ÖRNEK BİNA ÜZERİNDE ASCE EUROCODE VE TBDY DE ÖNERİLEN ÇOK MODLU PERFORMANS ANALİZLERİNİN İRDELENMESİ

Omer HASANI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖRNEK BİNA ÜZERİNDE ASCE EUROCODE VE TBDY DE ÖNERİLEN ÇOK MODLU PERFORMANS ANALİZLERİNİN İRDELENMESİ

Omer HASANI
0009-0007-9437-8205

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2025
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Omer HASANI tarafından hazırlanan "ÖRNEK BİNA ÜZERİNDE ASCE EUROCODE VE TBDY DE ÖNERİLEN ÇOK MODLU PERFORMANS ANALİZLERİNİN İRDELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Başkan : Unvanı, Adı ve Soyadı İmza
000-000-000-000
…….Üniversitesi
. ……...Fakültesi,
…….Anabilim Dalı

Üye : Unvanı, Adı ve Soyadı İmza
000-000-000-000
……..Üniversitesi,
……..Fakültesi,
……...Anabilim Dalı

Üye : Unvanı, Adı ve Soyadı İmza
000-000-000-000
……..Üniversitesi,
……..Fakültesi,
……...Anabilim Dalı

Üye : Unvanı, Adı ve Soyadı İmza
000-000-000-000
……..Üniversitesi,
……..……..Fakültesi,
……...Anabilim Dalı

Üye : Unvanı, Adı ve Soyadı İmza
000-000-000-000
……..Üniversitesi,
……..Fakültesi,
……...Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım
Prof. Dr. ……..…..
Enstitü Müdürü
../../….(Tarih)

Bilimsel Etik Bildirim

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/08/2025

Omer HASANI

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN	Omer HASANI
Tarih	Tarih
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI
ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU

FR 3.4.6_27

ÖĞRENCİ

Adı SOYADI : Omer Hasani
ÜNVANI : Yüksek lisans öğrencisi
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : omarcivileng94@gmail.com
PROGRAMI: YÜKSEK LİSANS
ORCID : 0009-0007-9437-8205
TÜBİTAK ID : TBTK-0202-9523
WOS RESEARCHER ID: NRZ-0535-2025
Google Scholar ID : XLGM86wAAAAJ

DANIŞMAN

Adı SOYADI : Adem DOĞANGÜN
ÜNVANI : Prof. Dr.
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : adogangun@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID : 12367
ORCID : 0000-0002-1867-7103
TÜBİTAK ID : TBTK-0007-9304
WOS RESEARCHER ID : AAR-6126-2020
SCOPUS AUTHOR ID : 6602349830
Google Scholar ID : j6e038oAAAAJ&hl

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA EĞİTİMİ BOYUNCA

BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ

1. Hasani O. Ve Doğangün A. (2025). Seismic Performance Evaluation of a Case Study Building Designed Under the Turkish Building Earthquake Code 2018 Using the ASCE 41-17 Standard. 4th International Palestra Scientific Research Congress. (pp. 150-165). Skopje, N. Macedonia

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

■

6.317.2518
Sustainable
Development

☐

■

7.121.431
Reinforced
Concrete

☐

☐

☐

☐

☐

☐

Anahtar kelimeler aşağıdaki bağlantı üzerinden seçilecektir.
https://incites.help.clarivate.com/Content/Resources/Docs/SDG2023.xlsx

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÖRNEK BİNA ÜZERİNDE ASCE EUROCODE VE TBDY DE ÖNERİLEN ÇOK MODLU PERFORMANS ANALİZLERİNİN İRDELENMESİ

Omer HASANI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Türkiye'de özelikle 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen ve asrın felaketi olarak adlandırılan depremler mevcut binaların deprem performanslarını değerlendirmesini gerekli kılmıştır. Bu çalışmanın başlıca amacı, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), Amerikan standardı (ASCE 41-17) ve Avrupa standardında (Eurocode 8) öngörülen deprem performans analizlerini örnek bina üzerinde gerçekleştirmek ve elde edilen bulguları karşılaştırmalı olarak irdelemektir. Bu amaçla 15 katlı ve düşey taşıyıcıları kolonlar ve perde duvarlardan, döşeme sistemi balkonlar hariç kirişli döşemeden oluşan bir bina uygulama örneği olarak seçilmiştir. Binanın deprem performansının değerlendirilmesinde doğrusal olmayan davranışı dikkate alarak çok modlu itme analizi kullanılmıştır. Analiz için ETABS ve Sta4CAD yazılımlarından yararlanılmıştır. Binanın analizi sonucu elde edilen plastik mafsallar üzerinden hasar düzeyleri belirlenmiştir. Elemanlardaki hasar seviyelerine bağlı olarak da binanın genel olarak yeterli deprem performansına sahip olup olmadığı tespit edilmiştir. Tezde dikkate alınan yönetmelik ve standartlarda deprem hasarlarına ilişkin tanımlanan değerlerde farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar da deprem performans analizlerinde özellikle de eleman hasarlarında kendini göstermektedir. Yapılan analizlerde, yatay yer değiştirme ve kat öteleme oranlarında yönetmelikler arasında belirgin farklar görülmüştür. TBDY 2018 en düşük, Eurocode 8 en yüksek, ASCE 41-17 ise orta düzeyde değerler üretmiştir. Hasar düzeyi analizlerinde kolonların büyük çoğunluğunun tüm yönetmeliklerde Sınırlı Hasar Bölgesi'nde kaldığı, kirişlerde ise özellikle TBDY 2018'e göre daha yüksek oranda, %50'den fazlasında, Belirgin Hasar oluştuğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Itme analizi, Plastik mafsal, Tepe yer değiştirme, Kapasite eğrisi.
2025, xiii + 96 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF MULTI-MODE PERFORMANCE ANALYSES PROPOSED IN ASCE, EUROCODE, AND TBDY ON A SAMPLE BUILDING

Omer HASANI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

The earthquakes that occurred in Türkiye on February 6, 2023, known as the disaster of the century, have made it essential to evaluate the seismic performance of existing buildings. The primary objective of this study is to conduct seismic performance analyses on a sample building in accordance with the Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018), the American standard (ASCE 41-17), and the European standard (Eurocode 8), and to comparatively examine the findings. For this purpose, a 15-story building with vertical load-bearing elements consisting of columns and shear walls, and a slab system composed of beam-supported slabs excluding balconies, was selected as a case study. Nonlinear behavior was taken into account in the seismic performance evaluation, and a multi-mode pushover analysis was performed. ETABS and Sta4CAD software were used for the analyses. Damage levels were determined based on plastic hinge formations obtained from the building analysis. Depending on the damage levels of structural elements, the overall seismic performance of the building was assessed. The codes and standards considered in the study differ in their definitions related to earthquake damage, which is reflected particularly in the element damage levels during the seismic performance analyses. The analyses revealed significant differences in lateral displacements and story drift ratios among the codes. TBDY 2018 produced the lowest values, Eurocode 8 the highest, while ASCE 41-17 yielded moderate results. In the damage level analyses, it was observed that the majority of columns remained within the Limited Damage Zone under all codes, while in beams, especially according to TBDY 2018, a higher proportion, more than 50% experienced Significant Damage.

Key words: Pushover analysis, Plastic hinge, Peak displacement, Capacity curves.

2025, xiii + 96 page

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca tez çalışmamın niteliğini ve yönünü önemli ölçüde geliştiren değerli danışmanım Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN'e, engin bilgisi, sürekli desteği ve yol gösterici katkılarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu çalışma süresince sağladığı değerli yardımlar ve yapıcı katkılar için Mühendis Muneeb JADALLAH'a da gönülden teşekkür ederim. Yüksek lisans sürecimin tüm aşamalarında bana verdiği sürekli destek ve katkılarından dolayı Riham DAWOD'a da teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, bu zorlu fakat anlamlı süreçte her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme en derin şükranlarımı sunarım.

Omer HASANI

25/08/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ii
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vii
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER 4
2.1. Sismik Performans Değerlendirmesi 4
2.2. Doğrusal Olmayan Statik Yöntemler (NSP) 6
2.2.1. Kapasite Spektrumu Yöntemi 8
2.2.2. Yer Deplasman Katsayısı Yöntemi 10
2.2.3. Geliştirilmiş Kapasite Spektrumu Yöntemi 12
2.2.4. Geliştirilmiş Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi 17
2.2.5. N2 Yöntemi 19
2.2.6. TBDY 2018’de Doğrusal Olmayan Statik Yöntem 22
2.3. Performans Tanımı 25
2.3.1. ASCE 41-17’de Performans Tanımları 25
2.3.2. EC8’de Performans Tanımları 26
2.3.3. TBDY 2018’de Performans Tanımları 27
2.4. Performans Kriteri 28
2.4.1. ASCE 41-17'de Kabul Edilebilirlik Sınırları 28
2.4.2. EC8'de Kabul Edilebilirlik Sınırları 31
2.4.3. TBDY 2018’de Kabul Edilebilirlik Sınırları 32
2.5. Önceki Çalışmaların İncelenmesi 33
3. MATERYAL ve YÖNTEM 42
3.1. Giriş 42
3.2. İncelenen Binanın Tasarım Parametreleri 46
3.2.1. Malzeme Özellikleri 46
3.2.2. Yapı Alanının Sismik ve Geoteknik Özellikleri 46
3.2.3. Yapı Modellemesinde Dikkate Alınan Yükler 48
3.3. Performans Analizi 49
3.3.1. ASCE 41-17’ye Göre Kesitsel Moment-Eğrilik Davranışı 49
3.3.2. EC8’e Göre Kesitsel Moment-Eğrilik Davranışı 50
3.3.3. TBDY 2018’e Göre Kesitsel Moment-Eğrilik Davranışı 51
3.3.4. Performans Noktasının Belirlenmesi 55
3.3.4.1. ASCE 41-17 İçin Performans Noktası 56
3.3.4.2. EC8 İçin Performans Noktası 58
3.3.4.3. TBDY 2018 İçin Performans Noktası 60
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 62
4.1. Deplasman Grafiği 62
4.1.1. ASCE 41-17 Analizi İçin Deplasman Grafiği 62

4.1.2. EC8 Analizi İçin Deplasman Grafiği 64
4.1.3. TBDY 2018 Analizi İçin Deplasman Grafiği.....66
4.1.4. Yönetmelikler Arası Deplasman Karşılaştırması 68
4.2. Göreli Kat Ötelemesi 70
4.2.1. ASCE 41-17 Analizi İçin Göreli Kat Ötelemesi 70
4.2.2. EC8 Analizi İçin Göreli Kat Ötelemesi 71
4.2.3. TBDY 2018 Analizi İçin Göreli Kat Ötelemesi 72
4.2.4. Yönetmelikler Arası Göreli Kat Ötelemesi Karşılaştırması.....72
4.3. Deplasman Talepleri Karşılaştırması 75
4.4. Yapısal Elemanlarda Hasar Durumları.....76
4.4.1. ASCE 41-17'ye Göre Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi 76
4.4.2. EC8'e Göre Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi 79
4.4.3. TBDY 2018'e Göre Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi.....82
4.4.4. Üç Yönetmeliğe Göre Hasar Durumlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi.....84
4.4.5. ETABS ve STA4CAD Hasar Durumlarının Karşılaştırılması 88
5. SONUÇ 90
KAYNAKLAR.....93
ÖZGEÇMİŞ 96

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$a_1^{(i)}$	i. modun modal TSD sisteminin spektral ivmesi
a_y	Akma ivmesi
a_{y1}	Akma ivmesi
$B(\beta_{eff})$	Sönüme bağlı spektral azalma faktörüco
C_0	TSD spektral deplasmanını, ÇSD çatı deplasmanına dönüştüren katsayı
C_1	Elastik yer değiştirmeleri inelastik yer değiştirmelere dönüştüren katsayı
C_2	Rijitlik ve dayanım kaybının yer değiştirmeye etkisini gösteren katsayı
C_3	P-Δ etkisiyle artan yer değiştirmeleri gösteren katsayı
C_m	Etkin kütle katsayısı
C_R	Spektral yer değiştirme oranı
cu	Üniformluk katsayısı
$d_1^{(i)}$	i. modun modal TSD sisteminin spektral yer değiştirmesi
d_{et}	T* periyotlu, sınırsız elastik davranışlı yapının hedef yer değiştirmesi
d_m	Hedef yer değiştirme noktası
d_{pi}	Maksimum yer değiştirme
d_t	Tepe yer değiştirme
d_y	Akma yer değiştirmesi
E	Elastisite modülü
E_m	Kapasite eğrisi altında, hedef yer değiştirme noktasından itibaren kalan alan
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{ck}	Karakteristik silindir basınç dayanımı
f_{ctk}	Karakteristik beton çekme dayanımı
f_e	Elastik dayanım talebi
f_y	Akma dayanımı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Kesit derinliği
I	Binanın önem katsayısı
K_i	Elastik yatay rijitliği
K_e	Etkin yatay rijitlik
L_p	Kolon derinliğinin yarısı
m^*	Eşdeğer TSD sistemin kütlesi
m_i	i. seviyedeki kütle
M_{x1}	Etkili kütle
M_y	Moment dayanımı

PGA	En büyük yer ivmesi
PGV	En büyük yer hızı
PF_1	Birinci titreşim modu katılım faktörü
R	Elastik kuvvet talebinin akma dayanımına oranı
R_{max}	Minimum dayanım sınırı
R_y	İtilim analizinden bulunan akma dayanımı
R_μ	Süneklik nedeniyle azaltma faktörü
S_{ai}	Spektral ivme
S_a	Elastik olmayan ivme spektrumu
S_{ae}	İlk adımdaki elastik spektral ivme
S_d	Elastik olmayan yer değiştirme spektrumu
S_{de}	Elastik yer değiştirme spektrumu
S_{DS}	Kısa devir tasarım spektral ivme katsayısı
S_{D1}	1 saniye periyot için tasarım ivme katsayısı
S_{di}	Spektral deplasman
S_e	Elastik ivme spektrumu
S_h	Kancaların aralığı
S_1	1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
S_S	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
S_v	Spektral hız
T	Doğal periyot
T*	Başlangıçtaki elastik periyot
T_0	Başlangıç periyodu
T_1	Birinci doğal titreşim periyodu
T_B	Yer hareketinin karakteristik periyodu
T_C	Yer hareketinin karakteristik periyodu
T_e	Etkin temel periyot
T_{eff}	Etkili periyot
T_i	Elastik temel periyot
T_s	Yanıt spektrumunun karakteristik köşe periyodu
U_{xN1}	Yer değiştirme
V_b	Taban Kesme Kuvveti
V_o	Kesme kapasitesi
Vs_{30}	30 metre derinlikteki ortalama kayma dalgası hızı
V_y	Etkin akma dayanımı
V_{x1}	Taban kesme kuvveti
W	Ölü yük ve hareketli yüklerin toplamını
α	Post-akma sertliğinin, etkili elastik sertliğe oranı
α_1	Modal kütle katsayısını
α_e	Etkin negatif akma sonrası eğim
αK_e	Akma sonrası eğimi
$\alpha_{p-\Delta}$	P-Δ etkileriyle oluşan negatif eğim oranı.
a_{pi}	Maksimum ivme
β_0	Başlangıç sönüm oranı
β_{eff}	Etkili sönüm oranı

Γ	Dönüşüm faktörü (ÇSD sistem için)
Γ_{x1}	n. titreşim modunun modal dönüşüm faktörü
γ_{el}	Güvenlik katsayısı
δ_t	Hedef deplasman
Δ_d	Maksimum dayanım ile ilişkili şekil değiştirme
Δ_{roof}	Çatı deplasmanını
Δ_y	Akma şekil değiştirmesi
η	Sabit katsayı
θ	Kiriş dönüşü parametresi
θ_y	Plastik mafsaldaki akma dönmesi
λ	Yakın alan etkisi faktörü
μ	Süneklik faktörü
ν	Eksenel kuvvet oranı
ρ_d	Çapraz donatı oranı
ρ_{sx}	Paralel enine donatı oranı
φ_y	Etkin akma eğriliği
$\Phi_{1,\ roof}$	Birinci titreşim mod şeklinin çatı seviyesindeki genliğini
Φ_i	ÇSD sisteminin i. seviyesindeki yer değiştirme vektörü.
Φ_u	Nihai eğrilik değeri
Φ_{xN1}	İlk itilim adımında belirlenen ve sabit kalan mod şeklinin yer değiştirme vektörü
ϑ	Eksenel yük oranı
$\square_{(1),1}$	İlk modun açısal frekansı

Kısaltmalar	**Açıklama**
ADRS	Acceleration-Displacement Response Spectrum
ASCE	American Society of Civil Engineers
ATC	Applied Technology Council
BKS	Bina Kullanım Sınıfı
BYS	Bina Yükseklik Sınıfı
CM	Coefficient Method
CP	Collapse Prevention
CSM	Capacity Spectrum Method
ÇSD	Çok Serbestlik Dereceli
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
DD-2	Deprem Yer Hareketi Düzeyi – 2
DL	Damage Limitation
DTS	Deprem Tasarım Sınıfı
EC	European Code
ETABS	Extended 3D Analysis of Building Systems
FEMA	Federal Acil Durum Yönetim Ajansı
GÖ	Göçme Önleme
IBC	International Building Code
IO	Immediate Occupancy
KH	Kontrollü Hasar
LS	Life Safety
NC	Near Collapse
NSP	Nonlinear Static Procedures
NSPT	Standard Penetration Test Resistance
PDDM	Performansa Dayalı Deprem Mühendisliği
SAP	Structural Analysis Program
SD	Significant Damage
SH	Sınırlı Hasar
STA4-CAD	Betonarme Yapı Tasarım ve Analiz Programı
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDTH	Türkiye Deprem Tehlike Haritası
TSD	Tek Serbestlik Dereceli
TS	Türk Standardı
XTRACT	Betonarme Kesit Analiz ve Tasarım Yazılımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Yapısal bir modelin eşdeğer tek serbestlik dereceli bir sisteme temel dönüştürülmesi…….	7
Şekil 2.2.	Kapasite spektrumu yönteminin genel süreci……..	9
Şekil 2.3.	Kapasite Eğrisinin İki Doğrusallaştırılması (FEMA 356)……...	10
Şekil 2.4.	Başlangıç ADRS Talebi ve Kapasite Spektrumu (FEMA 440)……...	13
Şekil 2.5.	Kapasite Spektrumunun İki Doğrulu Temsili (FEMA 440)….	13
Şekil 2.6.	Performans noktasının belirlenmesi (FEMA 440)……...	15
Şekil 2.7.	Çeşitli kaynak belgelerden alınan sönümleme katsayıları B, etkin sönümleme β_{eff} 'in bir fonksiyonu olarak……	16
Şekil 2.8.	Kapasite eğrisinin doğrusallaştırılması……	20
Şekil 2.9.	Sismik talebin belirlenmesi……..	22
Şekil 2.10.	S_{ae} ve S_{de} arasındaki ilişki……	24
Şekil 2.11.	Spektral yerdeğiştirme oranı……...	24
Şekil 2.12.	ASCE 41-17'ye Göre Hasar Sınır Bölgeleri (ASCE 41-17).....	26
Şekil 2.13.	TBDY 2018’e Göre Hasar Sınır Bölgeleri (TBDY 2018).....	28
Şekil 3.1.	Üçüncü katın plan görünümü.....	42
Şekil 3.2.	Üç boyutlu görünümü.....	43
Şekil 3.3.	Türkiye Deprem Tehlike Haritası.....	47
Şekil 3.4.	ZD zemin sınıfı ve DD-2 için elastik tasarım spektrumları.....	48
Şekil 3.5.	Kiriş 66 için ASCE 41-17'ye göre M3 plastik mafsal özellik verisi.....	50
Şekil 3.6.	Kiriş Kesiti 66’nın pozitif moment altındaki Xtract analiz sonuçları.....	51
Şekil 3.7.	Kiriş Kesiti 66’nın negatif moment altındaki Xtract analiz sonuçları.....	52
Şekil 3.8.	TBDY 2018'e göre kiriş kesiti 66’nın plastik dönme hesabı...	52
Şekil 3.9.	Kiriş 66 için TBDY 2018'e göre M3 plastik mafsal özellik verisi.....	53
Şekil 3.10.	Kolon C05 için TBDY 2018'e göre P-M2-M3 plastik mafsal özellik verisi.....	53
Şekil 3.11.	Plastik mafsalın elastoplastik davranışı (TBDY 2018).....	54
Şekil 3.12.	Donatı çeliği için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları (TBDY 2018).....	54
Şekil 3.13.	Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları (TBDY 2018).....	55
Şekil 3.14.	ASCE 41-17'ye göre statik itme eğrisi.....	56
Şekil 3.15.	ASCE 41-17'ye göre performans noktası.....	57
Şekil 3.16.	EC8'e göre statik itme eğrisi.....	58
Şekil 3.17.	EC8'e göre performans noktası.....	59
Şekil 3.18.	TBDY 2018'e göre statik itme eğrisi.....	60
Şekil 3.19.	TBDY 2018'e göre performans noktası.....	61
Şekil 4.1.	ASCE 41-17 deplasman grafiği.....	63
Şekil 4.2.	EC8 deplasman grafiği.....	64

Şekil 4.3. TBDY 2018 deplasman grafiği..... 67
Şekil 4.4. Yönetmeliklere göre yer değiştirme karşılaştırması..... 69
Şekil 4.5. ASCE 41-17 kat ötelenme değerleri..... 70
Şekil 4.6. EC8 kat ötelenme değerleri..... 71
Şekil 4.7. TBDY 2018 kat ötelenme değerleri..... 72
Şekil 4.8. Yönetmeliklere göre Maksimum Kat Ötelemesi karşılaştırması..... 74
Şekil 4.9. ASCE 41-17'ye Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı..... 77
Şekil 4.10. ASCE 41-17'ye Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı..... 77
Şekil 4.11. ASCE 41-17'ye Göre Tüm Elemanların Hasar Düzeyleri..... 78
Şekil 4.12. EC8'e Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı.... 80
Şekil 4.13. EC8'e Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı..... 80
Şekil 4.14. TBDY 2018'e Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı..... 82
Şekil 4.15. TBDY 2018'e Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı..... 84
Şekil 4.16. Üç Yönetmeliğe Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı..... 85
Şekil 4.17. Üç Yönetmeliğe Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı..... 85
Şekil 4.18. ETABS ve STA4CAD Sonuçlarının Karşılaştırılması: Kolon Hasar Düzeyleri..... 88
Şekil 4.19. ETABS ve STA4CAD Sonuçlarının Karşılaştırılması: Kiriş Hasar Düzeyleri..... 89

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Düzeltme Katsayısı Değerleri	11
Çizelge 2.2.	Kirişler için kabul kriterleri (ASCE 41-17)	30
Çizelge 3.1.	Yapı mevkiinin deprem parametreleri	47
Çizelge 4.1.	ASCE 41-17 deplasman değerleri	62
Çizelge 4.2.	EC8 deplasman değerleri	65
Çizelge 4.3.	TBDY 2018 deplasman değerleri	66
Çizelge 4.4.	Üst Kat Yer Değiştirmesi Karşılaştırması	68
Çizelge 4.5.	Maksimum Kat Ötelemesi Karşılaştırması	73
Çizelge 4.6.	Deplasman Talepleri Karşılaştırması	75
Çizelge 4.7.	ASCE 41-17'ye Göre Kolon ve Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri	79
Çizelge 4.8.	EC8'e Göre Kolon ve Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri	81
Çizelge 4.9.	TBDY 2018'e Göre Kolon ve Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri	83
Çizelge 4.10.	Üç Yönetmeliğe Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri	86
Çizelge 4.11.	Üç Yönetmeliğe Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri	87

1. GİRİŞ

Günümüzde, deprem riski taşıyan ülkelerin karşılaştığı en büyük zorluk, yapıların deprem güvenliğini sağlamaktır. Bu da can kayıplarının önlenmesine olanak tanır. Türkiye, kendine özgü jeolojik konumu nedeniyle sürekli deprem tehdidi altındadır. Büyük Avrasya, Arap ve Afrika levhalarının arasında yer alan Türkiye, Anadolu levhası üzerinde bulunmaktadır. Arap levhası, Türkiye'yi kuzeye doğru sürekli itmekte olup, Anadolu levhası saat yönünde dönmektedir. Ancak, kuzeye doğru hareket Avrasya levhası tarafından engellenmekte ve bu sıkışma, ülke genelinde çok sayıda aktif fay hattının oluşmasına neden olmaktadır. Türkiye'nin büyük bir kısmı yüksek deprem riski taşıyan bölgelerden oluşmaktadır. Ani ve yıkıcı depremler, büyük can ve mal kayıplarına yol açarak, ülke genelinde deprem yönetmeliklerinin daha sıkı uygulanmasını zorunlu hale getirmiştir.

1999 yılında Türkiye, iki büyük depremle sarsılmıştır. Ağustos ayında İzmit merkezli 7.6 büyüklüğündeki ilk deprem, 17.000'den fazla insanın ölümüne neden olmuştur. Aynı yılın Kasım ayında Düzce merkezli meydana gelen güçlü bir artçı sarsıntı ise en az 845 kişinin hayatını kaybetmesine sebep olmuştur. En son büyük deprem dizisi ise Şubat 2023'te Güneydoğu Türkiye ve komşu Suriye'yi etkilemiş, 7.7 ve 7.6 büyüklüğündeki iki ana deprem, yalnızca Türkiye’de 56.000’den fazla can kaybına neden olmuştur. Yaklaşık 3 milyon insan yerinden edilmiş ve 2,2 milyondan fazla konut birimi hasar görmüştür (IPA, 2024).

Tekniğine uygun olmayan yapıların bulunduğu ülkelerde, orta büyüklükteki depremler bile can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Bunun temel sebepleri ise zemin parametrelerinin gerçekçi bir şekilde belirlenmemesi, tasarım eksiklikleri, malzeme kalitesinin düşük olması ve yetersiz işçilik olarak öne çıkmaktadır. İnsan hayatı ve ekonomik kayıplar, mevcut yapıların sismik dayanımının değerlendirilmesi gerekliliğini bariz bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu nedenle, özellikle son yirmi yılda bina yönetmelikleri, yalnızca yeni yapıların tasarımını değil, mevcut yapıların değerlendirilmesini de içerecek şekilde önemli ölçüde revize edilmiştir. Mühendislik yaklaşımlarındaki değişiklikler, üstün malzeme ve inşaat teknikleri ile detaylı modelleme araçlarına sahip güçlü bilgisayar

yazılımları, yeni yapıların sismik performansının önemli ölçüde iyi düzeyde olmasını sağlamaktadır (Işık ve ark., 2021).

1980'lerin sonlarında hızlı sismik performans değerlendirme yöntemleri geliştirilmiş ve FEMA 154 gibi yaklaşımlar uygulanmıştır. Bu yöntemlerin amacı, genellikle bölgesel olarak hangi yapıların güvensiz olduğu ve yıkılması gerektiğini hızlı bir şekilde belirlemek, hangi yapıların daha fazla incelenmeye ihtiyaç duyduğunu tespit etmekti. Ancak, belirli bir bina hakkında nihai bir karar vermek için yeterli değillerdi. Bu nedenle, ASCE 41-17 (Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği), EC8 (Avrupa Deprem Yönetmeliği) ve TBDY 2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) gibi belirli prosedürleri ve yükümlülükleri zorunlu kılan ayrıntılı yönetmelikler hazırlanmış ve yürürlüğe girmiştir. Ancak, bu yönetmeliklerde doğal olarak ülkeye özgü parametrelere bağlı olarak bazı farklılıklar bulunmaktadır.

Son birkaç on yılda, performansa dayalı deprem mühendisliği (PDDM) araştırmaları, yapıların sismik kapasitesini ve talebini tahmin etmek için basit ve hassas yaklaşımlar geliştirmeye odaklanmıştır. Bu yöntemler, yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarını dikkate almaktadır. Doğrusal olmayan yaklaşımlar, doğru deprem performans değerlendirmeleri için kritik öneme sahiptir (Chopra, 2004). Kuvvet tabanlı sismik tasarım yöntemlerinin, yapıların doğrusal olmayan davranışlarını tam olarak yansıtamaması, bina yönetmeliklerinde var olan yapıların sismik performans değerlendirilmesi için deplasman tabanlı yaklaşımların ön plana çıkmasına neden olmuştur. 1990'ların başından itibaren doğrusal olmayan analiz yöntemleri, yapıların tasarım ve değerlendirme çalışmalarında temel bir unsur haline gelmiş ve güncel deprem yönetmeliklerine entegre edilmiştir.

Farklı bina yönetmelikleri arasında yapı performans analizi prosedürlerinde genel bir yakınsama görülse de, bazı temel kavramsal farklılıklar devam etmektedir. Bu farklılıklar özellikle plastik mafsalların modellenmesi ve performans noktasının belirlenmesine yönelik kullanılan yöntemlerde olmaktadır. Bu çalışma, ASCE 41-17, EC8 ve TBDY 2018'de tanımlanan doğrusal olmayan statik prosedürlerin karşılaştırmalı analizine odaklanmaktadır. Bu yönetmeliklerin karşılaştırılmasıyla, her birinin etkinliği hakkında daha iyi bir anlayış

geliştirilmesi, ortak ve farklı yönlerin belirlenmesi ve yapısal güvenlik üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Sözkonusu yönetmeliklerde belirtilen prosedürler, Türkiye'de bulunduğu kabul edilen örnek bir bina üzerinde uygulanacaktır. Bu kapsamda, her bir yönetmelik altında binanın sismik performansını değerlendirmek amacıyla ETABS v21.0.1 yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yönetmeliklerde belirtilen hükümlere uygun olarak, yapı elemanlarının (kiriş ve kolon) uç noktalarına plastik mafsal özellikleri atanmıştır. Binanın deprem yükleri altındaki performansını belirlemek için her üç yönetmeliğe göre doğrusal olmayan itme analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece Avrupa ve ABD yönetmeliklerinin Türk sismik tasarım pratiğine uyarlanması konusuna değinilecektir. Elde edilen sonuçların, hem mühendisler hem de yönetmelik yapıcılar için sismik standartların iyileştirilmesine ve yapısal dayanıklılığın artırılmasına yönelik bilgi sunulması beklenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Sismik Performans Değerlendirmesi

Binalar için analiz yöntemleri, başlangıçta, esas olarak basitleştirilmiş yapı modellerine dayanıyordu. Modal analiz ve tepki spektrumu analiz yöntemlerinin daha yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte, titreşim modlarının ve periyotlarının önemi daha belirgin hale gelmiştir. 1960'ların ortalarında, bilgisayar programlarının ve dinamik analiz çözümlerinin gelişmesiyle birlikte önemli değişimler gerçekleşmiştir. Bunun sonucunda, dinamik hareket denklemlerinin entegrasyonuna dayalı ayrıntılı dinamik analiz yöntemleri geliştirilmiş ve doğrusal modellere kıyasla yapının daha iyi temsil edilmesini sağlayan doğrusal olmayan modelleme teknikleri kullanılmaya başlanmıştır.

Küresel ölçekte kullanılan deprem yönetmeliklerinin çoğu, performansa dayalı değil, dayanıma (kuvvete) dayalıdır. Geleneksel kuvvet tabanlı yönetmelikler, tek bir performans seviyesine ve tek bir deprem yükü seviyesine odaklanmaktadır. Buna karşın, geleneksel kurallara dayalı yöntemlerden farklı olarak, performansa dayalı yaklaşımlar, yapıların beklenen sismik yükleme altında hangi performans seviyelerini göstermesi gerektiğini belirlemeye yönelik olarak tasarlanmıştır. Bu yaklaşımlar, önceden belirlenmiş yöntemlerden ziyade istenen sonuçları önceliklendirerek mühendislerin yapısal güvenliği ve maliyeti optimize etmelerine olanak tanımaktadır. Bu uyarlanabilirlik, sürdürülebilir kaynak kullanımına katkı sağlamakta ve inşaat uygulamalarını uzun vadeli ekonomik ve çevresel hedeflerle uyumlu hale getirmektedir.

Performans değerlendirmesi, deprem zemin ve bina için önceden belirlenmiş parametreler ile yönetmelikte öngörülen kriterlere göre yapılmaktadır. Bu kriterler, bir olay sonrasında yapı bileşenlerinin belirli bir işlevsellik seviyesine ulaşması için sahip olması gereken kapasiteyi tanımlamaktadır. Değerlendirmedeki temel unsurlardan biri, belirli bir yer hareketi veya beklenen şiddet seviyesinin oluşturacağı talebin doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Talep parametreleri, genel ve özel olmak üzere ikiye ayrılır. Genel parametreler, maksimum çatı deplasmanı ve maksimum kat öteleme oranı gibi ölçütleri içerirken, özel parametreler,

yapı elemanlarının bireysel deformasyonlarını, kritik kesitlerde plastik dönmeleri içermektedir. Ayrıntılı değerlendirme prosedürleri, kapsamlı bir analiz sağlamak için hem genel hem de özel talep parametrelerini kullanmaktadır. Günümüzde yürürlükte olan birçok yönetmelik ve standart, performans kriterlerini plastik dönmelere bağlı olarak tanımlamaktadır.

Talep parametreleri, doğrusal statik ve doğrusal dinamik analizler kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca, doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan dinamik analizlerde uygulanabilir (Whittaker ve ark., 2003). Doğrusal olmayan dinamik analiz, özellikle elastik olmayan deformasyonları doğru bir şekilde temsil etmesi açısından en hassas yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, dikkatlice seçilmiş bir dizi yer hareketine göre yapının davranışını değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Korkmaz ve Irtem, 2008).

Ancak, doğrusal olmayan dinamik analiz, doğrusal elastik analiz yöntemleri kadar standartlaştırılmış değildir. Karmaşıklığı nedeniyle önemli ölçüde işlem süresi ve veri işleme gerektirmektedir. Bu durum, rutin mühendislik uygulamaları açısından doğrusal olmayan dinamik analizi, doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemine kıyasla daha az pratik hale getirmektedir (Leslie ve Naveen, 2017). Doğrusal analiz yöntemleri, elastik olmayan sismik davranışı yeterince simüle etmekte yetersiz kaldığından, doğrusal olmayan statik itme analizi, yapıdaki elastik olmayan davranışın hangi bölgelerde meydana geldiğini tahmin etmek açısından makul sonuçlar sağlayabilmektedir. Bu nedenle mühendisler, yapıların elastik olmayan dinamik davranış özelliklerini belirlemek amacıyla genellikle doğrusal olmayan statik analiz yöntemini tercih etmektedirler (Goel ve Chadwell, 2008). Ancak, tüm itme analizi teknikleri belirli kabuller ve basitleştirmeler içerdiğinden, sismik talebin kesin tahmininde sınırlamalar taşımaktadır.

Uygun modelin seçimi için dikkate alınması gereken bazı faktörler vardır. Bunlar arasında, istenen performans seviyesi, gerekli modelleme karmaşıklığı ve yapısal özellikler yer almaktadır (Zou ve Chan, 2005). Modelleme süreci, güvenilirlik, uygulanabilirlik ve hesaplama yetenekleri arasında bir denge gerektirir. Model seçiminde yapı türü, kullanılan malzemeler, baskın davranış modları ve mevcut detay seviyeleri gibi birçok unsur etkilidir.

Modelin doğruluğu, kritik deformasyon türlerini temsil etme yeteneği ve yapının tepkisini hassas bir şekilde kontrol edebilme kabiliyeti ile belirlenebilir. Modelleme yaklaşımına ilişkin kararlar, basitleştirilmiş veya karmaşık bir yapısal model benimsenip benimsenmeyeceği üzerinde yoğunlaşmaktadır. Gerekli modelleme karmaşıklık seviyesi, muhtemel göçme türleri ve sonuçları, hasarın olası konumları ve beklenen doğrusal olmayan davranış derecesi gibi faktörlere bağlıdır.

2.2. Doğrusal Olmayan Statik Yöntemler (NSP)

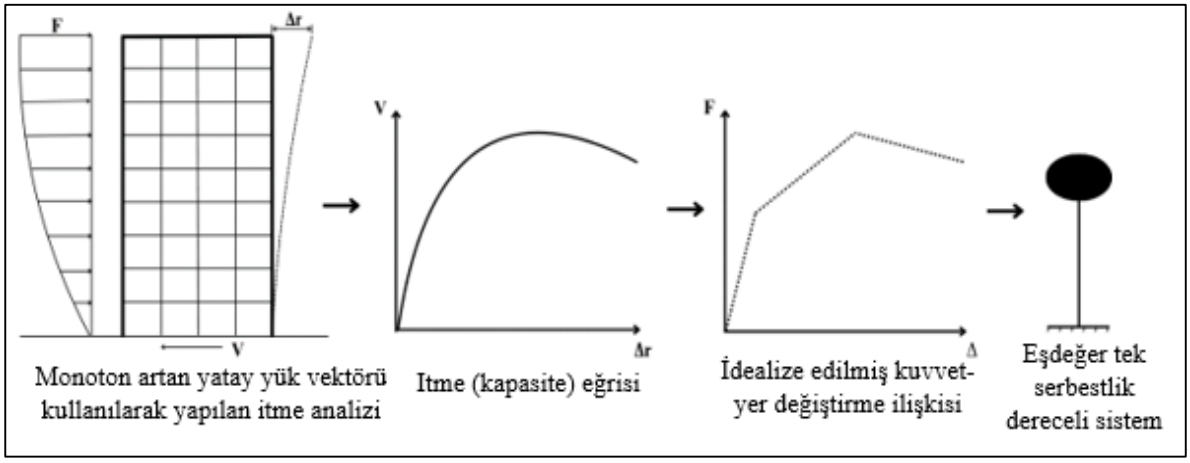
Uygulamalı yapı mühendisleri, yaklaşık olsa da yeterli teorik temele sahip ve ayrıntılı doğrusal olmayan dinamik yönteme alternatif olarak hizmet edebilecek basitleştirilmiş analiz yöntemleriyle her zaman ilgilenmektedir. Doğrusal olmayan analiz ile yapısal modellemenin birleştirilmesinin sağladığı basitlik, yapının kademeli bozulma ve çökme süreçlerini simüle etmede daha verimli kullanımını mümkün kılar (Krawinkler, 1996). Doğrusal olmayan statik yöntemler (NSP), doğrusal olmayan bir yapısal modelin statik yanal yüklemeye maruz bırakıldığı basitleştirilmiş bir yöntem olarak da tanımlanabilir ve çok serbestlik dereceli (ÇSD) bir yapının itme kapasitesini ve bunun eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) sistemini kullanarak yapıların dinamik tepkisini simüle etmeyi amaçlar.

İtme analizi, mevcut tüm doğrusal olmayan statik yöntemlerin en temel bileşenidir ve bir yapısal sistemin, aşamalı olarak artan monotonik bir yüke maruz bırakıldığı statik-doğrusal olmayan bir yöntemdir. Bu yükleme, nihai bir duruma kadar artırılarak yapının elastik ve elastik ötesi performans aralığını belirlemeye yardımcı olur. Ardından, her yük artışından sonra akmaya ulaşan yapı elemanlarının azalan direncini hesaba katmak amacıyla her bir yapısal bileşenin dayanım ve rijitlik özellikleri güncellenir.

Dayanım ve şekil değiştirme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak elde edilen doğrusal olmayan kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi, süneklik, sınır durum davranışı ve yapının göçme mekanizmasının değerlendirilmesine olanak sağlar. Bu süreç, yapı kararsız hale gelene veya önceden belirlenmiş bir hedef deplasman değerine ulaşana kadar devam eder. Deformasyon parametreleri, ötelenme veya dönme olabilir. Doğrusal statik analiz yöntemleriyle

kıyaslandığında, itme analizinin en önemli avantajı, artan yanal kuvvetler altında yapısal elemanların doğrusal olmayan davranış sergilemesi nedeniyle iç kuvvetlerin yeniden dağılımını dikkate alabilmesidir. Ancak, itme analizi temel modun davranışta baskın olduğu sistemler için en uygun yöntemdir.

Farklı doğrusal olmayan statik yöntemlerin (NSP) arkasındaki temel düşünce, binaların ayrıntılı doğrusal olmayan yapısal modellerinin eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) sistemlere basitleştirilebilmesidir. Bu yöntemde, bir yapının gerçek itme eğrisi idealize edilerek doğrusal olmayan bir kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi oluşturulur. Bu idealize edilmiş ilişki daha sonra eşdeğer bir TSD sistemine uygulanır ve böylece detaylı doğrusal olmayan modelin basitleştirilmiş bir temsili elde edilir (Şekil 2.1). Esasen, eşdeğer TSD sistemi, orijinal karmaşık yapısal modelin genel davranışını taklit etmek üzere tasarlanır. Son birkaç on yılda, çeşitli çalışmalar yapısal modellerdeki yaklaşımlar, sismik yükleme, analiz yöntemleri veya bu alanların herhangi bir kombinasyonu açısından çeşitli basitleştirmeler önermiştir.



Şekil 2.1. Yapısal bir modelin eşdeğer tek serbestlik dereceli bir sisteme dönüştürülmesi

Detaylı değerlendirme prosedürlerinin yönetmeliklerde belirtilen şekilde uygulanabilmesi için öncelikle elastik ötesi tepkinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bir binanın elastik ötesi tepkisi, genellikle performans noktası veya hedef deplasman olarak adlandırılır ve doğrusal olmayan statik yöntemler kullanılarak belirlenir. Literatürde, doğrusal olmayan statik analiz

gerçekleştirmek için Yer Deplasman Katsayıları Yöntemi, Kapasite Spektrumu Yöntemi ve eşdeğer TSD sistemlerinin doğrusal olmayan analizi gibi çeşitli modelleme yaklaşımları bulunmaktadır. Bu yaklaşımlarda, çatı deplasmanı değeri temel performans parametresi olarak hizmet eder. Daha sonra, elastik ötesi tepki tahmini (genel performans) ile seçilen binanın gözlemlenen hasar seviyesi karşılaştırılmalı ve ardından belirlenen hedef deplasmanda yapısal elemanların yerel deformasyonları ve gerilmeleri (özel performans) kullanılan standardın kabul kriterleri ile kontrol edilmelidir.

2.2.1. Kapasite Spektrumu Yöntemi

1996 yılında yayımlanan ATC40 raporu, "Betonarme Binaların Sismik Değerlendirmesi ve Güçlendirilmesi" başlıklı çalışmada, eşdeğer doğrusallaştırma yaklaşımına dayalı doğrusal olmayan statik bir yöntem olan Kapasite Spektrumu Yöntemi (CSM) tanıtılmıştır. 1970'lerde Puget Sound Deniz Üssü'ndeki ABD Donanması'nın sismik risk projesi için geliştirilen bu yaklaşım (Freeman ve ark., 1975), süneklik ile etkin periyot ve sönüm arasındaki ampirik olarak belirlenmiş ilişkileri kullanarak eşdeğer doğrusal Tek Serbestlik Dereceli (TSD) bir sistemin tepkisini tahmin etmektedir (Goel ve Chadwell, 2007). Bu yöntem, kapasite eğrisini modal spektral koordinatlara dönüştürerek bir kapasite spektrumu oluşturur.

Kapasite eğrisi, detaylı doğrusal olmayan bir yapısal modele birinci mod yük vektörü uygulanarak elde edilir ve taban kesme kuvveti (V_b) ile çatı deplasmanını (Δ_{roof}) ifade eder. Bu değerler daha sonra, Denklem (2.1) ve (2.2) kullanılarak spektral ivme (S_{ai}) ve spektral deplasmana (S_{di}) dönüştürülür. Burada (W) kalıcı (sabit, ölü) yük ve hareketli yüklerin toplamını, (α_1) modal kütle katsayısını, (PF_1) birinci titreşim modu için modal katılım faktörünü ve ($\Phi_{1,\ roof}$) ise birinci titreşim mod şeklinin çatı seviyesindeki genliğini temsil etmektedir.

$$S_a = \frac{V_b}{w/\alpha_1} \qquad \textbf{2.1.}$$

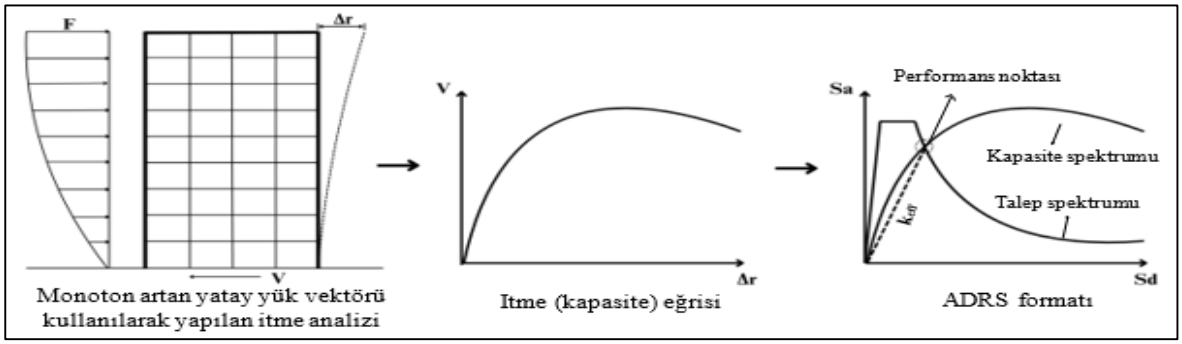
$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1\,\Phi_{1,roof}} \qquad \textbf{2.2.}$$

Kapasite spektrumu eğrisi üzerindeki her bir nokta, spektral ivme (S_a), spektral hız (S_v), spektral deplasman (S_d) ve doğal periyot (T) için belirli değerlere karşılık gelmektedir. Sismik tehlike, %5 sönümlü ivme tepki spektrumu ile temsil edilir ve eşdeğer doğrusal sistemin etkin sönüm oranına göre ayarlanır. ATC 40 raporunda belirtildiği gibi, talep spektrumunu göstermek için bu ayarlanmış spektrum kullanılır. Daha sonra, bu spektrum, talep spektrumunun İvme-Deplasman Tepki Spektrumu (ADRS) formatına dönüştürülmesi için Denklem (2.3) kullanılarak yeniden düzenlenir

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a(g) \qquad \textbf{2.3.}$$

Talep spektrumunun kapasite eğrisi ile kesiştiği nokta, sismik kapasitenin yapıya uygulanan talebe eşit olduğu durumu temsil eden performans noktası olarak adlandırılır. Bu nokta, öngörülen bir deprem sırasında beklenen maksimum deplasmanın bir tahminini sağlar ve Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

Çalışmalar, yüksek sönümlü talep spektrumlarının ve performans noktasındaki etkin doğal periyodun doğrusal olmayan dinamik tepkiyi, özellikle yüksek hedef deplasmanlarda, doğru şekilde yansıtamayabileceğine dair belirsizlikleri vurgulamaktadır. Araştırmacılar, elastik spektrumları sönüm faktörleriyle değiştirmek yerine, doğrusal olmayan tepki spektrumlarını önererek bu sorunları ele almışlardır (Bertero ve ark., 1991). Bu yaklaşım, ATC 40'ın yinelemeli prosedürlerine kıyasla maksimum doğrusal olmayan deplasmanları tahmin etmede daha yüksek doğruluk sağlamıştır (Fajfar, 2000; Miranda ve Ruiz-Garcia, 2002).

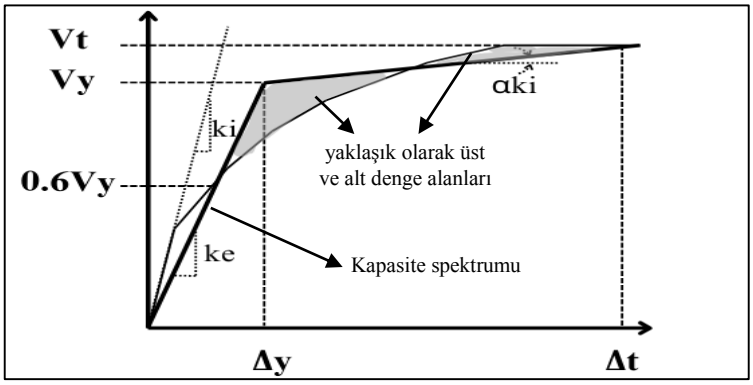


Şekil 2.2. Kapasite spektrumu yönteminin genel süreci

2.2.2. Yer Deplasman Katsayısı Yöntemi

Doğrusal Olmayan Statik Yöntemler geliştirmek için kullanılan gelişmiş bir yaklaşım olup, esası maksimum esnek olmayan deplasmanları doğrudan belirli değişim katsayılarıyla ölçeklendirerek tahmin etmektir. Esnek olmayan deplasmanların esnek deplasmanlara oranını temsil eden bu katsayılar, doğal periyot (T), deplasman süneklik oranı (μ) ve yatay akma dayanımı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu yöntem, 2000 yılında yayımlanan FEMA 356 raporunda "Binaların Sismik Güçlendirilmesine Yönelik Önstandart ve Açıklamalar" başlığı altında açıklanmıştır. Maksimum deplasmanı doğrusal tek serbestlik dereceli (TSD) bir sistemden doğrusal olmayan maksimum deplasmana dönüştürmek için katsayılar (C_0, C_1, C_2, ve C_3) kullanılır. Bu değer, genel sismik talepleri belirlemek için itme analizinde hedef deplasman olarak kullanılır.

Bu yöntemde kapasite eğrisi, eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) sistemi temsil edecek şekilde çift doğrusal hale getirilir. Etkin yatay rijitlik (K_e) ve etkin akma dayanımı (V_y) belirlenir; burada çift doğrusal eğrinin başlangıç eğimi (K_e) ve akma sonrası eğimi (αK_e) olarak ifade edilir. Çift doğrusal eğri, kapasite eğrisi ile yaklaşık olarak eşit alanlara sahip olacak şekilde tasarlanır. Ayrıca, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, çift doğrusal eğri kapasite eğrisiyle yaklaşık olarak etkin akma dayanımının (V_y) %60'ında kesişir.



Şekil 2.3. Kapasite Eğrisinin İki Doğrusallaştırılması (FEMA 356)

İdealize edilmiş eğriye dayanarak, etkin temel periyot (T_e), Denklem (2.4) kullanılarak hesaplanır. Burada (T_i) elastik temel periyot ve (K_i) binanın elastik yatay rijitliğidir.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{k_i}{k_e}} \qquad \textbf{2.4.}$$

Hedef deplasman (δ_t), spektral deplasman (S_d) ile deneysel olarak türetilmiş bir dizi değişim katsayısının çarpımı ile hesaplanır. Bu işlem, Denklem (2.5) ve (2.6) kullanılarak yapılır. Burada (S_a), etkin temel periyot ve sönüm oranı için tepki spektrumu ivmesi, (g) ise yerçekimi ivmesidir.

$$S_d = \frac{Te^2}{4\pi^2} S_a(g) \qquad \textbf{2.5.}$$

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_d \qquad \textbf{2.6.}$$

(C_0) değeri, eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) sistemin spektral deplasmanını çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemin çatı deplasmanıyla ilişkilendirmek için kullanılan değişim katsayısıdır ve Çizelge 2.1'den seçilebilir.

Çizelge 2.1. (C_0) Düzeltme Katsayısı Değerleri

	Kesme Binalar		**Diğer Binalar**
Kat Sayısı	Üçgen Yük Deseni	Uniform Yük Deseni	Herhangi Bir Yük Deseni
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

Modifikasyon faktörü (C_1), beklenen maksimum elastik olmayan yer değiştirmeleri, lineer elastik yanıt için hesaplanan yer değiştirmelere ilişkin olarak ifade eder, Denklem (2.7) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.0 \qquad \text{For} \quad T_e \geq T_s \\ C_1 &= [1.0 + (R-1)\, T_s / T_e] / R \qquad \text{For} \quad T_e < T_s \end{aligned} \qquad \textbf{2.7.}$$

Burada (T_s), tepki spektrumunun karakteristik köşe periyodudur ve bu periyot, spektrumun sabit ivme ve sabit hız segmentleri arasındaki geçiş periyodu olarak tanımlanır. (R), elastik güç talebi ile hesaplanan akma dayanımı katsayısının oranıdır ve Denklem (2.8) ile hesaplanır. Aşağıda (W), etkin sismik ağırlık ve (C_m), çerçeve sistemleri için 3'ten fazla katı olan sistemlerde 0.9 olarak verilen etkili kütle faktörüdür.

$$R = \frac{S_a}{V_y / W} \cdot C_m \qquad \textbf{2.8.}$$

Histeretik eğrinin, sertlik bozulması ve dayanım zayıflamasının maksimum yer değiştirme yanıtına etkisini temsil etmek için kullanılan modifikasyon faktörü (C_2), doğrusal olmayan prosedürler için 1.0 olarak kabul edilir. (C_3) ise (P-Δ) etkilerinden kaynaklanan artmış yer değiştirmeleri temsil eden modifikasyon faktörüdür. Bu değer, post-akma sertliği pozitif olan binalar için 1.0 olarak kabul edilir, aksi takdirde Denklem (2.9) ile hesaplanır.

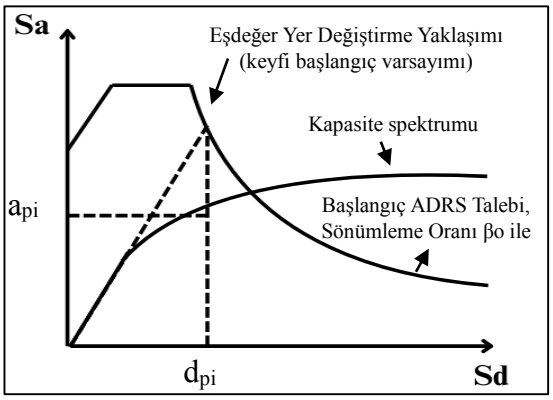
$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha| \,.\, (R-1)^{3/2}}{T_e} \qquad \textbf{2.9.}$$

Burada α, post-akma sertliğinin etkili elastik sertliğe oranıdır.

2.2.3. Geliştirilmiş Kapasite Spektrumu Yöntemi

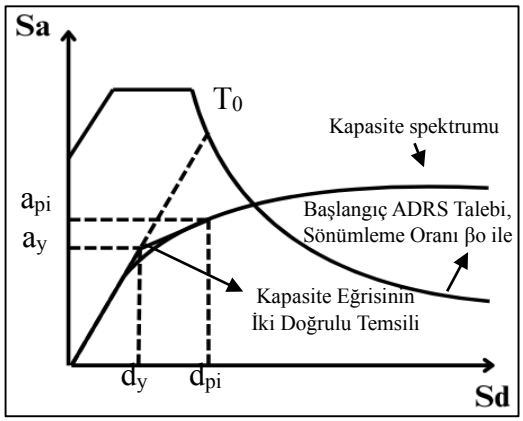
Kapasite spektrumu yönteminin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi ışığında, FEMA440, "Doğrusal Olmayan Statik Sismik Analiz Prosedürlerinin İyileştirilmesi" başlıklı raporunda, doğrusal olmayan bir sistemin yanıtı ile doğrusal bir sistemin yanıtı arasındaki farkı minimize eden etkili periyot (T_{eff}) ve etkili sönüm oranı (β_{eff}) için geliştirilmiş ampirik ifadeler önerir (Guyader ve Iwan, 2006). Süreç, ATC40'ta açıklanan kapasite spektrumu yöntemine aynı şekilde devam ederken, FEMA440 tarafından etkili sönüm için üst sınır kaldırılmıştır.

FEMA 440'a göre, başlangıç performans noktası seçilmelidir; burada (a_{pi}) maksimum ivme, (d_{pi}) maksimum yer değiştirme ve (β_0) başlangıç sönüm oranıdır; bu nokta eşit yer değiştirme yaklaşımına veya mühendislik yargısına dayalı olarak, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi seçilebilir.



Şekil 2.4. Başlangıç ADRS Talebi ve Kapasite Spektrumu (FEMA 440)

Sonra, kapasite spektrumunu temsil eden çift doğrusal bir idealizasyon geliştirilmelidir; buradan akma yer değiştirmesi (d_y), akma ivmesi (a_y) ve başlangıç periyodu (T_0) Şekil 2.5'te olduğu gibi tanımlanabilir.



Şekil 2.5. Kapasite Spektrumunun İki Doğrulu Temsili (FEMA 440)

Bu nedenle, süneklik oranı (μ) ve post-elastik sertlik (α), Denklem (2.10) ve (2.11) ile hesaplanabilir.

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} \qquad \textbf{2.10.}$$

$$\alpha = \frac{\left[\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right]}{\left[\frac{a_y}{d_y}\right]} \qquad \textbf{2.11.}$$

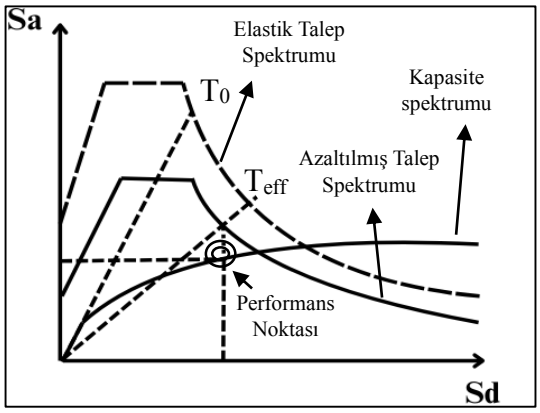
Geliştirilmiş ifadeler T_{eff} ve β_{eff}, çift doğrusal (esnek mükemmel plastik), sertlik bozulması ve dayanım bozulması gibi histeretik davranış türleri dikkate alınarak geliştirilmiştir. T_{eff} ve β_{eff} için denklemler, histeretik davranışa bakılmaksızın, 0.2s ile 2s arasındaki periyot aralığında herhangi bir kapasite eğrisi ile kullanılmak üzere optimize edilmiştir. Bu denklemler, tablo formatında sunulan ve modelin süneklik düzeyi ve histeretik davranışına göre değişen A'dan K'ya kadar olan katsayılara dayanır. Çalışılan binanın elastik periyotları bu aralıkta yer aldığı için, optimize edilmiş denklemler kullanılmıştır. T_{eff} ve β_{eff} için önerilen ifadeler, üç farklı süneklik düzeyi için Denklem (2.12) – (2.14) arasında verilmiştir. Yapıda var olan viskoz sönüm oranı olarak %5'lik sabit değer, verilen optimize edilmiş β_{eff} denklemlerine dahil edilmiştir

$$\beta_{eff} = 4.9\,(\mu - 1)^2 - 1.1\,(\mu - 1)^3 + \beta_0$$
$$T_{eff} = [\,0.20\,(\mu - 1)^2 - 0.038\,(\mu - 1)^3 + 1\,]\,T_0 \qquad \text{For } \mu < 4.0 \qquad \textbf{2.12.}$$

$$\beta_{eff} = 14.0 - 0.32\,(\mu - 1) + \beta_0$$
$$T_{eff} = [\,0.28 + 0.13\,(\mu - 1) + 1\,]\,T_0 \qquad \text{For } 4.0 \le \mu < 6.5 \qquad \textbf{2.13.}$$

$$\beta_{eff} = 19\left(\frac{0.64\,(\mu - 1) - 1}{[0.64\,(\mu - 1)]^2}\right)\left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 + \beta_0$$
$$T_{eff} = \left[0.89\left(\sqrt{\frac{(\mu-1)}{1 + 0.05\,(\mu - 2)}} - 1\right) + 1\right] T_0 \qquad \text{For } \mu > 6.5 \qquad \textbf{2.14.}$$

Etkili sönüm oranı (β_{eff}) için, spektral ivme $(S_a)_\beta$ ve spektral yer değiştirme $(S_d)_\beta$ hesaplanmalı ve ardından Şekil 2.6'da gösterildiği gibi S_a-S_d eğrisine yerleştirilmelidir.



Şekil 2.6. Performans noktasının belirlenmesi (FEMA 440)

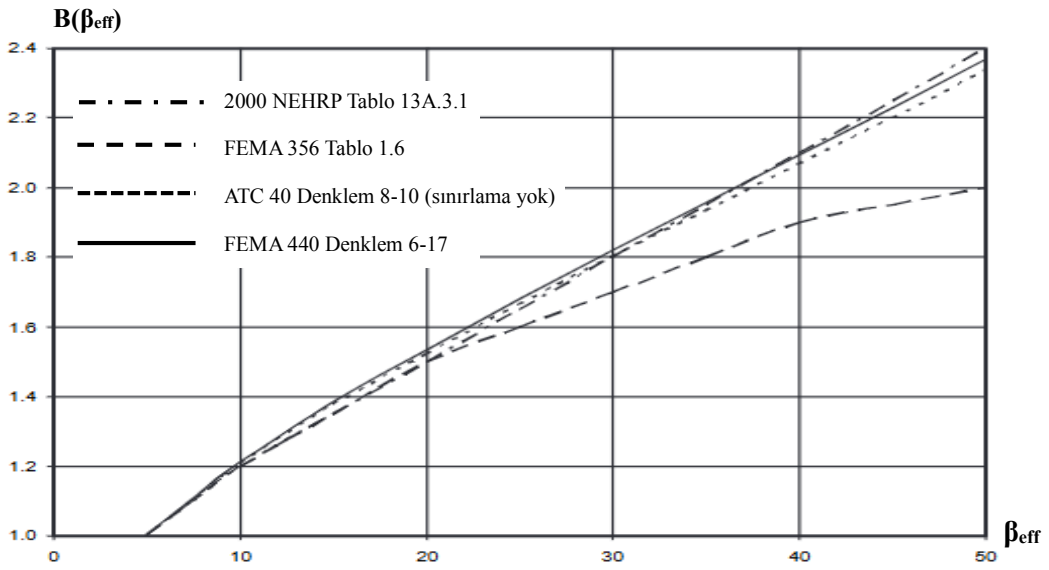
Denklem (2.15) ve (2.16) ile, $(S_a)_\beta$ ve $(S_d)_\beta$ hesaplanabilir. Bu, talep spektrum eğrisini çizecek ve kapasite eğrisi ile kesişimi, bu noktadaki bileşenlerin kabul kriterlerinin karşılanması gereken performans noktasıdır.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_{\beta_0}}{B(\beta_{eff})} \qquad \textbf{2.15.}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T_{eff}}{4\pi^2}\,(S_a)_\beta \qquad \textbf{2.16.}$$

Spektral azalma faktörü, β_{eff}'e bağlı bir fonksiyon olup, sönüm katsayısı $B(\beta_{eff})$ olarak adlandırılır ve matematiksel veya grafiksel olarak hesaplanabilir, Denklem (2.17) ve Şekil 2.7'de gösterildiği gibi.

$$B(\beta_{eff}) = \frac{4}{5.6\text{-}\ln\beta_{eff}(\text{in}\%)} \qquad \textbf{2.17.}$$



Şekil 2.7. Çeşitli kaynak belgelerden alınan sönümleme katsayıları B, etkin sönümleme β_{eff} 'in bir fonksiyonu olarak

FEMA440'ın geliştirilmiş kapasite spektrumu yöntemi, hem etkili periyot hem de etkili sönüm değerlerinin süneklik talebine bağlı olması nedeniyle yinelemeli bir süreç gerektirir. Yinelemeli prosedür (prosedür A) şu şekilde özetlenebilir:

1- β_i, tipik olarak %5 sönüm ile bir yer hareketi spektrumu seçilir.
2- Spektrumu, başlangıç talep eğrisi olarak hizmet etmek üzere bir ivme-yer değiştirme yanıt spektrumu (ADRS) formatına dönüştürülür.
3- Spektral ivme ile spektral yer değiştirme arasındaki ilişki, yapının kapasite eğrisini eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) sistem olarak temsil edecek şekilde oluşturulur.
4- Başlangıç performans noktası seçilir, eşit yer değiştirme yaklaşımı veya mühendislik yargısı kullanarak.
5- İlk periyodu (T_0), akma yer değiştirmesini (d_y) ve akma ivmesini (a_y) belirlemek için kapasite eğrisinin basitleştirilmiş çift doğrusal bir yaklaşımı oluşturulur.
6- Denklem (2.10) ve (2.11) ile post-elastik sertliği (α) ve sünekliği (μ) hesaplanır.
7- Denklem (2.12) – (2.14) arasından etkili sönüm oranı (β_{eff}) ve etkili periyod (T_{eff}) hesaplanır.
8- Denklem (2.15) ve (2.16) kullanarak ADRS'yi β_{eff} ile güncellenir.

9- Düzeltilmiş ADRS'nin T_{eff}'i temsil eden radyal çizgi ile kesişimi bulunur ve kapasite eğrisinden tahmin edilen maksimum yer değiştirme (d_i) ve karşılık gelen ivme (a_i) belirlenir.

10- Tahmin edilen yer değiştirme (d_i) önceki varsayım ile karşılaştırılır. Eğer kabul edilebilir tolerans içinde ise (bu, 0.05'ten küçük olmalıdır), performans noktası d_i ve a_i ile tanımlanır. Aksi takdirde, süreci, a_i ve d_i'yi yeni nokta olarak kullanarak adım 4'ten başlayarak tekrar edilir.

2.2.4. Geliştirilmiş Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi

FEMA 356 tarafından önerilen yer değiştirme katsayısı yöntemi, çeşitli çalışmalarda değerlendirilmiş ve yöntemin iyileştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle ATC-55 Projesi (ATC 2005) yürütülmüş ve son rapor olan FEMA 440 ile iyileştirilmiş uygulamalar için rehberlik sağlanmıştır. Raporda, katsayılar C_1 ve C_2 için geliştirilmiş ilişkiler önerilmiştir. Buna ek olarak, C_3 katsayısı kaldırılmış ve R_{max} değeri ile ifade edilen minimum dayanım sınırıyla değiştirilmiştir. FEMA 356 tarafından kısa periyotlu yapılar için C_1'e getirilen sınırlamanın kullanılmaması önerilmiştir. Bu yöntem, ASCE 41 standardı tarafından benimsenen NSP'ye entegre edilmiştir.

ASCE 41-17 (2017) tarafından tanımlanan Doğrusal Olmayan Statik Prosedür (NSP), yapıya tek bir sabit yükleme şekli (birinci mod şekline dayalı) uygulanmasını içerirken, hedef yer değiştirme, geliştirilmiş yer değiştirme katsayısı yöntemi kullanılarak belirlenir. ASCE 41-17, analizlerin hedef yer değiştirmenin (%150) üzerinde bir seviyeye kadar uzatılmasını zorunlu kılmaktadır (δ_t). Bu gereklilik, mühendisleri, yapıların tasarım sınırlarının ötesinde aşırı yükleme koşulları altında performansını değerlendirmeye teşvik eder. Kontrol düğümündeki doğrusal olmayan taban kesme kuvveti ile yatay yer değiştirme ilişkisi, basitleştirilmiş bir kuvvet-şekil değiştirme eğrisine idealize edilir. Bu işlem, yapının etkili yatay rijitliği (K_e) ve etkili akma dayanımı (V_y) gibi temel parametrelerin belirlenmesini sağlar. Bu değerler daha sonra Denklem (2.4) kullanılarak etkili periyot (T_e) ve Denklem (2.8) ile normalize edilmiş akma dayanımı faktörü (R) hesaplamalarında kullanılır.

Belirlenen sismik tehlike seviyesinde yapının beklenen yer değiştirmesini temsil eden hedef yer değiştirme, Denklem (2.18) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 \frac{Te^2}{4\pi^2} S_a(g) \qquad \textbf{2.18.}$$

Burada (S_a) tepki spektrumu ivmesi ve (g) yerçekimi ivmesidir. (C_0) katsayısı, daha önce olduğu gibi Çizelge 2.1'den elde edilebilir. Modifiye edilmiş katsayılar (C_1) ve (C_2), sırasıyla Denklem (2.19) ve (2.20) ile belirlenebilir.

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.0 && \text{For } T_e < 1.0s \\ C_1 &= 1.0 + (R\text{-}1) \ / \ aT_e^2 && \text{For } 0.2s < T_e \leq 1.0s \\ C_1 &= 1.0 + (R\text{-}1) \ /0.04a && \text{For } T_e < T_s \end{aligned} \qquad \textbf{2.19.}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.0 && \text{For } T_e > 0.7s \\ C_1 &= 1.0 + [\frac{1}{800} . ((R\text{-}1) \ /T_e)^2] && \text{For } T_e \leq 0.7s \end{aligned} \qquad \textbf{2.20.}$$

FEMA 440'taki geliştirme çalışmalarına göre, küresel yer değiştirme taleplerinin dayanımın zayıflamasıyla önemli ölçüde artmadığı, dinamik kararsızlık meydana gelmedikçe belirtilmiştir. Dinamik kararsızlıktan kaçınmak için, C_3 faktörü, minimum dayanım sınırı (R_{max}) ile değiştirilmiştir ve bu, Denklem (2.21) ile ifade edilir. Burada (Δ_y) akma şekil değiştirmesi, (Δ_d) maksimum dayanım ile ilişkili şekil değiştirme ve (α_e), Denklem (2.22) ile hesaplanabilen etkin negatif akma sonrası eğimdir.

$$R_{max} = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} + \frac{|\alpha_e|^{-h}}{4}; \qquad h = 1.0 + 0.15 \ln (T_e) \qquad \textbf{2.21.}$$

$$\alpha_e = \alpha_{p\text{-}\Delta} + \lambda (\alpha_2 - \alpha_{p\text{-}\Delta}) \qquad \textbf{2.22.}$$

Burada ($\alpha_{p\text{-}\Delta}$), P − Δ etkileriyle oluşan negatif eğim oranı, ve (λ) ise yakın alan etkisi faktörüdür; $S_1 \geq 0.6$ için 0.8 ve $S_1 < 0.6$ için 0.2 olarak verilir. (S_1), maksimum dikkate alınan deprem için 1 saniyelik spektral ivme olarak tanımlanır.

Hedef yer değiştirme belirlendikten sonra, elemanların şekil değiştirme talepleri bu spesifik noktada değerlendirilir ve ASCE 41'in Tablo 10-7, 10-8 ve 10-10'ları kullanılarak her elemanın kabul kriterleri, donatı detaylandırma, enine donatı oranı, beton basınç dayanımı, eksenel ve kesme kuvvetleri gibi parametreler göz önünde bulundurularak hesaplanır. ASCE 41'deki değerlendirme prosedürlerinin temel prensibi, elemanların talep - kapasite oranını incelemektir. Eğer bir elemanın kapasitesi, hesaplanan talebin altındaysa, bu eleman ASCE 41'de belirtilen kabul kriterlerini karşılamaz ve güçlendirme gerektirir (Sattar, 2018).

2.2.5. N2 Yöntemi

N2 yöntemi, N doğrusal olmayan ve 2 yöntem içinde kullanılan iki matematiksel model anlamına gelir, ilk olarak (Fajfar ve Fischinger, 1988) tarafından önerilmiştir ve binaların güçlü yer hareketlerine maruz kalması sonucu meydana gelen büyük elastik olmayan şekil değiştirmeler nedeniyle doğrusal olmayan dinamik analizlere dayanmaktadır. Bu durum, doğru sonuçlar elde etmek için binaların doğrusal olmayan dinamik analizini tercih etmektedir. Daha sonra, bu yöntem doğrusal olmayan dinamik analizin yerini itme analiziyle değiştirilerek (Fajfar, 2000) geliştirilmiş ve kapasite spektrumu yöntemiyle birleştirilerek, özellikle tek bir modda salınan yapılar için basit ve hızlı bir yöntem haline getirilmiştir.

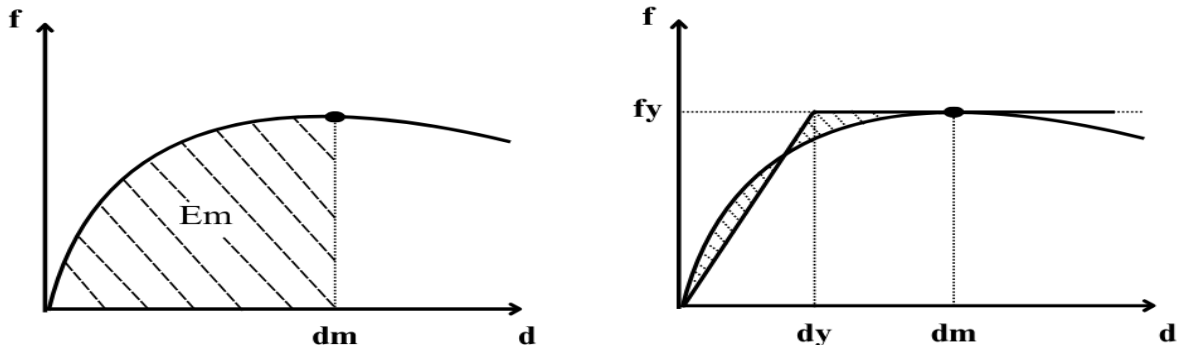
1987'den bu yana yöntem geliştirme sürecindedir ve 2004'te bir düzenleyici belge olan Eurocode 8 (EC8) tarafından benimsenmesiyle popülerlik kazanmıştır (Fajfar, 2021). Yöntem, elastik spektrumu elastik olmayan spektruma dönüştüren azaltma faktörü (R), süneklik faktörü (μ) ve periyot (T) kullanılarak kapasite spektrumu yönteminin farklı bir formudur (Lagaros ve Fragiadakis, 2011). EC8'e göre, ilk adım bir itme analizi gerçekleştirmek olup, buradan (d_t) tepe yer değiştirme ile taban kesme kuvveti (V_b) cinsinden elastik olmayan kapasite spektrumu eğrisi elde edilebilir. Bu yöntem yalnızca TSD (Tek Serbestlik Dereceli Sistemi) ile ilgilenir. Denklem (2.23) ve (2.24) kullanılarak bir dönüşüm faktörü (Γ) ile ÇSD'ye (Çok Serbestlik Dereceli Sistemi) dönüştürme yapılmalıdır. Burada (Φ_i), ÇSD sisteminin i-^{nci} seviyesindeki yer değiştirme vektörünü, (m_i) kütleyi ve (m^*) eşdeğer TSD sisteminin kütlesini temsil eder ve Denklem (2.25) ile hesaplanabilir.

$$f = \frac{V_b}{\Gamma}\ ,\ \ d = \frac{d_t}{\Gamma} \qquad \textbf{2.23.}$$

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i\ \Phi_i^{\,2}} \qquad \textbf{2.24.}$$

$$m^* = \sum m_i\ \Phi_i \qquad \textbf{2.25.}$$

Kapasite eğrisini, elastik olmayan talep spektrum eğrisi ile karşılaştırabilmek için TSD'nin doğrusal olmayan itme eğrisi, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi ideal elastik-plastik ilişki kullanılarak basitleştirilmelidir.



Şekil 2.8. Kapasite eğrisinin doğrusallaştırılması

Başlangıçtaki elastik periyot (T*), doğrusallaştırma prosedüründen elde edilen akma kuvveti (f_y) ve akma yer değiştirmesi (d_y) ile Denklem (2.26) ve (2.27) yardımıyla hesaplanabilir. Burada (E_m), kapasite eğrisi altında varsayılan hedef yer değiştirme noktasından itibaren alanı ifade eder.

$$d_y = 2\left(d_m - \frac{E_m}{f_y}\right) \qquad \textbf{2.26.}$$

$$T^* = 2\pi\sqrt{\frac{m^*\,.\,d_y}{f_y}} \qquad \textbf{2.27.}$$

Talep spektrumu eğrisini elde etmek için elastik spektrumdan elastik olmayan spektrum tanımlanmalıdır. Elastik ivme spektrumu (S_e) ve elastik yer değiştirme spektrumu (S_{de})'yi elastik olmayan ivme spektrumu (S_a) ve elastik olmayan yer değiştirme spektrumu (S_d)'ye dönüştürmek için süneklik faktörü (μ) ve süneklik nedeniyle azaltma faktörü (R_μ) gereklidir. (R_μ) belirlemek için, akma ivmesi (S_{ay}), Denklem (2.28) - (2.30) yardımıyla hesaplanmalıdır. Burada (T_C), yer hareketinin karakteristik periyodudur.

$$S_a = \frac{S_e}{R_\mu}, \qquad S_d = \frac{\mu}{R_\mu} . S_{de} \qquad \textbf{2.28.}$$

$$R_\mu = \frac{S_e\,(T^*)}{S_{ay}}, \qquad S_{ay} = \frac{f_y}{m^*} \qquad \textbf{2.29.}$$

$$\begin{aligned} \mu &= R_\mu && \text{For } T^* \geq T_c \\ \mu &= \left[\left(R_\mu - 1\right) . \frac{T_c}{T^*}\right] + 1 && \text{For } T^* < T_c \end{aligned} \qquad \textbf{2.30.}$$

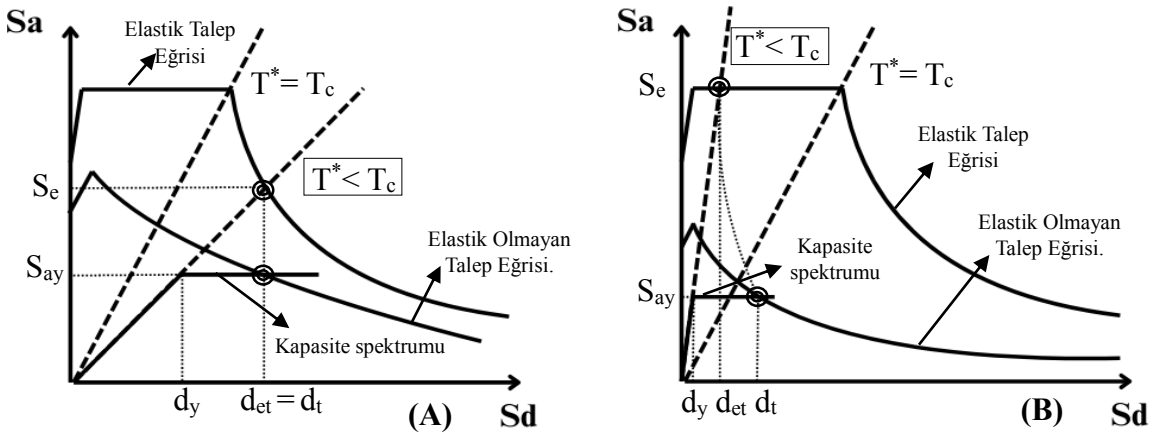
Hedef yer değiştirme (d_t)'yi belirlemek için, sınırsız elastik davranışa sahip T^* periyotlu yapının hedef yer değiştirmesi (d_{et}), Denklem (2.31) ile hesaplanmalıdır.

$$d_{et} = S_e\left(T^*\right) . \left[\frac{T^*}{2\pi}\right]^2 \qquad \textbf{2.31.}$$

Hedef yer değiştirme belirlenmesi, yapının kısa periyot veya orta ve uzun periyot aralığında olup olmamasına göre değişir. Kısa periyot aralığında (T^*, T_c'den küçükse), eğer (S_{ay}), T^* ile (S_e) toplamına eşit veya büyükse, yanıt elastiktir ve bu nedenle (d_t), (d_{et})'ye eşittir. Aksi takdirde Denklem (2.32) ile hesaplanabilir. Orta veya uzun periyot aralığında (T^*, T_c'ye eşit veya büyükse), (d_t), (d_{et})'ye eşittir. Farklı periyot aralıkları için kapasite ve talep spektrumları Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

$$d_t = \frac{d_{et}}{R_\mu}\left(1 + \left(R_\mu - 1\right)\frac{T_c}{T^*}\right) \qquad \textbf{2.32.}$$

Eğer (d_t), Denklem (2.26)'daki idealize edilmiş elastik-mükemmel plastik kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin belirlenmesi için kullanılan (d_m)'den çok farklıysa, bir yineleme prosedürü uygulanabilir. Bu durumda, adımlar (d_m)'yi (d_t)'ye eşit alarak tekrarlanır.



Şekil 2.9. Sismik talebinin belirlenmesi
A) Orta/uzun periyot aralığı **B)** Kısa periyot aralığı

2.2.6. TBDY 2018'de Doğrusal Olmayan Statik Yöntem

Deprem mühendisliğindeki gelişmeler sonucunda, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), 2007 yılından beri kullanımda olan DBYBHY'nin (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) güncellenmesinin ardından ilk kez 2019 yılında kullanılmıştır. Ayrıca, yapının koordinatları ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH) ile yapılan güncellemeler sayesinde farklı deprem seviyelerine ilişkin spektrum parametreleri ifade edilmiştir. Bu parametreler, yapıların performanslarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Güler ve Celep, 2020). Mevcut betonarme yapıların sismik performansını belirlemek için yapının bina kullanım sınıfı (BKS), bina yükseklik sınıfı (BYS) ve deprem tasarım sınıfı (DTS) dikkate alınmalıdır. Değerlendirme kapasite spektrumu yöntemine dayanmaktadır (Foroughi ve Yüksel, 2022).

TBDY 2018'e göre, ilk olarak, taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme ilişkisi olarak itme eğrisi elde edilir. Kapasite ve talep eğrilerinin karşılaştırılabilmesi için aynı eksende olmaları gereklidir. Bu amaçla, itme eğrisinin koordinatları, spektral kapasite diyagramını elde etmek

üzere dönüştürülür. Bu diyagram, modal TSD sisteminin spektral ivme ($a_1^{(i)}$), ve spektral yer değiştirme ($d_1^{(i)}$) ilişkisini ifade eder ve Denklem (2.33)'te gösterilmiştir. Burada (V_{x1}), taban kesme kuvvetini, (U_{xN1}) ise yer değiştirmeyi temsil eder. İlk itme adımında belirlenen ve itme analizi boyunca değişmeyen sabit mod şeklinin yer değiştirme vektörü (Φ_{xN1}), etkili kütle (M_{x1}) ve n'inci titreşim modunun modal dönüşüm faktörü (Γ_{x1}) ise Denklem (2.34) 'te hesaplanabilir.

$$a_1^{(i)} = \frac{V_{x1}^{(i)}}{M_{x1}} \qquad d_1^{(i)} = \frac{U_{xN1}^{(i)}}{\Phi_{xN1}\,\Gamma_{x1}} \qquad \textbf{2.33.}$$

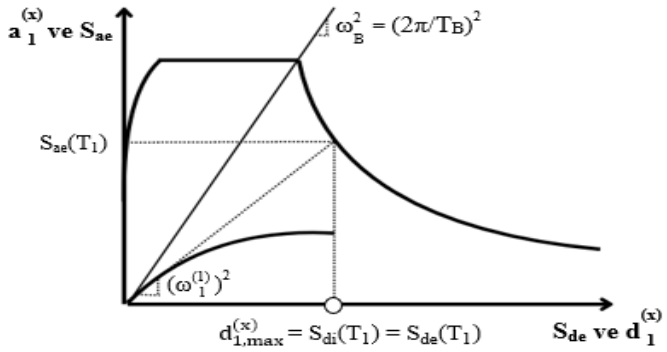
$$\Gamma_{x1} = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} \qquad \textbf{2.34.}$$

Maksimum yer değiştirme ($d_{1,max}^{(x)}$) ilk doğal titreşim periyoduna karşılık gelen doğrusal olmayan spektral yer değiştirme (S_{di} (T_1))'ye eşittir. (S_{de} (T_1)), doğrusal elastik spektral yer değiştirme, (C_R) ise spektral yer değiştirme oranıdır ve Denklem (2.35) ve (2.36)'da verilmiştir. ($\omega_{(1),1}$), itme adımındaki güncellenmiş serbest titreşim analizinden elde edilen birinci mod doğal açısal frekansını ifade ederken, (S_{ae}), itme analizinin ilk adımındaki birinci moda karşılık gelen elastik spektral ivmeyi temsil eder. (μ (R_y,T_1)), akma dayanımı ve süneklik talebi için azaltma faktörüdür ve (R_y) Denklem (2.37)'ye göre hesaplanabilir. (R_y), itme analizinden doğrudan elde edilen akma dayanımına bağlı bir büyüklüğü ifade eder. S_{ae} ile S_{de} arasındaki ilişki Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

$$d_{1,max}^{(x)} = S_{di}(T_1) = C_R\, S_{de}(T_1) \qquad \textbf{2.35.}$$

$$S_{de} = \frac{S_{ae}(T_1)}{\left(\omega_1^{(1)}\right)^2} \qquad C_R = \frac{\mu\left(R_y, T_1\right)}{R_y} \qquad \textbf{2.36.}$$

$$R_y = \frac{f_e}{f_y} = \frac{S_{ae}}{a_{y1}} \qquad \textbf{2.37.}$$

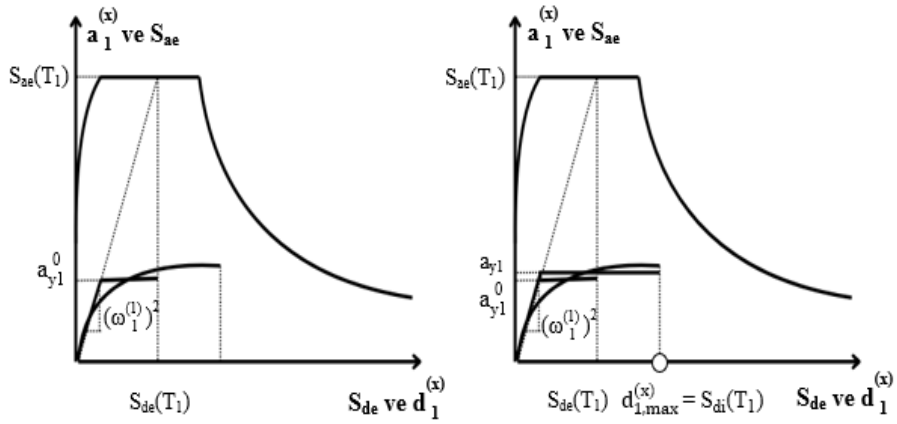


Şekil 2.10. S_{ae} ve S_{de} arasındaki ilişki

(f_e) ve (S_{ae}), sırasıyla elastik dayanım talebini ve buna karşılık gelen elastik spektral ivmeyi temsil ederken, (f_y), akma dayanımını ve (a_{y1}), buna karşılık gelen akma ivmesini ifade eder. Yukarıdaki hesaplamalar, birinci doğal titreşim periyodu (T_1) içindir. Eğer $T_1 > T_B$ ise, C_R bir'e eşittir. Burada (T_B), yer hareketinin karakteristik periyodudur. Eğer $T_1 \leq T_B$ ise, C_R Denklem (2.38)'e göre hesaplanabilir.

$$C_R = \frac{1 + (R_y - 1)\,\dfrac{T_B}{T_1}}{R_y} \qquad \textbf{2.38.}$$

Denklem (2.38)'den elde edilen C_R kullanılarak, eşdeğer akma noktası eksenleri, Denklem (2.35)'e göre ve S_{di} temel alınarak yeniden belirlenir. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi eşit alan kuralı uygulanarak, a_{y1}, R_y ve C_R değerleri yeniden hesaplanır. Ardışık iki adımda elde edilen sonuçlar birbirine yakınsadığında, iteratif süreç sonlandırılır.



Şekil 2.11. Spektral yerdeğiştirme oranı.

2.3. Performans Tanımı

Belirli bir deprem yer hareketi altında bir binadan beklenen veya hedeflenen sismik performans tanımlanır. Sismik performansı değerlendirmek için, sahadaki belirli deprem tehlike seviyeleri için maksimum izin verilen hasar durumları (performans seviyeleri) belirtilir. Bu performans seviyeleri, binalarda gözlemlenen hasar durumlarına dayalı olarak oluşturulan düzenlemeler ve standartlaştırma çalışmalarıyla belirlenir. Bir yapının durumu, fiziksel hasarın boyutu, yaşam güvenliğine yönelik riskler ve hasar sonrası işlevsellik derecesi ile karakterize edilir. Binanın kullanım amacına bağlı olarak, sahadaki deprem tehlikesiyle ilişkili yer hareketinin şiddeti dikkate alınarak farklı sismik performans seviyeleri seçilebilir. Gerekirse, farklı yer hareketi seviyelerini ele almak için birden fazla hasar durumu belirtilerek hedeflenen performans amacı karşılanabilir. Performans seviyelerinin bu kapsamlı tanımı, yönetmeliklerde/standartlarda tanımlanmaktadır.

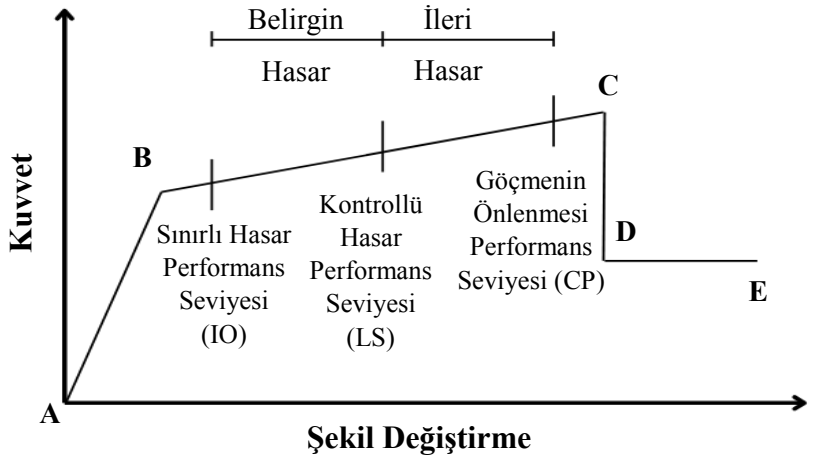
2.3.1. ASCE 41-17’de Performans Tanımları

ASCE 41-17'de, binaların sismik performansını değerlendirmek için üç belirgin yapısal performans seviyesi ve iki ara yapısal performans aralığı bulunmaktadır. Yapısal performans seviyeleri şunlardır: Sınırlı Hasar (IO), Kontrollü Hasar (LS) ve Göçme Önleme (CP). (Şekil 2.12).

- Sınırlı Hasar Performans Seviyesi (IO): Bu hasar durumu, depremin ardından binanın güvenli bir şekilde kullanılabilir durumda kaldığı bir durumu ifade eder. Yapı tasarım dayanımını ve rijitliğini korur, yalnızca minimal yapısal hasar meydana gelmiştir ve küçük onarımlar gerekebilir.
- Kontrollü Hasar Performans Seviyesi (LS): Bu hasar durumunda, bina önemli yapısal hasar alır, ancak kısmi veya tam çökme riskini önlemek için bir güvenlik marjı vardır. Deprem sırasında yaralanmalar meydana gelebilir, ancak yaşamı tehdit eden yaralanma olasılığı düşüktür. Yapı onarılabilir durumda olabilir, ancak onarımın ekonomik olarak uygulanabilirliği duruma bağlıdır.

- Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi (CP): Bu seviyede, bina ağır hasar alır ve kısmi veya tam yapısal göç eşiğindedir. Yapı hala yerçekimi yüklerini taşıyabilir, ancak düşen yapısal parçalar nedeniyle yüksek yaralanma riski vardır.

Belirgin Hasar Aralığı ve İleri Hasar Aralığı, sırasıyla IO-LS ve LS-CP arasında yer alan ara performans aralıklarıdır. Bu aralıklar, binalar için özelleştirilmiş rehabilitasyon hedeflerinin tanımlanmasına olanak tanır ve performans beklentileri ile tasarım kriterlerinde esneklik sunar.



Şekil 2.12. ASCE 41-17'ye Göre Hasar Sınır Bölgeleri (ASCE 41-17)

2.3.2. EC8'de Performans Tanımları

EC8, bir yapının hem hasar sınır durumu hem de nihai sınır durumlarını tanımlanmaktadır. Nihai sınır durumu, yapısal başarısızlık veya çökme ile ilişkilidir, hasar sınır durumunda ise yapının gerekli hizmet kriterlerini karşılayıp karşılamadığını değerlendirir. Nihai sınır durumunda, yapı tasarım sismik kuvvetleri altında stabil kalmalıdır. Ana sınır durumları şunlardır: Göçmenin önlenmesi (NC), Kontrollü Hasar (SD) ve Sınırlı Hasar (DL).

- Göçmenin önlenmesi (NC): Bu durumda, bina ağır hasar görmüş, artık dayanım ve rijitlik minimum düzeydedir. Düşey elemanlar hala düşey yükleri taşıyabilir, ancak büyük kalıcı yatay deplasmanlar meydana gelebilir. Yapı, sonraki bir depremde hayatta kalması oldukça zordur.

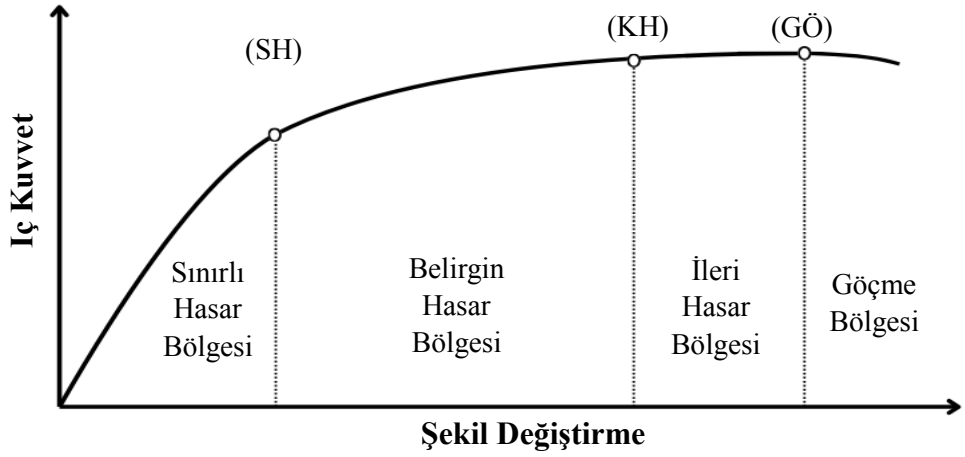
- Konrtollü Hasar (SD): Bina önemli hasar almış, ancak bir miktar artık dayanım ve rijitlik korunmuştur. Düşey elemanlar düşey yükleri taşıyabilir, ancak orta derecede kalıcı yatay deplasmanlar mevcut olabilir. Genellikle yapı, onarım için çok maliyetli olur.
- Sınırlı Hasar (DL): Bu durumda, bina yalnızca minimal hasar alır ve kalıcı yatay deplasman olmaz. Herhangi bir onarım gerekmez.

DL ve SD arasındaki aralık hasar kontrol aralığı, SD ve NC arasındaki aralık ise sınırlı güvenlik aralığı olarak adlandırılır. Bunlar sırasıyla orta ve ağır hasar durumlarına karşılık gelir. Bu aralıklar, sismik olay sırasında hasar ve güvenlik seviyelerini kategorize etmeye yardımcı olur.

2.3.3. TBDY 2018'de Performans Tanımları

TBDY 2018, bir yapının kesitindeki sünek elemanlar için üç sınır durumunu tanımlar: Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Önleme (GÖ). Bu sınırlar Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

- Sınırlı Hasar Performans Seviyesi (SH): Bu seviye, yapısal sistemin yalnızca küçük hasar veya doğrusal olmayan davranış sergilediği, elemanlarda sınırlı hasar olduğu bir durumu ifade eder.
- Kontrollü Hasar Performans Seviyesi (KH): Bu seviyede, yapının sismik dayanım sistemi, önemli yapısal zararları önleyecek şekilde kontrollü bir hasar alır ve yaşam güvenliği sağlanır.
- Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi (GÖ): Bu durum, yapının ağır hasar aldığı, ancak kısmi veya tam çökmeden kaçınıldığı bir durumu ifade eder. Yapı, bu hasara rağmen yerçekimi yüklerini taşımaya devam eder.



Şekil 2.13. TBDY 2018'e Göre Hasar Sınır Bölgeleri (TBDY 2018).

2.4. Performans Kriteri

Çeşitli standartlarda, her bir performans veya hasar seviyesi belirli kabul edilebilirlik kriterleri ile tanımlanmaktadır. Yapısal elemanlar için bu kriterler genellikle plastik mafsal dönmesi ve kiriş dönmesi cinsinden ifade edilir.

2.4.1. ASCE 41-17'de Kabul Edilebilirlik Sınırları

ASCE 41-17'de, yeterli bindirme boyuna veya ankraj uzunluğuna sahip olmayan kolonların plastik dönme sınırları, a_{ASCE} ve b_{ASCE} olarak adlandırılan iki katsayı ile ilişkilidir. Bu katsayılar sırasıyla Denklem (2.39) ve (2.40) ile hesaplanabilir. Burada a_{ASCE} sıfırdan küçük bir değer alamaz ve b_{ASCE} de a_{ASCE}'den düşük bir değer alamaz.

$$a_{ASCE} = 0.042 - 0.043\vartheta + 0.63\rho_h - 0.023\left(\max\left(\frac{V_y}{V_0}, 0.02\right)\right) \qquad \textbf{2.39.}$$

$$b_{ASCE} = \frac{0.5}{5 + \frac{P}{0.8\,A_g f_{co}}\,\frac{1}{\rho_h}\,\frac{f_{co}}{f_{yh}}} - 0.01 \qquad \textbf{2.40.}$$

(ρ_h) yatay donatı alanının, bu donatıya dik olan brüt beton alanına oranını ifade eder ve kolon çekirdeği ile düzgün bağlanmadığı durumlarda 0.0175'ten yüksek ve 0.0075'ten düşük bir değer alınmamalıdır. Ayrıca, (ϑ), eksenel yük oranını ifade eder. Eğilme akması esnasındaki

kesme talebinin kesme kapasitesine oranı (V_y/V_o) burada V_y, analizden elde edilen değer olup, kesme kapasitesi (V_o) Denklem (2.41)'e göre hesaplanır. Bu bağlamda, α_{col}, $s/d_{eff} \leq 0.75$ için 1 olarak alınır, $s/d_{eff} \geq 1$ için 0 olarak kabul edilir ve aradaki değerler için doğrusal olarak değişir. λ, hafif agrega betonu için 0.75 ve normal agrega betonu için 1 olarak alınır. Ayrıca, $M/(Vd_{eff})$ oranı, üretilen en büyük momentin kesme kuvveti ile etkin derinliğin çarpımına oranı olarak tanımlanır ve 2'den düşük ve 4'ten yüksek bir değer alamaz. Betonarme kolonlar için moment ve kesme değerleri yapılan analizlerden belirlenir.

$$V_0 = k\left[\alpha_{col}\frac{A_{sh}\, f_{yh}\, d_{eff}}{s} + \lambda\left(\frac{0.5\sqrt{f_{co}}}{M/V\, d_{eff}}\sqrt{1+\frac{P}{0.05\sqrt{f_{co}}\, A_g}}\right)0.8\ A_g\right] \qquad \textbf{2.41.}$$

Ayrıca, hemen kullanım performans seviyesi (IO) için plastik dönme sınırı, 0.15 a_{ASCE} olarak hesaplanır, bu değer 0.005'e eşit veya ondan küçük olmalıdır. Ayrıca, plastik dönme sınırı, kontrollü hasar performans seviyesi (LS) için 0.5 b_{ASCE} ve çökmenin önlenmesi performans seviyesi (CP) için 0.7 b_{ASCE} olarak hesaplanır. LS ve CP performans seviyeleri için bu değerlerin dikkate alınabilmesi için eksenel yük oranının (ϑ) 0.1'den büyük olması gerekir. Benzer şekilde, ASCE 41–17, akma sırasındaki dönmeyi hesaplamak için Denklem (2.42)'yi kullanır. Burada (M_y), kolon kesitinin moment dayanımını ifade eder ve L_p, kolon derinliğinin yarısı olarak alınır.

$$\theta_y = \frac{M_y}{EI_{flex}}\, L_p \qquad \textbf{2.42.}$$

Kirişler için Çizelge 2.2'de şu parametreler verilmiştir: (ρ) öngerilmesiz çekme donatı oranını; (ρ') öngerilmesiz basınç donatı oranını, (ρ_{bal}) dengeli donatı oranını, ve (V) tasarım kesme kuvvetini ifade etmektedir. "C" ve "NC" kısaltmaları sırasıyla uygun ve uygun olmayan enine donatıyı belirtir. Enine donatı, eğilme plastik mafsal bölgesinde etriye aralığı $\leq$ d/3 olduğunda ve orta ile yüksek süneklik talebi olan elemanlarda etriyelerin sağladığı dayanım (Vs), tasarım kesme kuvvetinin (V) en az üçte dört (¾) olduğu durumlarda uygun kabul edilir. Aksi takdirde, enine donatı uygun olmayan olarak sınıflandırılır.

Çizelge 2.2. Kirişler için kabul kriterleri (ASCE 41-17)

			Modelleme Parametreleri			Kabul Kriterleri		
						Plastik Dönme Açısı (radyan)		
			Plastik Dönme Açısı (radyan)		Artık Dayanım Oranı	Performans Seviyesi		
Durum			a	b	c	IO	LS	CP
1- Eğilme ile kontrol edilen kirişler								
$\frac{\rho-\rho'}{\rho bal}$	Enine donatı	$\frac{V^d}{b_w \square \sqrt{f'_{cE}}}$						
≤ 0.0	C	≤ 3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
≤ 0.0	C	> 3 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
> 0.5	C	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
> 0.5	C	> 3 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	> 3 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
> 0.5	NC	≤ 3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
> 0.5	NC	> 3 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
2- Kesme ile kontrol edilen kirişler								
Etriye aralığı ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
Etriye aralığı > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
3- Uzatma veya ek yerlerinin yetersizliği nedeniyle kontrol edilen kirişler								
Etriye aralığı ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
Etriye aralığı > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005	0.01
4- Kiriş-kolon birleşimine yetersiz ankrajlanma ile kontrol edilen kirişler			0.015	0.03	0.2	0.01	0.02	0.03

2.4.2. EC8'de Kabul Edilebilirlik Sınırları

Yapısal elemanlar, "sünek" veya "gevrek" olarak sınıflandırılır. Sünek elemanlar, deformasyon talepleri kontrol edilerek doğrulanırken, gevrek elemanlar, taleplerin dayanım kapasiteleri ile karşılaştırılmasıyla doğrulanır. Eleman değerlendirmesi, elemanın kiriş dönmesi parametresi (θ) kullanılarak yapılır. Bu parametre, akma ucundaki eksene teğet ile kayma açıklığını (LV = M/V = moment/kesme) bağlayan kiriş arasındaki açıyı ifade eder. Kiriş dönüşü ayrıca eleman kayma oranına eşittir (θ = Δ/L). Doğrusal olmayan analiz ile hesaplanan talep değerleri, her bir performans seviyesi için verilen sınırlar ile karşılaştırılır. Betonarme yapısal elemanlar için nihai kiriş dönme kapasitesi Denklem (2.43) ile tanımlanır. Nihai kiriş dönme sınırı, sınırlı güvenlik performans aralığının üst sınırı olan Göçmenin önlenmesi (NC) performans düzeyini ifade eder.

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.0172\,(0.3^{\nu}) \left[\frac{\max(0.01,\omega')}{\max(0.01,\omega)}\, f_c\right]^{0.175} \left(\frac{L_V}{h}\right)^{0.4} 25^{\left(\propto \rho_{SX} \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} \left(1.3^{100\rho d}\right) \qquad \textbf{2.43.}$$

γ_{el} = 1.5 (birincil elemanlar) ve γ_{el} = 1.0 (ikincil elemanlar), (h) kesit derinliği, (ν) = N / bhf_c (b), basınç bölgesinin genişliği, N eksenel kuvvet pozitif sıkıştırma için, ω ve ω′ gerilme ve sıkıştırma için mekanik donatı oranları, f_c betonun tahmin edilen basınç dayanımı değeri (MPa), $\rho_{sx} = A_{sx} / b_{wsh}$ yükleme yönü x'e paralel olan enine donatının oranı, (S_h) kancaların aralığı, ρ_d çapraz donatının oranı (varsa), her çapraz yönde, α ise Denklem (2.44) ile hesaplanabilen kısıtlama etkinlik faktörüdür.

$$\propto = \left(1-\frac{S_h}{2b_c}\right)\left(1-\frac{S_h}{2h_c}\right)\left(1-\frac{\sum b_i^2}{6h_c b_c}\right) \qquad \textbf{2.44.}$$

Burada, b_c ve h_c sınırlı çekirdeklerin boyutları, b_i ise uzunlamasına çubukların merkez hattı aralığıdır (i ile indekslenmiş) ve bunlar bir kanca köşesi veya kesit çevresi boyunca bir çapraz bağ ile yanlardan sınırlanmıştır. EC8'e göre, eğer elemanlar deprem dayanımı için detaylandırılmamışsa, nihai kiriş dönme kapasitesinin 1.2 sayısına bölünmesi gerekmektedir. Ayrıca, eğer kancalar 135° halkalarla kapatılmamışsa, α sıfır alınmalıdır. Nihai kiriş dönme

kapasitesi, Denklem (2.43) ile tanımlanır ve bu kapasite, elemanın toplam dönmesini, hem elastik hem de plastik dönmeyi içermektedir. Yapısal elemanın kiriş plastik dönmesi, Denklem (2.45) ile hesaplanabilir.

$$\theta_{um}{}^{pl} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.0129\ (0.2^{v}) \left[\frac{\max(0.01,\omega')}{\max(0.01,\omega)}\ f_c\right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h}\right)^{0.375} 25^{\left(\propto \rho_{SX} \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} \left(1.3^{100\rho d}\right) \quad \textbf{2.45.}$$

SD sınır durumuna göre , θ_{SD}, nihai kiriş dönme kapasitesi kullanılarak belirlenir, bunun nihai kiriş dönmesinin %75'i olduğu varsayılır, Denklem (2.46)'da gösterildiği gibi.

$$\theta_{SD} = \frac{3}{4} \cdot \theta_{um} \quad \textbf{2.46.}$$

DL sınır durumu için deformasyon limiti, akma anındaki kiriş dönmesi ile belirlenir ve bu dönme Denklem 2.47'de verilir. Bu denklemde, eğilme ve kayma katkıları sırasıyla birinci ve ikinci terimlerle dikkate alınırken, üçüncü terim çubukların ankraj kaymasını hesaba katar. Burada, φ_y akma eğriliğini, α_{el} sırasıyla 0.00275 (kirişler ve kolonlar) ve α_{el} = 0.0025 (duvarlar) olarak alınır, d ve d' çekme ve basınç donatılarının derinliklerini ifade eder, f_y ve f_c sırasıyla çeliğin çekme dayanımını ve betonun basınç dayanımını ifade eder.

$$\theta_y = \Phi_y \frac{L_v}{3} + \alpha_{el} + \alpha_{el} \frac{0.2\ \varepsilon_{sy}\ d_b\ f_y}{(d - d')\sqrt{f_c}} \quad \textbf{2.47.}$$

2.4.3. TBDY 2018'de Kabul Edilebilirlik Sınırları

TBDY 2018'de plastik mafsaldaki akma dönmesi (θ_y), Denklem (2.48) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde (φ_y), plastik mafsaldaki etkin akma eğriliğini, (η) ise kolonlar için 1 olarak kabul edilen sabit bir katsayıyı ifade etmektedir. Etkin akma eğriliği, φ_y, çeşitli kesit tasarım programları kullanılarak betonarme kolon kesitleri üzerinde gerçekleştirilen moment-eğrilik analizleri sonucunda elde edilmiştir.

$$\theta_y = \frac{\Phi_y L_v}{3} + 0.0015\ \eta \left(1 + 1.5 \frac{d}{L_s}\right) + \frac{\Phi_y\ d_l\ 1.2\ f_{yl}}{8\sqrt{1.3\ f_{co}}} \quad \textbf{2.48.}$$

TBDY 2018'e göre göçmenin önlenmesi (GÖ) performans düzeyi için izin verilen plastik dönme değeri, $\theta_p^{GÖ}$, Denklem (2.49) ile hesaplanmaktadır. Nihai eğrilik değeri, Φ_u yine TBDY 2018'de verilen beton ve donatı çeliği modelleri kullanılarak kesit tasarım programında gerçekleştirilen moment-eğrilik ilişkisine dayanarak belirlenmiştir. Plastik mafsal boyu L_p, kolon derinliğinin yarısı olarak kabul edilmiştir.

$$\theta_P^{GÖ} = \frac{2}{3}\left[(\Phi_u + \Phi_1)\, L_P \left(1\text{-}1.5\,\frac{L_P}{L_S}\right) + 4.5\,\Phi_u d_1\right] \qquad \textbf{2.49.}$$

Kontrollü hasar (KH), performans düzeyi için plastik dönme sınırı, θ_p^{KH}, Denklem 2.49'da göçmenin önlenmesi performans düzeyi için verilen plastik dönme sınırının %75'i olarak hesaplanmaktadır. TBDY 2018'de verilen etkin kesit rijitliği kullanıldığı takdirde, sınırlı hasar (SH) performans düzeyi için plastik dönmeye izin verilmemektedir.

2.5. Önceki Çalışmaların İncelenmesi

Goel (2008), güçlü yer hareketi kayıtlarını kullanarak, betonarme binaların sismik analizi için FEMA-356, ASCE/SEI 41-06, ATC-40 ve FEMA-440'da belirtilen doğrusal olmayan statik prosedürleri (NSP) değerlendirmiştir. Çalışmada, düşük katlıdan yüksek katlıya kadar beş betonarme bina seçilmiş ve bu NSP'lerin tahmin ettiği maksimum çatı yer değiştirmeleri, doğrudan kaydedilen hareketlerden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Goel, NSP'lerin bazı binalar için genellikle tepe çatı yer değiştirmelerini ya fazla ya da eksik tahmin ettiğini bulmuştur. Özellikle, FEMA-440'da yapılan iyileştirmeleri içeren ASCE/SEI 41-06 Katsayı Yöntemi (CM), FEMA-356'ya kıyasla tutarlı bir şekilde daha iyi tahminler sağlamamıştır. Geliştirilmiş FEMA-440 Kapasite Spektrumu Yöntemi (CSM) genellikle ATC-40 CSM'den daha iyi tahminler sağlamıştır. Bununla birlikte, CM veya CSM prosedürlerinin genel olarak daha doğru tahminler ürettiğine dair kesin bir kanıt bulunmamıştır. Çalışma, bazı yararlı gözlemler yapılmış olmasına rağmen, sonuçların beş bina ve her biri için yalnızca bir güçlü yer hareketi setinden oluşan sınırlı bir veri setine dayandığını vurgulamıştır. Çeşitli NSP'lerin etkinliği hakkında kesin sonuçlar çıkarmak için daha büyük bir veri setiyle ek araştırmalara ihtiyaç vardır.

Giannopoulos (2009), orta büyüklükte depremsellik için eski Yunan sismik kodlarına göre tasarlanmış tipik bir beş katlı betonarme çerçeveyi incelemiştir. Çalışmada, binanın nihai kapasitesini değerlendirmek için SAP2000 kullanılarak doğrusal olmayan statik analizi yapılmıştır. Kritik bölümler seçilmiş ve çeşitli sınır durumlarında dönme süneklik değerleri, FEMA 356 ve Eurocode 8 Bölüm 3'ün Ek A'sı (EC8) kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma, bu iki kodun tahminlerini SAP2000 sonuçlarıyla karşılaştırarak Eurocode 8'in geliştirilmesine yönelik öneriler sağlamayı amaçlamıştır. Bulgular, EC8 sınır durumlarının kirişler için çatı yer değiştirmesiyle arttığını, ancak kolonlar için neredeyse sabit kaldığını göstermiştir. EC8'in göçme sınır durumu (NC) değerleri, kirişler için FEMA'nın CP değerlerinden daha düşük, ancak kolonlar için tam tersi olmuştur. Hesaplama yöntemleri açısından, Giannopoulos, EC8'deki dönme sünekliği denklemlerinin kolonlar için iyi performans gösterdiğini, ancak kirişler için yeniden değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Özellikle, kirişler için sonuçlar önemli farklılıklar göstermiştir; EC8 denklemleri, FEMA'ya kıyasla dönme sünekliğini düşük tahmin etmiş ve EC8'deki kirişle ilgili parametrelerin daha fazla değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Karabulut (2011), DBYBHY 2007 (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007) ile FEMA 440 (Federal Acil Durum Yönetim Ajansı, Doğrusal Olmayan Statik Sismik Analiz Prosedürlerinin İyileştirilmesi Belgesi, 2005) arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Çalışma, önceki yönetmeliklerde benimsenen farklı yöntemlerin, TS-500 (Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü) ve DBYBHY 2007'ye göre tasarlanmış üç farklı yapı üzerinde uygulanmasıyla, sismik değerlendirme yöntemlerinin geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Yapılar, DBYBHY 2007'de tanımlanan doğrusal olmayan statik itme analizi ve FEMA 440 belgesinde önerilen eşdeğer doğrusallaştırma yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma, hem FEMA440 hem de DBYBHY 2007 yöntemleriyle hesaplanan tepe yer değiştirmesinin güvenli tarafta olduğunu göstermektedir. Ancak, her iki yönetmelikten elde edilen temel kesme değerleri ihtiyatlı olmayan hesaplamalar sonucunu vermektedir. Önemli olarak, DBYBHY 2007 değerlerinin, bu amaç için daha doğru kabul edilen doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi sonuçlarıyla daha iyi uyum sağladığı bulunmuştur.

Causevic ve Mitrovic (2011), Avrupa ve ABD sismik düzenlemelerine dahil edilen N2 doğrusal olmayan statik yöntemi (Eurocode 8), FEMA 356'nın doğrusal olmayan statik prosedürü (NSP) ve FEMA 440'nın geliştirilmiş Kapasite Spektrumu Yöntemi (CSM) gibi çeşitli doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yöntemlerini tartışmıştır. Çalışma, bu prosedürleri sekiz katlı bir betonarme binaya uygulamış ve doğrusal olmayan statik ile dinamik zaman-tanım alanı analizlerinin sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bulgular, N2 yöntemi ve NSP'nin temelde benzer olduğunu, ancak NSP'nin hedef yer değiştirmeyi etkileyen ek katsayılar içerdiğini göstermiştir. Ayrıca, daha gerçekçi olarak kabul edilen doğrusal olmayan zaman-tanım alanı analizi, statik yöntemlerin sonuçlarını doğrulamak için kullanılmıştır. Tüm yöntemlerden elde edilen maksimum tepe yer değiştirmeleri, dinamik analizin ortalama değerleriyle karşılaştırılabilir bulunmuştur. Çalışma, N2 yönteminde hedef yer değiştirmenin 1.45 faktörü ile artırılmasının, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi ile elde edilen maksimum yer değiştirme sonuçlarına benzer sonuçlar sağladığını ve bu durumun yapısal performans değerlendirmesi için pratik bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymuştur.

Bhatt ve Bento (2012), plan-asimetrik binaların sismik değerlendirilmesi için doğrusal olmayan statik prosedürlerin (NSP'ler) kullanımını analiz etmiştir. Çalışmaları, ATC40 ve FEMA440'dan gelen Kapasite Spektrum Yöntemi (CSM) ile Eurocode 8'den gelen genişletilmiş N2 yöntemini, beş katlı bir betonarme bina üzerinde karşılaştırmıştır. Sonuçlar, doğrusal olmayan dinamik analizle de karşılaştırılarak irdelenmiştir. Çalışma, hem CSM-FEMA440'ın hem de genişletilmiş N2 yönteminin yapısal tepkiyi muhafazakar tahminlerle değerlendirdiğini, ancak CSM-FEMA440'ın doğrusal olmayan dinamik analizin sonuçlarıyla daha uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu durum, hedef yer değiştirme hesaplamasında kullanılan etkili periyot, etkili sönümleme ve talep spektrumu indirgemesi gibi prosedürlerin iyileştirilmesine bağlanmıştır. Diğer yandan, CSM-ATC40 yöntemi, eşdeğer sönümleme oranını aşırı tahmin etme eğilimi nedeniyle yapının tepkisini genellikle düşük tahmin etmiştir. Burulma davranışı açısından, genişletilmiş N2 yöntemi özellikle etkili olmuş, binanın esnek tarafındaki artışı yakalarken Amerikan kodları burulma hareketini tam olarak yansıtmakta yetersiz kalmıştır. Yazarlar, her iki Amerikan yönteminin de yeterli performans

gösterdiğini, ancak plan-düzensiz binalarda burulma etkilerinin dikkate alınmasında iyileştirmelere ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir.

Sönmez (2012), Türk Deprem Yönetmeliği 2007 (DBYBHY-07) ve Türk Betonarme Yönetmeliği'ne (TS500) göre tasarlanmış üç farklı kat yüksekliğine sahip (6, 8 ve 10 kat) binaların sismik performans değerlendirmesini incelemiştir. Çalışma, ASCE 41-06 ve DBYBHY-07'den performans değerlendirme yöntemlerini, bu yönetmeliklerin yerel ve ulusal farklılıklarını göz önünde bulundurarak karşılaştırmıştır. Araştırmada kullanılan doğrusal olmayan analiz yöntemi, DBYBHY-07'nin "Artımsal Eşdeğer Sismik Yükler Yöntemi" olup, ASCE 41-06'da "Basitleştirilmiş Doğrusal Olmayan Statik Yükler Yöntemi" olarak adlandırılmaktadır. Analiz sonuçları, sismik yer değiştirme talepleri ve kesitlerin performans seviyelerinin her iki yönetmelikte de benzer olduğunu göstermiştir. Yük değerleri ve eğilme rijitliklerindeki farklılıklara rağmen, iki metodolojiden elde edilen deprem talep noktalarının birbirine yakın olduğu bulunmuştur.

Girgin ve arkadaşları (2013), mevcut betonarme yapıların performans noktasını belirlemek için kullanılan farklı yöntemleri, Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY-07) ve FEMA440'a göre karşılaştırmalı olarak incelemiştir. DBYBHY-07, eşdeğer yer değiştirme yaklaşımını kullanırken, FEMA440 etkili periyot ve sönümlemeye dayalı ardışık yaklaşım tekniğini önermektedir. Çalışma, farklı kat sayısına sahip (altı, sekiz ve on kat) düzenli çerçeve ve duvar-çerçeve tipi yapılar üzerinde her iki yöntemi değerlendirmiştir. Çerçeve tipi binalarda, FEMA440 kullanılarak belirlenen performans noktasındaki spektral yer değiştirmelerin, DBYBHY-07'den elde edilen değerlere göre sırasıyla %28, %24 ve %28 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Duvar-çerçeve tipi binalarda ise FEMA440 ve DBYBHY-07 yöntemleri ile belirlenen performans noktalarının birbirine oldukça yakın olduğu bulunmuştur. DBYBHY-07'nin daha basit yaklaşımı ile elde edilen taleplerin, doğrusal olmayan zaman tanımlı analizlerden elde edilen sonuçlara daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

Dhanvijay ve arkadaşları (2015), uluslararası sismik standartların karşılaştırmalı bir çalışmasını gerçekleştirmiştir; özellikle Eurocode, IBC ve Hindistan Standardı IS 1893:2002, 10 kat simetrik Özel Betonarme Moment Dayanımlı Çerçeve'nin sismik performansı üzerine

odaklanmıştır. Çalışma, seçilen kolon ve kirişler için taban kesmesi, yer değiştirme, eksenel yük ve momentler dahil olmak üzere yapısal tepkilerin kodlar arasındaki farklılıklarını incelemiştir. Taban kesmesi açısından, IBC'nin IS 1893:2002 yöntemine kıyasla X yönünde %5,53 ve Z yönünde %5,7 daha az olduğu, Eurocode'un ise X ve Z yönlerinde sırasıyla %38,52 ve %30,47 daha yüksek taban kesmesi değerleri verdiği tespit edilmiştir. Yer değiştirme açısından en yüksek değer Hindistan yöntemi altında elde edilirken, IBC ve Eurocode sırasıyla %42,44 ve %23,12 daha az yer değiştirme göstermiştir. Eksenel kuvvetler ve Moment-Y ile Moment-Z değerleri de benzer bir desen takip etmiş, Hindistan yöntemi, en yüksek taban kesmesi değerlerini vermiştir. Çalışma, taban kesmesi, yer değiştirme, eksenel yük ve momentler arasındaki farklılıkların, her standardın yük kombinasyonları ve tanımladığı sabitlerden kaynaklandığını belirtmiştir.

Santos ve arkadaşları (2018), küresel sismik tasarım yönetmeliklerinde yer alan farklılıkları ve benzerlikleri inceleyen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, ABD, Avrupa, İtalya, Romanya, Brezilya, Bulgaristan ve Şili gibi birçok ülkenin sismik tasarım standartlarını; tekrarlama periyotları, sismik bölgeleme, tasarım yanıt spektrumları, zemin koşulları ve izin verilen analiz yöntemleri gibi çeşitli açılardan karşılaştırmıştır. Araştırma, ayrıca farklı yönetmeliklerden alınan sismik girdileri modele uygulayarak, Eşdeğer Statik Analiz, Tepki Spektrum Analizi ve İtme Analizi yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmıştır. Sonuçlar, Eşdeğer Statik Analiz ve Tepki Spektrum Analizlerinin benzer sonuçlar ürettiğini, ancak İtme Analizinin yapının kapasitesini ve yer değiştirme davranışını kritik aşamalarda, özellikle göçmeden hemen önceki koşullarda değerlendirmek için değerli bir araç olduğunu göstermiştir. Çalışma, İtme Analizinin iteratif bir süreç gerektirdiğini ve yapısal elemanların tasarımı ile donatılarının ekonomik olarak uygun ve yönetmeliklere uygun olmasını sağlama önemini vurgulamıştır.

Keyik (2019), DBYBHY-07 hükümlerine göre tasarlanmış 4 katlı bir betonarme yapının doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, yapının performans sonuçları TBDY-2018 ve ASCE 41-17 sismik yönetmeliklerine göre karşılaştırılmıştır. Yapı, 475 yıllık dönüş periyoduna sahip, 50 yılda %10 aşılma olasılığı olan bir deprem seviyesiyle değerlendirilmiş ve yapının performans hedefi “kontrollü hasar”

olarak belirlenmiştir. Analiz, tüm kolonların ciddi hasar gördüğünü göstermiştir. Keyik, her iki yönetmeliğin benzer formülasyonlara sahip olması nedeniyle benzer taban kesme kuvveti sonuçları ürettiğini, ancak TBDY-2018'in genellikle ASCE 41-17'ye göre daha yüksek tepe yer değiştirmeleri ile sonuçlandığını bulmuştur. Çalışmada TBDY-2018'in performans değerlendirmesi için deformasyon bazlı kriterler kullandığı, ASCE 41-17'nin ise plastik dönme değerlerine dayandığı ve TBDY-2018'in tepe yer değiştirmelerinin ASCE'ye kıyasla 1,35 kat daha büyük olabileceği belirtilmiştir.

Dalyan ve Şahin (2019), doğrusal olmayan artımsal itme analizi yöntemini kullanarak, 5 katlı bir betonarme konut yapısının sismik performansını değerlendirmiştir. Çalışma, önceki Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY-2007) ile mevcut TBDY-2018 yönetmeliklerini karşılaştırmıştır. DBYBHY-2007 doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler sunarken, TBDY-2018 Tek Modlu İtme, Çok Modlu İtme ve Zaman Tanım Alanında Analiz yöntemlerini tanıtmaktadır. Analiz, TBDY-2018'e göre etkili periyodun daha uzun olduğunu, bunun da TBDY-2018'de daha düşük taban kesme kuvvetleriyle sonuçlandığını göstermiştir. Ayrıca, TBDY-2018 yönetmeliği her bir betonarme eleman için kesit rijitliklerinin ayrı ayrı hesaplanmasını zorunlu kılmakta ve bu, analizi daha gerçekçi ancak daha zaman alıcı hale getirmektedir. TBDY-2018'deki güncellenmiş tasarım spektrumu ve uzatılmış yapısal periyotlar, mevcut bina için daha düşük deprem kuvvetleri ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, TBDY-2018'deki daha katı deformasyon limitleri nedeniyle yapının hedef performans seviyeleri, DBYBHY-2007'ye göre önemli ölçüde farklılık göstermemiştir.

Uçar (2019), İstanbul'da bulunan dokuz katlı bir betonarme hastane binasının sismik performansını değerlendirmek için, hem DBYBHY-2007 hem de TBDY-2018 esaslarına dayalı doğrusal olmayan analiz yöntemlerini kullanmıştır. Çalışma, doğrusal olmayan itme ve zaman tanım alanında analiz yöntemlerini içermektedir. Sonuçlar, TBDY-2018'in dayanım esaslı kurallarına göre tasarlanan binanın, TBDY-2018 kapsamında belirlenen performans hedeflerini karşıladığını göstermiştir. Ancak bina, DBYBHY-2007'nin I = 1.0 için "Hemen Kullanım Performans Seviyesi" hedefini karşılayamamıştır. Öte yandan, TBDY-2018'in DD-2 tasarım spektrumu, DBYBHY-2007 kriterleri ile kullanıldığında bina

performans hedefini karşılamıştır. Çalışma, azalmış tasarım spektrumları ve mod birleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen taban kesme kuvvetlerinin, DBYBHY-2007'de TBDY-2018'e göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ancak, TBDY-2018'deki etkili eğilme rijitliklerinin kuvvet bazlı tasarımda kullanılması, daha büyük yer değiştirmelere neden olmuştur. Çalışma ayrıca, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yönteminin, özellikle dokuz katlı yapılar için, mod davranışını daha iyi yakaladığından dolayı itme analizine göre daha doğru sonuçlar verdiğini vurgulamıştır. Bulgular, itme analizinin zaman tanım alanında analize göre güvensiz sonuçlar üretebileceğini ve farklı performans seviyeleri ile deprem şiddetleri için uygun analiz yönteminin seçilmesinin önemini ortaya koymuştur. Çalışma, TBDY-2018'e göre yapılan tasarımların, güvenlik standartlarına uygunluğu sağlamak için daha büyük kolonlar ve perde duvarlar gibi daha yüksek yanal rijitliğe sahip elemanlar gerektirdiğini sonucuna varmıştır. Ayrıca bu performans analizlerinden elde edilen bulguların, Eurocode 8 (EC-8) ve ASCE 41 gibi Avrupa ve ABD standartlarına kolayca uygulanabileceği belirtilmiştir.

Jamal ve Yüksel (2021), tek açıklıklı bir yapının kullanıcı tanımlı ve varsayılan mafsal özellikleri için doğrusal olmayan statik prosedür (NSP) veya itme analizi ile performansını incelemiştir. Analiz, TBDY-2018 ve ASCE 41-17 standartlarına göre gerçekleştirilmiş ve çeşitli yükseklikler için sonuçlar karşılaştırılmıştır. ASCE 41-17'ye göre hesaplanan tepe yer değiştirme değerlerinin genellikle TBDY-2018'e göre daha büyük olduğu, TBDY-2018'in ise daha yüksek taban kesme ve kat kesme kuvvetleri ürettiği bulunmuştur. Çalışma, TBDY-2018 ve ASCE 41-17'ye göre tek açıklıklı, 3 katlı betonarme çerçeve sistemler için talep eğrilerini karşılaştırmıştır. TBDY-2018 kullanılarak hesaplanan spektral yer değiştirme (Sd) değerinin, ASCE 41-17'ye göre elde edilen değerden daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, plastik mafsal özelliklerinin, özellikle plastik mafsal uzunluğu ve enine donatı aralığının, yapısal performansı belirlemede önemli olduğunu vurgulamıştır. Bulgular, düşey yükler, yapısal elemanların etkili rijitlikleri ve plastik mafsal özellikleri gibi faktörlerin sonuçları önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Karakas ve arkadaşları (2022), modern sismik yönetmeliklerden önce inşa edilmiş mevcut binaların sismik performansını araştırmıştır. Bu çalışma, düşük ve orta katlı betonarme

yapıların kırılganlık eğrilerini analiz ederek farklı sismik yönetmeliklerdeki değerlendirme yöntemlerini karşılaştırmıştır. İncelenen binalar, 3 ila 6 kat arasında değişmekte olup, eski ve yeni olarak sınıflandırılmıştır ve DBYBHY-2007, TBDY-2018, EC8/3 ve ASCE 41-17'ye göre değerlendirilmiştir. Yapı kapasite eğrilerini ve hasar limitlerini belirlemek için itme analizleri yapılmış, ardından 300'den fazla gerçek deprem kaydı kullanılarak doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yeni binaların tüm sismik yönetmeliklerde eski binalara göre önemli ölçüde daha yüksek dayanım, rijitlik ve deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. TBDY-2018'in en muhafazakâr olduğu ve en yüksek hasar olasılıklarını sağladığı, DBYBHY-2007'nin ise genellikle hasar alt sınırlarını sunduğu bulunmuştur. Kırılganlık eğrileri, bina yaşının sismik kırılganlık üzerinde en etkili faktör olduğunu ortaya koymuştur.

Ascencio (2022), betonarme perde duvarlar için ASCE 41-17 ve Eurocode 8'e göre doğrusal olmayan sismik değerlendirme yöntemlerini karşılaştırmalı bir çalışma yapmıştır. Araştırma, bu standartlarda belirtilen performans esaslı yöntemlerin, betonarme perde duvarların sismik yükler altındaki davranışını tahmin etmedeki etkinliğini ve kabul kriterlerindeki farklılıkları değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, dikdörtgen ve dambıl kesitli, döngüsel yatay yükleme altında test edilmiş konsol duvarlar incelenmiş ve her iki standardın sonuçları karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan yöntemler, özellikle eğilme kontrollü duvarlar için, hasar mekanizmalarını doğru bir şekilde tahmin etmiş ve her iki yöntem benzer performans sınırları üretmiştir. Ancak, kesme kontrollü duvarlarda önemli farklılıklar bulunmuş, ASCE 41-17'nin duvar özelliklerindeki değişikliklere daha az duyarlı olduğu ve bazen sezgilere aykırı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Parametrik bir çalışma, en-boy oranları, eksenel yük seviyeleri gibi temel parametrelerdeki değişikliklerin sonuçlar üzerindeki etkisini belirlemiştir. ASCE 41-17, bu değişkenlere karşı daha büyük bir duyarlılık göstermiştir. Sonuç olarak, ASCE 41-17 ve Eurocode 8'deki doğrusal olmayan yöntemlerin, betonarme perde duvarların davranışını tahmin etmede genel olarak güvenilir olduğu görülmüştür. Ancak, kesme kontrollü duvarlar için ASCE 41-17'nin yöntemi bazen ikili sonuçlar sunarak sonuçları basitleştirirken, Eurocode 8, süneklik talebini dikkate alan daha detaylı bir yaklaşım sağlamıştır.

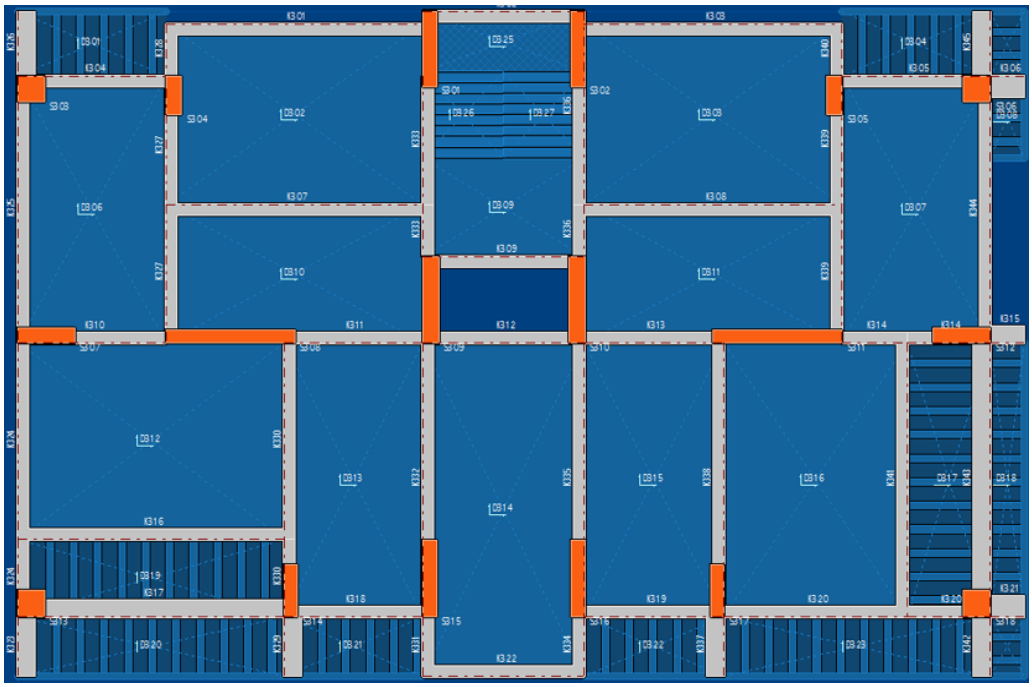
Subaşı ve arkadaşları (2023), modern sismik yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmayan betonarme kolonların sismik performansını incelemiştir. Çalışma, Eurocode 8, ASCE 41-17 ve TBDY-2018'de belirtilen deformasyon esaslı performans sınırlarının betonarme kolonlar üzerindeki etkinliğini değerlendirmiştir. Literatürdeki deneysel verilerle doğrulanan doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Parametrik çalışma, TBDY-2018'in performans sınırlarının genellikle Eurocode 8 ve ASCE 41-17'ye göre daha muhafazakâr olduğunu ve düşük eksenel yük seviyelerinde etkin performansın gerçek kolon kapasitesinin %22-53'ü ile sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlar, eksenel yük seviyelerinin yönetmeliklerde tanımlanan performans sınırları üzerindeki önemli etkisini vurgulamış ve eksenel yük değişimlerini dikkate alacak şekilde güncellemeler önerilmiştir. Sonuç olarak, çalışma, Eurocode 8, ASCE 41-17 ve TBDY-2018'de betonarme kolonlar için önerilen performans sınırlarını nicel olarak karşılaştırmıştır. TBDY-2018'in göçmeyi önleme sınırlarının, tüm eksenel yük oranları için başarılı ve muhafazakâr olduğu doğrulanmış, buna karşın Eurocode 8 ve ASCE 41-17'nin eksenel yüklerin %25'ini aşan kolonlarda daha az etkili olduğu tespit edilmiştir.

Akbıyık (2023), TBDY-2018'e göre tasarlanmış 5, 10 ve 15 katlı bina modellerinin sismik performans seviyelerini belirlemeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, DBYBHY-07, TBDY-2018, ASCE 41-17 ve Eurocode 8'de tanımlanan kesit hasar sınırları ve etkili kesit rijitlik değerleri kullanılarak binaların doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler için on bir ivme çifti seçilmiştir. Sonuçlar, performans seviyeleri için kesit rijitliği ve kesit hasar sınırı tanımlarındaki farklılıkların önemli bir varyasyona yol açtığını göstermiştir. TBDY-2018'e göre belirlenen performans seviyelerinin, yönetmeliğin etkili kesit rijitliği ve donatı çelik gerilme sınırlarına ilişkin tanımları nedeniyle tasarımla uyumsuz olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bulguları, özellikle çatı deplasmanı olmak üzere yer değiştirme taleplerinde artış olduğunu ortaya koymuştur. Bu artış, önerilen yöntemde kullanılan etkili kesit rijitliğine atfedilmiş ve ASCE-41-17'deki değerlere uyum sağlamıştır. TBDY-2018'e göre tasarlanan modeller ile önerilen yöntemle değerlendirilen modeller karşılaştırıldığında, ötelenme taleplerinde farklılıklar gözlemlenmiştir.

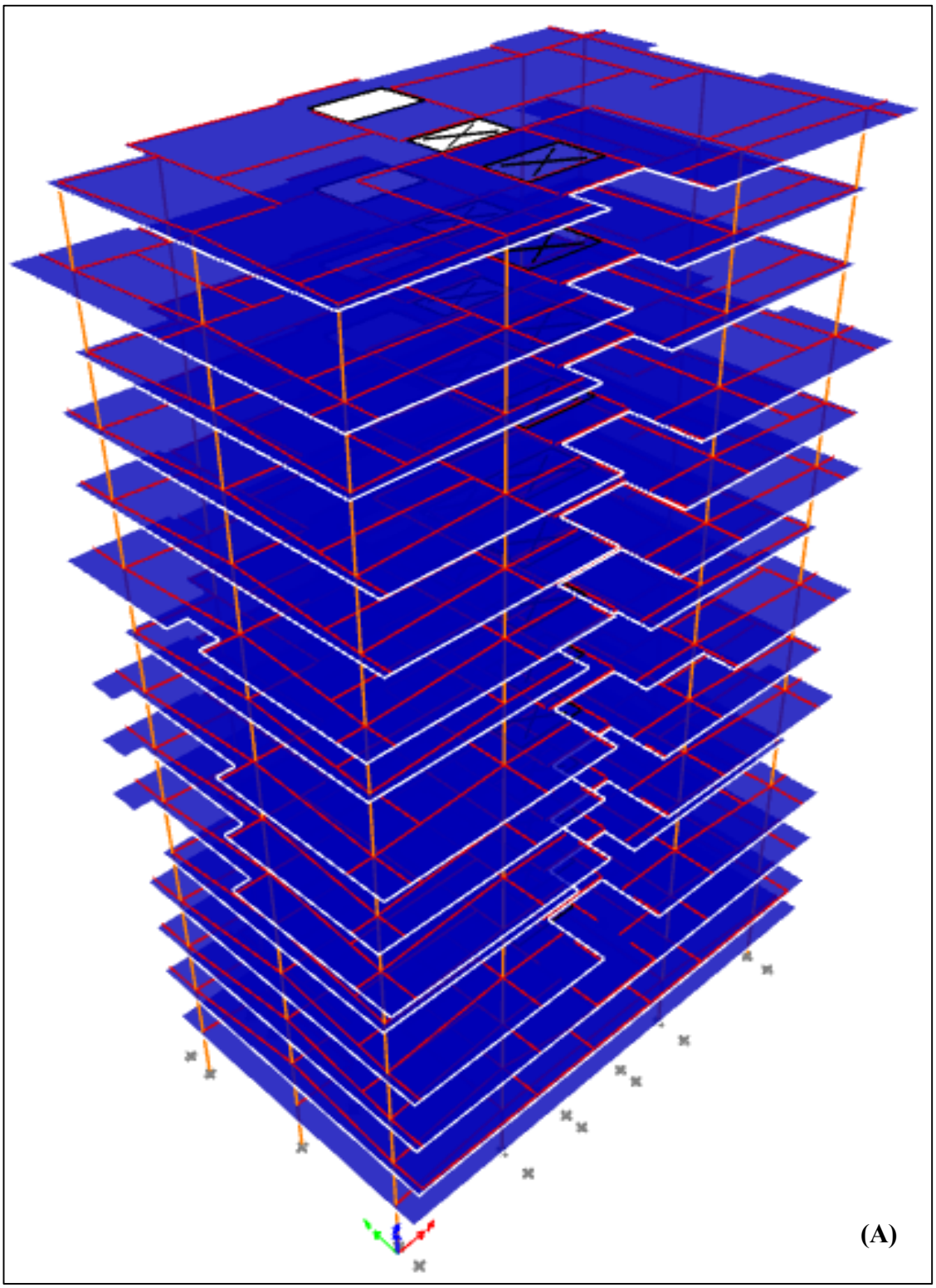
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

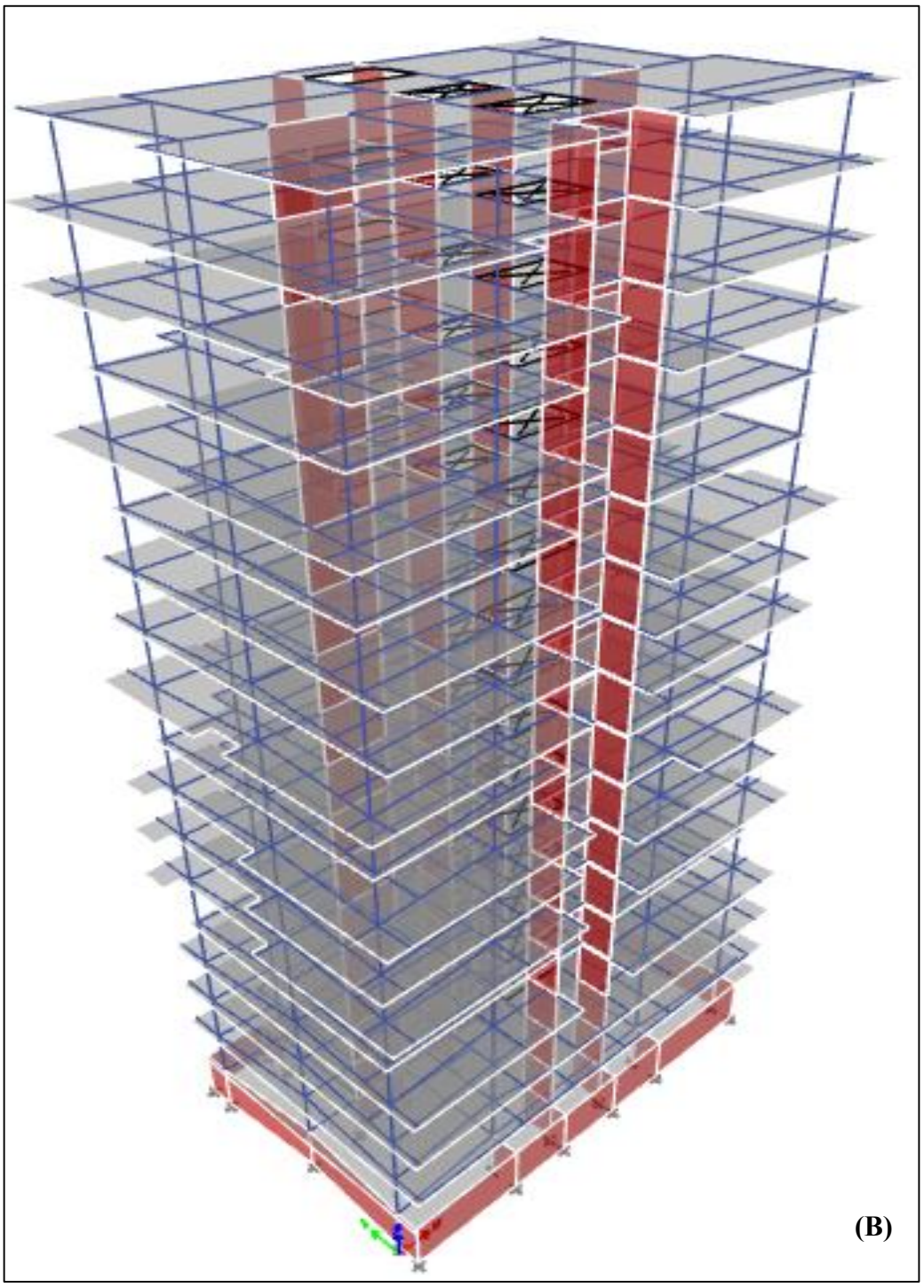
Bu araştırma için, Türkiye'nin Bursa ilinde inşa edildiği kabul edilen 15 katlı bir betonarme yapı örnek bina olarak seçilmiştir. Bina, Türk Standardı TS500-2000'e göre tasarlanmıştır. Depreme dayanıklı bir yapı oluşturulması amacıyla, Türk Bina Deprem Yönetmeliği TBDY 2018'de belirtilen koşullar dikkate alınmıştır. Yapının her katı farklı bir plan görünümüne sahiptir, üçüncü katın plan görünümü Şekil 3.1'de, binanın üç boyutlu görünümü ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Çalışmanın amacı, Türk Bina Deprem Yönetmeliği TBDY 2018, Amerikan standardı ASCE 41-17 ve Eurocode (EC8) standartlarında belirtilen performans değerlendirme prosedürlerini karşılaştırmalı olarak irdelemektir.



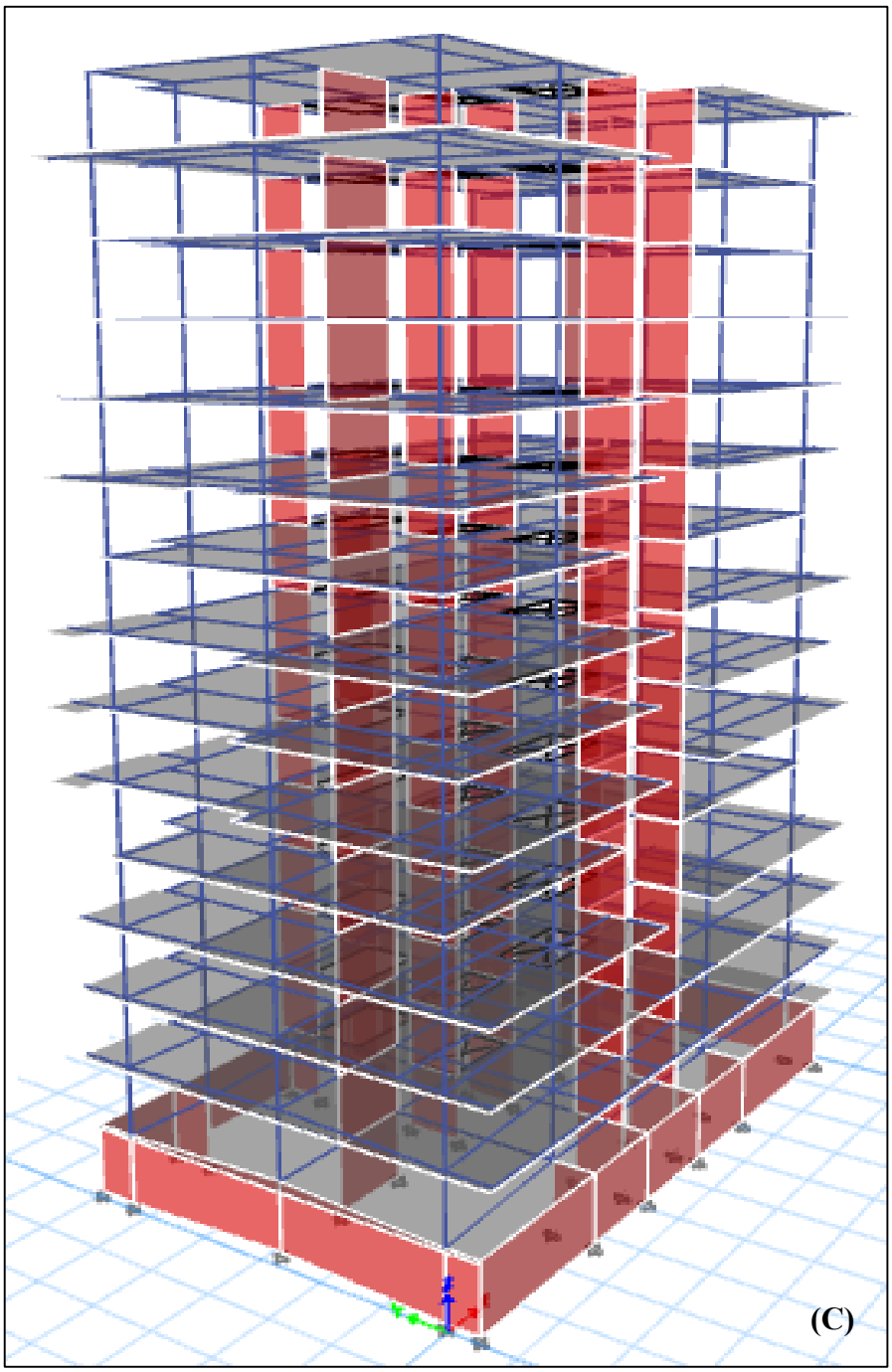
Şekil 3.1. Üçüncü katın plan görünümü



Şekil 3.2. (A), (B), ve (C) Üç boyutlu görünümü



Şekil 3.2. (A), (B), ve (C) Üç boyutlu görünümü (devam)



Şekil 3.2. (A), (B), ve (C) Üç boyutlu görünümü (devam)

3.2. İncelenen Binanın Tasarım Parametreleri

Bu bölüm, incelenen binanın genel tasarım parametrelerini sunmaktadır. Binanın taşıyıcı elemanları, TS500-2000 ve TBDY 2018'e göre dayanım esaslı tasarım yaklaşımı kullanılarak boyutlandırılmıştır. Proje olarak deprem hesaplamaları, mod birleştirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Betonarme tasarımı STA4-CAD yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Kat yüksekliği 2.8 metredir. Yatay taşıyıcı sistem, betonarme çerçeveden oluşmaktadır. Binanın önem katsayısı (I) 1, bina kullanım sınıfı (BKS) 3 ve bina yükseklik sınıfı (BYS) 4 olarak belirlenmiştir.

3.2.1. Malzeme Özellikleri

Beton sınıfı C35 olup, karakteristik silindir basınç dayanımı (f_{ck}) 35 MPa, karakteristik küp basınç dayanımı ise 45 MPa'dır. Karakteristik beton çekme dayanımı (f_{ctk}) 2.1 MPa, elastisite modülü (E) ise 28 günlük 33200 MPa'dır.

Donatı çeliği S420 sınıfında olup, akma dayanımı 420 MPa, nihai çekme dayanımı ise 550 MPa'dır. Nihai çekme dayanımındaki gerilme (%ε_{su}) ise %10'dur.

3.2.2. Yapı Alanının Sismik ve Geoteknik Özellikleri

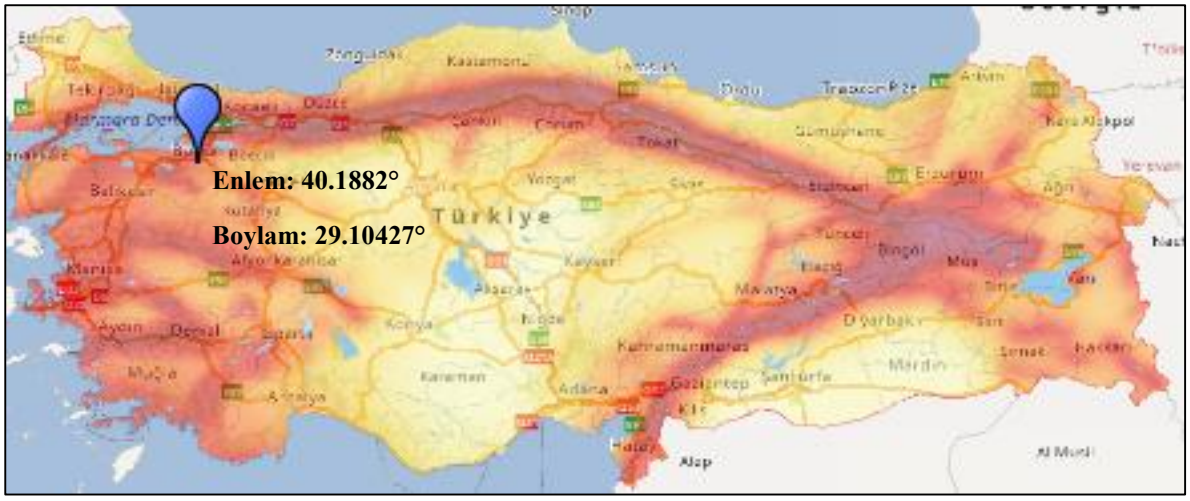
Binanın, Bursa'da 40.1882° enlem ve 29.10427° boylamda yer aldığı kabul edilmektedir. Sismik tehlike değerlendirmesi, 50 yıl içinde %10 aşılma olasılığına dayanmaktadır ki bu, 475 yıllık bir tekrarlanma periyoduna (DD-2) karşılık gelmektedir.

Zeminin sismik sınıflandırması, 30 metre derinlikteki ortalama kayma dalgası hızı (Vs_{30}) 180-360 m/s arasında olan ve Standart Penetrasyon Direnci (NSPT) 15-50 darbe/30 cm olan ZD (Orta sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları) olarak belirlenmiştir. Üniformluk katsayısı (c_u) 70-250 kPa arasındadır. Tüm parametreler Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Deprem tasarım sınıfı (DTS) 1 olarak tanımlanmıştır.

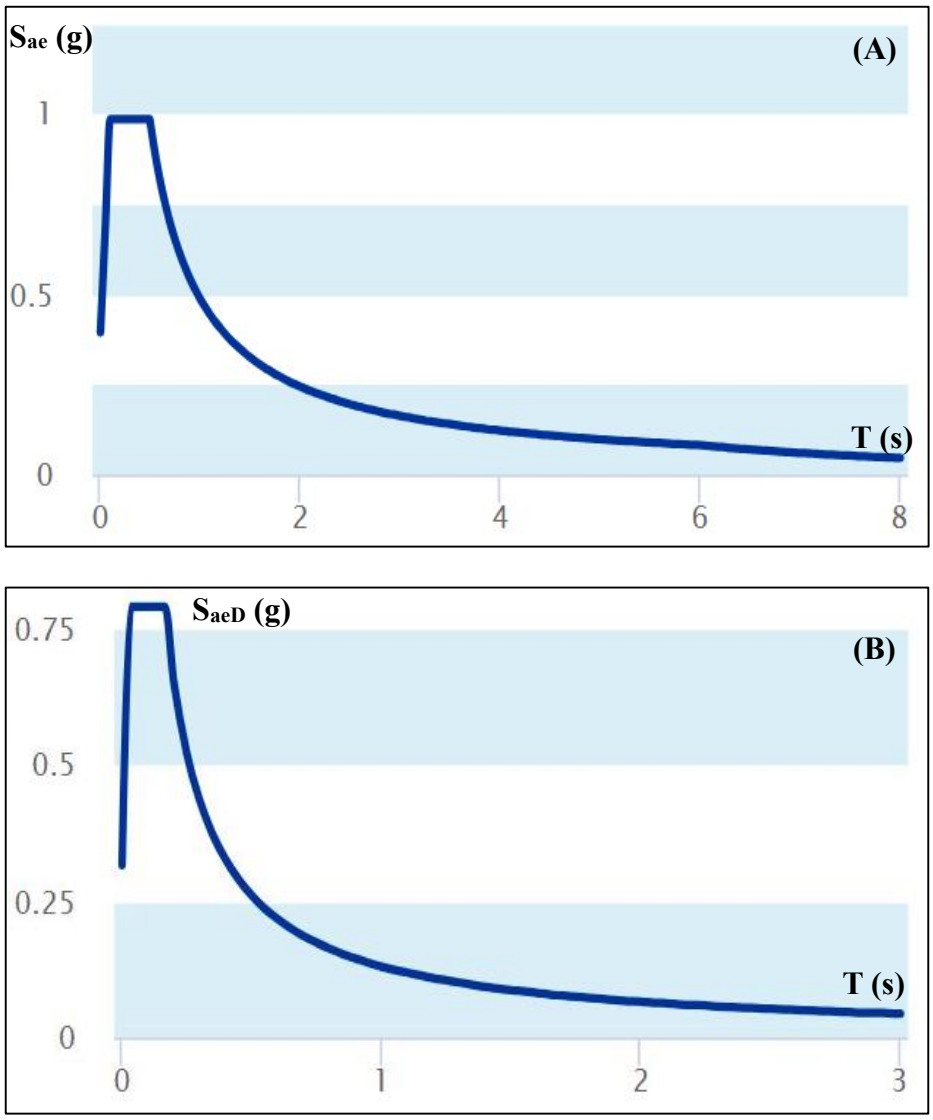
Çizelge 3.1. Yapı mevkiinin deprem parametreleri

	DD-2
SS	0.847
S1	0.226
PGA	0.353 (g)
PGV	21.6 (cm/sn)
F_S	1.161
F_1	2.148
S_{DS}	0.984
S_{D1}	0.485
T_A	0.099 (s)
T_B	0.494 (s)
T_L	6 (s)

Yapının bulunduğu bölgenin depremselliği, Şekil 3.3'de gösterilen Türkiye Deprem Tehlike Haritası kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere dayanarak, DD-2 deprem yer hareketi seviyesi için spektrumlar Şekil 3.4'te grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 3.3. Türkiye Deprem Tehlike Haritası



Şekil 3.4. ZD zemin sınıfı ve DD-2 için elastik tasarım spektrumları
A) Yatay elastik tasarım spektrumu **B)** Düşey elastik tasarım spektrumu

3.2.3. Yapı Modellemesinde Dikkate Alınan Yükler

Performans analizinde, 6 kN/m² sabit yük ve 2 kN/m² hareketli yük dikkate alınmıştır. Sabit yük, yapısal elemanların kendi ağırlığını ve kalıcı kaplamaları hesaba katarken, hareketli yük, kullanım ve işlev değişikliklerinden kaynaklanan değişken yükleri temsil etmektedir.
Bu yükler, yapısal performansın belirlenmesinde ve ilgili tasarım standartlarına uygunluğun sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

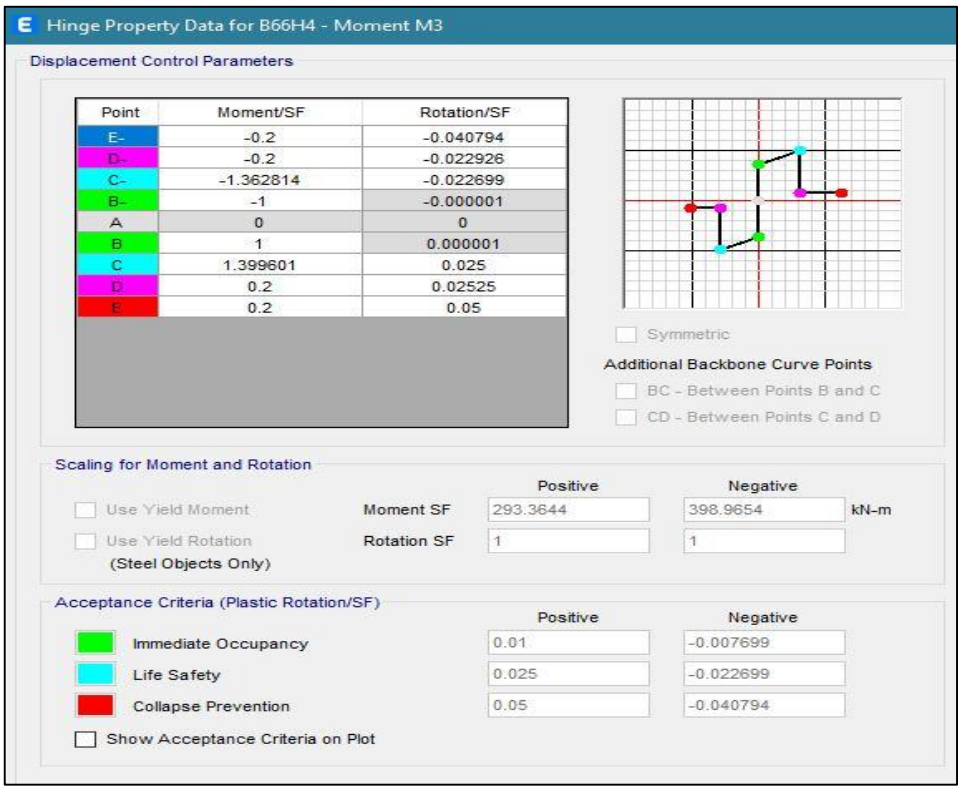
3.3. Performans Analizi

Yapının sismik performansını analiz etmek için, yaygın olarak kullanılan bir yapısal analiz ve tasarım aracı olan ETABS yazılımı, yapının davranışını modellemek ve değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. TBDY 2018'e uygun olarak plastik mafsal özelliklerini tanımlamak için XTRACT yazılımı, detaylı kesit analizi, moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenmesi ve plastik mafsalların konum ve özelliklerinin tanımlanmasında kullanılmıştır.

Modellemede kirişler ve kolonlar çubuk elemanlar olarak temsil edilmiş, plastik (elastik olmayan) deformasyonların plastik mafsalların oluştuğu uçlarda meydana geldiği varsayılmıştır. Ayrıca, kiriş-kolon birleşim bölgeleri rijit olarak kabul edilmiş ve boyutları, kiriş derinlikleri ve kolon genişliklerine göre tanımlanmıştır. Kolonların temel seviyesinde sabitlendiği varsayılmıştır. Bu modelleme yaklaşımı, yapının sismik yükleme altındaki doğrusal olmayan davranışını gerçekçi bir şekilde temsil etmektedir.

3.3.1. ASCE 41-17'ye Göre Kesitsel Moment-Eğrilik Davranışı

ASCE 41-17'ye göre modellenen plastik bir mafsalın kesitsel moment-eğrilik davranışı, bir yapısal elemanın (örneğin, bir kirişin [M3] veya kolonun [P-M2-M3]), bir deprem ya da diğer aşırı yükleme durumlarında plastik deformasyona uğraması sırasında, moment (eğilme kuvveti) ve eğrilik (birim uzunluk başına dönme) arasındaki ilişkiyi ifade eder. ASCE 41-17, bu plastik mafsalların davranışlarını modellemek için kılavuzlar sağlar ve ETABS yazılımı, yapısal elemanların doğrusal olmayan tepkisini simüle etmek için bu kılavuzları kullanır. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, plastik mafsallar ETABS'ta otomatik olarak tanımlanabilir ve ASCE 41-17 önerileri dikkate alınır. Bu sayede, ETABS, kiriş ve kolonların sismik yükleme altındaki hem elastik hem de plastik davranışlarını dikkate alarak doğrusal olmayan tepkilerini simüle edebilir.



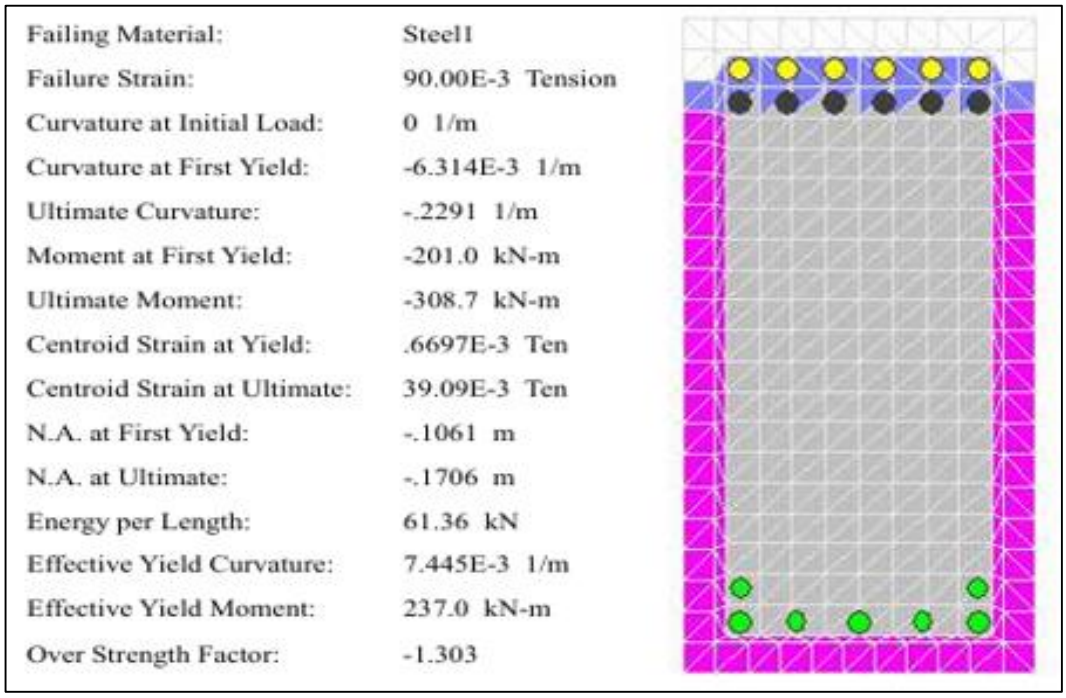
Şekil 3.5. Kiriş 66 için ASCE 41-17'ye göre M3 plastik mafsal özellik verisi

3.3.2. EC8'e Göre Kesitsel Moment-Eğrilik Davranışı

Eurocode 8 (EC8)'e göre, plastik mafsalın kesitsel moment-eğrilik davranışı, genellikle bir kiriş veya kolonun, sismik yükleme altında hem elastik hem de plastik deformasyonları dikkate alarak etkiye nasıl tepki verdiğini ifade eder. Eurocode 8, depremlerden etkilenen yapıların doğrusal olmayan davranışlarını modellemek için yönergeler sağlar ve özellikle yapının plastik deformasyona uğradıkça plastik mafsalların gelişimini ele alır. ETABS yazılımında, Eurocode 8'e dayalı kesitsel moment-eğrilik davranışı, ASCE 41-17 standartlarına benzer şekilde uygulanmakla birlikte, plastik mafsal özelliklerini tanımlamak için EC8 tasarım yönergeleri ve formüllerine uygun parametreler kullanılır.

3.3.3. TBDY 2018'e Göre Kesitsel Moment-Eğrilik Davranışı

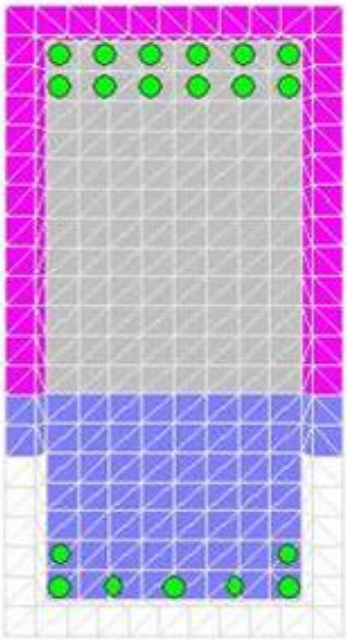
Doğrusal olmayan modellerde, plastik mafsallar kiriş ve kolonların uçlarına atanmıştır. Kolon uçları için eksenel kuvvet etkilerini hesaba katan (P-M2-M3) mafsal tipi kullanılır (Şekil 3.6), kiriş uçları için ise ETABS'da mevcut olan (M3) plastik mafsal tipi uygulanır (Şekil 3.7). Kiriş ve kolon kesitlerinin moment-eğrilik ilişkileri, TBDY 2018'e uygun şekilde sargılı ve sargısız beton modelleri için beton ve çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini içeren XTRACT yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Örnek kiriş kesiti 66'ya ait XTRACT analiz sonuçları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de sunulmuştur. Ardından, kirişlerin plastik dönmeleri TBDY 2018 standardına uygun olarak hesaplanmış ve Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Elde edilen değerlerin grafiksel gösterimi ise Şekil 3.9'da verilmiştir. TBDY 2018'e göre, plastik mafsal uzunluğu (Lp), kesit yüksekliğinin yarısı olarak alınır (Lp = 0.5h).



Failing Material:	Steel1
Failure Strain:	90.00E-3 Tension
Curvature at Initial Load:	0 1/m
Curvature at First Yield:	-6.314E-3 1/m
Ultimate Curvature:	-.2291 1/m
Moment at First Yield:	-201.0 kN-m
Ultimate Moment:	-308.7 kN-m
Centroid Strain at Yield:	.6697E-3 Ten
Centroid Strain at Ultimate:	39.09E-3 Ten
N.A. at First Yield:	-.1061 m
N.A. at Ultimate:	-.1706 m
Energy per Length:	61.36 kN
Effective Yield Curvature:	7.445E-3 1/m
Effective Yield Moment:	237.0 kN-m
Over Strength Factor:	-1.303

Şekil 3.6. Kiriş Kesiti 66'nın pozitif moment altındaki XTRACT analiz sonuçları

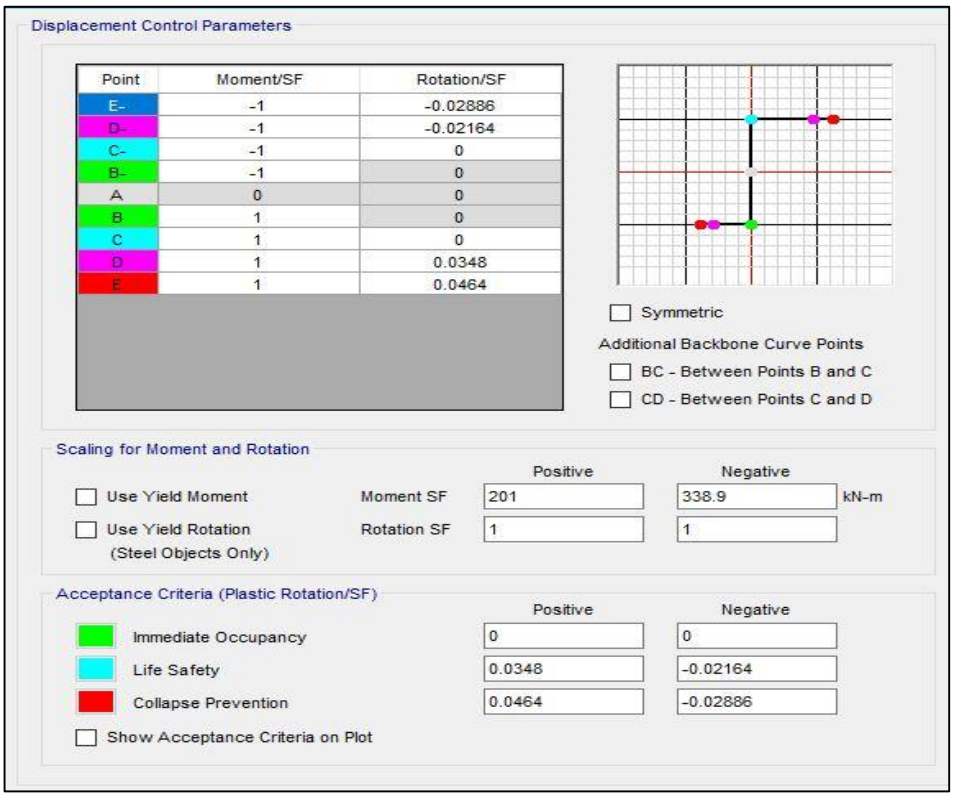
Failing Material:	Confined1
Failure Strain:	20.00E-3 Compression
Curvature at Initial Load:	0 1/m
Curvature at First Yield:	7.359E-3 1/m
Ultimate Curvature:	.1337 1/m
Moment at First Yield:	338.9 kN-m
Ultimate Moment:	462.3 kN-m
Centroid Strain at Yield:	.4664E-3 Ten
Centroid Strain at Ultimate:	10.03E-3 Ten
N.A. at First Yield:	63.37E-3 m
N.A. at Ultimate:	74.99E-3 m
Energy per Length:	54.92 kN
Effective Yield Curvature:	8.428E-3 1/m
Effective Yield Moment:	388.1 kN-m
Over Strength Factor:	1.191



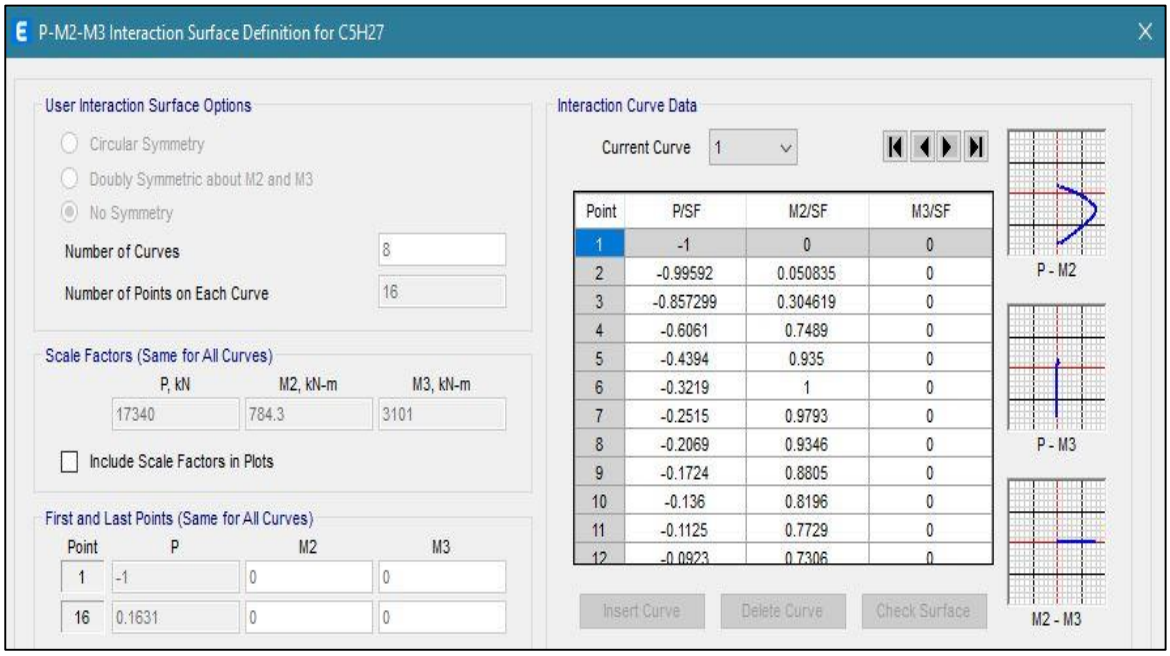
Şekil 3.7. Kiriş Kesiti 66'nın negatif moment altındaki XTRACT analiz sonuçları

Kiriş kesiti	sınıf	Donat	L	t3	t2	Alan	X		Y		$\theta_p^{GÖX}$	$\theta_p^{GÖY}$	θ_p^{KHX}	θ_p^{KHY}	θ_p^{SHX}	θ_p^{SHY}	İlk akma anındaki moment (pozitif)	İlk akma anındaki moment (Negatif)
			m	m	m	m2	φu	φy	φu	φy								
1	C35/42	0.014	3.5	0.5	0.25	0.125	0.2186	0.00579	0.2186	0.005794	0.04212	-0.04212	0.03159	-0.03159	0.00000	0.00000	80.86	80.86
2	C35/42	0.014	3.5	0.5	0.25	0.125	0.2203	0.00599	0.2203	0.005992	0.04242	-0.04242	0.03181	-0.03181	0.00000	0.00000	106.6	106.6
3	C35/42	0.014	5.5	0.5	0.25	0.125	0.2173	0.0057	0.2398	0.006279	0.04279	-0.04722	0.03209	-0.03542	0.00000	0.00000	80.34	131.7
4	C35/42	0.014	5	0.5	0.25	0.125	0.2163	0.0055	0.2321	0.006083	0.04246	-0.04553	0.03185	-0.03415	0.00000	0.00000	54.86	105.6
5	C35/42	0.014	5.5	0.5	0.25	0.125	0.2157	0.00543	0.2584	0.006563	0.04251	-0.05092	0.03188	-0.03819	0.00000	0.00000	54.22	155.2
64	C35/42	0.016	5.5	0.5	0.25	0.125	0.2309	0.00655	0.1961	0.007418	0.04678	-0.03943	0.03508	-0.02957	0.00000	0.00000	221.4	308.2
65	C35/42	0.016	3	0.5	0.25	0.125	0.2471	0.00663	0.2179	0.005944	0.04860	-0.04284	0.03645	-0.03213	0.00000	0.00000	180.8	115.3
66	C35/42	0.016	5.5	0.5	0.25	0.125	0.2289	0.00631	0.145	0.007359	0.04640	-0.02886	0.03480	-0.02164	0.00000	0.00000	201	338.9
67	C35/42	0.016	2	0.5	0.25	0.125	0.2341	0.0065	0.2299	0.006398	0.04443	-0.04363	0.03332	-0.03272	0.00000	0.00000	182.1	172.4
68	C35/42	0.016	2	0.5	0.25	0.125	0.2417	0.00665	0.2279	0.006432	0.04588	-0.04324	0.03441	-0.03243	0.00000	0.00000	205.2	183
69	C35/42	0.016	5.5	0.5	0.25	0.125	0.2289	0.00631	0.2556	0.006964	0.04640	-0.05182	0.03480	-0.03887	0.00000	0.00000	172.5	236.2
115	C35/42	0.014	5.5	0.4	0.32	0.128	0.3816	0.00999	0.2741	0.01247	0.06377	-0.04513	0.04783	-0.03385	0.00000	0.00000	79.14	176.5
116	C35/42	0.014	5.5	0.4	0.32	0.128	0.3833	0.01031	0.3303	0.01252	0.06402	-0.05470	0.04802	-0.04103	0.00000	0.00000	94.2	172.7
117	C35/42	0.014	6	0.4	0.32	0.128	0.3797	0.00998	0.3355	0.01241	0.06360	-0.05573	0.04770	-0.04180	0.00000	0.00000	78.69	164.9
118	C35/42	0.014	6	0.4	0.32	0.128	0.3805	0.01008	0.4009	0.01181	0.06372	-0.06699	0.04779	-0.05024	0.00000	0.00000	79.45	141.5
119	C35/42	0.014	0.8	0.4	0.32	0.128	0.3785	0.00969	0.2815	0.0127	0.05278	-0.03870	0.03958	-0.02903	0.00000	0.00000	64.09	169.2
120	C35/42	0.014	1.4	0.45	0.32	0.144	0.3832	0.00984	0.3832	0.009839	0.06310	-0.06310	0.04732	-0.04732	0.00000	0.00000	64.11	64.11

Şekil 3.8. TBDY 2018'e göre kiriş kesiti 66'nın plastik dönme hesabı

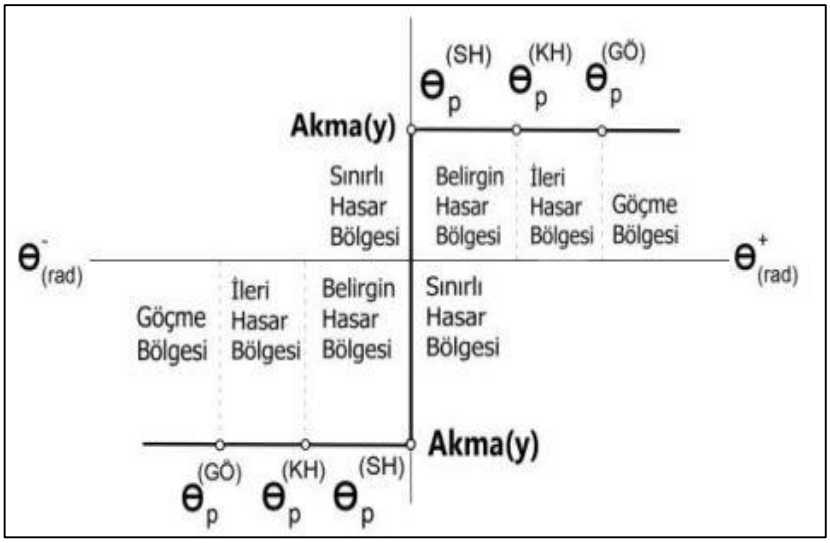


Şekil 3.9. Kiriş 66 için TBDY 2018'e göre M3 plastik mafsal özellik verisi

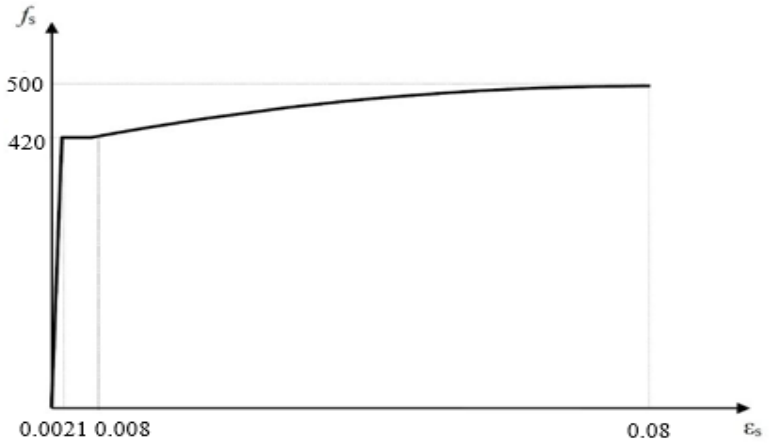


Şekil 3.10. Kolon C05 için TBDY 2018'e göre P-M2-M3 plastik mafsal özellik verisi

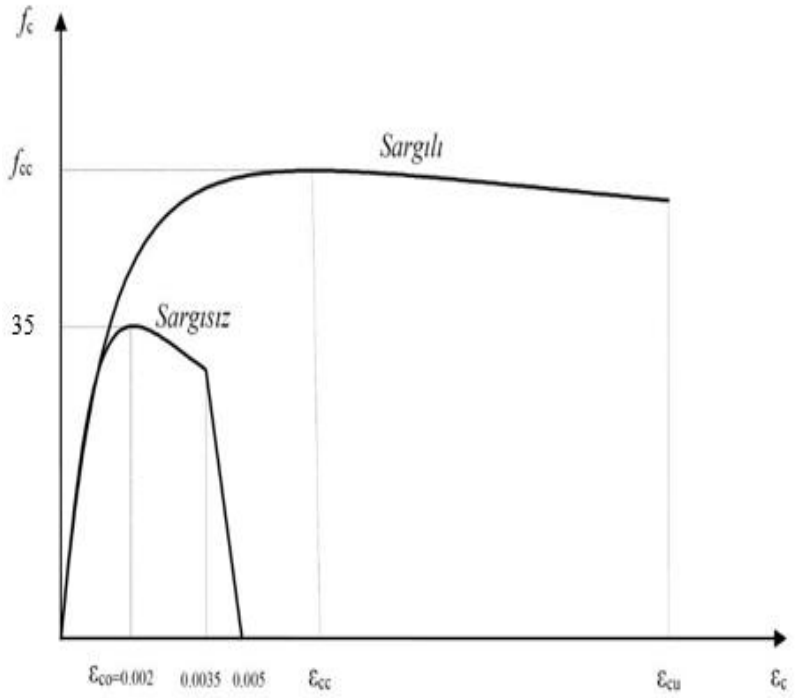
Şekil 3.11'de gösterildiği gibi, plastik mafsal davranışı elasto-plastik olarak idealize edilmiştir, ve Şekil 3.12, TBDY 2018'e göre çelik donatının gerilme-şekil değiştirme ilişkisini grafiksel olarak göstermektedir. Şekil 3.13 ise sargılı ve sargısız beton malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini göstermektedir.



Şekil 3.11. Plastik mafsalın elastoplastik davranışı (TBDY 2018)



Şekil 3.12. Donatı çeliği için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları (TBDY 2018)



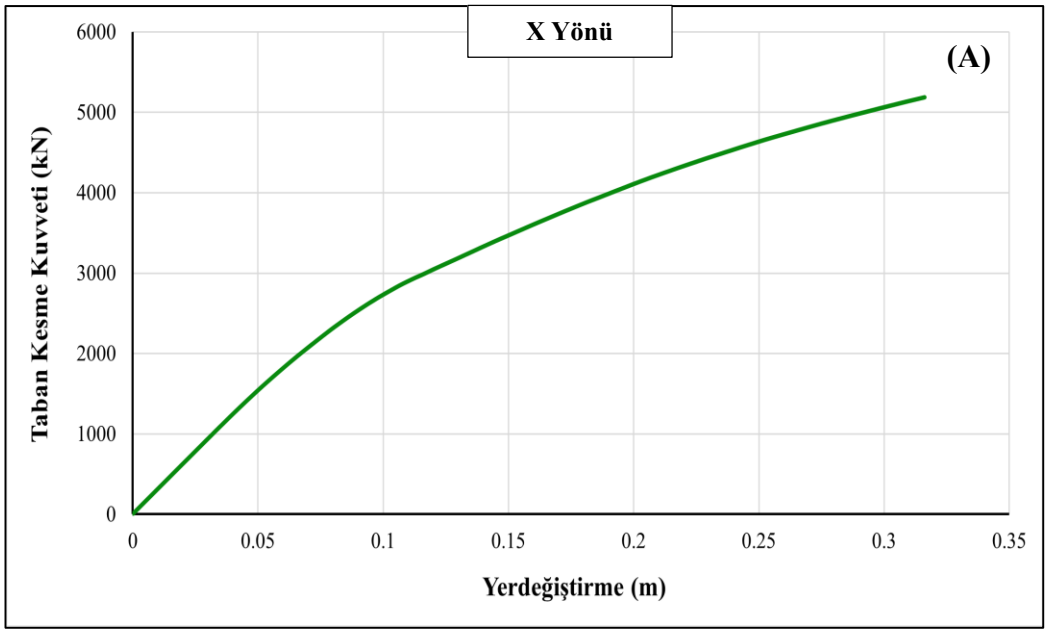
Şekil 3.13. Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları (TBDY 2018)

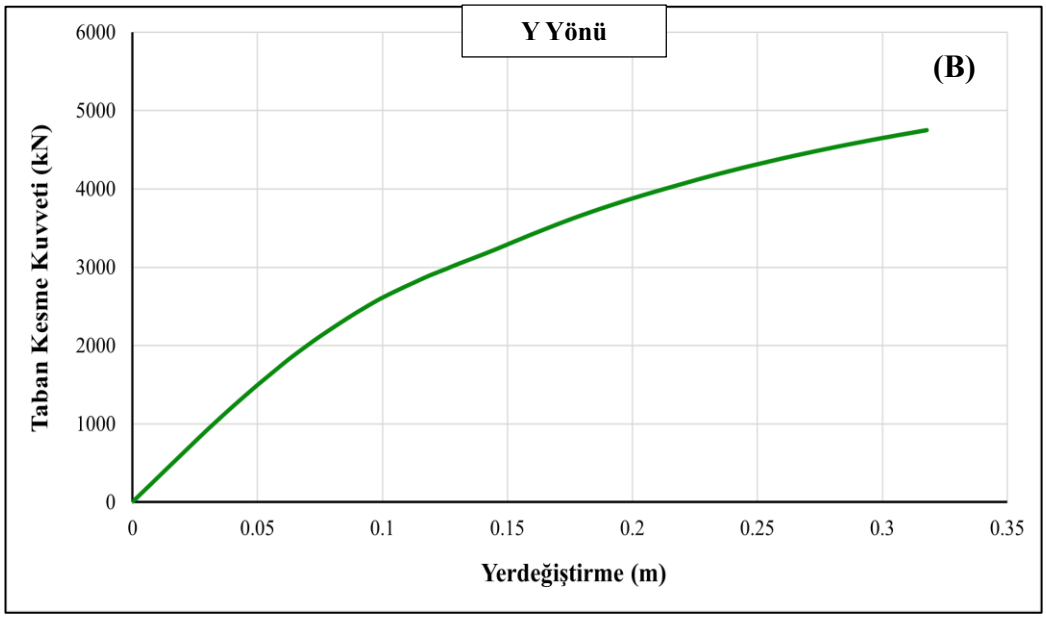
3.3.4. Performans Noktasının Belirlenmesi

Performans noktası, bir yapının kapasitesini temsil eden kapasite eğrisinin, deprem yüklemesi altındaki talebi temsil eden tepki spektrumu veya yer değiştirme spektrumu ile kesiştiği noktadır. Kapasite eğrisi, bir yapının belirli bir depreme karşı maksimum tepkisini temsil eder ve yatay kuvvet (veya moment) ile yer değiştirme arasındaki ilişkiyi gösterir. Sismik talep, bir yapının bir deprem sırasında maruz kalması beklenen kuvvetleri ve yer değiştirmeleri temsil eder. İki eğrinin kesişim noktası, bir yapının deprem sırasında beklenen maksimum yer değiştirmesi ve maruz kalacağı maksimum yatay kuvvet hakkında bilgi sağlar. Performans noktası, yapının elastik sınırları içinde kalıp kalmayacağını veya doğrusal olmayan deformasyon yaşayıp yaşamayacağını değerlendirmek için kullanılır. Yapı doğrusal olmayan davranış sergilerse, performans noktası hasar derecesini belirlemeye yardımcı olur.

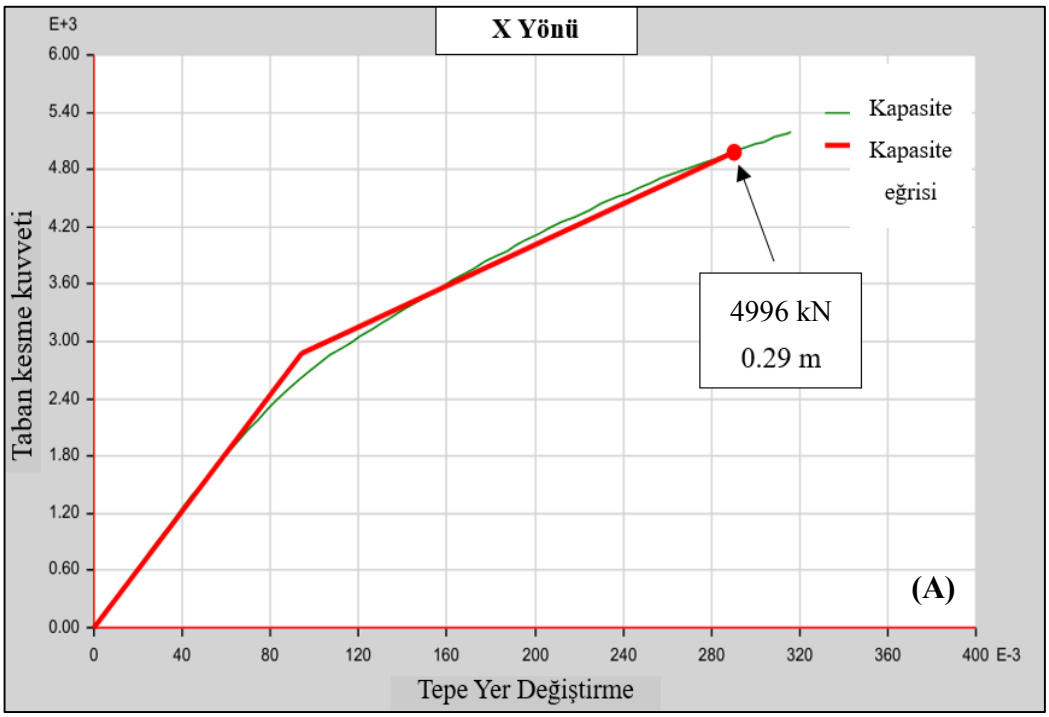
3.3.4.1. ASCE 41-17 İçin Performans Noktası

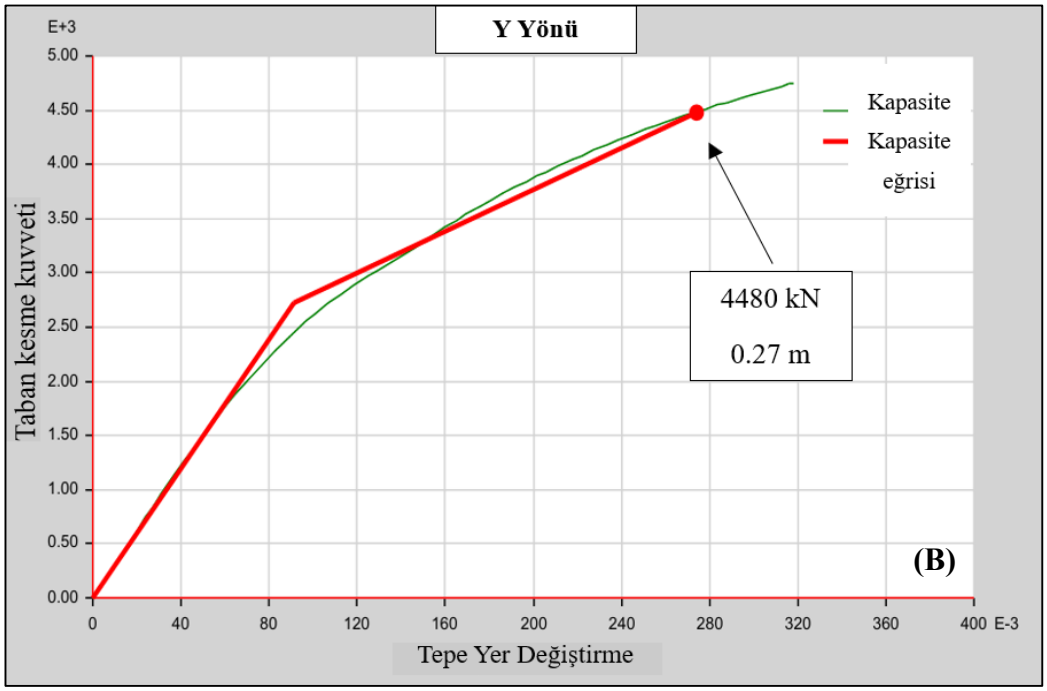
Modelin X ve Y doğrultularındaki, statik itme eğrileri ve performans noktası belirlemeleri, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 sunulmuştur.





Şekil 3.14. ASCE 41-17'ye göre statik itme eğrisi. **A)** X yönü **B)** Y yönü

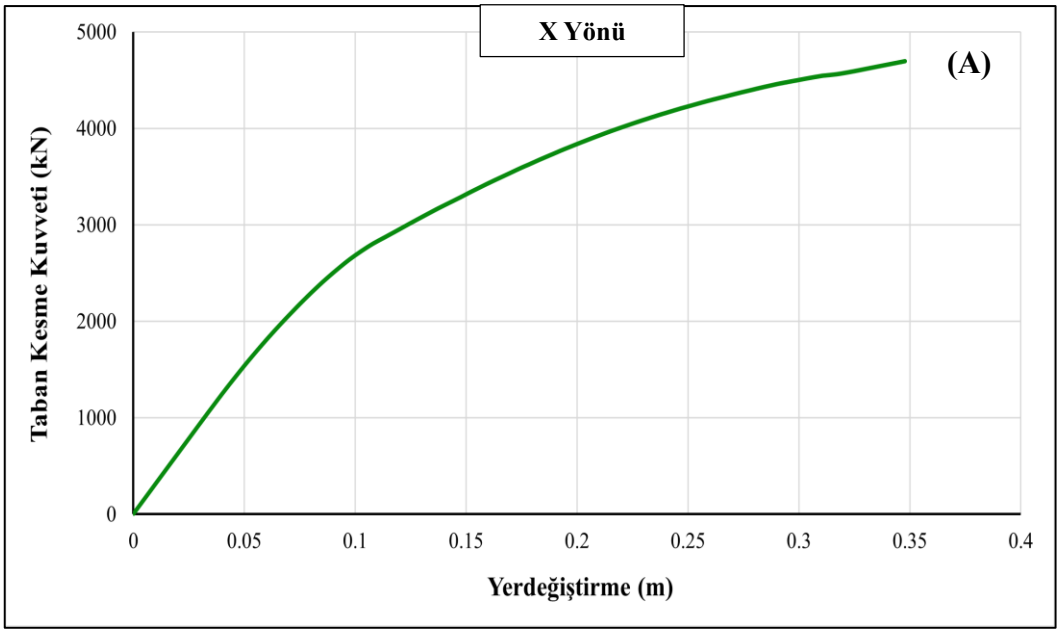


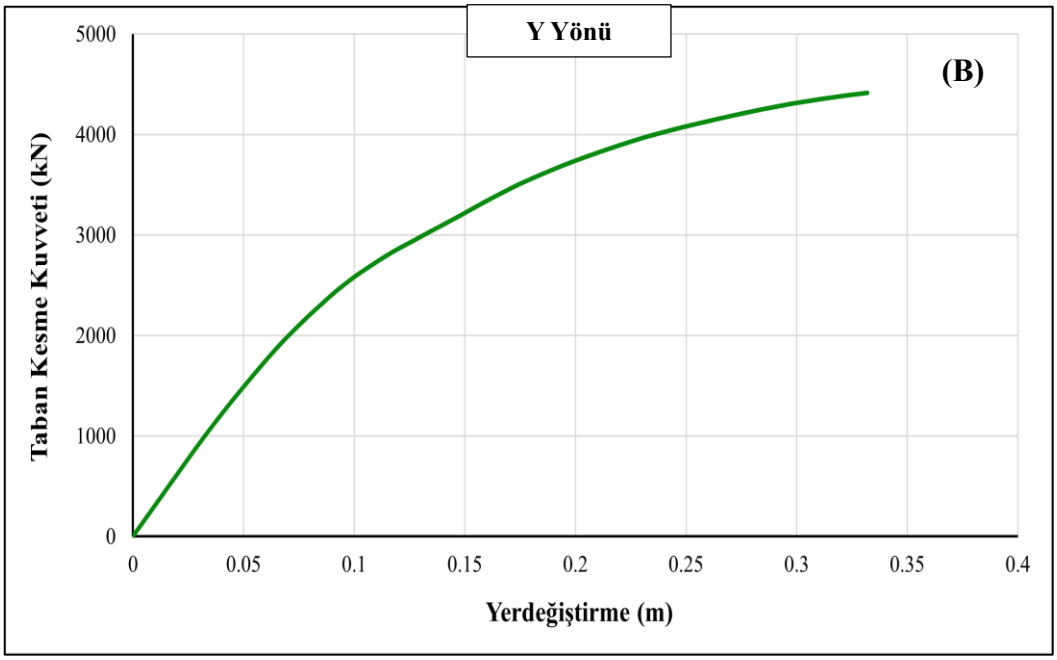


Şekil 3.15. ASCE 41-17'ye göre performans noktası. **A)** X yönü **B)** Y yönü

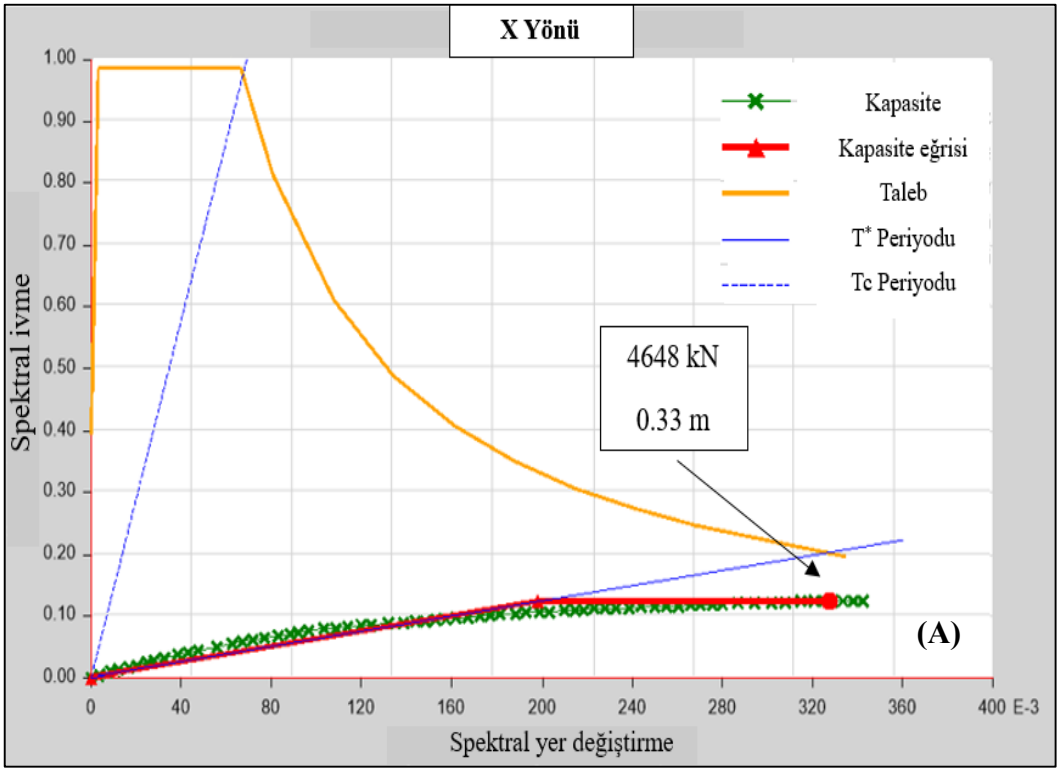
3.3.4.2. EC8 İçin Performans Noktası

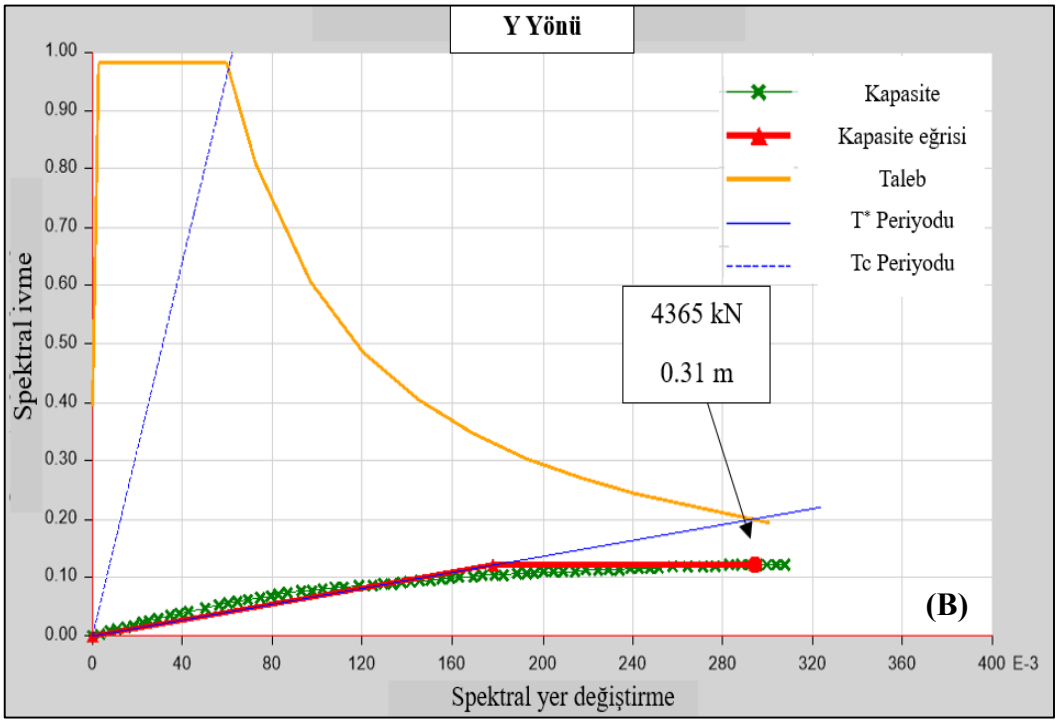
Modelin X ve Y doğrultularındaki, statik itme eğrileri ve performans noktası belirlemeleri, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 sunulmuştur.





Şekil 3.16. EC8'e göre statik itme eğrisi. **A)** X yönü **B)** Y yönü

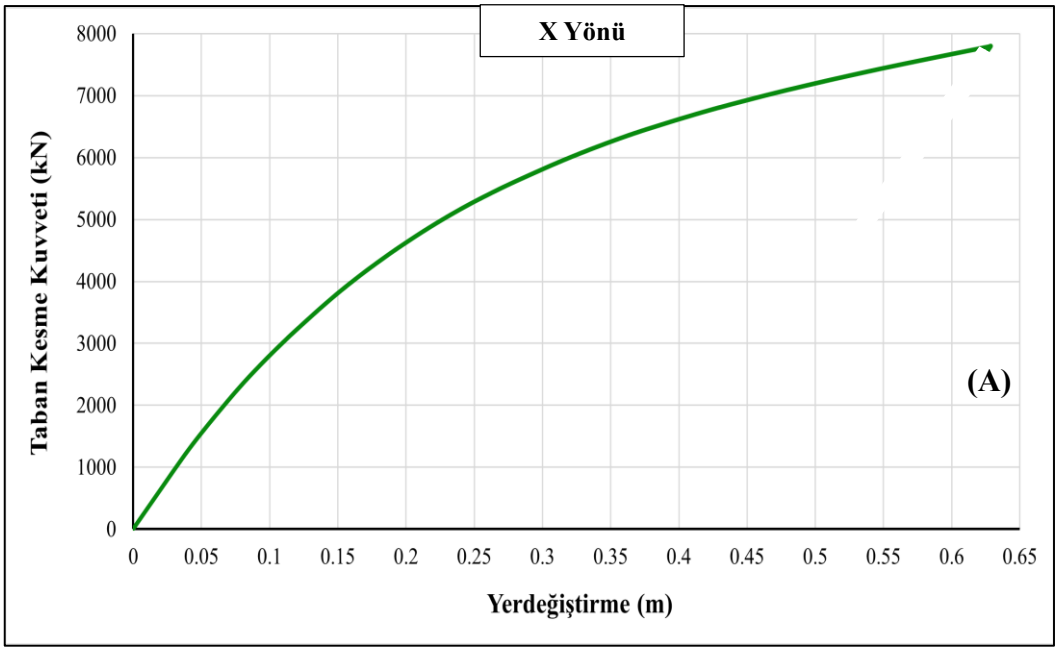


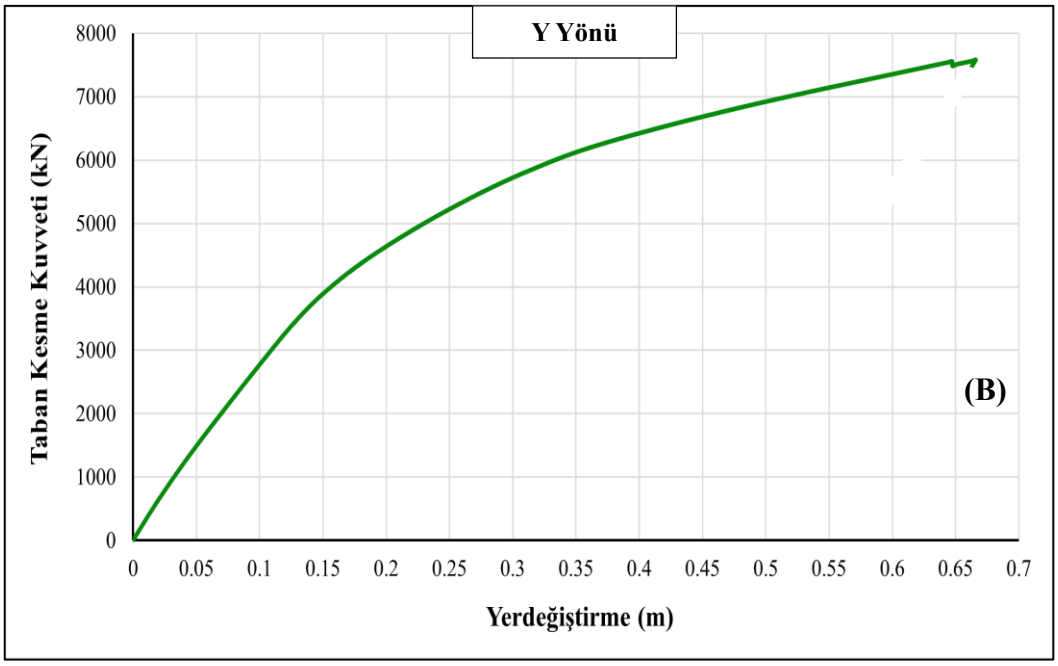


Şekil 3.17. EC8'e göre performans noktası. **A)** X yönü **B)** Y yönü

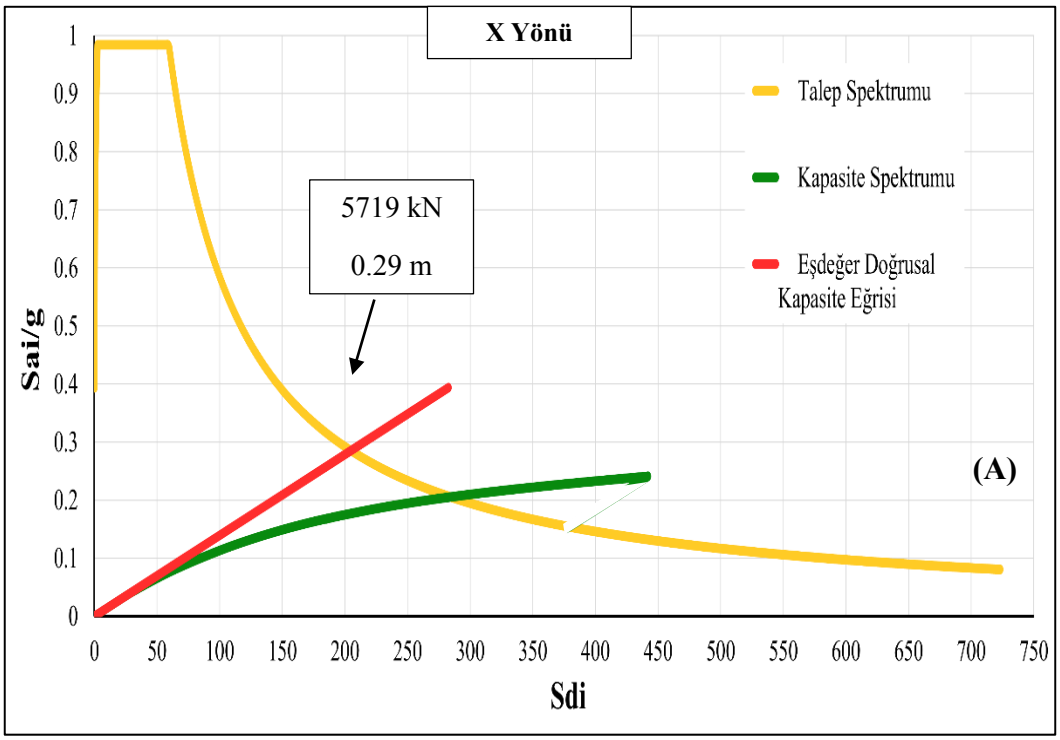
3.3.4.3. TBDY 2018 İçin Performans Noktası

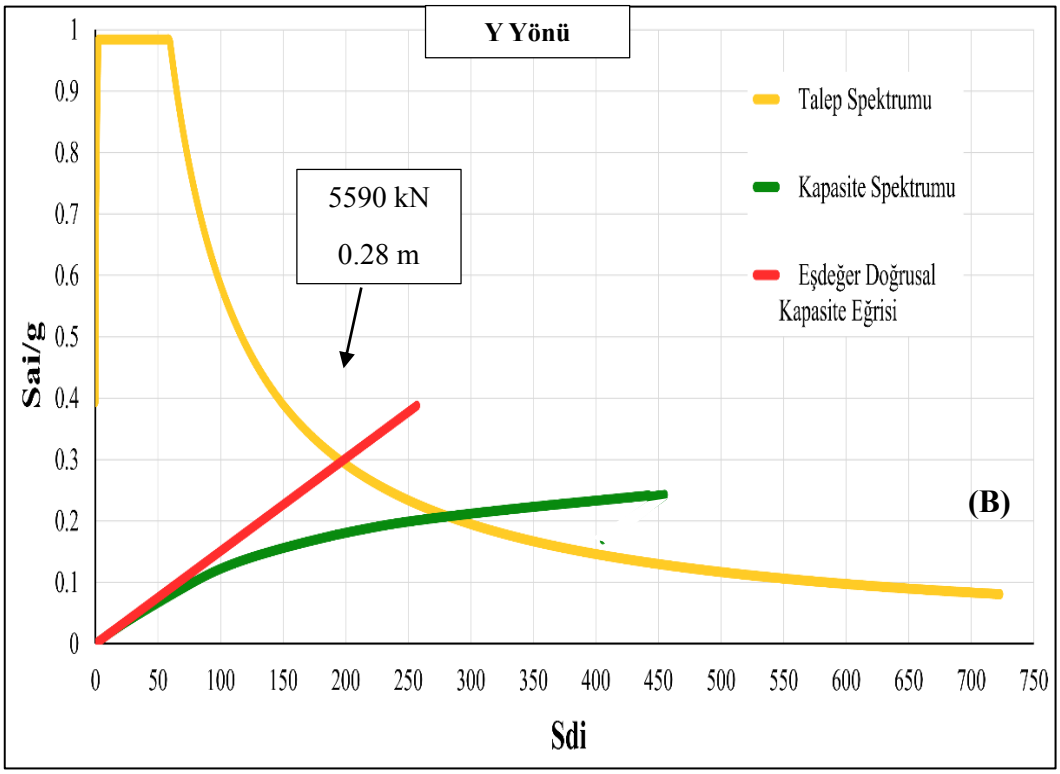
Modelin X ve Y doğrultularındaki, statik itme eğrileri ve performans noktası belirlemeleri, Şekil 3.18ve Şekil 3.19 sunulmuştur.





Şekil 3.18. TBDY 2018'e göre statik itme eğrisi. **A)** X yönü **B)** Y yönü





Şekil 3.19. TBDY 2018'e göre performans noktası. **A)** X yönü **B)** Y yönü

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, örnek yapı üzerinde ASCE 41-17, TBDY 2018 ve Eurocode 8 yönetmeliklerine göre gerçekleştirilen sismik performans analizinin sonuçları sunulmaktadır. Analiz sonuçları; X ve Y doğrultularındaki yer değiştirme, kat ötelemesi ve tepe deplasman taleplerini içermektedir. Ayrıca, her bir yönetmelik tarafından tanımlanan hasar sınırları belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Öncelikle, her bir yönetmeliğe ait sonuçlar ayrı ayrı sunularak, performans kriterleri ve yapısal tepkiler yönetmelik bazında ortaya konmuştur. Daha sonra, yapının üç farklı yönetmelik/standarda göre performansının bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyan karşılaştırmalı bir özet verilmiştir.

4.1. Deplasman Grafiği

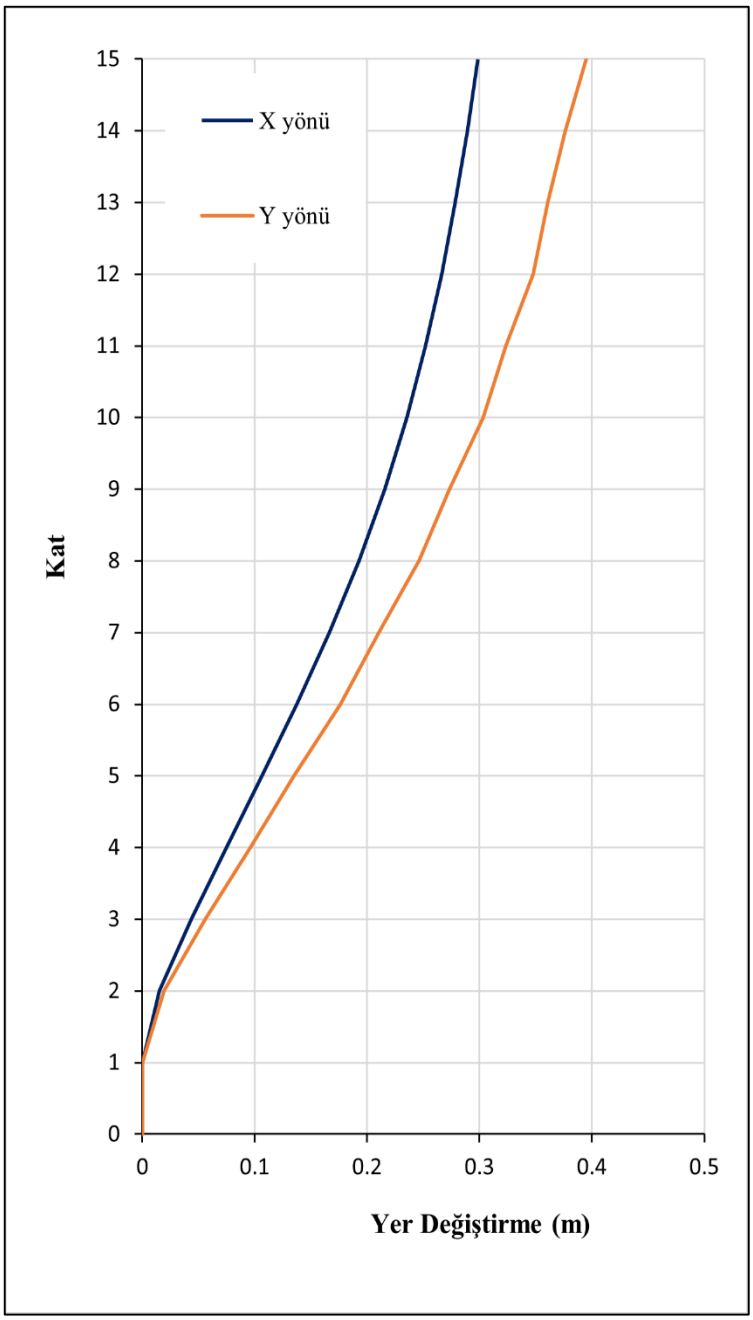
Bu grafiklerde, Y ekseni kat seviyesini, X ekseni ise her kat için karşılık gelen maksimum deplasmanı metre cinsinden göstermektedir.

4.1.1. ASCE 41-17 Analizi İçin Deplasman Grafiği

Çizelge 4.1'de ayrıntılı olarak verildiği ve Şekil 4.1'de gösterildiği üzere, Y yönündeki deplasmanın X yönündeki deplasmana göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1. ASCE 41-17 deplasman değerleri

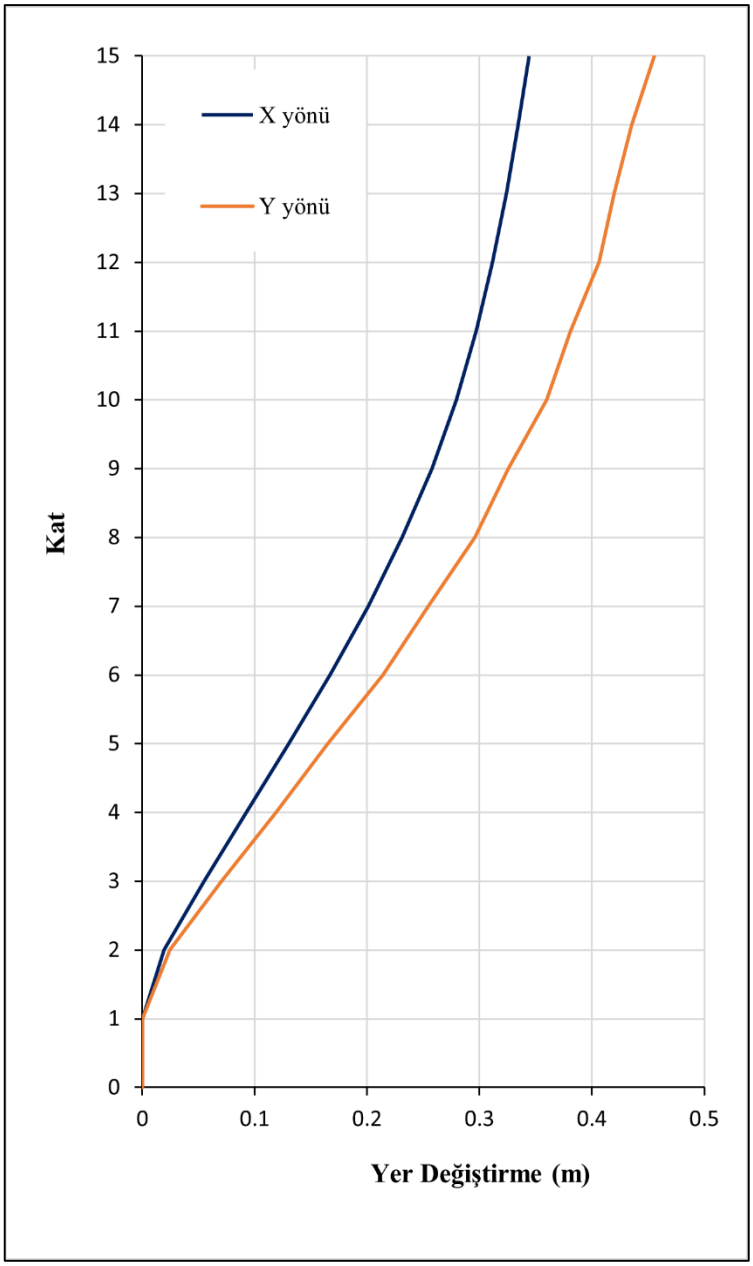
Kat	X yönü (m)	Y yönü (m)	Kat	X yönü (m)	Y yönü (m)
1	0.0003	0.0002	9	0.2158	0.2729
2	0.0153	0.0192	10	0.2355	0.3033
3	0.0438	0.0561	11	0.2521	0.3234
4	0.0748	0.0959	12	0.2663	0.3476
5	0.1064	0.1348	13	0.2785	0.3609
6	0.1374	0.1762	14	0.2890	0.3762
7	0.1665	0.2106	15	0.2983	0.3949
8	0.1927	0.2463	9	0.2158	0.2729



Şekil 4.1. ASCE 41-17 deplasman grafiği

4.1.2. EC8 Analizi İçin Deplasman Grafiği

Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2, Eurocode 8'e göre değerlendirilen binanın yer değiştirme tepkisini göstermektedir.



Şekil 4.2. EC8 deplasman grafiği

Çizelge 4.2. EC8 deplasman değerleri

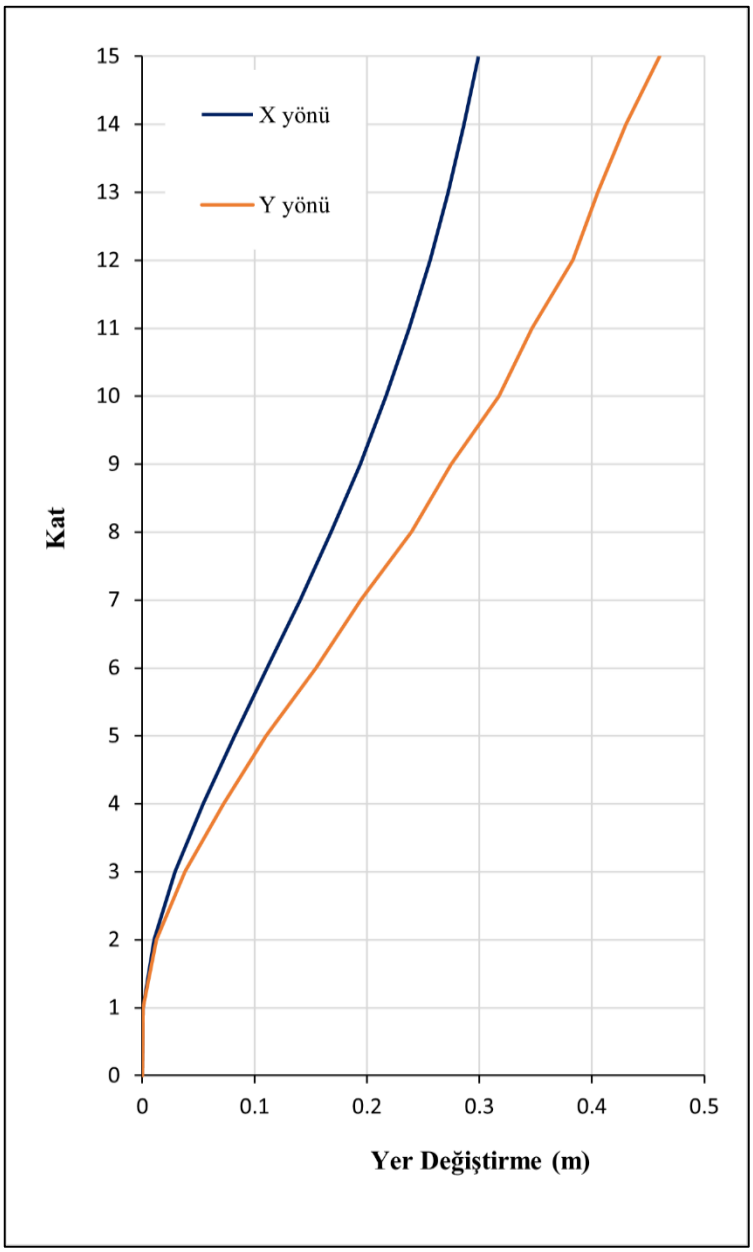
Kat	X yönü (m)	Y yönü (m)
1	0.0003	0.0002
2	0.0193	0.0242
3	0.0550	0.0704
4	0.0925	0.1187
5	0.1303	0.1650
6	0.1670	0.2142
7	0.2011	0.2544
8	0.2314	0.2957
9	0.2574	0.3255
10	0.2791	0.3595
11	0.2969	0.3808
12	0.3114	0.4064
13	0.3238	0.4197
14	0.3345	0.4355
15	0.3438	0.4552

4.1.3. TBDY 2018 Analizi İçin Deplasman Grafiği

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.3, TBDY 2018'e göre değerlendirilen binanın yer değiştirme tepkisini göstermektedir.

Çizelge 4.3. TBDY 2018 deplasman değerleri

Kat	X yönü (m)	Y yönü (m)
1	0.0005	0.0006
2	0.0106	0.0125
3	0.0293	0.0377
4	0.0537	0.0720
5	0.0818	0.1099
6	0.1112	0.1545
7	0.1403	0.1944
8	0.1680	0.2393
9	0.1937	0.2748
10	0.2168	0.3169
11	0.2375	0.3466
12	0.2558	0.3832
13	0.2720	0.4053
14	0.2862	0.4304
15	0.2988	0.4600



Şekil 4.3. TBDY 2018 deplasman grafiği

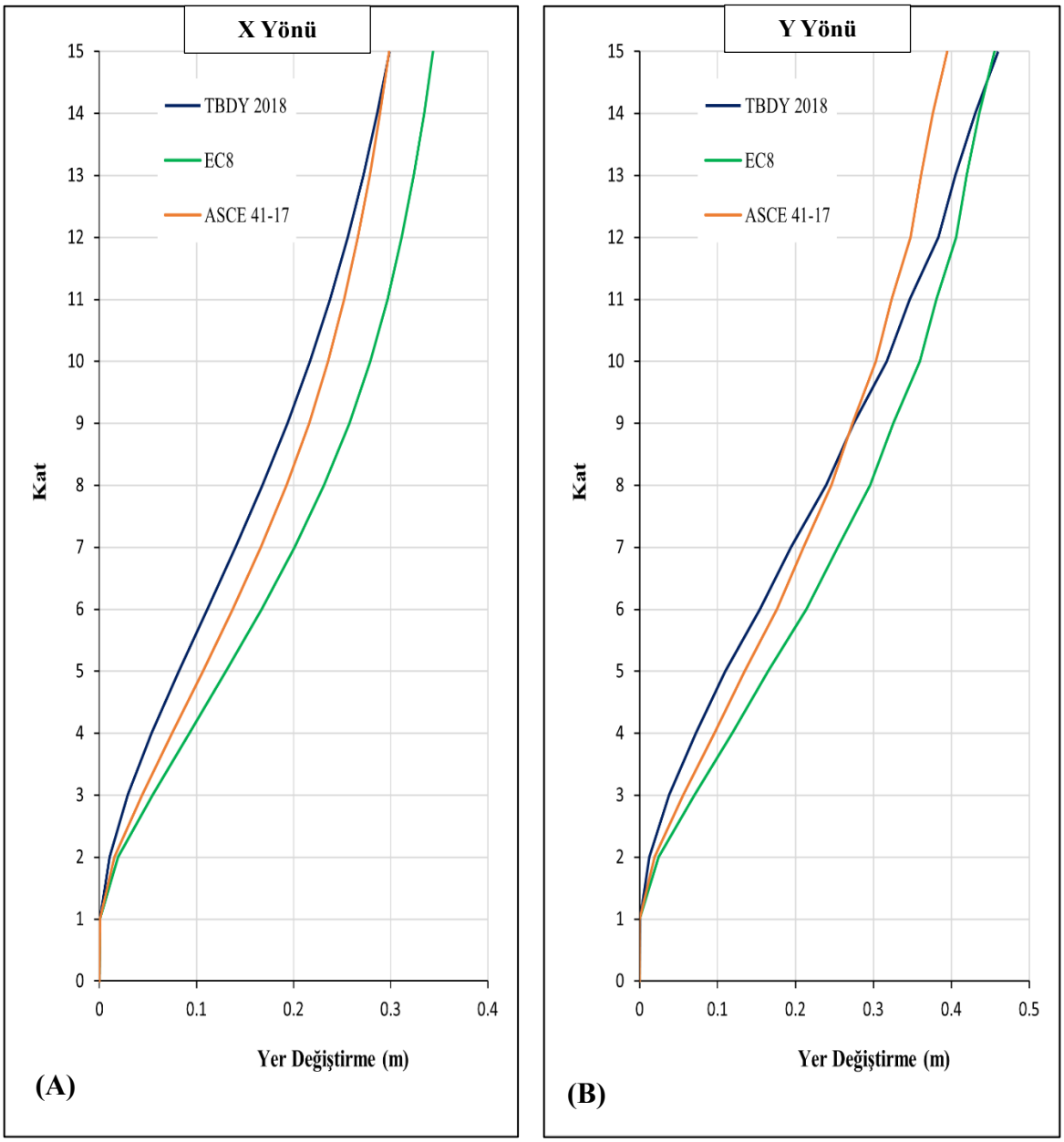
4.1.4. Yönetmelikler Arası Deplasman Karşılaştırması

Tüm üç yönetmelikten elde edilen yer değiştirme tepkileri, hem X hem de Y doğrultularındaki farkları vurgulamak amacıyla tek bir grafikte birleştirilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.4, her bir yönetmelik için en üst katın yer değiştirme değerlerini sunmaktadır.

Çizelge 4.4. Üst Kat Yer Değiştirmesi Karşılaştırması

Yöntem	X yönü (m)	Y yönü (m)
ASCE 41-17	0.2983	0.3949
EC8	0.3438	0.4552
TBDY 2018	0.2988	0.4600

X doğrultusunda, TBDY 2018 üst katlarda en düşük yer değiştirme değerlerini vermekte olup, bu durum göreli olarak daha rijit bir yapısal tepkiye işaret etmektedir. Buna karşılık, Eurocode 8 en yüksek yer değiştirmeleri üretirken, ASCE 41-17 bu iki yönetmelik arasında kalan ara değerler ortaya koymaktadır (Şekil 4.4). Y yönünde, TBDY 2018 yer değiştirme eğrisi, orta katlarda ASCE 41-17 ile, üst katlarda ise Eurocode 8 ile kesişmektedir. (Şekil 4.5).



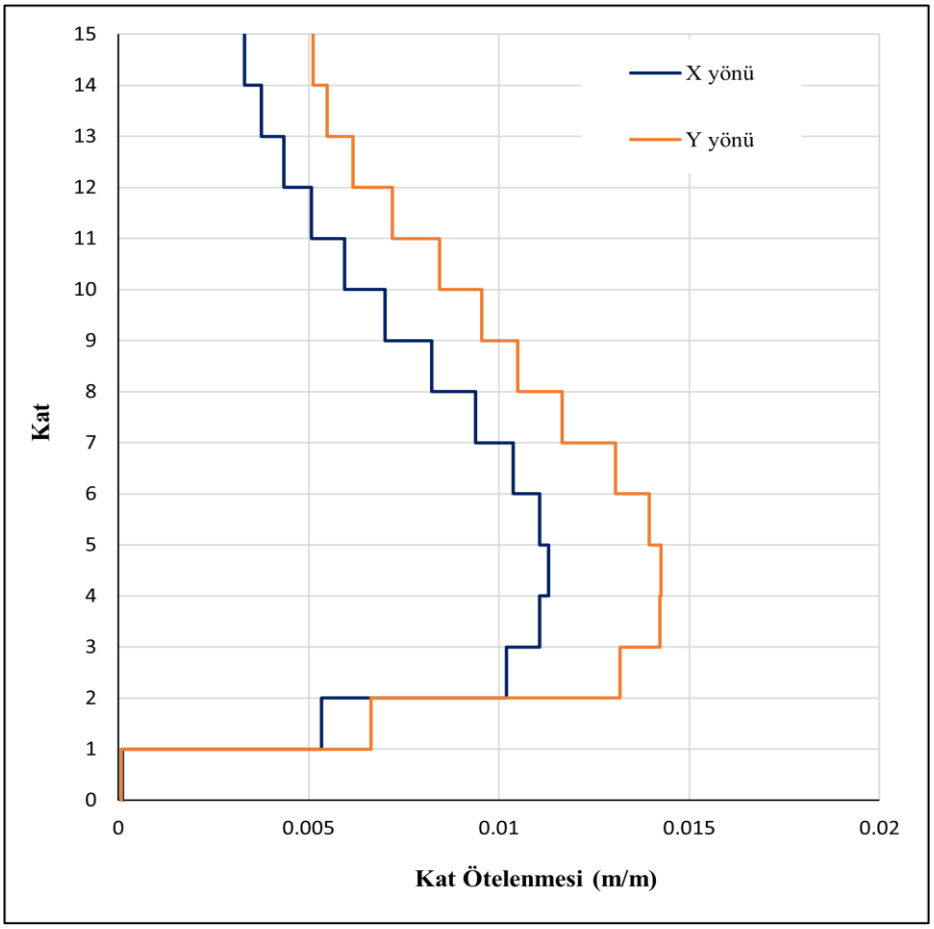
Şekil 4.4. Yönetmeliklere göre yer değiştirme karşılaştırması. **A)** X yönü **B)** Y yönü

4.2. Göreli Kat Ötelemesi

Göreli kat ötelenme oranları, birbirini izleyen iki kat arasındaki yatay yer değiştirme farkının, ilgili kat yüksekliğine oranlanmasıyla elde edilmektedir. Sunulan grafiklerde, x ekseni göreli kat ötelenme oranlarını, y ekseni ise kat numaralarını göstermektedir.

4.2.1. ASCE 41-17 Analizi İçin Göreli Kat Ötelemesi

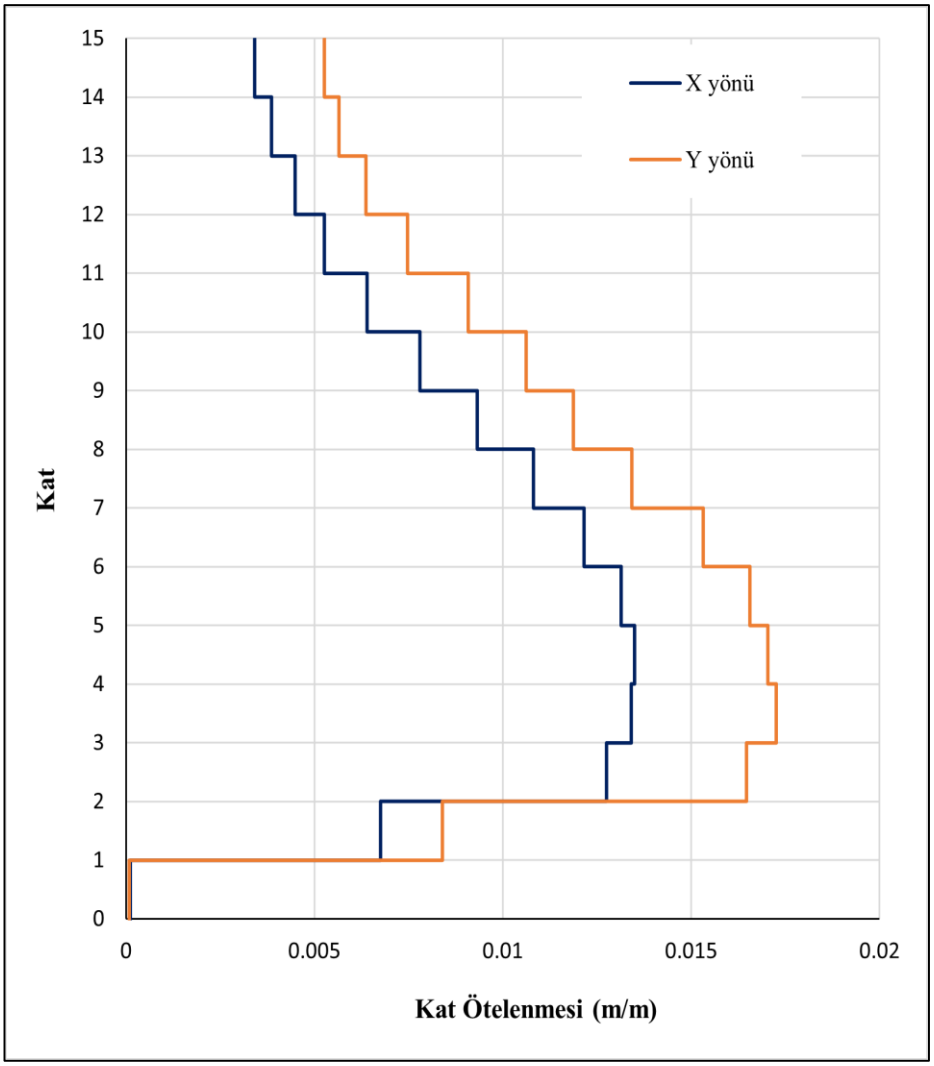
ASCE 41-17 analiz sonuçlarına göre, X ve Y doğrultularına ait kat ötelenme değerleri Şekil 4.5'te sunulmaktadır.



Şekil 4.5. ASCE 41-17 kat ötelenme değerleri

4.2.2. EC8 Analizi İçin Göreli Kat Ötelemesi

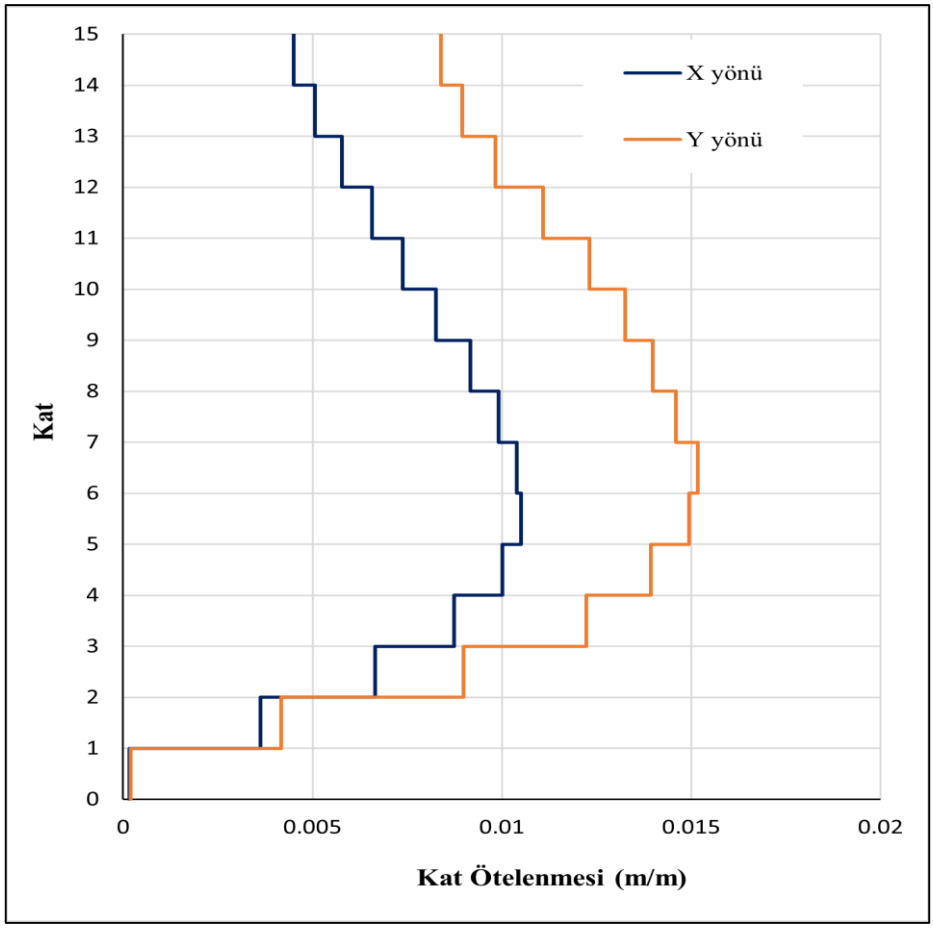
Eurocode 8'e göre elde edilen analiz sonuçları, hem X hem de Y doğrultularındaki kat ötelenme değerlerini Şekil 4.6'da grafiksel olarak sunmaktadır.



Şekil 4.6. EC8 kat ötelenme değerleri

4.2.3. TBDY 2018 Analizi İçin Göreli Kat Ötelemesi

TBDY 2018 analiz sonuçlarından elde edilen X ve Y doğrultularındaki kat ötelenme değerleri, Şekil 4.7'de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.7. TBDY 2018 kat ötelenme değerleri

4.2.4. Yönetmelikler Arası Göreli Kat Ötelemesi Karşılaştırması

Şekil 4.8, yapının yüksekliği boyunca ASCE 41-17, TBDY 2018 ve Eurocode 8 yönetmeliklerine göre X ve Y doğrultularında hesaplanan kat öteleme oranlarını sunmaktadır. Çizelge 4.5 ise her bir yönetmelik için her iki doğrultularında elde edilen maksimum kat öteleme oranlarını özetlemektedir.

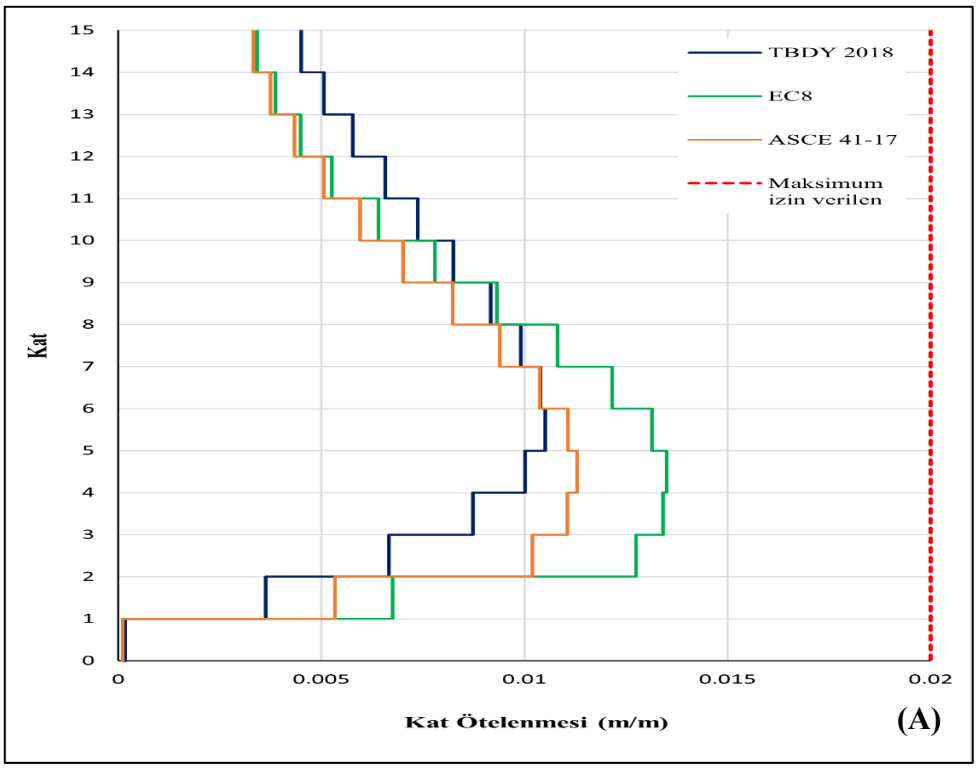
X doğrultusunda, maksimum kat öteleme oranları üç deprem yönetmeliği arasında belirgin şekilde farklılık göstermektedir. En yüksek değer, 0.0135'lik öteleme oranı ile Eurocode 8'e (EC8) göre elde edilmiş olup, bu durum söz konusu standardın bu doğrultuda göreli olarak daha büyük yatay yer değiştirmelere izin verdiğini göstermektedir. ASCE 41-17 ise 0.0113'lük biraz daha düşük bir maksimum öteleme oranı ile onu takip etmekte ve kat ötelemesini sınırlandırmada daha temkinli bir yaklaşım sergilemektedir. Öte yandan, TBDY 2018, 0.0105 ile en düşük maksimum öteleme oranını vermektedir.

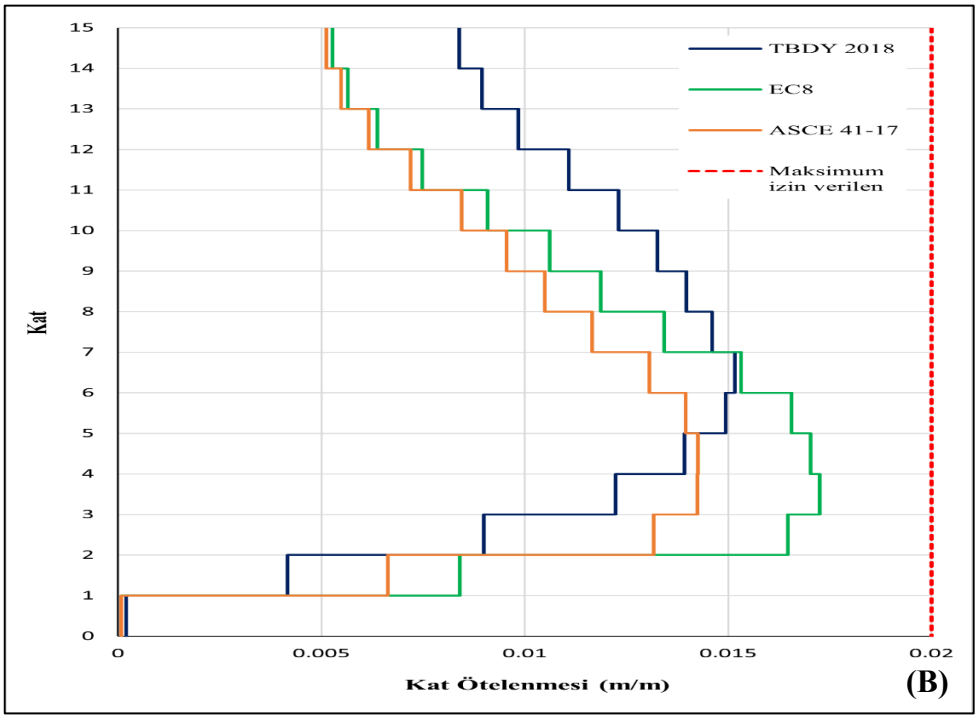
Çizelge 4.5. Maksimum Kat Ötelemesi Karşılaştırması

Yöntem	X yönü (m/m)	Y yönü (m/m)
ASCE 41-17	0.0113	0.0143
EC8	0.0135	0.0173
TBDY 2018	0.0105	0.0153

Y doğrultusunda ise maksimum kat öteleme oranları genel olarak X doğrultusuna göre daha yüksek çıkmıştır. En büyük değer yine EC8'e göre 0.0173 olarak elde edilmiştir. Bunu 0.0153 değeriyle TBDY 2018 takip etmekte olup, daha orta düzeyde bir yaklaşımı temsil etmektedir. ASCE 41-17 ise 0.0143'lük öteleme oranı ile diğer iki koda göre daha muhafazakâr bir değerlendirme sunmaktadır.

Bu farklılıklar, her bir yönetmeliğin benimsediği performans kriterleri ve güvenlik paylarındaki değişiklikleri ortaya koymakta; uluslararası standartlar arasında yer değiştirme kapasitesi ve performans değerlendirme yöntemlerinde gözlenen farklılıkların, sismik performans değerlendirmelerinde beklentileri doğrudan etkileyebileceğini vurgulamaktadır.





Şekil 4.8. Yönetmeliklere göre Maksimum Kat Ötelemesi karşılaştırması. **A)** X yönü **B)** Y yönü

4.3. Deplasman Talepleri Karşılaştırması

Üç yönetmeliğin her biri için X ve Y doğrultularındaki deplasman talepleri, ilgili yönetmeliklerde belirtilen yöntemlere göre belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.6'da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.6. Deplasman Talepleri Karşılaştırması

Yöntem	X yönü		Y yönü	
	Deplasman (m)	Taban Kesmesi (kN)	Deplasman (m)	Taban Kesmesi (kN)
ASCE 41-17	0.29	4996	0.27	4480
EC8	0.33	4648	0.31	4365
TBDY 2018	0.29	5719	0.28	5590

X ve Y doğrultularında TBDY 2018, en yüksek taban kesme kuvvetlerini üretmektedir (sırasıyla 5719 kN ve 5590 kN); Buna karşılık, ASCE 41-17 ve Eurocode 8 (EC8) daha düşük taban kesme kuvvetleri öngörmekte olup, en düşük değerler EC8 tarafından elde edilmiştir (X doğrultusunda 4648 kN ve Y doğrultusunda 4365 kN). Yatay deplasmanlar açısından değerlendirildiğinde, EC8 en yüksek değerleri üretmektedir (X doğrultusunda 0.33 m ve Y doğrultusunda 0.31 m). Öte yandan, ASCE 41-17 ve TBDY 2018 benzer ve göreli olarak daha düşük deplasman değerleri (X doğrultusunda 0.29 m ve Y doğrultusunda 0.27 - 0.28 m) öngörmektedir. Bu karşılaştırma, TBDY 2018'in daha yüksek dayanım gereklilikleri ile yapısal güvenlik marjlarını artırmayı hedeflediğini, EC8'in ise daha fazla şekil değiştirmeye izin vererek yapısal süneklik varsayımlarındaki farklılıkları yansıttığını göstermektedir.

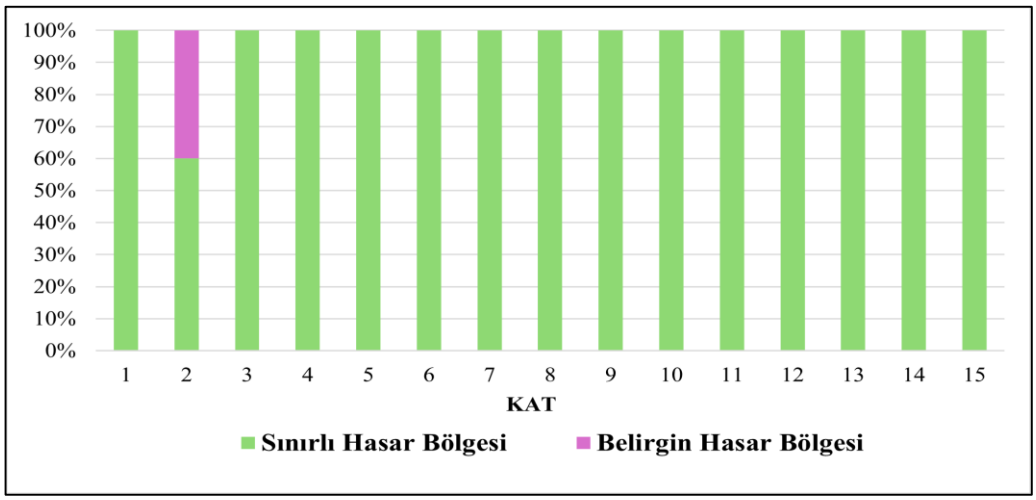
4.4. Yapısal Elemanlarda Hasar Durumları

Bu bölümde, incelenen yapının taşıyıcı elemanlarında gözlemlenen hasar durumlarına ilişkin analiz sonuçları sunulmaktadır. Performans hedeflerine göre, yapının 'Kontrollü Hasar Performans Seviyesi (KH)'ni sağlaması beklenmektedir. Bu durumu doğrulamak amacıyla, kiriş ve kolonların performans düzeyleri her bir deprem yönetmeliğine göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Her yönetmelik için, yapının katları boyunca yapısal elemanların performans düzeylerinin yüzdesel dağılımını gösteren grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerde, elemanların 'Sınırlı Hasar Bölgesi', 'Belirgin Hasar Bölgesi', 'İleri Hasar Bölgesi' ve 'Göçme Bölgesi' kapsamında nasıl dağıldığı açık bir şekilde gösterilmekte; böylece beklenen performans düzeyinin sağlanıp sağlanmadığı kapsamlı bir biçimde ortaya konmaktadır. Ayrıca, kirişler ve kolonlar için ayrı ayrı olacak şekilde, farklı yönetmeliklere göre elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak gösteren birleşik bir grafik de sunulmuştur.

4.4.1. ASCE 41-17'ye Göre Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi

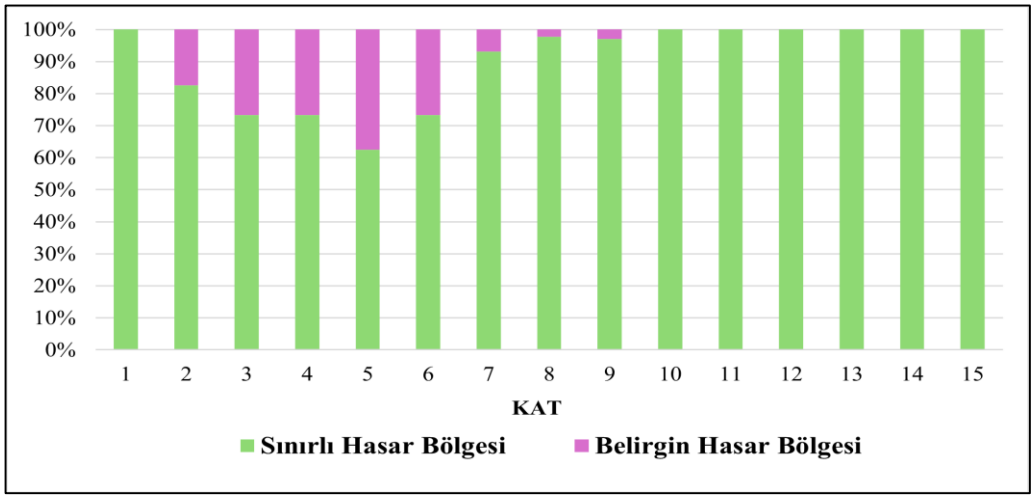
ASCE 41-17 yönetmeliğine göre kiriş ve kolon elemanlarında oluşan hasar düzeylerinin sonuçları, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da sırasıyla yüzdesel olarak yığılmış sütun grafiklerle sunulmuştur. Grafiklerde, yatay eksen kat seviyelerini, düşey eksen ise her performans düzeyine karşılık gelen eleman yüzdelerini göstermektedir. Farklı hasar bölgeleri renkli olarak ifade edilerek her kat için performans dağılımı görsel olarak ortaya konmuştur. Bu grafiklerin ardından gelen Çizelge 4.7'de ise, her bir kat seviyesinde kiriş ve kolonlar için elde edilen yüzdesel dağılımlar sayısal olarak verilmiştir.

Grafikten de görüldüğü üzere, yalnızca ikinci katta kolonların %40'ı Belirgin Hasar Bölgesinde, %60'ı ise Sınırlı Hasar Bölgesinde yer almaktadır. Yapı genelinde değerlendirildiğinde, kolonların %97'si Sınırlı Hasar Bölgesi içerisinde kalmakta, yalnızca %3'ü Belirgin Hasar Bölgesine ulaşmaktadır. Hiçbir kolon elemanının Belirgin Hasar Bölgesinin ötesine geçmemesi, yapının kolonlarında daha ileri düzeyde bir hasarın oluşmadığını göstermektedir.



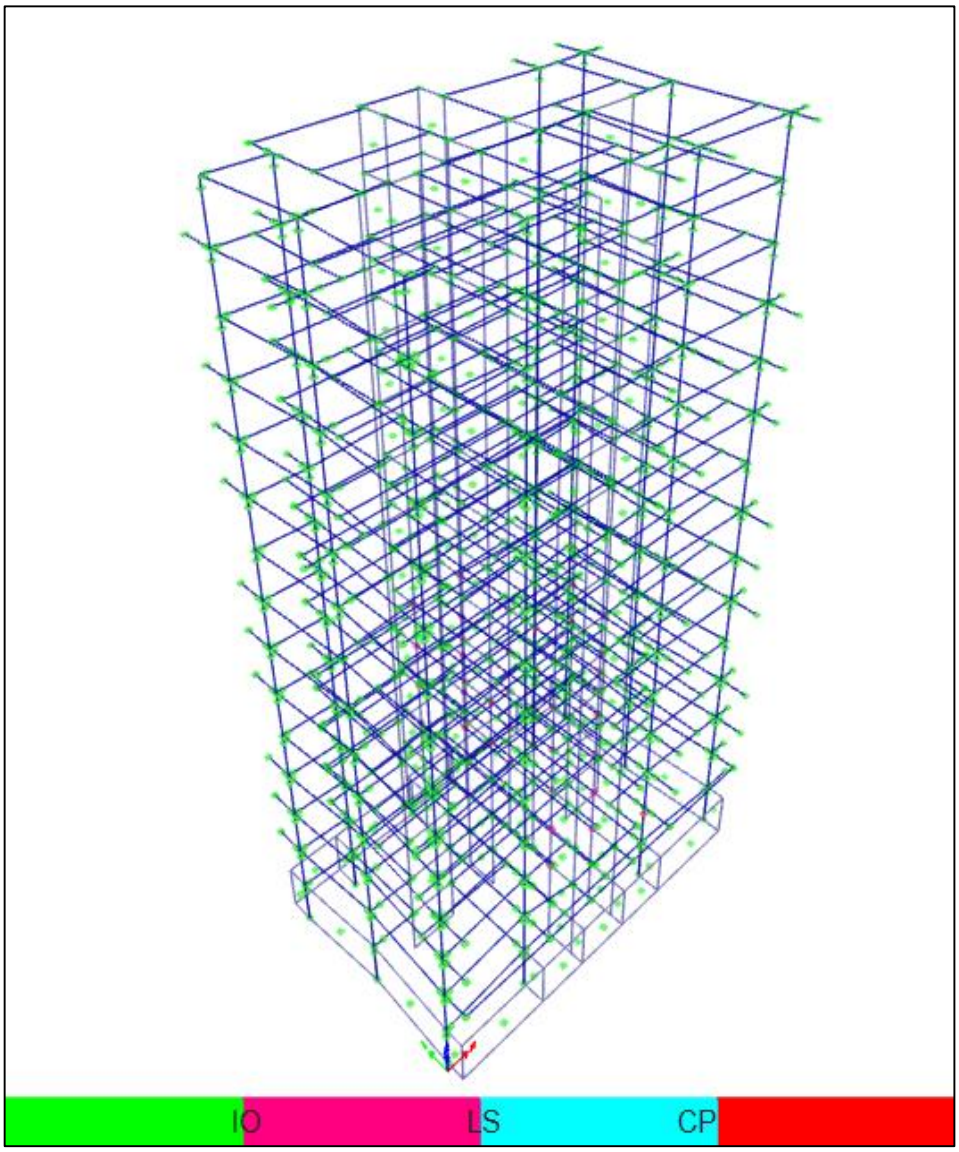
Şekil 4.9. ASCE 41-17'ye Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı

Şekil 4.10'dan anlaşılacağı üzere, beşinci katta Belirgin Hasar Bölgesinde bulunan kiriş oranı en yüksek seviyededir; bu katta kirişlerin %38'i Belirgin Hasar Bölgesinde, %62'si ise Sınırlı Hasar Bölgesinde yer almaktadır. İkinci kattan dokuzuncu kata kadar olan katlarda bazı kiriş elemanları Belirgin Hasar Bölgesine ulaşmış, kalan elemanlar ise Sınırlı Hasar Bölgesi içerisinde kalmıştır. Yapı genelinde değerlendirildiğinde, kirişlerin %90'ı Sınırlı Hasar Bölgesinde, %10'u ise Belirgin Hasar Bölgesindedir. Hiçbir elemanın Belirgin Hasar Bölgesinin ötesine geçmemesi, ileri düzey bir hasarın oluşmadığını göstermektedir.



Şekil 4.10. ASCE 41-17'ye Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı

Yapısal elemanların %91'inin Sınırlı Hasar Bölgesinde, %9'unun ise Belirgin Hasar Bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Önemle vurgulanmalıdır ki, hiçbir eleman Kontrollü Hasar Seviyesini aşmamıştır. Bu durum, yapının ASCE 41-17 yönetmeliğine göre öngörülen performans seviyesini sağladığını göstermektedir.



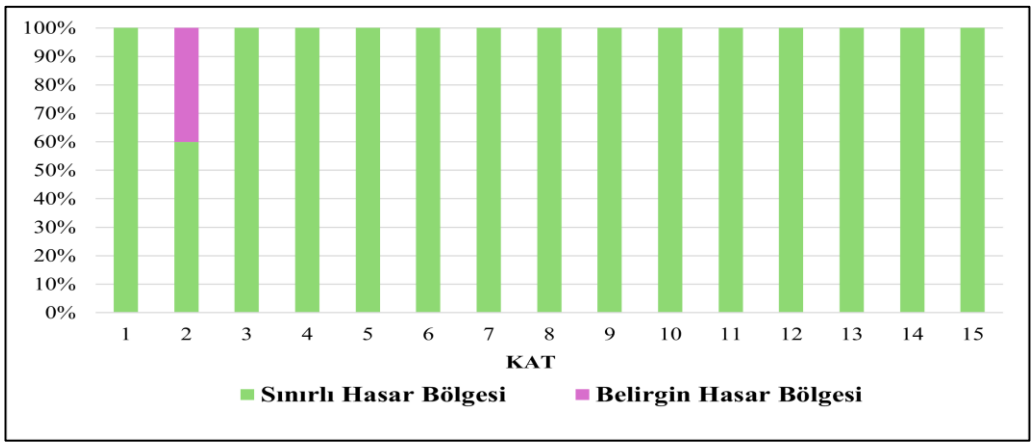
Şekil 4.11. ASCE 41-17'ye Göre Tüm Elemanların Hasar Düzeyleri

Çizelge 4.7. ASCE 41-17'ye Göre Kolon ve Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri

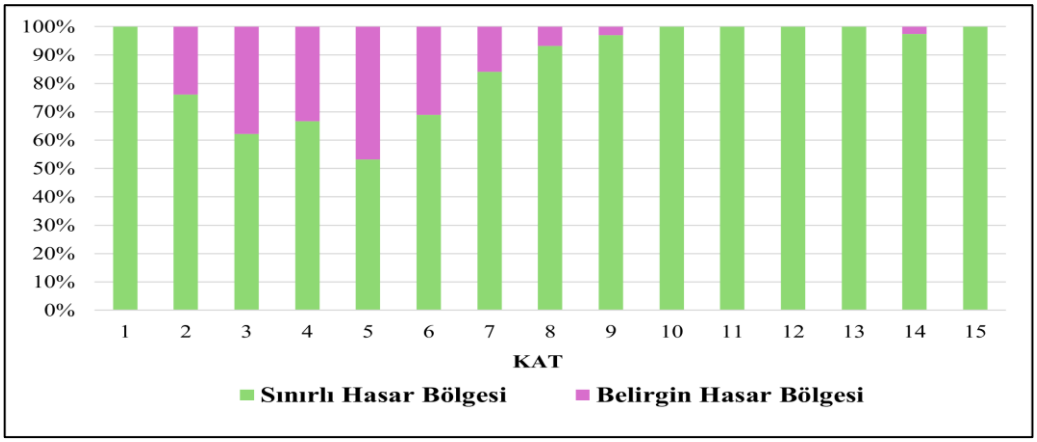
Kat	Kolon		Kiriş	
	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)
1	100	0	100	0
2	60	40	83	17
3	100	0	73	27
4	100	0	73	27
5	100	0	62	38
6	100	0	73	27
7	100	0	93	7
8	100	0	98	2
9	100	0	97	3
10	100	0	100	0
11	100	0	100	0
12	100	0	100	0
13	100	0	100	0
14	100	0	100	0
15	100	0	100	0

4.4.2. EC8'e Göre Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi

Kiriş ve kolon elemanlarındaki hasar düzeylerine ilişkin sonuçlar, EC8 yönetmeliği kapsamında değerlendirilmiş ve Şekil 4.12 ile Şekil 4.13'de yüzdesel dağılımlar yığılmış sütun grafikler halinde gösterilmiştir. Bu grafiklerde yatay eksen kat seviyelerini, dikey eksen ise ilgili performans seviyelerine ait eleman yüzdelerini ifade etmektedir. Hasar bölgeleri farklı renklerle belirtilerek, her kat için performans durumu görsel olarak ortaya konmuştur. Çizelge 4.8, kiriş ve kolonların kat bazındaki hasar yüzdelerini sayısal olarak sunmaktadır.



Şekil 4.12. EC8'e Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı



Şekil 4.13. EC8'e Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı

Şekil 4.12'den ikinci kat özelinde, kolonların %40'ı Belirgin Hasar Bölgesinde yer almakta, kalan %60'ı ise Sınırlı Hasar Bölgesinde bulunmaktadır. Tüm yapı genelinde ise kolonların büyük çoğunluğu, yani %97'si Sınırlı Hasar Bölgesi sınırları içinde kalırken, sadece %3'ü Belirgin Hasar Bölgesine erişmiştir. İkinci grafikte ise, Belirgin Hasar Bölgesinde bulunan kirişlerin en yüksek oranı beşinci katta gözlemlenmektedir; bu katta kirişlerin %47'si Belirgin Hasar Bölgesinde, %53'ü ise Sınırlı Hasar Bölgesinde yer almaktadır. İkinci ile dokuzuncu katlar arasında ve on dört kattaki bazı kiriş elemanları Belirgin Hasar Bölgesine ulaşmışken, geri kalan elemanlar Sınırlı Hasar Bölgesinde kalmıştır. Yapı genelinde değerlendirildiğinde ise kirişlerin %86'sı Sınırlı Hasar Bölgesinde, %14'ü ise Belirgin Hasar Bölgesindedir.

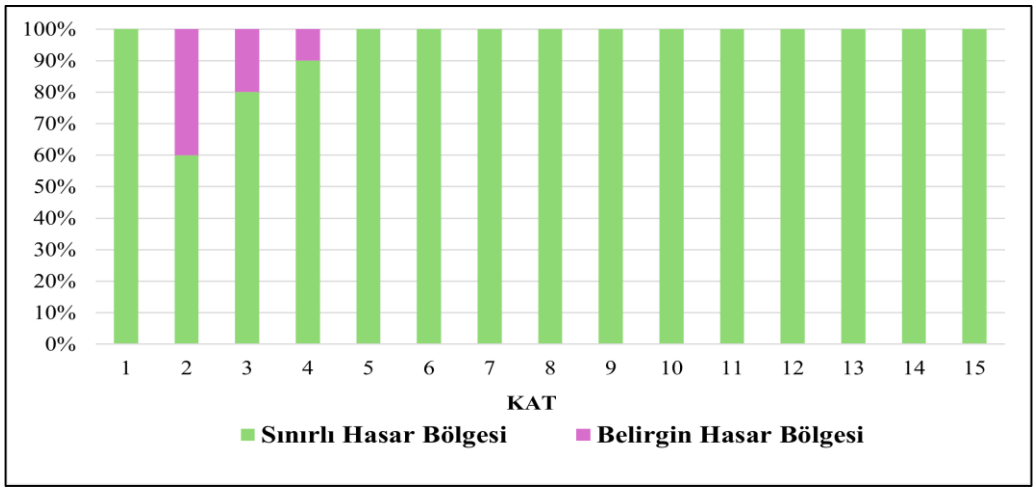
Çizelge 4.8. EC8'e Göre Kolon ve Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri

Kat	Kolon		Kiriş	
	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)
1	100	0	100	0
2	60	40	76	24
3	100	0	62	38
4	100	0	67	33
5	100	0	53	47
6	100	0	69	31
7	100	0	84	16
8	100	0	93	7
9	100	0	97	3
10	100	0	100	0
11	100	0	100	0
12	100	0	100	0
13	100	0	100	0
14	100	0	97	3
15	100	0	100	0

Elde edilen sonuçlara göre, yapısal elemanların %88'i Sınırlı Hasar Bölgesinde, %12'si ise Belirgin Hasar Bölgesinde yer almaktadır. Hiçbir elemanın Kontrollü Hasar Seviyesini aşmamış olması, yapının EC8 yönetmeliğiyle tanımlanan performans gerekliliklerini karşıladığını açıkça ortaya koymaktadır.

4.4.3. TBDY 2018'e Göre Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi

Kiriş ve kolon elemanlarındaki hasar düzeyleri, TBDY 2018 yönetmeliği kapsamında değerlendirilmiştir. Performans düzeylerinin yüzdesel dağılımları, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te yığılmış sütun grafikler şeklinde sunulmuştur. Bu grafiklerde yatay eksen kat seviyelerini, düşey eksen ise her bir performans düzeyine karşılık gelen eleman yüzdelerini göstermektedir. Hasar bölgeleri farklı renklerle ifade edilerek her kat için yapısal performans durumu görsel olarak ortaya konmuştur. Buna ek olarak, Çizelge 4.9'da kiriş ve kolonlara ait kat bazındaki hasar yüzdeleri sayısal olarak sunulmaktadır.



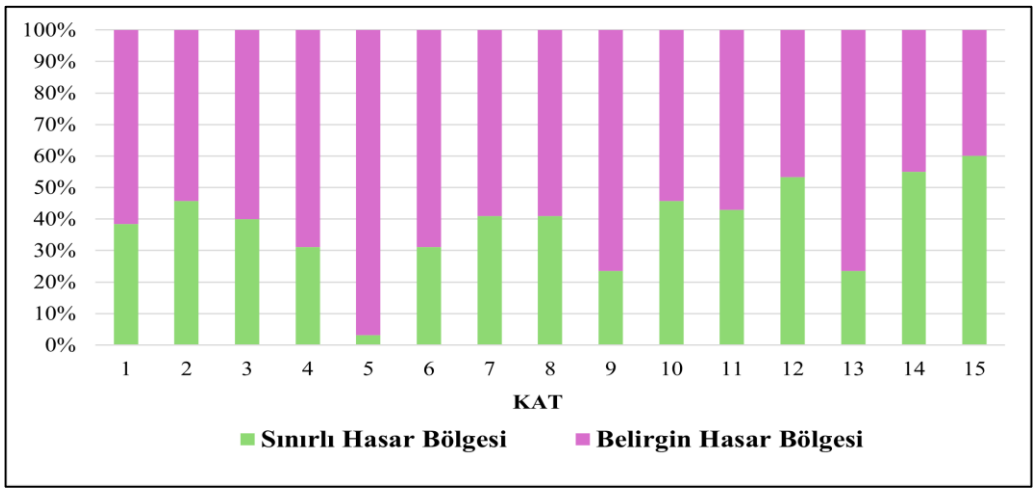
Şekil 4.14. TBDY 2018'e Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı

Şekil 4.14'de görüldüğü üzere, ikinci kattaki kolonların %40'ı Belirgin Hasar Bölgesine ulaşmış olup, bu oran diğer katlara kıyasla en yüksek hasar oranını temsil etmektedir. Aynı katta kalan %60'lık kısım ise Sınırlı Hasar Bölgesinde yer almaktadır. Buna ek olarak, üçüncü ve dördüncü katlardaki kolonların sırasıyla %20'si ve %10'u da Belirgin Hasar Bölgesine ulaşmıştır. Yapı genelinde değerlendirildiğinde, kolonların %95'i Sınırlı Hasar Bölgesi içerisinde kalmakta, yalnızca %5'i Belirgin Hasar Bölgesine ulaşmaktadır.

Çizelge 4.9. TBDY 2018'e Göre Kolon ve Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri

Kat	Kolon		Kiriş	
	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)
1	100	0	38	62
2	60	40	46	54
3	80	20	40	60
4	90	10	31	69
5	100	0	3	97
6	100	0	31	69
7	100	0	41	59
8	100	0	41	59
9	100	0	24	76
10	100	0	46	54
11	100	0	43	57
12	100	0	53	47
13	100	0	24	76
14	100	0	55	45
15	100	0	60	40

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, kiriş elemanlarının çoğunluğu (%61) Belirgin Hasar Bölgesinde yer almakta, kalan %39'u ise Sınırlı Hasar Bölgesinde bulunmaktadır. Özellikle beşinci, dokuzuncu ve on üçüncü katlarda, Belirgin Hasar Bölgesinde bulunan kirişlerin oranı en yüksek seviyededir. Yapı genelinde, yapısal elemanların %50'si Sınırlı Hasar Bölgesi'nde, diğer %50'si ise Belirgin Hasar Bölgesi'nde yer almaktadır. Hiçbir elemanın Kontrollü Hasar Seviyesini aşmamış olması, yapının TBDY 2018 yönetmeliğinde belirtilen performans gereksinimlerini karşıladığını açıkça göstermektedir.

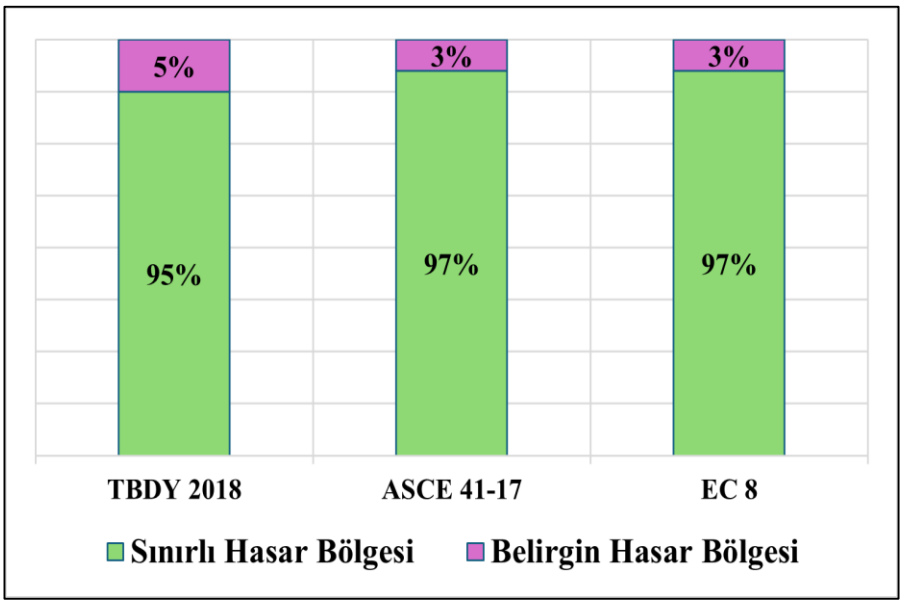


Şekil 4.15. TBDY 2018'e Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı

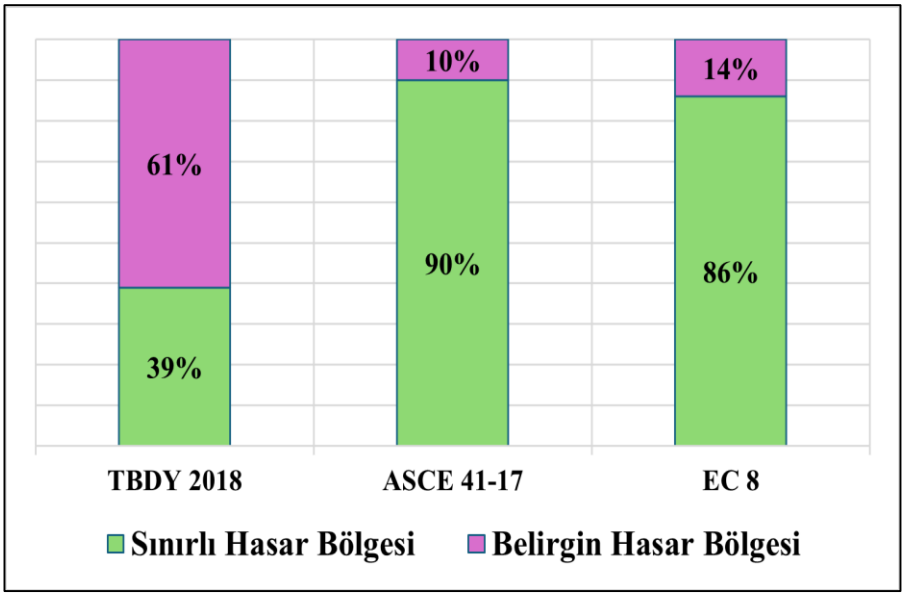
4.4.4. Üç Yönetmeliğe Göre Hasar Durumlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Bu bölümde, üç yönetmeliğe göre hasar durumlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmaktadır. Farklılıkların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, kolonların hasar durumları Şekil 4.16'da görsel olarak, ilgili sayısal değerler ise Çizelge 4.10'da verilmiştir. Benzer şekilde, kirişlerin hasar durumları Şekil 4.17'de gösterilmiş ve Çizelge 4.11'de ilgili veriler sunulmuştur.

Yapılan karşılaştırma, kolonlar için üç yönetmeliğin neredeyse aynı sonuçları verdiğini göstermektedir. Ancak kirişler açısından, EC8 ve ASCE 41-17 yönetmeliklerinin benzer sonuçlar ortaya koyduğu, TBDY 2018'in ise farklı değerler gösterdiği ve daha fazla kirişin Belirgin Hasar Bölgesi'nde yer aldığı görülmüştür. Bu farklılık, her bir yönetmelikte plastik mafsalların farklı şekilde temsil edilmesinden ve yönetmelik sınırlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen, yapısal elemanların hiçbiri üç yönetmelik tarafından tanımlanan Kontrollü Hasar Seviyesi'nin üzerine çıkmamış olup, bu durum yapının üç yönetmeliğin tüm performans kriterlerini karşıladığını göstermektedir.



Şekil 4.16. Üç Yönetmeliğe Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı



Şekil 4.17. Üç Yönetmeliğe Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Dağılımı

Çizelge 4.10. Üç Yönetmeliğe Göre Kolon Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri

Kat	ASCE 41-17		EC8		TBDY 2018	
	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)
1	100	0	100	0	100	0
2	60	40	60	40	60	40
3	100	0	100	0	80	20
4	100	0	100	0	90	10
5	100	0	100	0	100	0
6	100	0	100	0	100	0
7	100	0	100	0	100	0
8	100	0	100	0	100	0
9	100	0	100	0	100	0
10	100	0	100	0	100	0
11	100	0	100	0	100	0
12	100	0	100	0	100	0
13	100	0	100	0	100	0
14	100	0	100	0	100	0
15	100	0	100	0	100	0

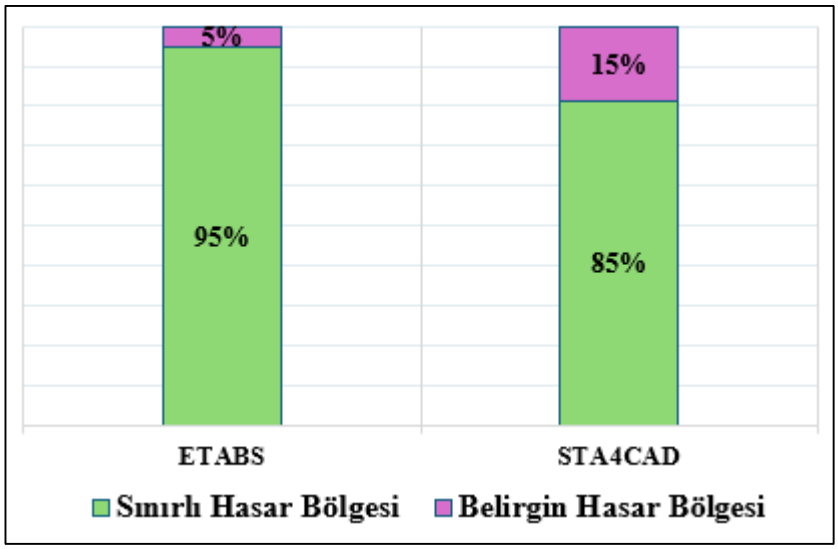
Çizelge 4.11. Üç Yönetmeliğe Göre Kiriş Hasar Düzeylerinin Yüzdesel Değerleri

Kat	ASCE 41-17		EC8		TBDY 2018	
	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)	Sınırlı Hasar Bölgesi (%)	Belirgin Hasar Bölgesi (%)
1	100	0	100	0	38	62
2	83	17	76	24	46	54
3	73	27	62	38	40	60
4	73	27	67	33	31	69
5	62	38	53	47	3	97
6	73	27	69	31	31	69
7	93	7	84	16	41	59
8	98	2	93	7	41	59
9	97	3	97	3	24	76
10	100	0	100	0	46	54
11	100	0	100	0	43	57
12	100	0	100	0	53	47
13	100	0	100	0	24	76
14	100	0	97	3	55	45
15	100	0	100	0	60	40

Genel olarak, hasar sınırları incelendiğinde, yapının TBDY-2018'e göre daha ileri hasar düzeylerine ulaştığı görülmektedir. EC8 yönetmeliği yaklaşık 4,5 cm daha fazla deplasmana izin vermesine rağmen, buna karşılık gelen hasar seviyeleri nispeten daha düşük kalmaktadır. Buna karşın, ASCE 41-17 diğer iki yönetmelik arasında en düşük hasar düzeylerini yansıtmaktadır.

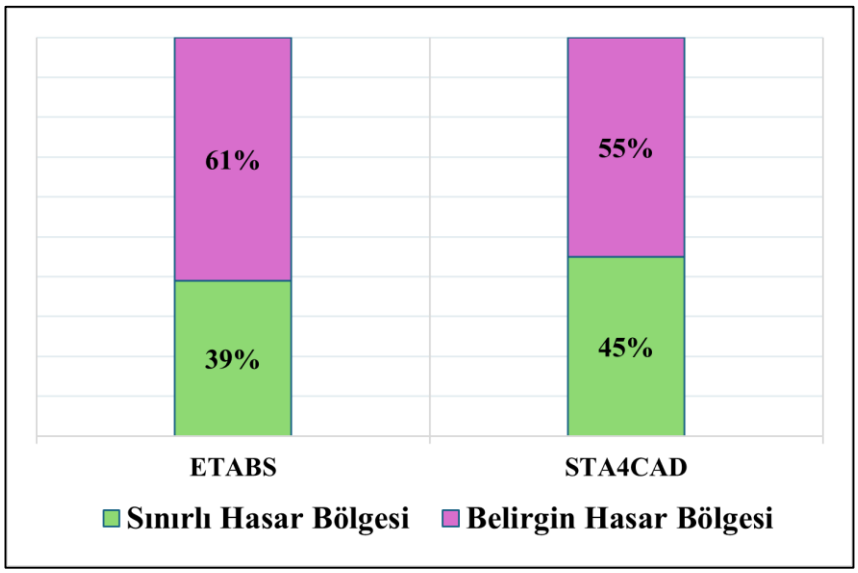
4.4.5. ETABS ve STA4CAD Hasar Durumlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, TBDY 2018 yönetmeliği kapsamında ETABS ve STA4CAD programları ile elde edilen hasar durumlarının karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır. İki analiz programı arasındaki farkların daha açık bir şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla, kolonların hasar durumları Şekil 4.18'de, kirişlerin hasar durumları ise Şekil 4.19'da görsel olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, analiz yazılımlarının hesap yöntemlerindeki ve varsayımlarındaki farklılıkların yapının hasar performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.18. ETABS ve STA4CAD Sonuçlarının Karşılaştırılması: Kolon Hasar Düzeyleri

ETABS ve STA4CAD analiz sonuçları karşılaştırıldığında, kolonların hasar düzeyleri bakımından belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. ETABS analizine göre, kolonların %95'i Sınırlı Hasar Bölgesi'nde yer almakta olup yalnızca %5'i Belirgin Hasar Bölgesi'nde bulunmaktadır. Buna karşılık, STA4CAD analiz sonuçlarına göre kolonların %85'i Sınırlı Hasar Bölgesi'nde, %15'i ise Belirgin Hasar Bölgesi'nde yer almaktadır.



Şekil 4.19. ETABS ve STA4CAD Sonuçlarının Karşılaştırılması: Kiriş Hasar Düzeyleri

Kirişlerin hasar düzeyleri açısından yapılan karşılaştırmada ise, her iki analiz programı arasında daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. ETABS analiz sonuçlarına göre, kirişlerin %61'i Belirgin Hasar Bölgesi'nde, %39'u ise Sınırlı Hasar Bölgesi'nde yer almaktadır. STA4CAD analizine göre ise kirişlerin %55'i Belirgin Hasar Bölgesi'nde, %45'i Sınırlı Hasar Bölgesi'nde bulunmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye'nin Bursa ilinde yer alan ve TS500-2000 standardına göre tasarlanmış 15 katlı mevcut bir betonarme binanın sismik performansını, üç farklı deprem yönetmeliği çerçevesinde karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda bina, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), Amerikan standardı (ASCE 41-17) ve Avrupa standardı (Eurocode 8) esas alınarak analiz edilmiştir. Her bir yönetmelik, deprem etkilerine karşı yapısal performansı farklı varsayımlar ve performans kriterleri doğrultusunda ele almakta ve bu sayede çok boyutlu bir değerlendirme olanağı sunmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, X ve Y doğrultularındaki yatay yer değiştirme değerleri açısından yönetmelikler arasında belirgin farklılıklar tespit edilmiştir. X doğrultusunda, TBDY 2018'e göre hesaplanan yer değiştirme değerleri, Eurocode 8'e göre yaklaşık 4,5 cm daha düşük olup, ASCE 41-17 sonuçlarıyla benzer düzeydedir. Y doğrultusunda ise, TBDY 2018 ve Eurocode 8'e göre elde edilen yer değiştirme değerleri birbirine yakın olmakla birlikte, ASCE 41-17'ye göre yapılan hesaplamalarda, TBDY 2018'in yaklaşık 6 cm daha yüksek yer değiştirme değerleri verdiği görülmüştür. Genel olarak Eurocode 8, daha yüksek yer değiştirme değerleri ile daha esnek bir yapısal davranış sergilerken, ASCE 41-17 daha dengeli ve ılımlı bir sistem performansı ortaya koymaktadır. TBDY 2018'e göre elde edilen maksimum kat öteleme değerleri, ASCE 41-17'ye göre yaklaşık %7, Eurocode 8'e göre ise %22 daha düşük bulunmuştur. Bu bulgular, incelenen yönetmeliklerin yer değiştirme kapasitesi ve yapısal güvenlik sınırlarına ilişkin yaklaşımlarındaki farklılıkları bir kez daha ortaya koymaktadır.

Taban kesme kuvvetleri incelendiğinde, TBDY 2018 her iki ana doğrultuda da en yüksek kuvvet değerlerini öngörmektedir. Özellikle X doğrultusunda, TBDY 2018'e göre hesaplanan taban kesme kuvveti, ASCE 41-17'ye göre yaklaşık %12, Eurocode 8'e göre ise %18 daha yüksek çıkmıştır. Y doğrultusunda ise bu fark daha belirgin olup, TBDY 2018'e göre elde edilen taban kesme kuvveti ASCE 41-17'ye kıyasla yaklaşık %20, Eurocode 8'e kıyasla ise %23 daha yüksektir. Bu sonuçlar, TBDY 2018'in diğer iki yönetmeliğe kıyasla

daha yüksek yatay yük değerlerini öngördüğünü ortaya koymaktadır. Buna karşılık, ASCE 41-17 ve Eurocode 8, görece olarak daha düşük taban kesme kuvvetlerine sahiptir.

Hasar düzeyi analizleri, her bir yönetmelik için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. ASCE 41-17 ve Eurocode 8'e göre kolonların yaklaşık %97'si Sınırlı Hasar Bölgesi içerisinde kalırken, TBDY 2018 için bu oran %95 olarak belirlenmiştir. Buna karşın, kiriş elemanlarında tüm yönetmelikler kapsamında daha yüksek oranlarda Belirgin Hasar oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle TBDY 2018 kapsamında, kirişlerin %61'inin Belirgin Hasar Bölgesi'nde yer aldığı tespit edilmiş olup, bu durum plastik mafsal tanımlarındaki farklılıklar ve yönetmeliğin performans sınır kriterleri ile ilişkilendirilmiştir. ASCE 41-17 ve Eurocode 8'e göre ise kirişlerin sırasıyla yalnızca %10'u ve %14'ü Belirgin Hasar Bölgesi'ne ulaşmış, bu oranlar TBDY 2018'e kıyasla daha sınırlı bir hasar seviyesine işaret etmiştir. Önemli bir bulgu olarak, hiçbir yapısal elemanın herhangi bir yönetmeliğe göre Kontrollü Hasar seviyesini aşmadığı belirlenmiş, böylece yapının her üç yönetmelikte tanımlanan performans hedeflerini sağladığı açık bir şekilde ortaya konulmuştur.

Genel değerlendirme, her bir yönetmeliğin hasar ve performans kavramlarını farklı şekillerde tanımladığını göstermektedir. TBDY 2018, en muhafazakâr (güvenli tarafta kalmaya çalışan) yaklaşımı benimseyerek sınır değerlerde daha düşük değerler öngörerek ve daha fazla sayıda yapısal elemanda özellikle de kirişler için daha hasar oluşumuna olanak tanımakta dolayısıyla yapının genel performansı için güvenli tarafta kalacak şekilde (daha kötümser) değerler vermeye çalışmaktadır. Buna karşın, ASCE 41-17 daha büyük şekil değiştirme kapasitesine izin vererek performans seviyelerini daha esnek şekilde yorumlamakta, böylece aynı modelde daha iyimser performans sonuçları elde edilmektedir. Eurocode 8 ise bu iki yönetmelik arasında bir öngörü sergilemekte, kapasite tasarımı ilkesi ile süneklik ve enerji sönümleme davranışlarını ön plana çıkarmaktadır.

Kolon ve kiriş hasar düzeyleri sonuçları incelendiğinde, ETABS ve STA4CAD analiz programlarının birbirinden farklı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Kolonlar için elde edilen sonuçlara göre, STA4CAD analizinde Belirgin Hasar Bölgesi'ne giren kolon oranı, ETABS sonuçlarına kıyasla %10 daha fazladır. ETABS analizinde kolonların yalnızca %5'i Belirgin

Hasar Bölgesi'nde yer alırken, STA4CAD analizine göre bu oran %15'e çıkmaktadır. Kiriş hasar durumlarında ise iki program arasında daha sınırlı bir fark gözlemlenmiştir. ETABS sonuçlarına göre kirişlerin %61'i Belirgin Hasar Bölgesi'nde bulunurken, STA4CAD analizinde bu oran %55'tir. Kolonlarda %10'luk belirgin bir fark söz konusu iken, kirişlerde bu fark %6 seviyesindedir. Bununla birlikte, her iki analiz programında da herhangi bir elemanın İleri Hasar Bölgesi'ne ulaşmadığı görülmüştür. Bu durum, yapının performansının TBDY 2018 kapsamında öngörülen Kontrollü Hasar Performans Seviyesi'ni sağladığını göstermektedir. Ancak elde edilen bulgular, kullanılan analiz yazılımının, hasar dağılımı ve oranları üzerinde etkili olduğunu ortaya koymakta; dolayısıyla analiz programı seçiminin, performans değerlendirme sonuçlarını belirli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir.

Tüm bu bulgular, yönetmeliklerin mevcut bir yapı üzerinde nasıl farklı performans senaryoları oluşturabileceğini ortaya koymuş; yönetmeliklerin mühendislik kararları üzerindeki belirleyici etkisini vurgulamıştır. Öte yandan, çalışmanın bazı sınırlılıkları da dikkate alınmalıdır. Özellikle itme analizinin dinamik ve çevrimsel deprem etkilerini tam anlamıyla temsil edememesi, sayısal modellemede kullanılan malzeme özellikleri, plastik mafsal tanımları, sönüm oranları ve sınır koşulları gibi kabullerin sonuçlar üzerindeki etkisi, değerlendirme sürecinin temel sınırlayıcı faktörleri olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, her üç yönetmelik de mevcut yapının performans hedeflerini sağladığını belirtmiş olsa da, bu değerlendirmeler farklı mühendislik anlayışları, kabuller ve beklentiler çerçevesinde şekillenmiştir. Bu durum, mühendislerin yalnızca "ne"yin olduğunu değil, aynı zamanda "nasıl" ve "neden" olduğunu da sorgulaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Burada elde edilen sonuçlar sadece örnek bina için yapılan performans analizlerinden elde edilen sonuçlar olup henüz tüm binalar için genellemek uygun değildir. Gelecekte yapılacak benzer çalışmaların, farklı yapı tipleri ile genişletilmesi ve yönetmelikler arası uyumun daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

AFAD, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Akbıyık, A. S. (2023). *Farklı yönetmeliklere göre tanımlanan kesit hasar sınırlarının düşük ve orta katlı binaların performansı üzerindeki etkileri* (Master's thesis, Pamukkale University, Denizli, Turkey).

American Society of Civil Engineers. (2017). ASCE/SEI 41-17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. Reston, Virginia.

Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H., & Miranda, E. (1991). Design guidelines for ductility and drift limits. *Rep. No. UCB/EERC-91*, *15*.

Bhatt, C., & Bento, R. (2012, September). A comparison between American and European codes on the nonlinear static analysis of RC buildings. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal* (pp. 24-28).

Causevic, M., & Mitrovic, S. (2011). Comparison between non-linear dynamic and static seismic analysis of structures according to European and US provisions. *Bulletin of earthquake engineering*, *9*, 467-489.

Chopra, A. K. (2004, August). Estimating seismic demands for performance-based engineering of buildings. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Mira Digital Publishing, Canada*.

Cirak Karakas, C., Palanci, M., & Senel, S. M. (2022). Fragility based evaluation of different code-based assessment approaches for the performance estimation of existing buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *20*(3), 1685-1716.

Council, A. T. (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings; Report No. *SSC 96-01: ATC-40*, *1*.

Dalyan, İ., & Şahin, B. (2019). Mevcut betonarme bir binanın 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre deprem yükleri altındaki taşıyıcı sistem perfomansının değerlendirilmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, *1*(2), 134-147.

Dhanvijay, V., Telang, D., & Nair, V. (2015). Comparative study of different codes in seismic assessment. *Comparative Study of Different Codes in Seismic Assessment*, *2*(4), 1371-1381.

European Committee for Standardization (EC), 2005. "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Strengthening and repair of buildings" European Standard, EC-8-3, BS EN 1998–3, Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.

Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. *Earthquake spectra*, *16*(3), 573-592.

Fajfar, P. (2021). The story of the N2 method. *International association for earthquake engineering.*

Fajfar, P., & Fischinger, M. (1988, August). N2-A method for non-linear seismic analysis of regular buildings. In *Proceedings of the ninth world conference in earthquake engineering* (Vol. 5, pp. 111-116).

Fema, A. (2005). 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. *FEMA-440, Redwood City*, *7*(9), 11.

FEMA 356, F. E. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA*.

Foroughi, S., ve Yüksel, B. (2022). TBDY 2018'e göre doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile betonarme yapı sistemlerinin performans analizi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *5*(1), 33-55.

Freeman, S. A. (1975). Evaluations of existing buildings for seismic risk-A case study of Puget Sound Naval Shipyard. In *Proc. 1st US Nat. Conf. on Earthquake Engrg., Bremerton, Washington, 1975* (pp. 113-122).

Giannopoulos, P. I. (2009, October). Seismic Assessment of RC Building according to FEMA 356 and Eurocode 8. In *16th Conference on Concrete, TEE, ETEK* (pp. 21-23).

Girgin, K., Yüksel, E., Karabulut, A., & Çakirterzi, S. (2013). DBYBHY2007 ve FEMA440 da önerilen performans noktasi belirleme yaklaşimlarinin karşilaştirilmasi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *19*(3).

Goel, R. K. (2008). Evaluation of current nonlinear static procedures for reinforced concrete buildings. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 12-17).

Goel, R. K., & Chadwell, C. (2007). Evaluation of current nonlinear static procedures for concrete buildings using recorded strong-motion data. *Data Utilization Report California Strong Motion Instrumentation Program*.

Goel, R. K., & Chadwell, C. (2008). Evaluation of ASCE-41 nonlinear static procedure using recorded motions of reinforced-concrete buildings. In *Structures congress 2008: Crossing borders* (pp. 1-11).

Guyader, A. C., & Iwan, W. D. (2006). Determining equivalent linear parameters for use in a capacity spectrum method of analysis. *Journal of Structural Engineering*, *132*(1), 59-67.

Güler, K., & Celep, Z. (2020, February). On the general requirements for design of earthquake resistant buildings in the Turkish Building Seismic code of 2018. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 737, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.

İstanbul Planlama Ajansı (IPA). (2024). Türkiye'de Depremın 25 Yılı. *İstanbul Büyükşehir Belediye iştiraki Kültür A.Ş.*, İstanbul, Türkiye.

Işık, E., Harirchian, E., Bilgin, H., & Jadhav, K. (2021). The effect of material strength and discontinuity in RC structures according to different site-specific design spectra. *Res. Eng. Struct. Mater*, *7*(3), 413-430.

Jamal, R., ve Yüksel, B. (2021). TBDY 2018 ve ASCE 41-17'e Göre doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile yapı sistemlerinin performans analizin elde edilmesi ve karşılaştırması. *El-Cezeri*, *8*(1), 432-444.

Karabulut, A. (2011). *TDY2007 yönetmeliği ve FEMA 440 raporunda tanımlanan doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin mevcut betonarme binalar için karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).

Keyik, T. Z. (2019). *ASCE 41-17 ve Türk Deprem yönetmelikleri kapsamında mevcut betonarme bir binanın performans analizi ve sonuçlarının karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylul Universitesi).

Korkmaz, K. A., & Irtem, E. (2008, October). Evaluation of previous and current performance-based analysis method. In *The 14th world conference on earthquake engineering* (pp. 12-17).

Krawinkler, H. (1996, October). Pushover analysis: why, how, when, and when not to use it. In *Proceedings of the 65th Annual Convention of the Structural Engineers Association of California* (pp. 17-36).

Lagaros, N. D., & Fragiadakis, M. (2011). Evaluation of ASCE-41, ATC-40 and N2 static pushover methods based on optimally designed buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *31*(1), 77-90.

Leslie, R., & Naveen, A. (2017). A study on pushover analysis using capacity spectrum method based on Eurocode 8. In *16th World Conference on Earthquake Engineering, Reg Code: S-P148645023, Santiago, Chile*.

Miranda, E., & Ruiz García, J. (2002). Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *31*(3), 539-560.

Plaza Ascencio, R. E. (2022). *Comparative analysis of seismic evaluation methods for RC walls in ASCE 41-17 and Eurocode 8-3* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Santos, S. H. C., Giarlelis, C., Traykova, M., Lima, S. S., Bucur, C., & Orrala, W. H. (2018). Comparative study of some seismic codes for building design regarding criteria for non-linear methods of analysis. In *16th European Conference on Earthquake Engineering*. Thessaloniki, Greece.

Sattar, S. (2018). Evaluating the consistency between prescriptive and performance-based seismic design approaches for reinforced concrete moment frame buildings. *Engineering Structures*, *174*, 919-931.

Sönmez, M. (2012). *DBYBHY-07 ve ASCE 41-06'da tanımlanan doğrusal olmayan performans değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).

Subasi, I., Caglar, N., Olabi, M. N., & Kasap, H. (2023). Evaluation of the performance limit states in codes for RC columns under different axial loads. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *48*(10), 13031-13045.

Uçar, B. (2019). *Betonarme bir hastane binasının DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 kapsamında deprem performansının değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).

Whittaker, A., Hamburger, R., & Mahoney, M. (2003, December). Performance-based engineering of buildings for extreme events. In *AISC-SINY symposium on resisting blast and progressive collapse* (pp. 55-66).

Zou, X. K., & Chan, C. M. (2005). Optimal seismic performance-based design of reinforced concrete buildings using nonlinear pushover analysis. *Engineering structures*, *27*(8), 1289-1302.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Omer HASANI
Doğum Yeri ve Tarihi	: Istanbul / TÜRKIYE- 1994
Yabancı Dil	: Türkçe, İngilizce ve Arabça

Eğitim Durumu

Lise	:
Lisans	: Helwan Üniversitesi (2014-2019)
Yüksek Lisans	: Uludağ Üniversitesi (2022-2025)

Çalıştığı Kurum(lar) :

İletişim (e-posta) : omarcivileng94@gmail.com

Akademik çalışmalar :

Hasani O. Ve Doğangün A. (2025). Seismic Performance Evaluation of a Case Study Building Designed Under the Turkish Building Earthquake Code 2018 Using the ASCE 41-17 Standard. *4th International Palestra Scientific Research Congress.* (pp. 150-165). Skopje, N. Macedonia.