



Farshad Farahmand

Firat University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
farahmandfarshad11@gmail.com, Elazığ-Türkiye

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2025.20.4.1A0497
ORCID ID	0009-0007-3569-438X
Corresponding Author	Farshad Farahmand

**MOD BİRLEŞTİRME VE DOĞRUSAL ZAMAN TANIMLI ANALİZ YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

ÖZ

Bu çalışma, sismik yapı analizinde temel dinamik yöntemler olan Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) ile Doğrusal Zaman Tanımlı Analiz (DZTA) yöntemlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Tepki Spektrumu Yöntemi, deprem spektrum verilerini kullanarak yapı modlarının katkılarını istatistiksel olarak birleştirir ve maksimum tepkileri hızlıca tahmin eder. Düzenli ve doğrusal-elastik davranan yapılar için hesaplama kolaylığı ve yönetmeliklere uygunluğu nedeniyle ilk tasarım aşamalarında avantajlıdır. Ancak, MBY zamanla değişen veya doğrusal olmayan etkileri doğrudan modelleyemez. Buna karşın, DZTA, gerçek veya sentetik ivme kayıtlarıyla yapı tepkilerini zaman boyunca adım adım hesaplar. Bu yaklaşım, yüksek mod etkilerinin belirgin olduğu, burulma düzensizlikleri veya karmaşık kütle-rijitlik dağılımı içeren yapılarda daha güvenilir sonuçlar verir. Analizler, doğrusal-elastik varsayım altında gerçekleştirilmiştir. Bulgular, standart yapılar için ilk tasarımda MBY'nin yeterli doğruluk sağladığını; ancak yüksek mod katkısı olan veya düzensiz geometriye sahip yapılarda DZTA'nın üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu iki yöntemin birlikte veya tamamlayıcı biçimde kullanılması, performansa dayalı sismik tasarımın güvenilirliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırabilir.

Anahtar Kelimeler: Tepki Spektrumu Analizi, Doğrusal Zaman Geçmiş Analizi, Sismik Performans, ETABS Modellemesi, Mod Birleştirme

**COMPARISON OF MODE COMBINATION AND LINEAR TIME HISTORY ANALYSIS
METHODS**

ABSTRACT

This study presents a comparative evaluation of two fundamental dynamic analysis techniques widely employed in seismic structural assessment: the Response Spectrum Method (RSM) and the Linear Time History Analysis (LTHA). The RSM statistically combines the contributions of structural modes using earthquake spectrum data to estimate maximum responses quickly. This method offers computational simplicity, speed, and code compliance, making it advantageous for the preliminary design of regular, linear-elastic structures. However, the RSM cannot directly capture time-varying or nonlinear structural behaviors. In contrast, LTHA calculates the step-by-step response of the structure over time using real or synthetic ground acceleration records. This approach provides more reliable results for structures where higher mode effects are pronounced, or those exhibiting torsional irregularities and complex mass-stiffness distributions. The analyses in this work were conducted under the assumption of linear-elastic behavior. Findings indicate that while the RSM provides sufficient accuracy for the initial design of standard buildings, the LTHA yields more dependable results in structures with significantly higher mode contributions or irregular geometries. Consequently, the complementary use of both methods can significantly enhance the reliability and robustness of performance-based seismic design.

Keywords: Response Spectrum Analysis, Linear Time History Analysis, Seismic Performance, ETABS Modeling, and Mode Combination

How to Cite:

Farahmand, F., (2025). Mod birleştirme ve doğrusal zaman tanımlı analiz yöntemlerinin karşılaştırılması. Engineering Sciences, 20(4):65-83,
DOI: 10.12739/NWSA.2025.20.4.1A0497.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya çapında sismik olayların artan sıklığı ve yoğunluğu, depreme eğilimli bölgelerde gelişmiş ve güvenilir yapısal analiz tekniklerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Dinamik yükleme koşulları altında binaların yapısal bütünlüğünün sağlanması, Türkiye gibi yüksek riskli bölgelerde kamu güvenliği için kritik bir konudur. Geleneksel statik analiz yöntemleri, basit ve yaygın olarak kullanılmasına rağmen, sismik kuvvetlerin gerçek zamanlı, doğrusal olmayan ve kümülatif etkilerini yakalamada yetersizdir. Bu nedenle yapı mühendisliği alanı, deprem kaynaklı yüklerin zamana bağlı doğasını daha doğru bir şekilde temsil eden dinamik analiz yöntemlerine doğru bir paradigma kayması yaşamaktadır [1].

Yapısal dinamikler, binaların zamanla değişen yüklere nasıl tepki verdiğini iki temel yöntem kullanarak inceler: Mod Birleştirme (Tepki Spektrum Analizi) ve Doğrusal Zaman Tanımlı Analiz (DZTA). Tepki Spektrum Analizi, modal katkıları istatistiksel olarak birleştirilerek en yüksek yapısal tepkileri tahmin eder; bina kodlarına uygundur ve ön tasarım aşamalarındaki düzenli yapılar için verimli bir yöntemdir. Ancak, ayrıntılı zamansal tepkiyi yakalamada yetersiz kalır. Buna karşılık, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, gerçek veya simüle edilmiş yer hareketi verilerini doğrudan yapısal modele uygulayarak, zamana bağlı yer değiştirmelerin ve burulma etkilerinin kapsamlı bir değerlendirmesini sağlar. Bu yöntem, performansa dayalı sismik tasarım için vazgeçilmezdir. Bu çalışmada, bu iki temel yöntemin karşılaştırılması hedeflenmiştir; ancak DZTA'nın hesaplama maliyetinin düşük olması ve yapının elastik davranışının orta şiddetteki depremler altında değerlendirilmesine uygunluğu nedeniyle, analizler doğrusal yaklaşımla gerçekleştirilmiştir.

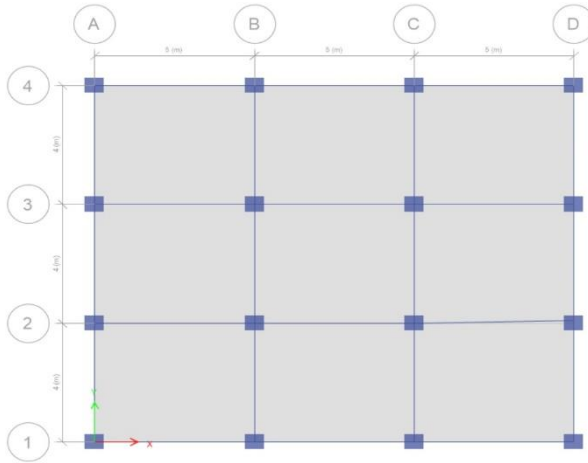
Sismik analiz yöntemleri, artan yapısal karmaşıklığa ve deprem mühendisliğinde daha doğru tahminlere olan talebe yanıt olarak gelişmiştir. Alan, statik prosedürlerden, zamana bağlı sismik etkileri daha etkili bir şekilde temsil eden dinamik yöntemlere kaymıştır. Tepki Spektrum Analizi (RSA), kod uyumluluğu ve ön değerlendirmeler için güvenilir ve pratik bir araç olmaya devam etse de, Miranda ve Taghavi (2005), daha yüksek modlu etkilerin ve karmaşık etkileşimlerin kritik hale geldiği düzensiz veya yüksek katlı yapılar için yeterli olmayabileceğini vurgulamıştır [4].

Clough ve Penzien (2003)'nin de belirttiği gibi, DZTA; burulma düzensizlikleri, dinamik amplifikasyon ve akma sonrası davranış dahil olmak üzere gerçek zamanlı tepkiler hakkında değerli bilgiler sağlar [5]. Benzer şekilde, Makris ve Black (2004), RSA'nın içsel doğrusallığının elastik olmayan davranışı yakalamadaki etkinliğini sınırladığını ve gerçek dünya yapılarında sismik performansın doğru bir şekilde değerlendirilmesi için DZTA yöntemlerini gerekli kıldığını belirtmiştir [6]. Kalkan ve Kunnath (2006), DZTA'nın doğrusal olmayan sistemlerde katlar arası kaymayı ve taban kaymasını daha doğru bir şekilde tahmin ettiğini gösterirken [7], Antoniou ve Pinho (2004), şiddetli sismik olaylar sırasında kademeli çökme mekanizmalarını yakalamada DZTA'nın üstünlüğünü doğrulamıştır [8]. Literatür toplu olarak, DZTA'nın özellikle yapısal düzensizlikler ve performansa yönelik tasarım hedefleri ele alındığında yüksek doğruluklu analiz için gerekli olduğunu, RSA'nın ise hızı ve basitliği nedeniyle vazgeçilmez bir araç olmaya devam ettiğini ileri sürmektedir.

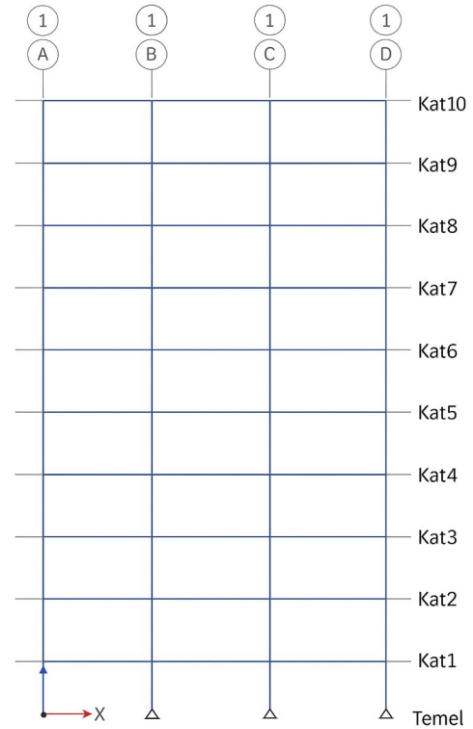
Bu çalışmanın sismik yapı mühendisliğinde doğru ve güvenilir dinamik analiz yöntemlerine olan artan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Özellikle Türkiye gibi depreme eğilimli bölgelerde kentleşme genişledikçe, sismik yükleme altında binaların yapısal güvenliğini sağlamak acil bir endişe haline gelmiştir [9]. Mod Birleştirme gibi geleneksel doğrusal yöntemler, karmaşık, zamanla değişen sismik

kuvvetlerin doğasını yakalamada sıklıkla başarısız olmaktadır. DZTA, performansa dayalı sismik tasarım için olmazsa olmaz olan doğrusal olmayanlıkların, artık yer değiştirmelerin ve burulma tepkilerinin ayrıntılı modellemesini sağlar [10]. Dahası, çalışma, kod tabanlı uyumluluk ile gerçek sismik performans arasındaki önemli boşluğu ele almaktadır [11]. DZTA, spektrum tabanlı yöntemlerde göz ardı edilen katlar arası kayma ve artık yer değiştirmeler gibi kritik performans göstergelerini yakalayarak bu boşluğu kapatmaya yardımcı olur. Mühendislerin, gerçek deprem davranışını daha iyi temsil eden yöntemleri benimsemek için aşırı basitleştirilmiş prosedürlerin ötesine geçmeleri teşvik edilmektedir.

Bu kapsamda, çalışma, yüksek sismik risk bölgesinde bulunan iki on katlı betonarme konut binasında Tepki Spektrum Analizi ve Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi'ni karşılaştırmıştır. Her yöntemin dayanıklılıklarını ve uygulamalarını değerlendirmek için modeller, Türk Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY 2018) uygun olarak yerel parametrelere dayalı olarak ETABS'de geliştirildi [2 ve 3]. Araştırma, ETABS modelleme yazılımı ve TBDY 2018 kullanılarak uygulanmıştır ve bu sayede karşılaştırma gerçekçi ve pratik bir bağlama oturtulmuştur. Bu, bölgesel kod standartlarıyla uyumlu araçlar ve prosedürler arayan yapı mühendisleri için çalışmanın faydasını artırır [12].



Şekil 1. 10 katlı binanın taşıyıcı sistemine ait plan görünümü
(Figure 1. Plan view of the carrier system of the 10-storey building)



Şekil 2. 10 katlı yapısal modelin düşey görünüşü
(Figure 2. Vertical view of the 10-storey structural model)

Ek olarak, bu çalışma sismik tasarımda hibrit stratejilerin önemini vurgular. Ön aşamalarda Mod Birleştirmenin ve nihai değerlendirmelerde Doğrusal Zaman Tanımlı Analizinin kullanılması hem pratik uyumluluk hem de sağlam performans değerlendirmesi sağlar [13]. Her iki yöntemi de pratik bir tasarım ve analiz çerçevesi içinde

karşılaştırarak, çalışma yapısal mühendislik uygulamasının evrimine katkıda bulunur. Elde edilen içgörüler, mühendislik kültüründe basitleştirilmiş, kod-minimum çözümlere güvenmekten, sismik yükler altında yapısal davranışı gerçekten yansıtan gelişmiş, senaryoya özgü yöntemlerin benimsenmesine doğru bir değişimi teşvik eder [14].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEACH SIGNFICANTE)

Bu çalışma gerçekçi sismik senaryolarda Mod Birleştirme ve Zaman Tanımlı Analizi yöntemlerinin karşılaştırmalı performansına ilişkin kritik içgörüler sunmaktadır. Ayrıca bu çalışma yalnızca iki temel dinamik analiz yöntemini karşılaştırarak akademik anlayışı ilerletmekle kalmıyor, aynı zamanda gerçek dünya projeleri için eyleme geçirilebilir rehberlik de sağlamaktadır. Yapı türüne, sismik riske ve tasarım hedeflerine dayalı yöntem seçimini vurgulayarak, mühendisleri analitik yaklaşımlarını proje taleplerine göre uyarlamaya teşvik etmektedir. Bu durum giderek sürdürülebilirliğe, dayanıklılığa ve yaşam döngüsü performansına öncelik veren deprem mühendisliğinin uzun vadeli vizyonu ile uyumludur [15].

Önemli Noktalar (Highlights)

- Mod Birleştirme ve Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi yöntemlerinin gerçekçi sismik senaryolarda karşılaştırılması, deprem davranışının doğru modellenmesi için kritik performans farklarını ortaya koymaktadır.
- Çalışma, spektrum tabanlı doğrusal analiz ile zaman tanımlı analiz arasındaki boşluğu vurgulayarak, özellikle düzensiz veya yüksek katlı binalarda doğrusal olmayanlık, burulma etkileri ve artık yer değiştirmeler gibi gerçek performans göstergelerinin önemini göstermektedir.
- ETABS ve TBDY 2018 kullanılarak yapılan uygulama, mühendislik pratiği için pratik bir çerçeve sunmakta ve hibrit tasarım stratejilerinin (erken aşamada Mod Birleştirme, nihai değerlendirmede Zaman Tanımlı Analiz) sismik dayanıklılığı artırmadaki etkinliğini kanıtlamaktadır.

3. MOD BİRLEŞTİRME VE DOĞRUSAL ZAMAN TANIMLI ANALİZ YÖNTEMLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ (GENERAL CHARACTERISTICS OF MODE COMBINATION AND LINEAR TIME-HISTORY ANALYSIS METHODS)

Yapıların depremler altındaki davranışlarını anlamak için doğru analiz araçlarının kullanılması gerekir. Bu bölümde, yapıların sismik tepkisini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan iki dinamik analiz yöntemi, yani Mod Birleştirme ve Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi ele alınmakta, bu yöntemlerin temel prensipleri, kullanım alanları ve yapı tepkisini yakalamadaki farklılıkları vurgulanmaktadır.

3.1. Mod Birleştirme Yöntemi (Mode Combination Method)

Mod Birleştirme Yöntemi, modal süperpozisyon yöntemi olarak da bilinir, sismik mühendislikte yaygın olarak kullanılan doğrusal bir dinamik analiz tekniğidir. Bu yöntem, bir yapının depreme karşı toplam dinamik tepkisinin, yapıyı her biri doğal bir titreşim moduna karşılık gelen bir dizi bağımsız modal tepkiye ayrıştırarak yaklaşık olarak hesaplanabileceği ilkesine dayanır. İşlem, yapının doğal frekanslarının, mod şekillerinin ve modal kütle katılım faktörlerinin belirlendiği bir modal analizle başlar. Her mod, belirli bir frekansla ilişkili benzersiz bir deformasyon desenini temsil eder. Bu modal özellikler hesaplandıktan sonra, her modun sismik uyarıma tepkisi, genellikle sismik kodlardan üretilen bir tepki spektrum kullanılarak değerlendirilir. Daha sonra, yer değiştirmeler, ivmeler veya iç kuvvetler gibi en yüksek modal

tepkiler, toplam yapısal tepkiyi yaklaşık olarak hesaplamak için istatistiksel olarak birleştirilir.

En sık kullanılan modal birleştirme teknikleri şunlardır:

- **Kare Kök Kareler Toplamı:** Bu yöntem modal tepkilerin istatistiksel olarak bağımsız olduğunu varsayar ve bu da onu modal frekansların iyi ayrıldığı durumlar için uygun hale getirir. Bu yaklaşım basittir ve genellikle muhafazakar sonuçlar verir.

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_n^2} \quad (1)$$

R, toplam birleşik yanıtı temsil eder.

$R_1, R_2, \dots, R_n$ farklı modlardan (örneğin yer değiştirmeler veya ivmeler) elde edilen tepkilerdir.

- **Tam Karesel Kombinasyon:** Bu yöntem modal korelasyonu hesaba katar ve özellikle modlar birbirine yakın olduğunda veya yapı önemli sönümlleme gösterdiğinde etkilidir. Esnek veya düzensiz yapılar için daha doğru sonuçlar üretir. Mod Birleştirme Yöntemi, analitik netliği ve pratik faydası nedeniyle yapısal dinamiklerde bir köşe taşı olmaya devam etmektedir. Ancak, içsel varsayımları, özellikle ayrıntılı doğrusal olmayan veya Zaman Tanımlı değerlendirmeleri gerektiren performansa dayalı tasarım senaryolarında dikkatli uygulama gerektirir [16].

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_i R_j \rho_{ij}} \quad (2)$$

ρ_{ij} , i ve j modları arasındaki intermodal korelasyon katsayısını temsil eder.

3.2. Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi (Linear Time History Analysis)

Günümüzde Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, yapı mühendisliğinde kullanılan en gelişmiş ve ayrıntılı dinamik analiz tekniklerinden biridir. Mod Birleştirme (Tepki Spektrum Analizi) gibi tepe tepkileri tahmin eden tepki tabanlı yaklaşımların aksine, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, uygulanan yer hareketi kayıtları altında hareket denklemlerini artımlı olarak çözerek bir yapının tüm tepkisini zaman içinde değerlendirir. Bu kayıtlar gerçek (geçmiş depremler sırasında kaydedilmiş) veya sentetik (yerel sismik özelliklerle eşleştirilmiş) olabilir. Doğrusal Zaman Tanımlı analizinde, yer değiştirmeler, hızlar, ivmeler, katlar arası kayma ve iç kuvvetler gibi yapısal tepkiler zaman içinde izlenir. Bu yaklaşım, mühendislerin doğrusal veya modal tabanlı yöntemlerin yakalayamadığı hasarın kademeli birikimini, dinamik amplifikasyon etkilerini ve akma sonrası davranışı gözlemlemelerine olanak tanır [17].

Newmark-Beta yöntemi ve Wilson-θ yöntemi gibi sayısal bütünleştirme teknikleri, adım adım çözümler gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemler, atalet, sönümlleme ve sertlik arasındaki etkileşimleri hesaba katar ve doğrusal olmayan malzeme davranışı, sertlik bozulması, histerezis ve geometrik doğrusal olmayanlığı karşılayabilir. Sonuç olarak, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, düzensiz yapılandırmalara, doğrusal olmayan elemanlara veya kritik performans gereksinimlerine sahip yapılar için özellikle etkilidir [18].

Karmaşıklığına rağmen, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi dinamik analiz için altın standart olarak kabul edilir ve özellikle düzensiz, yüksek şiddette olan veya yönetmelikleri aşan yapılar için sismik güvenlik değerlendirmeleri için kritik öneme sahiptir.

3.3. Mod Birleştirme ve Doğrusal Zaman Tanımlı Analizinin Pratik Kullanımı (Practical Use of Mode Combination and Linear Time-History Analysis)

Önemli mühendislik projeleri, Mod Birleştirme ve Zaman Tanımlı Analizinin farklı sismik tasarım gereksinimlerini nasıl

karşılayabileceğini göstermektedir. Orta derecede sismik bir bölgede bulunan orta yükseklikteki bir ofis binası için, Tepki Spektrum Analizi, yapının basit dinamikleri nedeniyle verimli, koda uygun bir tasarıma olanak sağlamıştır. Buna karşılık, yüksek riskli bir alanda bulunan bir asma köprü, yoğun yer hareketleri altında doğrusal olmayan davranışı ve karmaşık etkileşimleri doğru bir şekilde yakalamak için Zaman tanımlı Analizini kullanmıştır. Bu örnekler, analiz yöntemlerinin proje karmaşıklığına ve sismik taleplere göre seçilmesinin önemini vurgulamaktadır; Mod Birleştirme rutin tasarımlar için uygundur, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi ise kritik veya doğrusal olmayan sistemler için gereklidir [19].

3.4. Malzeme Özellikleri ve Şartnamesi (Material Properties and Specifications)

Malzeme özellikleri aşağıdaki gibi atanır:

Beton:

Birim hacim başına ağırlık	= 24.9926 KN/m ³
Birim hacim başına kütle	= 2548.538 Kg/m ³
Elastikiyet Modülü	E = 27386.13 MPa
Isıl Genleşme Katsayısı	A = 0.000013 1/C
Tutku Oranı	U = 0.2
Kayma Modülü	G = 11410.8 MPa
Belirtilen Beton Basınç Dayanımı, f'_c	= 30 MPa

Tablo 1. Kabul kriterleri suşlar
(Table 1. Acceptance criteria strains)

	Tansiyon	Sıkıştırma	
IO	0.01	-0.003	mm/mm
LS	0.02	-0.006	mm/mm
CP	0.05	-0.015	mm/mm

Tablo 2. Parametresel gerinim verileri
(Table 2. Parameterial strain data)

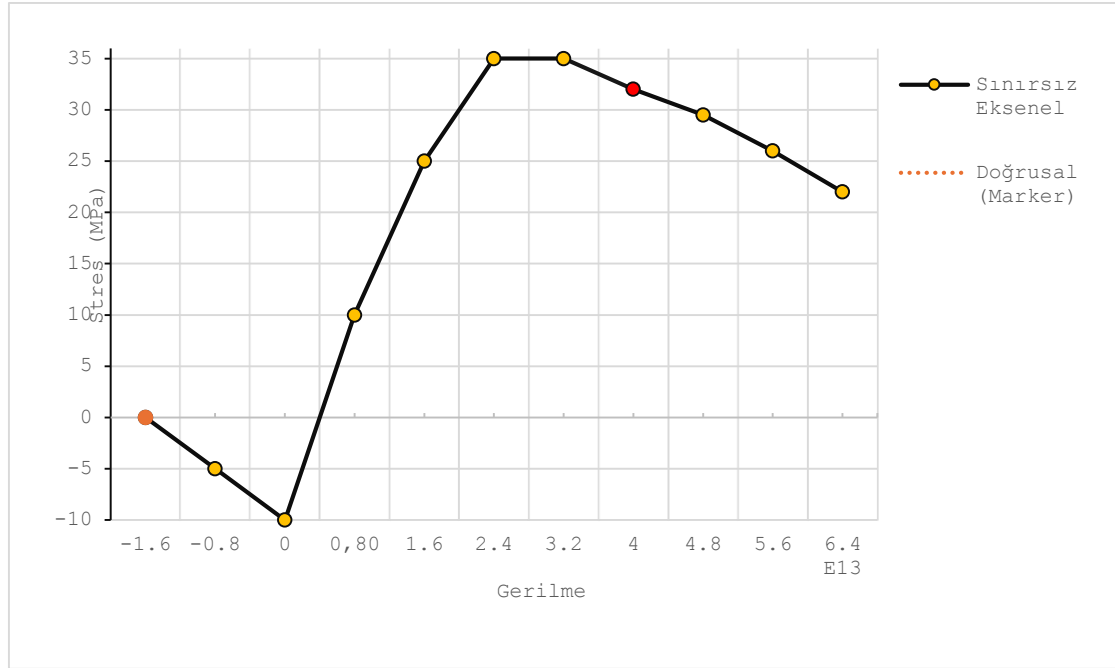
Basınç Dayanımının Sınırlandırılmamış Halindeki Gerinim, f'_c	0.002219	mm/mm
Nihai Sınırsız Gerilim Kapasitesi	0.005	mm/mm
Son Sıkıştırma Eğimi (E Üzerindeki Çarpan)	-0.1	mm/mm

Tablo 3. Kabul kriterleri suşlar
(Table 3. Acceptance criteria strains)

	Tansiyon	Sıkıştırma	
IO	0.01	-0.005	mm/mm
LS	0.02	-0.01	mm/mm
CP	0.05	-0.02	mm/mm

Tablo 4. Parametresel gerinim verileri
(Table 4. Parameterial strain data)

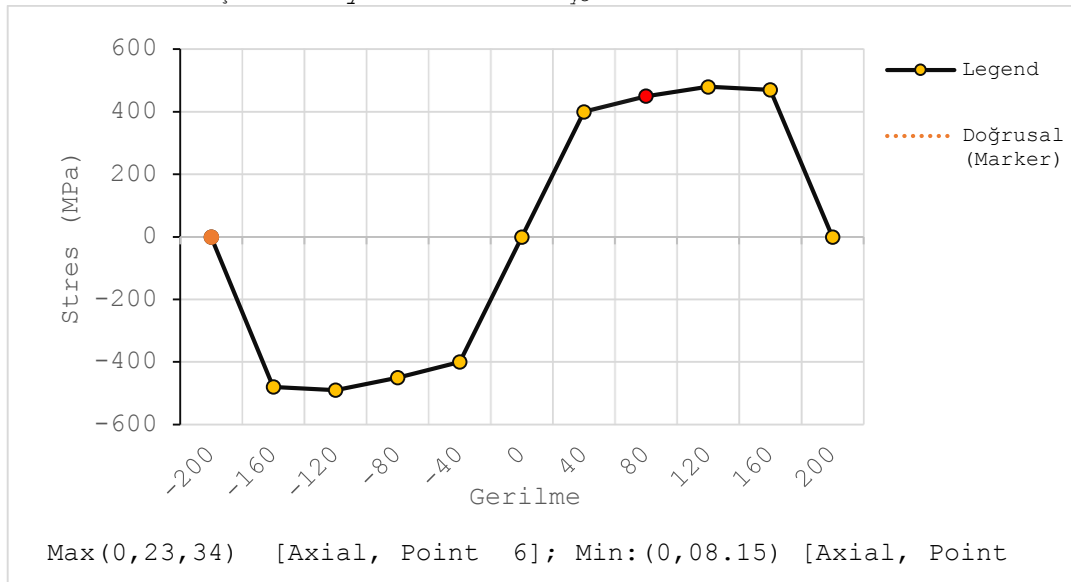
Gerilim Sertleşmesinin Başlangıcındaki Gerilim	0.015	mm/mm
Maksimum Streste Zorlanma	0.11	mm/mm
Kopma Anındaki Gerilme	0.17	mm/mm
Son Eğim (E'deki Çarpan)	-0.10	mm/mm



Şekil 3. Beton için malzeme gerilim-gerinim diyagramı
(Figure 3. Material stress-strain diagram for concrete)

Donatı Çelikleri:

Birim hacim başına ağırlık	= 76.9729 KN/m ³
Birim hacim başına kütle	= 7849.047 Kg/m ³
Sınıf	= 60
Elastiklik Modülü	E = 210000 MPa
Isıl Genleşme Katsayısı	A = 0.0000117 1/C
Minimum Akma Dayanımı	F _y = 345 MPa
Minimum Çekme Dayanımı	F _u = 450 MPa
Beklenen Akma Dayanımı	F _{ye} = 379.5 MPa
Beklenen Çekme Dayanımı	F _{ye} = 495 MPa



Max(0,23,34) [Axial, Point 6]; Min:(0,08.15) [Axial, Point

Şekil 4. Çelik malzeme gerilim-gerinim diyagramı
(Figure 4. Stress-strain diagram of steel material)

Tablo 5. Yapısal modelde kullanılan sismik tasarım parametreleri
(Table 5. Seismic design parameters used in the structural model)

Kategori	Parametre	Değer
Yapısal Model	Kat Sayısı	10
	Kat Yüksekliği	3 m
	Deprem Yükleri İçin Üst Kat	Kat 10
	Deprem Yükleri İçin Alt Kat	Zemin Kat
Yük Yönleri	Dikkate Alınan Yönler	X ve Y
	Tüm Diyaframlar İçin Eksantriklik Oranı	0.05
Periyot Hesabı	Hesap Yöntemi	Program Tarafından Hesaplandı
	Katsayı C_t	0.028
	Üs Değeri α	0.8
Spektral Parametreler	Kısa Periyot Tasarım Spektral İvmesi (SDS)	1.93
	1 Saniyelik Tasarım Spektral İvmesi (Sd1)	1.45
	Zemin Sınıfı	ZC
	Uzun Periyot Geçiş Süresi	8 sn
Tasarım Katsayıları	Davranış Katsayısı (R)	8
	Kullanım Amacı Katsayısı (I)	1
	Yer Değiştirme Büyütme Katsayısı (C_d)	5.5

3.5. ETABS Modelleme (ETABS Modeling)

ETABS, sismik kuvvetlere maruz kalan yapıların modellenmesi ve analiz edilmesi için yaygın olarak kullanılır ve hem Mod Birleştirme hem de Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi için verimli bir platform sağlar. Bu iki yöntemi karşılaştıran ETABS, çeşitli sismik senaryolar altında binaların dinamik davranışını simüle etmek için sağlam bir çerçeve sunar. Tepki Spektrum Analizi, modal özellikleri belirleyerek ve bunları birleştirerek tepe tepkileri tahmin ederek ETABS'de kolayca uygulanabilir ve bu da onu düzenli, düşük karmaşıklıkta yapılar için ideal hale getirir. Tersine, ETABS'deki Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, yapının zamana bağlı davranışını gözlemlemek için kaydedilen veya simüle edilen yer hareketlerini uygulayarak ayrıntılı simülasyonlar sağlar ve doğrusal olmayanlıkları ve geçici etkileri etkili bir şekilde yakalar. Yazılımın her iki yöntemi tek bir modele entegre etme yeteneği, farklı sismik koşullar altında yapısal performansın kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını kolaylaştırır.

Tablo 6. Mod birleştirme ve zaman tanımlı analizi arasındaki x-yer değiştirme karşılaştırması
(Table 6. X-displacement comparison between mode combination and time-domain analysis)

Kat Seviyesi	Ux (mm) Mod Birleştirme	Ux (mm) Zaman Tanımlı	Anahtar Gözlem
10	184.77	184.79	Yakın bir uyum; her iki yöntem de tepe yer değiştirmesini doğru bir şekilde yakalar.
9-8	0.033/0.023	70.15/20.65	Zaman Tanımlı çok daha yüksek yer değiştirmeleri gösterir; Mod Birleştirme ise düşük tahminlerde bulunur.
7	61.52	0.022	Mod Birleştirme Zaman Tanımlı'da bulunmayan keskin bir artış gösteriyor.
Temel	52.17	-0.025	Mod Birleştirme gerçekçi olmayan taban yer değiştirmesini gösterir; Zaman Tanımlı sabit taban davranışını yansıtır.

Bu çalışmada, on katlı bir bina, yaygın olarak benimsenen iki sismik değerlendirme tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Karşılaştırma, dinamik yükleme altında yanal yer değiştirmeleri yakalamadaki etkinliklerini değerlendirmek için gerçekleştirilir. Hem düzenli hem de kritik kat tepkileri, yapısal davranıştaki değişiklikleri belirlemek için üç yönde (x, y, z) incelenir. Sonuçlar, her yöntemin avantajlarını ve sınırlamalarını, özellikle yer değiştirme doğruluğu ve modal etkileşimlere duyarlılık açısından vurgular [20 and 21] .

Tablo 7. Mod birleştirme ve zaman tanımlı analizi arasındaki y-yer değiştirme karşılaştırması
(Table 7. Y-displacement comparison between mode combination and time-domain analysis)

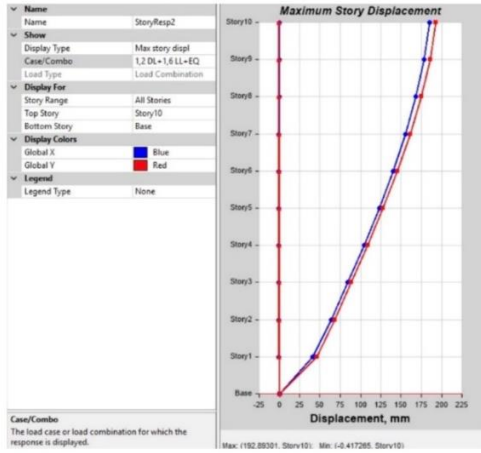
Kat Seviyesi	Uy(mm) Mod Birleştirme	Uy(mm) Zaman Tanımlı	Anahtar Gözlem
10	192.89	192.56	Üst düzeyde yakın bir mutabakat var; her iki yöntem de tepe yer değiştirmesini doğru bir şekilde yakalıyor.
9-8	80.65/44.33	0.045/0.028	Mod Birleştirme önemli ölçüde fazla tahmin ediyor; Zaman Tanımlı minimal yer değiştirmeyi gösteriyor.
6-5	0.022/0,009	92.77/23.21	Zaman Tanımlı, Mod Birleştirmede yansıtılmayan büyük yer değiştirme artışını yakalar.
Temel	80.65	54.26	Her iki yöntem de yüksek taban yer değiştirmesi göstermektedir; Mod Birleştirme abartmaktadır.

Tablo 8. Mod birleştirme ve zaman tanımlı analizi arasındaki z-yer değiştirme karşılaştırması
(Table 8. Z-displacement comparison between mode combination and time-domain analysis)

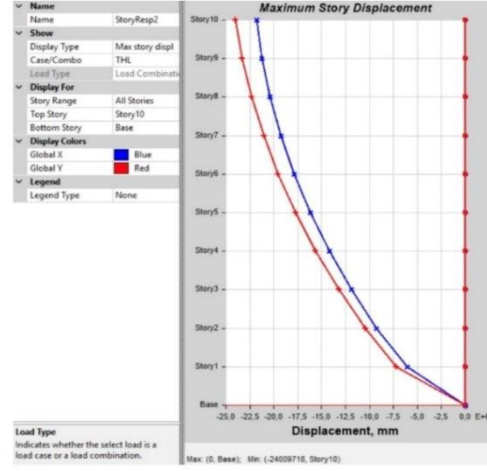
Kat Seviyesi	Uz (mm) Mod Birleştirme	Uz (mm) Zaman Tanımlı	Anahtar Gözlem
10. (Çatı)	-1.022	-1.016	Üst düzeyde güçlü bir mutabakat var; her iki yöntem de yer değiştirmeyi doğru bir şekilde yakalıyor.
9-8	2.96/1.89	-0.23/-0.64	Zıt yer değiştirme işaretleri; Mod Birleştirme aşırı tahmin eder ve yönü tersine çevirir.
7	-2.17	-0.001	Mod Birleştirme keskin bir negatif artış gösteriyor; Zaman Tanımlı sifıra yakın hareketi gösteriyor.
6-5	≈ 0	0.49/0.03	Zaman Tanımlı fark edilir yer değiştirmeyi yakalar; Mod Birleştirme neredeyse sıfırdır.
Temel	0.13	-2.29	Zaman Tanımlı önemli negatif taban hareketi gösteriyor; Mod Birleştirme bunu gerçekçi bir şekilde yakalamayı başaramıyor.

ETABS'den alınan bu grafik, ölü yük durumu altında Zaman Tanımlı Analizinden elde edilen maksimum kat yer değiştirme sonuçlarını temsil eder. Yatay eksen yer değiştirmeyi milimetre cinsinden gösterirken, dikey eksen binanın tabanından 10. kata kadar olan yüksekliğini temsil eder. Mavi eğri, Küresel X yönündeki yer değiştirmeyi gösterir ve kırmızı eğri, Küresel Y yönündeki yer değiştirmeyi gösterir. Dinamik analizde beklendiği gibi, yer değiştirmeler yükseklikle artar ve X yönü, Y yönünden daha yüksek değerler gösterir ve bu da daha büyük yanal tepkiyi gösterir. Bu analiz, yapının dinamik yüklemeye karşı gerçek zamanlı

tepkisini yakalayarak sismik performansı hakkında daha ayrıntılı bir anlayış sağlar.



Şekil 5. Mod birleştirme analizinden elde edilen maksimum kat öteleme örneği
(Figure 5. Example of maximum story drift obtained from mode combination analysis)



Şekil 6. Zaman tanımlı analizinden elde edilen maksimum kat yer değiştirme örneği
(Figure 6. Example of maximum floor displacement obtained from time-defined analysis)

Şekil 5 ve 6'da verilen ve ETABS'den alınan bu grafik, Mod Birleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen maksimum kat yer değiştirmelerini göstermektedir. Şekiller yatay eksen boyunca milimetre cinsinden yer değiştirmeyi ve dikey eksen boyunca bina yüksekliğini (kat seviyeleri) gösterir. Yer değiştirmeler hem Global X (mavi) hem de Global Y (kırmızı) yönleri için gösterilir. Tipik olarak, yer değiştirme yükseklikle birlikte artar ve yapının birleşik modal katkılara dayalı yanal yüklere tepkisini yansıtır.

4. MOD BİRLEŞTİRME VE DOĞRUSAL ZAMANTANIMLI ANALİZİN GENEL KARŞILAŞTIRMASI (A GENERAL COMPARISON OF MODE COMBINATION AND LINEAR TIME-HISTORY ANALYSIS)

4.1. Doğruluk Karşılaştırması (Accuracy Comparison)

Doğruluk açısından, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, dinamik yükleme altında tam zamana bağlı tepkiyi değerlendirerek yapısal davranışın önemli ölçüde daha ayrıntılı ve gerçekçi bir simülasyonunu sağlar. Tepe tepkileri, yük yeniden dağılımını, burulma etkilerini ve malzeme akması ve sertlik bozulması gibi doğrusal olmayan olayları yakalar. Bu özellikler genellikle Mod Birleştirme yöntemlerinde aşırı basitleştirilir veya atlanır. Mod Birleştirme, tipik olarak Tepki Spektrum Analizi aracılığıyla uygulanır. Analizi doğrusal elastik varsayımlara ve modal tepkilerin istatistiksel kombinasyonlarına dayanmaktadır. Düzenli, hafif sönümlü yapılar için etkili ve yeterli olsa da, elastik olmayan deformasyon, sismik darbe veya geçici temas olayları gibi karmaşık dinamik davranışları güvenilir bir şekilde temsil edemez. Karşılaştırmalı çalışmalar, Tepki Spektrum Analizinin kod tabanlı kontroller ve ön tasarım aşamaları için uygun olduğunu göstermiştir, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi ise kritik yapıları değerlendirirken veya performansa dayalı sismik değerlendirmeler yaparken vazgeçilmez hale gelmiştir [22].

4.2. Hesaplama Maliyeti ve Verimliliği (Computational Cost and Efficiency)

Sismik analiz yöntemlerini seçerken dikkate alınması gereken kritik bir faktör, hesaplama talepleridir. Modal birleştirme yaklaşımını kullanan Tepki Spektrum Analizi, modal ayrıştırma uygulaması nedeniyle oldukça verimlidir ve dinamik problemleri yönetilebilir hesaplamalara basitleştirir. Bu özellik, yöntemi standart tasarımlar, erken aşama değerlendirmeleri ve hızlı kod uyumluluk kontrolleri için ideal hale getirir. Buna karşılık, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, özellikle doğrusal olmayan modeller için tam hareket denklemlerinin zaman adımıyla bütünleştirilmesini gerektirir. Modern araçlar erişilebilirliği iyileştirmiş olsa da, bu yöntem hesaplama açısından yoğun olmaya devam eder ve ayrıntılı tepki analizi gerektiren karmaşık veya kritik yapılar için en uygundur[23].

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

5.1. Mod Birleştirme Analizinin Sonuçları (Results of Mode Combination Analysis)

Tepki Spektrum Analizinin bu çalışma kapsamında uygulanması, değerlendirilen betonarme binaların taban kesme kuvvetleri, maksimum kat yer değiştirmeleri ve katlar arası öteleme oranlarının TBDY-2018'in öngördüğü elastik sınırlar içerisinde kaldığını göstermiştir. Analiz sonuçları, özellikle geometrik olarak düzenli ve kütle dağılımı simetrik binalarda yöntemin yüksek doğrulukla çalıştığını ortaya koymuştur. Bu tür yapılarda birinci, ikinci ve üçüncü doğal titreşim modlarının toplam modal kütle katılım oranının %90'ın üzerine çıkması, Mod Birleştirme yaklaşımının temel varsayımlarından biri olan "birkaç baskın modla toplam davranışın temsil edilebileceği" kabulünün geçerliliğini doğrulamaktadır. Elde edilen yer değiştirme biçimleri, bina yüksekliği boyunca düzgün ve öngörülebilir bir dağılım sergilemiş; bu durum, global yapısal davranışın spektrum tabanlı analiz yöntemi tarafından etkili biçimde yakalandığını göstermiştir. Bununla birlikte çalışma, düzenli yapılarda gözlenen bu uygun performansın düzensiz binalara doğrudan aktarılamayacağını da göstermiştir. Kütle dağılımında, rijitlikte veya planda oluşan düzensizlikler, modal katkıların daha kompleks hâle gelmesine yol açtığından Tepki Spektrum Analizi'nin doğruluğu belirgin şekilde azalmaktadır. Analizler, özellikle burulma düzensizliği bulunan modellerde spektrum yönteminin, daha gelişmiş yöntemlerle doğrulanan kritik burulma taleplerini, yüksek mod etkilerini ve yumuşak kat oluşum potansiyelini yeterince ortaya koymadığını göstermiştir. Bu eksiklik, yöntemin zaman bağımlı deprem etkilerini doğrudan hesaba katmamasından kaynaklanmakta olup, spektral tabanlı yaklaşımların sınırlılıklarını bir kez daha vurgulamaktadır. Sonuç olarak Mod Birleştirme Analizi, düzenli ve elastik davranış gösteren yapılar için güvenilir ve hesaplama açısından verimli bir yöntemdir; ancak düzensiz yapıların sismik performansının tüm yönleriyle değerlendirilmesi için tek başına yeterli değildir. Bu nedenle kritik düzensizlik içeren yapılarda zaman tanım alanında analiz gibi daha kapsamlı yöntemlerin kullanılmasının gerekli olduğu literatürde de desteklenmektedir [24].

Tablo 9'dan da görüleceği üzere, Mod Birleştirme ve Doğrusal Zaman Tanımlı Analizinin pratik uygulamaları karşılaştırılmakta ve her yöntemin proje aşamasına, girdi hassasiyetine ve yazılım gereksinimlerine göre ne zaman en uygun olduğu vurgulanmaktadır.

Tablo 9. Mod birleştirme ve doğrusal zaman tanımlı analizinin pratik uygulaması ve esneklik tabanlı karşılaştırması
(Table 9. Practical application and elasticity-based comparison of mode combination and linear time-domain analysis)

Özellik	Mod Birleştirme	Doğrusal Zaman Tanımlı Analiz
Tasarım Aşaması	Ön Tasarım	Son Tasarım ve Ayrıntılı Değerlendirme
Giriş Hassasiyeti	Düşük (Genel Spektrum)	Yüksek (Zemin Hareketi Verilerine Duyarlı)
Sonuç Yorumlama	Açık sözlü	Karmaşık ve Uzmanlık Gerektirir
Yazılım Gereksinimleri	Temel ve Orta Seviye	Gelişmiş Yazılım Gerekli
Tercih Edilen Kullanım Durumu	Kod Uyumluluğu ve Düzenli Projeler	Performansa Dayalı ve Kritik Projeler

5.2. Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi Sonuçları (Linear Time History Analysis Results)

Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, yapının sismik uyarılar altındaki davranışını zaman ekseninde çözümleyerek, dinamik tepkinin hem genlik hem de faz bileşenlerini ayrıntılı biçimde ortaya koyar. Bu yöntemin en belirgin üstünlüğü, deprem hareketinin gerçek zamanlı gelişimini esas alması nedeniyle, yapısal performansı yalnızca maksimum değerler üzerinden değil, tüm zaman geçmişi boyunca değerlendirebilmesidir. Analiz sonuçları, hem gerçek deprem kayıtları hem de ölçeklendirilmiş yer hareketleri kullanıldığında, yapıya etki eden burulma taleplerinin, modal etkileşimlerin ve dinamik amplifikasyon etkilerinin yüksek doğrulukla yakalandığını göstermektedir. Elde edilen katlar arası öteleme oranları, belirli kat seviyelerinde Tepki Spektrum Analizi (Mod Birleştirme) sonuçlarına kıyasla 25% ila 40% arasında daha yüksek değerler göstermiştir. Bu farklılık, özellikle ara katlarda modal kuplajın belirginleştiği ve yapısal rijitliğin değişkenlik gösterdiği bölgelerde daha da belirgin hâle gelmiştir. Söz konusu durum, spektrum tabanlı yöntemlerin ortalama etkileri temsil etmesi nedeniyle, zaman bağımlı tepe taleplerini yakalamakta yetersiz kaldığını doğrulamaktadır.

Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi ayrıca deprem sonrası performans açısından kritik öneme sahip artık yer değiştirmeleri de ortaya koymuştur. Bu artık yer değiştirmeler, belirli kat seviyelerinde hizmet verebilirlik performansının sınırlandığını ve yapının deprem sonrası fonksiyonelliğinde potansiyel kayıpları işaret etmektedir. Bununla birlikte analiz, yük aktarım yollarında yoğunlaşan bölgelerde yerleşmiş plastik mafsallı eğilimlerini açıkça göstermiştir. Her ne kadar çalışma kapsamında kullanılan model tamamen elastik davranış varsayımıyla sınırlandırılmış olsa da, bu eğilimler yapısal zayıf bölgelerin belirlenmesi açısından değerlidir. Bu bulgular, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizinin, performansa dayalı sismik tasarım prensiplerinin gerektirdiği ayrıntılı değerlendirmeleri yapabilme kapasitesini vurgulamaktadır. Zaman Tanımlı yaklaşım, özellikle doğrusal olmayan davranışın etkilerinin önemli olduğu düzensiz, yüksek mod katkılı veya yüksek riskli yapılarda, Tepki Spektrumu Analizine göre çok daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır [25].

Tablo 10'dan da görüleceği üzere, her yöntemin yapısal düzensizlikleri, sönümlenme davranışını ve sismik yük değişkenliğini nasıl ele aldığına odaklanır. Her yaklaşımın değişen analitik karmaşıklık düzeyleri için uygunluğunu vurgular. Karşılaştırmalı değerlendirme, Tepki Spektrum Analizinin düzenli yapılarda kod uyumluluğunu sağlamak için etkili ve yaygın olarak kabul görmüş bir yöntem olmasına rağmen, gerçek zamanlı doğrusal olmayan etkileri doğru bir şekilde modellemek için gereken hassasiyetten yoksun olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, daha yoğun hesaplama gerektiren Doğrusal

Zaman Tanımlı Analizi, sismik yükleme altında yapısal tepkilerin daha kapsamlı ve doğru bir temsilini sağlar. Karmaşık binalarda veya kritik tesislerde, yalnızca Tepki Spektrum Analizine güvenmek olası güvenlik açıklarını göz ardı edebilirken, Zaman Tanımlı Analizi hasara eğilimli alanları belirlemek ve dayanıklı yapılar tasarlamak için gereken derinliği sağlar. Bu nedenle, ön aşamalarda Tepki Spektrum Analizi ve nihai performans değerlendirmeleri için Zaman Tanımlı Analizi kullanılarak hibrit bir yaklaşım önerilir [26]. Tablo 11'de görüldüğü üzere, girdi, maliyet ve doğrusal olmayan tepkiye dayalı olarak Mod Birleştirme ve Zaman Tanımlı Analizinin hızlı bir karşılaştırması sunulmaktadır.

Tablo 10. Yapısal ve analitik karmaşıklık mod birleştirme ve doğrusal zaman tanımlı analizine dayalı karşılaştırma
(Table 10. Comparison of structural and analytical complexity based on mode combination and linear time-domain analysis)

Özellik	Mod Birleştirme	Doğrusal Zaman Tanımlı Analiz
Yapısal Karmaşıklık	Düzenli Geometri için En İyisi	Düzensiz/Asimetrik Formlar için Uygun
Sönümlenmenin Göz Önünde Bulundurulması	Orantılı Sönümleme Varsayımı	Oransal Olmayan Sönümlemeye İzin Verir
Sismik Yük Değişkenliği	Genelleştirilmiş Yükleme	Siteye Özel ve Kayıtlara Özel
Maddi Davranış	Doğrusal elastik	Doğrusal Olmayan, Esneklik Dahil
Analiz Zamanı	Kısa	Uzun

Tablo 11. Yöntem özelliklerinin özeti
(Table 11. Summary of method features)

Özellik	Mod Birleştirme	Zaman Tanımlı Analizi
Tür	Doğrusal	Doğrusal/Doğrusal Olmayan
Giriş	Tepki Spektrumu	Zemin Hareketi Kaydı
Çıkış	Zirve Yanıtları	Tam Zamanlı Geçmişler
En Uygun Olduğu Alan	Düzenli Binalar	Düzensiz/Yüksek Riskli Yapılar
Doğrusal Olmayanlığı Yakalar	Hayır	Evet
Burulma Etkileri	Yaklaşık olarak	Doğru Yakalandı
Hesaplama Maliyeti	Düşük	Yüksek
Yönetmelik Uyumu	Kolay	Gelişmiş Doğrulama Gerektirir

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışma, dinamik yapısal davranışın değerlendirilmesinde kullanılan iki temel doğrusal sismik analiz yöntemi olan Mod Birleştirme (Tepki Spektrumu Analizi) ile Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi kapsamlı ve eleştirel bir şekilde karşılaştırmıştır. ETABS yazılımı kullanılarak modellenen on katlı betonarme yapı üzerinden elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar, yalnızca yöntemlerin teorik kabulleri ve analiz süreçlerindeki temel farklılıkları ortaya koymakla kalmamış; aynı zamanda her bir analiz yaklaşımının hangi mühendislik koşullarında daha uygun ve güvenilir olduğu konusunda detaylı bir değerlendirme sunmuştur. Bu bulgular, yöntem seçiminde tasarımcılar ve araştırmacılar için somut, yönlendirici ve uygulamaya dönük önemli bir rehber niteliği taşımaktadır. Basitliği ve hesaplama verimliliğiyle öne çıkan Mod Birleştirme Yöntemi, düzenli geometrik özelliklere ve çoğunlukla elastik davranış sergileyen yapılara uygulanabilirliği nedeniyle mühendislik pratiğinde yaygın biçimde tercih edilmektedir. Yöntemin doğrusal varsayımlara dayanması ve modal üst-üste binme prensibini esas alması, özellikle ön tasarım safhasında hızlı ve pratik değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, Tablo 6'dan Tablo 11'e kadar sunulan sonuçlar, Mod Birleştirme Yöntemi'nin doğrusal olmayan davranışın belirgin hâle geldiği durumlarda

dinamik tepkinin kritik ayrıntılarını yakalamakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Özellikle X ve Y yönlerindeki yer değiştirme değerlerinin karşılaştırıldığı tablolar incelendiğinde, yöntemin ara kat seviyelerinde (örneğin 8. ve 9. katlar) Doğrusal Zaman Tanımlı Analize kıyasla yer değiştirmeleri belirgin şekilde düşük tahmin ettiği açıkça görülmektedir. Buna karşılık, hesaplama maliyeti yüksek olmasına rağmen Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, yapının bir deprem etkisi altındaki davranışını tüm zaman geçmişi boyunca ayrıntılı biçimde ortaya koyma yeteneğine sahiptir. Bu yaklaşım, Tablo 7 ve Tablo 10'da sunulan bulgularla da doğrulandığı üzere; doğrusal olmayan etkilerin, kalıcı şekil değiştirmelerin, burulma düzensizliklerinin ve plastik mafsall oluşumu gibi performansa kritik davranışların doğru şekilde temsil edilebilmesine olanak tanır. Bu nedenle Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, performansa dayalı sismik tasarım uygulamalarında ve karmaşık geometriye veya düzensiz kat planlarına sahip yapıların değerlendirilmesinde vazgeçilmez bir araç olarak değerlendirilmektedir [27].

Tasarım süreci açısından değerlendirildiğinde, Mod Birleştirme Yöntemi özellikle tasarımın erken aşamalarında kod uyumluluğunun sağlanması için uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Yöntem, daha sınırlı girdi verisi gerektiren ve genelleştirilmiş tepki spektrumlarından yararlanarak kısa sürede sonuç üretebilen yaklaşımı sayesinde, mühendislik ölçeğinde hızlı konsept değerlendirmelerine imkân tanır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan davranışların veya değişken sönüm mekanizmalarının modellenmesindeki sınırlamaları, yöntemin nihai tasarımın doğrulanması veya güçlendirme senaryolarının ayrıntılı olarak incelenmesi gibi kritik mühendislik aşamalarında güvenilirliğini azaltmaktadır. Buna karşılık, Zaman Tanımlı Analizi daha gelişmiş ve ayrıntılı veri gereksinimlerine sahiptir; özellikle saha koşullarına uygun gerçek zemin hareketi kayıtlarının kullanılması yöntemin temel gerekliliklerindendir. Bu yönüyle, Tablo 9'da sunulan bulguların da ortaya koyduğu gibi, yük yollarının doğru belirlenmesinin, yerel hasar mekanizmalarının tespitin ve elastik ötesi performansın hassas şekilde modellenmesinin kritik olduğu son tasarım aşamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak bu gelişmiş doğruluk, beraberinde daha karmaşık bir modelleme sürecini getirir ve hem kullanıcı tarafında ileri düzey mühendislik deneyimi hem de yazılımın kapsamlı analitik yetenekleri gerektirir [28].

Bu çalışmanın elde ettiği bulgular, iki yöntem arasındaki doğruluk ve temsil kapasitesi farkını açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Mod Birleştirme Yönteminde üst kat yer değiştirmeleri genellikle muhafazakâr tahmin edilse de, alt ve orta kat seviyelerinde oluşan gerçek tepe tepkilerini ve dinamik büyütme etkilerini yakalama konusunda belirgin sınırlılıklar bulunmaktadır. Bu durum, özellikle düzenli olmayan kütle ve rijitlik dağılımlarına sahip binalarda belirginleşmekte ve yöntemin yapısal tepkileri yalınlaştırma eğilimi nedeniyle bazı kritik davranışları gözden kaçırmasına neden olmaktadır.

Öte yandan, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizi, spektral analizin öngöremediği kısa süreli, yüksek yoğunluklu ivme piklerini ve buna karşılık gelen katlar arası kayma artışlarını ayrıntılı biçimde yansıtabilmektedir. Nitekim sonuçlar, katlar arası göreceli ötelemelerde Tepki Spektrumu Analizine kıyasla %40'a varan daha yüksek değerlerin elde edildiğini göstermiştir; bu fark, özellikle performansa dayalı tasarım kapsamında can güvenliği, hasar kontrolü ve eleman plastikleşme sınırlarının değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir [29]. Bu tür tepkisel sivrilikler Mod Birleştirme Yöntemi tarafından filtrelenirken, Zaman Tanımlı Analiz bu davranışları tam zaman ekseninde yakalayarak daha gerçekçi bir yapısal çözüm sunmaktadır. Tablo 11, bu iki yöntem arasındaki ayrımı tasarım ekipleri açısından pratik bir özet formatında sunmaktadır. Mod Birleştirme, hesaplama verimliliği ve kod

gerekliliklerine uyum açısından önemli avantajlar sağlamakta; tasarım aşamasının erken ve orta evrelerinde hızlı karar alma süreçleri için uygun bir araç olarak kabul edilmektedir. Ancak orantısız sönümleme, mod bağlaşımı veya doğrusal olmayan davranış gibi karmaşık dinamik süreçleri temsil edememesi, yöntemin ayrıntılı performans değerlendirmelerinde kullanımını sınırlamaktadır. Buna karşılık Zaman Tanımlı Analizi bu sınırlamaları aşmakta ve yapının tam davranışını, gerçek zemin hareketlerinin etkisi altında zamanın tüm anlarında çözümleyerek modelleyebilmektedir. Bununla birlikte, daha uzun hesaplama süreleri, ayrıntılı girdi bilgisi ve ileri düzey analiz bilgisi gerektirmesi yöntemin pratik uygulama açısından daha yüksek uzmanlık talep ettiğini göstermektedir.

Karşılaştırmalı sonuçlar değerlendirildiğinde, alan uzmanları, yapı mühendisleri, standart ve kod geliştiricileri ile proje paydaşları açısından aşağıdaki hususların dikkatle ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır:

- **Hibrit Analiz Stratejisi Benimsenmesi:** Her iki yöntemin de birbirini tamamlayan güçlü yönleri göz önünde bulundurulduğunda, tasarım sürecinde hibrit bir analiz yaklaşımının benimsenmesi önerilmektedir. İlk aşamada, kod uyumluluğu gereksinimlerini verimli bir şekilde karşılayan Mod Birleştirme Yönteminin kullanılması, tasarımın hızlı ve yönetilebilir bir çerçevede şekillendirilmesine olanak tanır. Bunun ardından, özellikle düzensiz plan geometrisine sahip yapılar, yüksek önem katsayılı binalar ve doğrusal olmayan davranışın belirleyici olduğu yüksek riskli projelerde, Doğrusal Zaman Tanımlı Analizine geçilmesi, yapısal performansın ayrıntılı ve gerçekçi biçimde değerlendirilmesini sağlar. Bu iki aşamalı yaklaşım, hem mühendislik verimliliğini korumakta hem de performansa dayalı tasarım ilkelerinin gerektirdiği analitik derinliği sağlayarak daha güvenilir ve optimize edilmiş tasarım çıktılarının elde edilmesine katkıda bulunmaktadır [30].
- **Düzensiz veya Kritik Yapılar için Zaman Tanımlı Analizin Kullanılması:** Deprem sonrası güvenliğin ve hizmet verilebilirliğin pazarlık konusu olmadığı hastaneler, köprüler ve yüksek binalar için Zaman Tanımlı Analizi zorunlu olmalıdır. Doğrusal olmayan tepkileri ve artık sürüklenmeleri simüle etme yeteneği bu uygulamalar için olmazsa olmazdır [31].
- **Yazılım Okuryazarlığını Geliştirilmesi:** Yapı mühendisleri, her iki analiz türünü de destekleyen ETABS gibi gelişmiş yazılımlarda yeterlilik geliştirmeye teşvik edilmelidir. Bu çalışma, bu tür araçlarda ustalaşmanın sismik değerlendirmelerin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını ve tasarım ve iyileştirme sırasında daha iyi karar vermeyi sağladığını göstermektedir [32].
- **Kod Geliştirme Kuruluşlarını Her İki Yaklaşımı Entegre Etmeye Teşvik Edilmesi:** Düzenleyici uygulamayı sismik mühendislikteki ilerlemelerle uyumlu hale getirmek için, tasarım kodları hem doğrusal (Mod Birleştirme) hem de doğrusal olmayan (Zaman Tanımlı) analiz yöntemlerini entegre etmenin değerini giderek daha fazla kabul etmelidir. Özellikle yüksek sismik bölgelerde veya düzensiz konfigürasyonlara sahip yapılar için, Zaman Tanımlı Analizini kod hükümlerine dahil etmek, odak noktasını reçeteli uyumluluktan doğrulanmış performans sonuçlarına kaydırmaya yardımcı olacaktır [33].
- **Çeşitli Bina Tipolojileri için Karşılaştırmalı Çalışmalara Devam Edilmesi:** Daha ileri çalışmalar, her iki yöntemi kullanarak alçak katlı, taban izolasyonlu veya çelik çerçeveli yapıları test ederek bu çalışmayı genişletmelidir. Bu, bulguların uygulanabilirliğini

genişletecek ve tre özgü en iyi uygulamaların geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

Sonuç olarak, her sismik analiz yönteminin kendine özgü güçlü yanları olsa da, entegre kullanımları analitik verimlilik ve yapısal doğruluk arasında pratik bir denge sunmaktadır. Sismik tasarım alanı ilerledikçe, ilk değerlendirmeler için Mod Birleştirme ve ayrıntılı değerlendirmeler için Zaman Tanımlı Analizi kullanan bir hibrit yaklaşımın benimsenmesi daha dayanıklı ve performans odaklı mühendislik sonuçlarını teşvik eder. Gelecekteki araştırmalar, yapıları gerçek dünya sismik taleplerine daha iyi hazırlamak için bu ikili yöntem stratejisini standartlaştırmaya ve optimize etmeye odaklanmalıdır [34 ve 35].

NOT (NOTICE)

Bu alışma, Dr.C.E.Ekinci danışmanlığında, Fırat Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Teknolojileri ABD’de yürütülen "Investigation of buildings performance using mode combination and time history analysis" başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

ÇIKAR ATIşMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazar çıkar atışması bildirmemiştir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Yazar bu çalışma için herhangi bir mali destek almadığını beyan etmiştir.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarı bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chopra, A.K., (2017). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Chopra+Dynamics+of+Structures+2017>
- [2] Computers and Structures, Inc., CSI. (2020). ETABS 19 Structural Analysis and Design Software. Berkeley, California, USA.
<https://scholar.google.com/scholar?q=ETABS+19+Structural+Analysis+Design+Software+CSI>
- [3] Türk Standartları Enstits. (2018). Türk Bina Deprem Ynetmeliği TBDY-2018. Ankara, Türkiye: T.C. Resm Gazete.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Trk+Bina+Deprem+Ynetmelięi+2018>
- [4] Miranda, E. and Taghavi, S., (2005). Approximate floor acceleration requirements for multi-story buildings. Journal of Structural Engineering ASCE.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Miranda+Taghavi+Approximate+floor+acceleration+requirements+2005>
- [5] Clough, R.W. and Penzien, J., (2003). Dynamics of Structures, 3rd ed. Berkeley, USA: Computers and Structures, Inc.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Clough+Penzien+Dynamics+of+Structures+2003>
- [6] Makris, N. and Black, C.J., (2004). Dimensional analysis of rigid-plastic and elastoplastic structures under impact-type excitation. Journal of Engineering Mechanics ASCE.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Makris+Black+Dimensional+analysis+rigid+plastic+elastoplastic+2004>
- [7] Kalkan, E. and Kunnath, S.K., (2007). Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings.

- Engineering Structures, 29, 305-316.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Kalkan+Kunnath+Assessment+Current+Nonlinear+Static+Procedures+2007>
- [8] Antoniou, S. and Pinho, R., (2004). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 643-661.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Antoniou+Pinho+displacement+based+adaptive+pushover+2004>
- [9] Bojórquez, E. and Ruiz, S.E., (2004). Comparison of spectral- and energy-based intensity measures for predicting seismic structural response. *Engineering Structures*, 26, 1-14.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Bojórquez+Ruiz+Comparison+spectral+energy+based+intensity+measures+2004>
- [10] Tena-Colunga, A., (2004). Evaluation of the seismic response of slender, setback RC moment-resisting frame buildings designed according to the seismic guidelines of a modern seismic code. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 2027.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Tena+Colunga+Evaluation+seismic+response+slender+setback+RC+2004>
- [11] Ruiz-García, J. and Miranda, E., (2006). Residual displacement ratios for assessment of existing structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 315-336.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Ruiz+Garcia+Miranda+Residual+displacement+ratios+2006>
- [12] Korkmaz, K.A. and Korkmaz, S.Z., (2007). Seismic performance evaluation of reinforced concrete buildings using nonlinear time-history analysis. *Building and Environment*, 42, 191-201.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Korkmaz+Korkmaz+Seismic+performance+nonlinear+time+history+2007>
- [13] Zareian, F. and Krawinkler, H., (2010). Structural system parameter selection based on the collapse potential of buildings in earthquakes. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 136, 933-943.
- [14] Haselton, C.B., Liel, A.B., Deierlein, G.G., Dean, B.S. and Chou, J.H., (2011). Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Haselton+Seismic+collapse+safety+reinforced+concrete+buildings+2011>
- [15] Asgarian, B. and Shokrgozar, H.R., (2009). BRBF response modification factors for seismic design of offshore platforms. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 290-298.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Asgarian+Shokrgozar+BRBF+response+modification+factor+2009>
- [16] Paz, M. and Leigh, W., (2004). *Structural Dynamics: Theory and Computation*, 5th ed. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Paz+Leigh+Structural+Dynamics+Theory+and+Computation+2004>
- [17] Newmark, N.M., (1959). A computational method for structural dynamics. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 85.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Newmark+A+computational+method+for+structural+dynamics+1959>
- [18] Bathe, K.J., (1996). *Finite Element Procedures*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.
- [19] Jeong, S.-H. and Elnashai, A.S., (2005). Analytical assessment of an irregular RC frame for full-scale 3D pseudo-dynamic testing Part I. *Journal of Earthquake Engineering*, 9, 95-112.

- <https://scholar.google.com/scholar?q=Jeong+Elnashai+Analytical+assessment+irregular+RC+frame+2005>
- [20] Poursha, M., Khoshnoudian, F., and Moghadam, A.S., (2009). A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings. *Engineering Structures*, 31, 591-599. <https://scholar.google.com/scholar?q=Poursha+Consecutive+modal+pushover+procedure+2009>
- [21] CSI, Computers and Structures Inc., (2020). ETABS 19 Structural Analysis and Design Software. Berkeley, California, USA. <https://scholar.google.com/scholar?q=CSI+ETABS+19+2020>
- [22] Baker, J.W., Lin, T., Shahi, S.K., and Jayaram, N., (2011). New ground motion selection procedures for the PEER transportation program. PEER Report 2011/03, UC Berkeley. <https://scholar.google.com/scholar?q=Baker+New+ground+motion+selection+procedures+PEER+2011>
- [23] Abbasnia, R., Mohajeri Nav, F., Zahedifar, S., and Tajik, A., (2007). Evaluation of adaptive pushover methods for irregular buildings with torsion. *International Journal of Engineering*. <https://scholar.google.com/scholar?q=Evaluation+of+Adaptive+Pushover+Methods+Irregular+Buildings+torsion>
- [24] Lee, D.H. and Foutch, D.A., (2002). Performance evaluation of new steel frame buildings under seismic loads. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. <https://scholar.google.com/scholar?q=Lee+Foutch+Performance+evaluation+steel+frame+seismic+2002>
- [25] FEMA, Federal Emergency Management Agency, (2020). NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures FEMA P-1050. Washington, DC, USA. <https://scholar.google.com/scholar?q=FEMA+P-1050+NEHRP+2020>
- [26] Rahgozar, R. and Sharifi, M.J., (2011). Comparison of nonlinear static and dynamic analysis methods in seismic evaluation of reinforced concrete buildings. *International Journal of Civil Engineering*. <https://scholar.google.com/scholar?q=Rahgozar+Sharifi+Comparison+nonlinear+static+dynamic+analysis+2011>
- [27] Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A., (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 491-514. <https://scholar.google.com/scholar?q=Vamvatsikos+Cornell+Incremental+dynamic+analysis+2002>
- [28] Naumoski, N., Tso, W.K., and Humar, J., (2005). Design and Analysis of Earthquake-Resistant Structures. Canadian Association for Earthquake Engineering. <https://scholar.google.com/scholar?q=Naumoski+Design+and+Analysis+of+Earthquake-Resistant+Structures>
- [29] PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Center (2010). Performance-Based Seismic Design Guidelines. UC Berkeley. <https://scholar.google.com/scholar?q=PEER+Performance+Based+Seismic+Design+Guidelines+2010>
- [30] FEMA, (2012). Seismic Performance Assessment of Buildings. <https://scholar.google.com/scholar?q=FEMA+Seismic+Performance+Assessment+of+Buildings+2012>
- [31] ASCE, (2017). Seismic Assessment and Strengthening of Existing Buildings. <https://scholar.google.com/scholar?q=ASCE+Seismic+Assessment+and+Strengthening+of+Existing+Buildings+2017>
- [32] SEAOC, Structural Engineers Association of California, (2019). Recommended Design Practice for Performance-Based Seismic Design. Sacramento, CA, USA.

- <https://scholar.google.com/scholar?q=SEAOB+Performance+Based+Seismic+Design+2019>
- [33] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., and Kowalsky, M.J., (2007). Displacement-Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy: IUSS Press.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Priestley+Displacement+Based+Seismic+Design+2007>
- [34] ASCE, American Society of Civil Engineers, (2022). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE SEI 7-22. Reston, VA, USA.
<https://scholar.google.com/scholar?q=ASCE+7-22+Minimum+Design+Loads+2022>
- [35] Naeim, F. and Kelly, J.M., (1999). Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. New York, USA: Wiley.
<https://scholar.google.com/scholar?q=Naeim+Kelly+Design+of+Seismic+Isolated+Structures+1999>