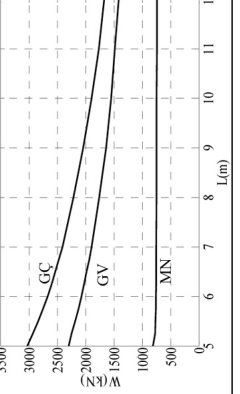
Tablo Ek.1: Çalışma kapsamında kullanılan yapı türlerine ait kolon tipleri için geliştirilen hasar tahmin eğrileri (1. Derece Deprem Bölgesi ve Z3 zemin sınıfı koşullarına tabi)

Tip	Kolon Kesiti (cm)	Donatı Oranı		
		a) En küçük	b) Orta	c) Yüksek
1	35x35			
				
				

Tablo Ek1: Çalışma kapsamında kullanılan yapı türlerine ait kolon tipleri için geliştirilen hasar tahmin eğrileri (1. Derece Deprem Bölgesi ve Z3 zemin sınıfı koşullarına tabi) (Devam)

Tip	Kolon Kesiti (cm)	Donatı Oranı		
		a) En küçük	b) Orta	c) Yüksek
4	50x50			
5	55x55			
6	60x60			

Tablo Ekl: Çalışma kapsamında kullanılan yapı türlerine ait kolon tipleri için geliştirilen hasar tahmin eğrileri (1. Derece Deprem Bölgesi ve Z3 zemin sınıfı koşullarına tabi) (Devam)

Tip	Kolon Kesiti (cm)	Donatı Oranı		
		a) En küçük	b) Orta	c) Yüksek
7	70x70			
				
8	80x80	