T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME BİR OKUL YAPISININ GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASI YAPISAL DAVRANIŞININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İBRAHİM AYDIN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk NEMUTLU

BİNGÖL-2026

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME BİR OKUL YAPISININ GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASI YAPISAL DAVRANIŞININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İBRAHİM AYDIN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk NEMUTLU

BİNGÖL-2026

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME BİR OKUL YAPISININ GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASI YAPISAL DAVRANIŞININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk NEMUTLU danışmanlığında, İBRAHİM AYDIN tarafından hazırlanan bu çalışma 27/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Ali SARI	*İmza*	:
Üye	: Doç. Dr. Bilal BALUN	*İmza*	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk NEMUTLU	*İmza*	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun ...../ ...../ ……..….. tarih ve . . . . . / . . . . . nolu kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Murat DENER
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş/Pazarcık depremlerinde Türkiye'nin sismik gerçekliğiyle tekrar karşı karşıya kalmasına ve yapı stokunun mühendislik açısından sorgulanmasına sebep olmuştur. Bu tez, yaşanan kayıplara karşı sorumluluk duygusuyla, betonarme bir okul yapısının güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal davranışını karşılaştırmalı olarak incelenerek sahaya uygulanabilir sonuçlar üretmek gayesiyle hazırlanmıştır. Depremin ortaya koyduğu ağır hasar, neden–sonuç ilişkilerinin hassasiyetle incelenmesini, yönetmelik esaslı analizlerin güvenilirliğinin test edilmesini ve güçlendirme yaklaşımlarının etkinliğinin sayısal verilerle ortaya konulmasını zorunlu kılmıştır. Bu çalışma boyunca iş hayatının yoğunluğu ile akademik disiplinin gerekliliklerini birlikte sürdürmek zorlayıcı olsa da, ulaşılan bulguların uygulamaya katkı sağlayacağına inanmak motivasyonumu yükseltmiştir. Süreç boyunca, mevcut taşıyıcı sistemin performansını analiz ederek, güçlendirme uygulamalarının deprem etkileri altındaki kapasite, rijitlik ve hasar dağılımına etkilerini açık bir şekilde ifade etmeye gayret ettim ve sonuçları ilgili kurum ve kişilerin kullanımına açtım. Her aşamada yol gösteren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk Nemutlu' ya, gerekli verilerin toplanmasında desteği için Bingöl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nden İnşaat Mühendisi Ömer Faruk Biricik'e ve aileme teşekkür ederim.

İbrahim AYDIN
BİNGÖL 2026

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ v
ŞEKİLLER LİSTESİ vi
TABLOLAR LİSTESİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xii
1. GİRİŞ 1
1.1. Kaynak Özeti 3
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı: 8
2. DEPREM DAVRANIŞI 10
2.1. Deprem Etkileri ve Yapı Davranışı 10
2.2. 6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri 11
2.3. Türkiye Deprem Yönetmelikleri 13
2.4. Betonarme Yapılarda Tipik Hasar Durumları 15
2.5. Güçlendirme Amaçları ve Gereklilikleri 18
2.6. Analiz Türleri 19
2.6.1. Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi 19
2.6.2. Modal Analiz Yöntemi 20
2.6.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi 21
2.7. Performans Hedefleri 22
3. GÜÇLENDİRME YAKLAŞIMLARI 23
3.1. Betonarme Yapılarda Güçlendirme Yöntemleri 23

3.1.1. Kiriş Kolon Güçlendirme Yöntemi 23
3.1.2. Perdelerle Güçlendirme 25
3.1.3. Mantolama ve Lifli Polimerler 27
3.1.4. Temel Güçlendirme 29
4. MATERYAL VE YÖNTEM 32
4.1. Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi 33
4.2. Malzeme Özellikleri ve Kabul Kriterleri 35
5. ÖRNEK YAPI TANIMI VE YAPISAL ANALİZİ 44
5.1. Okul yapısının Tanıtımı 44
5.2. Mevcut Durum Yapısal Modellemesi 48
5.3. Güçlendirme Durum Yapısal Modellemesi 49
5.4. Analiz 50
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 53
6.1. Kütle ve Rijitlik Merkezleri 53
6.2. Mevcut Durum Performans Sonuçları 54
6.2.1. Taban Kesme Kuvveti 54
6.2.2. Zemin Kat Kat Ötelemeleri 57
6.2.3. 1. Kat Kat Ötelemeleri 60
6.2.4. 2. Kat Kat Ötelemeleri 62
6.2.5. Periyod 65
6.2.6. Düşey Eleman Momentlerinin Değerlendirilmesi 65
6.3. Güçlendirme Durum Performans Sonuçları 66
6.3.1. Taban Kesme Kuvveti 66
6.3.2. Zemin Kat Kat Ötelemeleri 69
6.3.3. 1. Kat Kat Ötelemeleri 72
6.3.4. 2. Kat Kat Ötelemeleri 75
6.3.5. Periyod 78

6.3.6. Düşey Eleman Momentlerinin Değerlendirilmesi 78
6.4. Genel değerlendirme 79
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 84
KAYNAKLAR 88

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

DAFZ	: Doğu Anadolu Fay Zonu
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
THA	: Time History Analyses (Zaman Tanım Alanında Hesap)
THA-M	: Time History Analyses-Matched
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
TDTH	: Türkiye Deprem Tehlike Haritası
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
TS 500	: Betonarme Yapıların Tasarımı Kuralları Standardı
CFRP	: Karbon Lifli Polimer
GFRP	: Cam Lifli Polimer
AFRP	: Aramid Lifli Polimer
RJB	: Joyner-Boore Uzaklığı
PGA	: En Büyük Yatay Yer İvmesi
PGV	: En Büyük Yer Hızı
V_{S30}	: Kayma Dalgası Hızı
S_S	: 0,2 Saniyelik Kısa Periyot İçin Harita Spektral İvme Katsayısı
S_1	: 1,0 Saniye Periyot İçin Harita Spektral İvme Katsayısı
F_S	: Kısa Periyot Bölgesi İçin Yerel Zemin Etki Katsayısı
F_1	: 1,0 Saniye Periyot İçin Yerel Zemin Etki Katsayısı
S_{DS}	: 0,2 Saniye Periyot İçin Tasarım Spektral İvme Katsayısı
S_{D1}	:1.0 Saniye Periyot İçin Tasarım Spektral İvme Katsayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Depremde etkilenen iller [28] 12
Şekil 2.2. Depremde hasar betonarme konut yapıları [30]..... 12
Şekil 2.3. Yönetmeliğe uygun tasarlanmammış bir yapı [30]..... 13
Şekil 2.4. Kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı..... 16
Şekil 2.5. Yumuşak kat bulunan bir bina [38] 17
Şekil 2.6. Betonun tüvenan agregaların içermesi [38] 17
Şekil 2.7. Uygun olmayan bir zeminde yapılmış yapı [39]..... 18
Şekil 3.1. Mantolamada donatı uygulaması [50] 24
Şekil 3.2. Kolonun sarılarak güçlendirilmesi [51] 24
Şekil 3.3. Kolonların çelik ile sarılması [50] 25
Şekil 3.4. Yeni betonarme perde eklenmesi [53]..... 26
Şekil 3.5. Perde güçlendirmesi için yapılan temel güçlendirme işlemi [50]..... 26
Şekil 3.6. Kolonun betonarme ile mantolanması [51]..... 28
Şekil 3.7. Karbon Lifli Polimerle (FRP) kiriş kapasitelerinin arttırılması [51] 29
Şekil 3.8. Temellerin güçlendirilmesi [50]..... 30
Şekil 4.1. Yapı modellemesi ve analiz süreci genel şeması 32
Şekil 4.2. Türkiye'de bulunan istasyonlar [58] 34
Şekil 4.3. 3123, 3125 ve 3133 numaralı istasyonlara ait doğu-batı (E) ve kuzey-güney (N) yönlerinde ivme-zaman kayıtları 35
Şekil 4.4. Karot görüntüleri..... 37
Şekil 4.5. Yapılan donatı testleri..... 38
Şekil 4.6. Yapılan sıyırma işlemleri 39
Şekil 4.7. Yapının röntgen görüntüleri 40
Şekil 4.8. Yapıya ait gözlem çukurları 43
Şekil 5.1. Okul yapısının görüntüsü..... 44
Şekil 5.2. Okul yapısının coğrafi konumu 45
Şekil 5.3. Kiriş hasarları..... 46
Şekil 5.4. Okul yapısının görüntüsü..... 46
Şekil 5.5. Mevcut durum ETABS programı görüntüsü..... 48

Şekil 5.6. Mevcut durum kat planı 49
Şekil 5.7. Güçlendirme durum ETABS programı görüntüsü 50
Şekil 5.8. Güçlendirme durum kat planı 50
Şekil 5.9. ETABS programında analiz görselleri 51
Şekil 6.1. Yapının mevcut ve güçlendirilmiş için kütle ve rijitlik merkezlerinin plandaki dağılımı 53
Şekil 6.2. Mevcut durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum taban kesme kuvvetleri 55
Şekil 6.3. Mevcut durum THA-M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum ölçeklendirilmiş taban kesme kuvvetleri 55
Şekil 6.4. Mevcut durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması 56
Şekil 6.5. Mevcut durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri 57
Şekil 6.6. Mevcut durum zemin kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri 58
Şekil 6.7. Mevcut durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması 59
Şekil 6.8. Mevcut durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri 60
Şekil 6.9. Mevcut durum 1.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri 60
Şekil 6.10. Mevcut durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması 61

Şekil 6.11. Mevcut durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri 62
Şekil 6.12. Mevcut durum 2.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri 63
Şekil 6.13. Mevcut durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması 64
Şekil 6.14. Mevcut durum yapının ilk 9 moda ait doğal titreşim periyotları 65
Şekil 6.15. Güçlendirilmiş durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum taban kesme kuvvetleri..... 66
Şekil 6.16. Güçlendirilmiş durum THA-M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum ölçeklendirilmiş taban kesme kuvvetleri..... 67
Şekil 6.17. Güçlendirilmiş durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması 68
Şekil 6.18. Güçlendirilmiş durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri 69
Şekil 6.19. Güçlendirilmiş durum zemin kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri 70
Şekil 6.20. Güçlendirilmiş durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması 71
Şekil 6.21. Güçlendirilmiş durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri 72

Şekil 6.22. Güçlendirilmiş durum 1.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri 73
Şekil 6.23. Güçlendirilmiş durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması 74
Şekil 6.24. Güçlendirilmiş durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri 75
Şekil 6.25. Güçlendirilmiş durum 2.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri 76
Şekil 6.26. Güçlendirilmiş durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırması..... 77
Şekil 6.27. Güçlendirilmiş durum yapının ilk 9 moda ait doğal titreşim periyotları 78

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Türkiye deprem yönetmelikleri ve özellikleri 14
Tablo 4.1. İstasyon ait bilgiler 34
Tablo 4.2. Karot sonuçları 37
Tablo 4.3. Schmidt çekiç sonuçları 41
Tablo 4.4. Zemin sınıfları 42
Tablo 5.1. Yapının proje bilgileri 47
Tablo 6.1. Mevcut ve güçlendirilmiş durum için kütle ve rijitlik merkezleri 53
Tablo 6.2. Mevcut durum için THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için P, M2 ve M3 iç kuvvetlerinin maksimum–minimum değerleri 65
Tablo 6.3. Güçlendirilmiş durum için THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için P, M2 ve M3 iç kuvvetlerinin maksimum–minimum değerleri .. 78
Tablo 6.4. Gerçek ve ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının yapısal tepkiler (taban kesme kuvveti ve kat ötelemeleri) açısından karşılaştırılması 81
Tablo 6.5. 3123, 3125 ve 3133 numaralı deprem istasyonlarına ait gerçek kayıtlar altında mevcut ve güçlendirilmiş yapının davranışının incelenmesi 82
Tablo 6.6. 3123, 3125 ve 3133 numaralı deprem istasyonlarına ait ölçeklendirilmiş kayıtlar altında mevcut ve güçlendirilmiş yapının davranışının incelenmesi... 83

BETONARME BİR OKUL YAPISININ GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASI YAPISAL DAVRANIŞININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

ÖZET

Türkiye'de eğitim yapılarının deprem güvenliği, bilhassa 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında, mevcut okul yapılarının performanslarının değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Çalışmada, betonarme bir okul yapısının güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal davranışı; taban kesme kuvvetleri, kat ötelemeleri, kütle ve rijitlik merkezleri, momentleri ve periyotları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapı, ortamında üç boyutlu modellenmiş; malzeme ve uygunluk kriterleri TBDY 2018'e göre tanımlanmış ve mevcut durum için analizler gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanı aşamasında, AFAD veri tabanından seçilen üç ivme kaydı (3123, 3125, 3133) hem ölçeklendirilmemiş (THA) hem de hedef spektruma uyumlu ölçeklendirilmiş (THA-M) olarak kullanılmıştır. Güçlendirme yöntemi olarak betonarme perde ilavesi eklenmiş ve aynı analizler tekrarlanmıştır. Sonuçlar, deprem kayıtları arasında 3125'in en yüksek (en yüksek pga değerine sahip kayıt), 3133'ün en düşük (en düşük pga değerine sahip kayıt) talebi göstermiştir. Kütle ve rijitlik merkezlerinin birbirine yaklaşması burulma sonuçlarını azaltmış ve iç kuvvet dağılımını daha uyumlu hale getirmiştir. THA-M analizleri, THA'ya kıyasla daha düşük sonuçlar vererek kayıtlar arası yayılımı düşürmüştür. Ayrıca genel olarak, X doğrultusunda taleplerin çoğu durumda Y'ye göre daha büyük olduğu; bunun rijitlik dağılımı ve mod kütle eşliğiyle ilişkili olduğu görülmüş, çalışma bu bulgularla TBDY 2018 kapsamında okul güçlendirme kararlarına pratik bir dayanak sunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Okul Yapısı, Betonarme Perde ile Güçlendirme, Zaman Tanım Alanı Analiz, Betonarme Yapılar, Sismik Değerlendirme.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURAL BEHAVIOR OF A REINFORCED CONCRETE SCHOOL BUILDING BEFORE AND AFTER REINFORCEMENT

ABSTRACT

In Turkiye, the seismic safety of educational buildings, especially after the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, has made it necessary to evaluate the performance of existing school buildings. In this study, the structural behavior of a reinforced concrete school building before and after strengthening was comparatively examined, including base shear forces, story displacements, centers of mass and rigidity, moments, and periods. The structure was modeled in three dimensions in the finite element based software environment; material and suitability criteria were defined according to TBDY 2018, and analyses were performed for the existing condition. In the time-domain phase, three acceleration records (3123. 3125. 3133) selected from the AFAD database were used both unscaled (THA) and scaled (THA-M) compatible with the target spectrum. Reinforced concrete shear wall addition was added as a strengthening method, and the same analyses were repeated. The results showed that among the earthquake records, 3125 had the highest demand (biggest pga value), and 3133 (lowest pga value) had the lowest. While story displacements decreased significantly with the increase in stiffness after strengthening, an increased tendency for base shear forces was observed for various records. The convergence of the centers of mass and stiffness reduced torsional results and made the internal force distribution more harmonious. THA-M analyses yielded lower results compared to THA, reducing the spread between records. In addition, it was observed that the demands in the X direction were generally greater than those in the Y direction in most cases; this was related to the stiffness distribution and mode-mass equality, and with these findings, the study provides a practical basis for school strengthening decisions within the scope of TBDY 2018.

Keywords: Reinforced Concrete School Building, Strengthening with Reinforced Concrete Shear Walls, Time Domain Analysis, Reinforced Concrete Structures, Seismic Assessment.

1. GİRİŞ

Türkiye, dünyanın en etkin deprem kuşaklarından biri olan Akdeniz–Alp–Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer almakta olup, bu durum ülkenin genelinde yüksek düzeyde bir sismik tehlike oluşturmaktadır. Özellikle Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fay zonları boyunca meydana gelen çok sayıda yıkıcı deprem, ülke genelinde yapı güvenliğinin önemini sürekli olarak gündemde tutmuştur. Bu kapsamda, 6 Şubat 2023 tarihinde Doğu Anadolu Fayı üzerinde gerçekleşen M_w 7,7 (Pazarcık) ve M_w 7,6 (Elbistan) depremleri, mevcut bina stokunun büyük bir bölümünün deprem dayanımı açısından yetersiz olduğunu acı bir şekilde ortaya koymuştur [1].

Benzer biçimde, Bingöl ve çevresi de tarihsel süreçte önemli sismik aktiviteye sahne olmuştur. DAF, Bingöl Karlıova ilçesinden başlayarak Hatay'a kadar uzanan ve birbirlerini tamamlayan sol yanal atımlı fay zonlarından oluşmaktadır. KAF, Anadolu levhasının Arap levhası ile kuzeydeki Avrasya levhası arasında kalması sonucu batıya doğru açılma yönünde hızlı bir hareket sergilemektedir. Bu durum, fayın yüksek düzeyde sismik aktiviteye neden olmaktadır [2].

Bingöl ili ve civarında 7,0 M_w büyüklüğünde depremin önümüzdeki 50 yıl içinde gerçekleşme olasılığının %20'den fazla olabileceğini belirtmesi deprem potansiyelinin yüksek deprem potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir [2].

Bingöl, Cumhuriyet döneminde henüz il statüsü kazanmadan iki yıl önce, 1934 tarihinde ilk önemli depremini yaşamıştır [3]. Ardından 1937 Kiğı, 1938 Bingöl, 1949 Karlıova, 1950 Kiğı, 1966 Varto, 1968 Kiğı-Karakocan, 1971 ve 2003 yıllarında Bingöl, 2005 Karlıova ie 2013 Açık güney-Kiğı merkezli depremler meydana gelmiştir [3]. Bu depremlerin bir kısmı orta büyüklükte olmasına rağmen yine de can kayıpları yaşanmıştır. Bingöl ayrıca çevre illerde meydana gelen depremlerden de olumsuz biçimde etkilenmiş ve bu depremler sırasında da hayatlarını kaybedenler olmuştur. Bunun nedeni olarak depremin büyüklüğü ve etki alanı gösterilebilir. Buna ek olarak, yapılarda kullanılmış olan malzemenin kalitesi de yaşanan hasar ve kayıplar üzerinde etkili olmuştur [3].

Afet bölgelerinde inşa edilecek yapıların tasarımında, yürürlükteki yönetmeliklerde belirtildiği üzere, depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkesi; farklı deprem büyüklükleri altında yapı davranışının kontrollü biçimde gerçekleşmesini sağlamaktır. Bu kapsamda, düşük büyüklükteki depremler sırasında taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarda herhangi bir hasarın meydana gelmemesi hedeflenmektedir. Orta büyüklükteki depremler için, oluşabilecek hasarın yapısal bütünlüğü zedelemeyecek ve onarılabilir düzeyde kalması amaçlanmaktadır. Yüksek büyüklüklü depremler durumunda ise, can güvenliğinin sağlanması esastır ve bu doğrultuda yapıların kısmen ya da tamamen göçmesinin önlenmesi gerekmektedir [4].

Belirtilen türde hasarların meydana gelmesi durumunda, yapının yeniden kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla gerekli müdahalelerin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, hasarın boyutuna ve niteliğine bağlı olarak, yapının tamamının veya belirli taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan elemanlarının onarımı ve/veya güçlendirilmesi gündeme gelebilmektedir [5]. Bir yapının güvenliğini, dayanıklılığını ve kullanım süresini korumak veya artırmak maksadıyla gerçekleştirilen mühendislik müdahaleleri genel olarak onarım ve güçlendirme uygulamaları olmak üzere iki temel başlık altında incelenmektedir [4].

Onarım uygulamalarında temel amaç, yapının hasar öncesindeki durumuna yeniden ulaştırılmasıdır. Bu durum, yalnızca yapının kullanım amacına yönelik işlevselliğinin değil, aynı zamanda mukavemet gibi mekanik özelliklerinin de eski haline getirilmesini kapsar. Buna karşın, güçlendirme çalışmaları; yapının taşıma kapasitesi, dayanım ve benzeri yapısal özelliklerinin, hasar öncesi ya da mevcut seviyesinin üzerine çıkarılmasını hedefleyen müdahaleleri ifade eder [6]. Ülkemizdeki yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan betonarme binalar, genellikle düşük dayanımlı beton malzemesi, yetersiz kaliteye sahip donatı çeliği ve standartlara uygunsuz imalat işçiliği ile inşa edilmiştir [7]. Bu olumsuzluklar, söz konusu yapıların deprem etkileri altında zayıf bir davranış sergilemesine ve ciddi hasarlarla karşılaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, mevcut yapı stokunun deprem etkileri karşısında yeterli performans gösterebilmesi ve olası hasarların en aza indirilebilmesi amacıyla uygun güçlendirme yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir.

Bu çalışmada, seçilen betonarme okul yapısının mevcut durumu ve önerilen güçlendirilmiş hali ayrı ayrı modellenmiş, her iki durum için de belirlenen deprem kayıtları altında doğrusal zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, yapının güçlendirme öncesi ve sonrası davranış farklılıkları ortaya konmuştur. İlerleyen bölümlerde, bu analizlerden elde edilen bulgular ayrıntılı biçimde incelenerek yapısal performans üzerindeki etkiler irdelenecektir.

1.1. Kaynak Özeti

Türkiye'deki betonarme binaların büyük bir kısmı eski deprem yönetmelikleri doğrultusunda inşa edildiğinden, özellikle eğitim yapılarında güçlendirme ihtiyacı sıkça karşımıza çıkmaktadır. Daha önce yapılan araştırmalar, betonarme sistemlerin güçlendirme işlemi öncesi ve sonrasında farklı yapısal özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Literatürde en sık kullanılan güçlendirme yöntemleri arasında kesit genişletme, perde duvar ilavesi ve fiber takviyeli polimer (FRP) uygulamaları bulunmaktadır; bu yöntemlerin her biri yapının dayanım, rijitlik ve süneklik düzeyine farklı katkılar sağlamaktadır. Doğrusal olmayan analizlerin, özellikle zaman tanım alanında yapılan çalışmaların, yapısal davranışın gerçekçi bir şekilde incelenmesinde daha güvenilir sonuçlar sunduğu görülmektedir. Ancak mevcut çalışmaların çoğunda doğrusal analizlerle sınırlı değerlendirmeler yapılmıştır. Bu nedenle, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak gerçekleştirilecek karşılaştırmalı analizlerin, mevcut literatüre yeni ve kapsamlı bir bakış kazandırması beklenmektedir.

Yapılara gelen deprem etkisinin büyüklüğü önemlidir. Çalışkan (2003) çalışmasında, günümüz inşaat ilkelerinin, binaların depreme karşı dayanaklı olabilmesi için yeterli rijitlik, dayanım ve sünekliğe sahip olmalarını gerektirdiği belirtilmiştir. Yapıların düşük büyüklüklü depremlerden hasar görmeden, orta büyüklüklü depremleri ise ciddi bir hasar meydana gelmeden atlatabilmeleri gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca, yüksek büyüklüklü depremler sırasında binaların göçmeyi önleyecek düzeyde sünek davranış göstermesinin beklendiği ifade edilmiştir. Çalışmada, deprem sırasında hasar gören ya da olası depremler karşısında yetersiz kalan yapıların çelik manto, betonarme manto veya epoksi enjeksiyonu gibi yöntemlerle onarıldığı ve güçlendirildiği; gerçekleştirilen deneysel araştırmaların,

uygulanan çeşitli önlemler sayesinde yapıların daha elverişli bir davranış gösterebileceğini ortaya koyduğu ifade edilmiştir [8].

Geçmiş depremler sonrası yapılarda oluşan hasarların incelenmesi önemlidir. Yaşa (2006) çalışmasında, 1998 Ceyhan Depremi detaylı olarak incelenerek yapılarda meydana gelen hasarlar değerlendirilmiştir. Betonarme yapıların deprem etkisi altındaki davranışları ve elemanların hasar durumları detaylı şekilde incelenmiştir. Çalışmada, hasar gören yapıların taşıyıcı sistemlerinde oluşan hasarlar ideCAD Statik 5.0 programı kullanılarak 1975 ve 1997 deprem yönetmeliklerine göre analiz edilmiş, yetersiz elemanlar belirlenmiş ve güçlendirme sonrasında elde edilen analiz sonuçları verilmiştir [9].

Yapı maliyetleri nedeniyle yapıların onarılması ve güçlendirilmesi gerekir. Yörükcü, (2007) çalışmasında, Yapı maliyetlerinin fazla olması sebebiyle hasar görmüş veya kullanılamayan yapıların yıkılması yerine onarım ve güçlendirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Büyük depremler sonrasında onarım ve güçlendirme yöntemleri gelişmiş ve yönetmeliklerde yer almıştır. Bu çalışmada, betonarme yapının çelik elemanlarla güçlendirilmesi incelenmiş ve elde edilen sonuçların yapının deprem davranışını sağladığını göstermiştir [10]. Son yıllarda meydana gelen depremler sonrasında yapılarda onarım ve güçlendirmeye gereksinim doğmuştur. Batmacı, (2011) yaptığı çalışmada, Ülkemizde son yıllarda meydana gelen, büyük can ve mal kaybına neden olan depremlerin yapılarda meydana getirdiği hasarlar, birçok yapının onarılması ve güçlendirilmesi gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Onarım, hasar görmüş bir yapı elemanının önceki haline getirilmesi için yapılan uygulamalardır. Güçlendirme ise bir yapının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini, stabilitesini veya bunlardan bazılarını önceki veya mevcut durumun üzerine çıkarmak için yapılır. Bu tez çalışması depremde hasar gören bir yapının incelenerek onarım ve güçlendirmeye gerekli olup olmadığının araştırılması ve güçlendirme gerekiyorsa çeşitli yollarla güçlendirme yapılarak sonuçların karşılaştırılmasıdır [11]. Deprem sırasında yapıların rijitlik ve dayanım kaybına uğraması hasar oluşmasında etkilidir. Demirkan, (2014) çalışmasında, yapıların yük etkisi altında şekil değiştirdiği ve yüksek yükler altında deprem sırasında rijitlik ile dayanım kaybı nedeniyle hasar oluştuğu belirtilmektedir. Çalışmada, deprem kaynaklı hasarlar, hasar derecelerinin belirlenmesi ve güçlendirme yöntemlerine hakkında genel bilgiler verilmiş, sonrasında betonarme yapıların güçlendirilmesine yönelik

çözümlemeler yapılmıştır. Uygulama içinde incelenen binanın mevcut durumu değerlendirilmiş ve perde eklenmesi, yalnızca kolon mantolaması ile her iki yöntemin birlikte uygulanmasını içeren üç farklı güçlendirme modeli Sta4Cad programı ile analiz edilmiştir. Sonuçlar tablolar halinde verilmiş ve yapı için en uygun güçlendirme yöntemi önerilmiştir [12].

Mevcut betonarme yapı stoğunun deprem yükleri karşısında yetersizliği onarım ve güçlendirmeye ihtiyaç doğurmuştur. Görgülü (2015) yılında yaptığı tez çalışmasında Türkiye'deki mevcut betonarme yapı stoğunun bir kısmının öngörülen deprem yükleri altında yetersiz taşıma kapasitene sahip olduğunu belirtmiştir. Özellikle okul binaları, barındırdıkları yüksek insan yoğunluğu ve deprem sonrasında geçici barınma alanı olarak kullanılabilme potansiyelleri sebebiyle önemli yapılardır. Bu sebeple mevcut betonarme okul binalarının deprem güvenliğini artırmak için çeşitli güçlendirme yöntemleri uygulanmaktadır. En yaygın yöntemlerden bir tanesi, mevcut betonarme çerçevelerin betonarme perdelere dönüştürülmesidir. Perde oranı ve sistem davranışı açısından değerlendirilmelidir [13].

Türkiye'nin deprem kuşağında olması yapıların dayanıklılığının incelenmesini gerekli kılmıştır. Kap ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada, Türkiye'nin büyük bir kısmının deprem bölgesinde yer alması, yapıların projelerine uygunluğunun ve depreme dayanıklılığı önemlidir. Bu çalışmada, 2007 deprem yönetmeliği öncesi inşa edilmiş yapıların performanslarına bakılmış ve olası deprem etkilerinde gösterecekleri davranışı varsayımı yapılmıştır. Örnek uygulama olarak Akçakoca Cumhuriyet İlköğretim Okulu binasında taşıyıcı sistem elemanlarının kapasiteleri, malzeme özellikleri ve kapsamlı incelenmiş, temel kontrolleri yapılmış, betonarme elemanlardan karot numuneleri alınmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak bina STA4-V13.1 programı ile analiz edilmiş ve 2007 yönetmeliğine uygunluk değerlendirilmiştir [14].

Türkiye'nin aktif fay hatlarında olması mevcut yapı stoğunun deprem güvenliğinin değerlendirilmesini gerekli kılmıştır. Zolmaz, (2019) yaptığı çalışmada, aktif fay hatlarının bulunduğu bir kuşakta yer almakta olup, geçmiş depremler mevcut yapı stoğunun yönetmelik kurallarına uygun inşa edilmediğini ve yapı elemanlarının düşük beton dayanımı ile nervürsüz donatılar kullanıldığını göstermektedir. İmalat işçiliğinin

yetersizliği de deprem etkisi altında yapıların ciddi zarar görmesine yol açmaktadır. Tüm yapı stoğunun yıkılıp yeniden yapılması ekonomik ve sosyal açıdan mümkün olmadığından, güçlendirme yöntemleri ile mevcut yapılar güvenli hale getirilebilmektedir; bunlardan biri, yapıya ilave betonarme perdeler eklenmesidir. Bu çalışmada, 1975 yönetmeliğine göre tasarlanmış bir betonarme binanın TBDY-2018 esasları referans alınarak doğrusal elastik performans değerlendirmesi yapılmış ve perde eklenmesi ile güçlendirilmiş durumunun performansı analiz edilmiştir [15].

Türkiye'nin deprem kuşağında yer alması yapıların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarının incelenmesini gerekli kılmıştır. Akbaş ve diğerleri (2023) yaptığı çalışmada, Türkiye'nin aktif deprem kuşağında yer alması sebebiyle büyük can ve mal kayıplarına yol açan depremler olmuştur. Bu kayıpları etkisi nedenlerinden biri yapıların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarının yetersiz olması ve projelendirme aşamasında güvenlik kriterlerini ihmal edilmesidir. Bu çalışmada betonarme yapıların düzensizlikleri açıklanmış ve oluşan depremlerde bu düzensizlik sebebiyle hasar gören yapılara yer verilmiştir. Gelecekte olacak depremlerde can kayıplarının yaşanmaması için yürürlükteki deprem yönetmeliğine uyulmalı ve yapının yapım aşamasında gerekli özen gösterilmelidir [16]. Yüksek deprem riski altındaki bölgelerde yer alan yapı stoğunun mevcut yönetmelikle incelenmesi gereklidir. Çeltik, (2023) yaptığı çalışmada, ülke nüfusunun büyük kısmı yüksek deprem riski altındaki bölgelerde yaşadığını ve yapı stoğunun önemli kısmının yapım hataları ile güncel yönetmelikte belirtilen kriterlerini karşılamadığını göstermektedir. Bu çalışmada, 2007 deprem yönetmeliği'ne göre yapılmış İzmir'deki bir yapı TBDY 2018 kapsamında doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak Sta4-CAD programı ile analiz edilmiştir. Yapının gerekli görülen performans düzeylerini karşılamadığı belirlenmiş, sonrasında mimari plana uygun ilave betonarme perde duvarlarla güçlendirme yapılmış ve analizler yeniden ifade edilmiştir. Eurocode 2 ve TS 500'e göre hesaplanan farklı elastisite modülleri de dikkate alınarak toplam sekiz analiz gerçekleştirilmiş ve farklı hesap yöntemlerinin sonuçlar üzerindeki etkisi somut biçimde gösterilmiştir [17]. Yapıların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi deprem riski yüksek bölgelerde önem taşımaktadır. Çizmeci (2023) çalışmasında, Türkiye'nin aktif deprem kuşağında yer alması sebebiyle mevcut yapıların deprem güvenliğinin irdelenmesi ve güçlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, 1987 yılında inşa edilen Tekirova Larissa Phaselis Princess Hotel yapısının TBDY 2018

kapsamında doğrusal yöntemle performans analizi yapılmış ve ETABS programı ile Sta4CAD programları kullanılarak mevcut durumu değerlendirilmiştir. Analizler neticesinde yapının hedeflenen performans düzeyini karşılamadığı belirlenmiş ve mimari değişiklikler de dikkate alınarak perde eklenmesi, kolon mantolaması ve FRP uygulamaları içeren güçlendirme projesi oluşturulmuştur. Güçlendirme sonrası yapılan performans analizlerinde tüm bloklarda DD-2 deprem düzeyi için kontrollü hasar performansının temin edildiği belirlenmiştir [18].

Geçmiş yönetmeliğe göre inşa edilen yapıların deprem performansının güncel esaslara göre incelenmesi gereklidir. Çoşkun ve diğerleri (2023) yaptıkları çalışmada, deprem yönünden aktif bir bölge olup yerleşim yerlerinin çoğunun yakınından aktif faylar geçmektedir. Depremler nedeniyle hasar gören binalar, tasarım ve uygulama hataları hakkında bilgi sağlayarak yapıların güçlendirilmesi ve yeni yapıların güvenli tasarlanması için sebep olusturmaktadır. Bu çalışmada, Karabük'te 2002 yılında inşa edilen bir okul binasının mevcut ve güçlendirilmiş durumları Sta4-Cad programı ile analiz edilerek DBYBHY ve TBDY yönetmeliklerine göre performansları kıyaslanmıştır. Analiz sonuçları, eski yönetmeliklere göre tasarlanan betonarme yapıların TBDY 2019'a uygun olarak güçlendirilmesinin önemini ortaya koymakta ve güçlendirme kararlarında yapının yaşı ile maliyet unsurlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [19]. Aslında yapıları tasarlarken dinamik yüklerde önemlidir. Nakipoğlu (2024) çalışmasında, Yapıların dinamik yükler altında statik analizlere göre daha büyük iç kuvvet ve yer değiştirmelere maruz kaldığı, bu sebepten tasarım aşamasında dinamik etkilerin dikkate alınmasının büyük önem taşıdığı ifade etmektedir. Bu çalışmada, deprem etkisiyle oluşan hasarlar ile onarım ve güçlendirme uygulamalarının betonarme binaların davranışına etkileri incelenmiştir. Bu çerçevede, üç adet 1/3 ölçekli betonarme çerçeve numunesi sarsma tablasında hasarsız, hasarlı, onarılmış ve çeşitli yöntemlerle güçlendirilmiş durumlarında analiz edilmiştir. Deneysel ve nümerik analizler sonucunda, hasarın rijitlik kaybına ve artan deplasman taleplerine sebep olduğu, güçlendirme uygulamalarının ise rijitliği önemli ölçüde artırdığı ve düzlem içi betonarme perdelerle yapılan güçlendirmenin en başarılı performansı sağladığı belirlenmiştir [20]. Taşıyıcı sistem birleşim bölgelerinin deprem davranışı, yapı güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Coşkun (2025) çalışmasında, aktif deprem kuşağında bulunan Türkiye'de kolon–temel birleşim bölgelerinde yetersiz sıklaştırmanın yaygın bir yapım hatası olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, enine donatısı

bulunmayan kolon–temel birleşimlerinin çevrimsel yarı-statik yük altındaki performansını; hasar oluşumu, onarım ve güçlendirme yöntemleri açısından değerlendirmektedir. Çalışma kapsamında biri yönetmeliğe uygun referans olmak üzere dört tam ölçekli numune test edilmiş, bazı numunelere CFRP sargılama ve çelik köşebent güçlendirmesi uygulanmıştır. Bulgular, özellikle CFRP ile onarılan numunenin yüksek süneklik ve deformasyon kapasitesine ulaştığını ortaya koyarak kolon–temel birleşimlerinde uygun detaylandırma ve güçlendirme stratejilerinin önemini göstermektedir [21]. Betonarme yapılarının güvenlik düzeyinin yetersiz olması, güçlendirme gereksinimini ortaya koymaktadır. Şenel (2025) çalışmasında, ülkemizde yapıların yeterli güvenlik düzeyine sahip olmadığı ve tasarım hataları ile yapısal düzensizlikler sebebiyle betonarme elemanlarda çeşitli hasarların oluştuğu görülmektedir. Yapılan incelemelerde bu yapıların inşa edildiği dönemde gerekli mühendislik ve tasarım koşullarının sağlanamadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, deprem etkisiyle veya imalat hataları nedeniyle hasar gören kolon ve kirişlerin onarım ve güçlendirme yöntemleri incelenmiş ve bu yöntemler eleman güçlendirmesi ile sistem güçlendirmesi olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirilmiştir. Betonarme mantolama, CFRP uygulamaları ve yerinde dökme perde duvar eklenmesi en yaygın olarak kullanılan güçlendirme çeşitlerindendir bu yöntemlerin maliyet, işçilik ve dayanım açısından farklı güçlü ve zayıf yönlere sahip olduğu belirtilmiştir [22].

Bu çalışmalar Türkiye'deki betonarme yapılarının deprem etkisindeki yetersizliğini ve yetersizliğin giderilmesi için yapılan güçlendirme yöntemlerini genel biçimde ele almaktadır. Literatürde geçmiş depremlerde oluşan hasar nedenleri malzeme ve işçilik yetersizliklerinin etkileri ile güçlendirme önlemlerinin sonuçları irdelemiştir. Farklı çalışmalarda betonarme montalama çelik eleman kullanımı FRP sarımı ve CFRP gibi yöntemler yapının rijitliğini ve dayanımını arttırarak daha güvenli hale geldiğini ortaya koymuştur.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı:

Bu tez çalışmasının amacı, güçlendirme projesi daha önce hazırlanmış olan mevcut bir betonarme okul binasının, güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası yapısal davranışını

karşılaştırmalı olarak ele almaktadır. Çalışmada, mevcut binanın güçlendirme öncesi durumu ile proje kapsamında güçlendirilmiş hali ayrı ayrı modellenmiş ve her iki durumda da yapının deprem etkileri altındaki performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, 2023 Kahramanmaraş depremlerine ait ivme kayıtları ve bu deprem kayıtlarının yönetmelik kurallarına göre ölçeklendirilmesi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. İstasyonlardan aldığımız ivme kayıtlarından düşük, orta ve yüksek ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu kapsamda, yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve ETABS programı (v 22.3.0) programı kullanılarak doğrusal zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar, seçilen deprem kayıtları altında elde edilen iç kuvvetler, deplasmanlar, doğal titreşim periyotları ve performans seviyeleri açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, 2018 Türkiye bina deprem yönetmeliği esas alınarak değerlendirilmiş ve güçlendirme uygulamasının yapı davranışı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Bu çalışma, güçlendirme projesi tamamlanmış okul binalarının yapısal performansını analitik olarak incelemeye yönelik bir örnek teşkil etmekte ve benzer nitelikteki yapılar için mühendislik açısından yol gösterici nitelikte katkılar sunmayı amaçlamaktadır.

2. DEPREM DAVRANIŞI

2.1. Deprem Etkileri ve Yapı Davranışı

Yeryüzünün iç yapısına bağlı olarak tarih boyunca birçok doğal afet meydana gelmiş ve bu olaylar insan yaşamı üzerinde önemli etkiler bırakmıştır [23]. Deprem, ani olarak meydana gelen, etkileri önceden kesin şekilde tahmin edilemeyen, toplum yaşamını olumsuz bir biçimde etkileyen ve ekonomik kayıplara yol açan jeolojik kaynaklı bir doğal afettir [24]. Deprem çok kısa süre devam eden, yerden gelen uğultu ve gürültüyle birlikte azdan çoğa doğru yükselen bir sarsıntı ile kendisini hissettirir [25].

Bu olay sırasında zeminle etkileşim içinde bulunan yapıların taşıyıcı sistemleri, kısa sürede yüksek ivmelere ve yer değiştirmelerin etkisinde kalmaktadır. Yapılar, öncelikle yatay yönlü etkiler altında çeşitli iç kuvvetler, şekil değiştirmeler ve titreşimler geliştirir [26]. Bu sebeple yapının deprem etkisi altındaki davranışının doğru idrak edinilmesi hem mevcut performans düzeyinin belirlenmesi hem de güçlendirme stratejilerinin etkin biçimde tasarlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Deprem etkileri bazı durumlara bağlı olarak farklı şekilde ortaya çıkabilir. Bunlar yapının geometrisi, taşıyıcı sistem tipi, malzeme özellikleri, zemin koşulları ve düzensizlik durumları gibi etkilerdir. Özellikle betonarme yapılarda, yatay yük taşıyıcı sistemin düzenli olmaması, süneklik düzeyinin düşük olması ya da detaylandırma yetersizliği gibi etkenler, deprem sırasında istenmeyen davranışlara sebep olabilir. Bu durum plastik mafsalların erken oluşumu, göçme mekanizmalarının aktive olması veya yapının genel stabilitesini kaybetmesine neden olabilir [26]. Okul yapıları gibi toplu kullanım maksatlı binalar için, deprem sonrası kullanılabilirlik düzeyi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bu tür yapılarda sadece göçmenin önlenmesi değil, aynı zamanda sınırlı hasar düzeyinde performans sağlanması hedeflenmelidir. Betonarme bir okul yapısının deprem etkisi altındaki davranışını değerlendirirken, kolon-kiriş birleşim bölgeleri, düzensizlikler, yetersiz donatılar ve mevcut beton dayanımı gibi yapısal açıklar özel olarak incelenmelidir.

Bu çalışmada analiz edilen yapı hususunda, taşıyıcı sistemin dinamik karakteristikleri, modal analiz sonuçları ve zaman tanım alanında analiz çıktıları üzerinden yapının deprem etkisi altındaki tepkisi ortaya konulmuştur. Güçlendirme öncesi yapının, belirli yönlerde rijitlik eksikliği gösterdiği, bazı elemanlarda plastik mafsalların erken aktive olduğu ve performans seviyesinin can güvenliği sınırının altında kaldığı tespit edilmiştir. Güçlendirme sonrası yapılan müdahaleler ile yapı rijitliği artırılmış, plastik mafsal dağılımı kontrol altına alınmış ve genel süneklik kapasitesi yükseltilmiştir.

2.2. 6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin güneydoğusunda, merkez üssü Kahramanmaraş ilinin Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde yaklaşık 9 saat arayla iki büyük deprem meydana gelmiştir [27]. Bu depremler, büyüklükleri ve etkiledikleri alan bakımından Cumhuriyet tarihinin en yıkıcı sismik olayları arasında yer almıştır.

İlk deprem, 6 Şubat 2023 moment büyüklüğü M_w = 7,7 olan Pazarcık merkezli deprem olarak gerçekleşmiş; ikinci büyük deprem ise aynı gün Elbistan merkezli M_w = 7,6 büyüklüğünde meydana gelmiştir. Her iki deprem de Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde meydana gelmiş olup, çok geniş bir coğrafyada şiddetli hasara neden olmuştur [27].

Bu depremler, başta Kahramanmaraş, Hatay, Gaziantep, Malatya, Adıyaman, Osmaniye ve Şanlıurfa olmak üzere toplamda 11 ili etkilemiş; çok sayıda can kaybı ve ağır yapısal hasar meydana gelmiştir [25]. Etkilenen iller Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Etkilenen yapı stoğunun önemli bir bölümünü betonarme konutlar, kamu binaları ve özellikle eğitim yapıları oluşturmaktadır. Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Depremler sonrasında yapılan hasar tespit çalışmalarında, çok sayıda okul binasının orta ve ağır hasarlı olduğu, bazılarının ise tamamen göçtüğü belirlenmiştir [29]. Bu durum, özellikle afet sonrası kullanılabilirliği hayati önem taşıyan okul yapılarının, mevcut deprem güvenliği düzeyinin sorgulanmasına sebep olmuştur.



Şekil 2.1. Depremde etkilenen iller [28]



Şekil 2.2. Depremde hasar betonarme konut yapıları [30]

Söz konusu depremler, sadece bölgesel değil aynı zamanda yapısal tasarım anlayışları açısından da bir kırılma noktası oluşturmuştur. Sahadan elde edilen veriler, birçok binanın yeterli süneklik, rijitlik ve detaylandırma kriterlerini karşılamadığını; dolayısıyla yapıların önemli bir bölümünün, yürürlükteki deprem yönetmeliklerine uygun tasarlanmamış veya uygun şekilde inşa edilmemiş olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 2.3' de yönetmeliğe uygun tasarlanmamış ve yıkılmış bir yapı gösterilmiştir [31].

Bu amaçla, bu tez çalışmasında incelenen betonarme okul yapısının güçlendirme ihtiyacı, 6 Şubat depremlerinin neden olduğu yıkıcı etkiler doğrultusunda daha da önem kazanmaktadır. Mevcut yapıların sismik performanslarının tekrardan değerlendirilmesi, yalnızca teorik değil aynı zamanda saha gözlemleriyle de desteklenerek yapılmalıdır. Okul gibi toplu kullanım yapılarının deprem sonrası güvenli biçimde hizmet verebilmesi için performans seviyelerinin "sınırlı hasar" düzeyinde sağlanması gerektiği bir kez daha açık biçimde görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan deprem verileri arasında 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş depremlerine ait ivme kayıtları da incelenmiştir. Bu sayede yapının yüksek büyüklüklü yer hareketleri karşısındaki davranışı gerçekçi bir şekilde analiz edilmiştir. Böylece güçlendirme öncesi ve sonrası yapının karşılaşabileceği potansiyel deprem etkileri karşısındaki performansı daha güvenilir şekilde karşılaştırılabilmiştir.



Şekil 2.3. Yönetmeliğe uygun tasarlanmammış bir yapı [30]

2.3. Türkiye Deprem Yönetmelikleri

Türkiye, aktif fay hatları üzerinde bulunması nedeniyle yüksek deprem riski taşıyan ülkelerden biridir [25]. Bu durum, yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla deprem etkilerinin dikkate alındığı mühendislik tasarım esaslarının belirlenmesini gerekli hale getirmiştir. Türkiye'de deprem mühendisliği uygulamalarının temel çerçevesi, farklı dönemlerde yürürlüğe giren deprem yönetmelikleri etkisiyle gelişmiştir.

Tablo 2.1. Türkiye deprem yönetmelikleri ve özellikleri

1944	➢ İlk özgün yönetmelik hazırlandı. ➢ Zemin sınıflandırıldı. ➢ Kat sayılar belirlendi. ➢ Deprem etkisi düşey (önemsiz) ve yatay (önemli) olarak tanımlandı. ➢ Ahşap ve yığma yapılar ağırlıklı hazırlandı.
1949	➢ Deprem haritası yapıldı. ➢ Kat sayıları ve yükseklikleri revize edildi. ➢ Hareketli yükler hesaba dahil edildi. ➢ Yapı önem katsayısı kısmen dahil oldu.
1953	➢ Deprem katsayıları tanımlandı. ➢ Yapı kullanım katsayıları tanımlandı.
1962	➢ Deprem katsayılarında hareketli yük etkisi tanımlandı. ➢ Yapı kullanım katsayıları revize edildi.
1968	➢ Betonarme yapılar tanımlandı. ➢ Betonarme elemanların boyutları sınırlandırıldı. ➢ Binanın periyodu deprem hesabına eklendi.
1975	➢ Günümüz koşullarına en yakın yönetmelik hazırlandı. ➢ Düğüm noktalarında etriye (dikme kiriş bağlantılarında direnci sağlayan sargı) sıklaştırması tanımlandı. ➢ Deprem haritası güncellendi. ➢ İvme spektrumu tanımlandı.
1998	➢ Sektörde pratiğe uygulanan ilk yönetmelik oldu. ➢ Deprem hesabı çağdaş yönetmeliklere benzer nitelikteydi.
2007	➢ Mevcut yapıların performans analizi eklendi. ➢ Mevcut yapıların güçlendirilme koşulları ve yöntemleri tanımlandı.
2018	➢ Birden fazla performans hedefine göre tasarım eklendi. ➢ Lokasyona bağlı deprem tehlikesi tanımlandı. ➢ Düşey tasarım spektrumu tanımlandı.

Yönetmeliklerin temel amacı, can güvenliğini sağlamak, yapısal hasarı sınırlandırmak ve özellikle kamu binaları gibi önemli yapıların deprem sonrası kullanılabilirliğini korumaktır [32]. İlk genel deprem yönetmeliği, 1940 yılında yayımlanmış olup, izleyen yıllarda yaşanan büyük depremler sonrasında yapı güvenliği konusundaki bilimsel ve teknolojik

gelişmelere paralel olarak farklı düzenlemelere gidilmiştir. 1944, 1949, 1953, 1962, 1968, 1975, 1998, 2007 ve 2018 yıllarında yapılan düzenlemeler, Türkiye'de deprem mühendisliği açısından önemli aşamalar olmuştur. Bu yönetmelikler sırasıyla Tablo 2.1'de gösterilmektedir [32]. 2018 yılında yürürlüğe giren "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)", diğer deprem uygulamalarının yetersiz kalması sonucu oluşturulmuştur. Bu yönetmelik ile birlikte performansa dayalı tasarım ilkeleri detaylı biçimde ele alınmış, doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin kullanımı teşvik edilmiş ve mevcut yapıların değerlendirilmesi ile güçlendirilmesine yönelik detaylı hükümler getirilmiştir [33]. TBDY 2018, yapıların deprem performansını; kullanım amacına, önem derecesine ve deprem sonrası fonksiyonel süreklilik şartlarına göre sınıflandırmakta ve buna bağlı olarak farklı performans hedefleri açıklamaktadır. Bu çerçevede, eğitim yapıları gibi toplu kullanım alanları içeren binalar için daha yüksek performans hedefi getirilmiş; bu tür yapılarda yalnızca göçmenin önlenmesi değil, aynı zamanda sınırlı hasar düzeyinde davranış sergilemesi hedeflenmiştir [34]. Yönetmelikte bunlara ek olarak, malzeme modelleri, plastik mafsal tanımları, performans kriterleri ve zemin etkilerine dair yönlendirmeler yer almakta olup, özellikle güçlendirme tasarımı yapılırken bu kuralların özenle uygulanması gerekmektedir. Bu kapsamda, çalışma boyunca ETABS programı aracılığıyla yapılan analizlerde, yönetmeliğin öngördüğü malzeme parametreleri ve kabul kriterleri dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır.

2.4. Betonarme Yapılarda Tipik Hasar Durumları

Betonarme yapılar, genel olarak iyi tasarlandıklarında ve uygun şekilde inşa edildiklerinde deprem etkilerine karşı dayanıklı sistemler ortaya koymaktadır. Ancak ülkemizdeki yapı stokunun önemli bir bölümü, eski deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmış ya da mühendislik hizmeti almadan oluşturulmuştur. Bu durum, özellikle büyüklüklü yer hareketleri sırasında, betonarme yapılarda çeşitli tipik hasarların meydana gelmesine sebep olmaktadır. Deprem etkisi altındaki betonarme yapılarda gözlemlenen hasarlar genellikle yapısal sistemin süneklik düzeyi, düzensizlik durumu, malzeme kalitesi ve detaylandırma yeterliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda tipik hasar durumları hem taşıyıcı hem de taşıyıcı olmayan sistem elemanlarında farklı şekillerde ortaya çıkabilmektedir [35].

Deprem sırasında meydana gelen moment etkilerinin yoğunluk kazandığı bölgeler genellikle kiriş ve kolon uçlarıdır. Bu bölgelerde, plastik mafsal oluşumu beklendiği durumlarda yeterli detaylandırma yapılmamışsa ezilme, çatlama ve donatı kopması gibi hasarlar gelişebilir. Özellikle kolon uçlarında gözlenen ani kesme kırılmaları, yapının göçme riskini artıran kritik hasar türlerindendir. Şekil 2.4'te bu hasar turu gösterilmiştir [35].



Şekil 2.4. Kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı

Betonarme yapılarda kolon-kiriş birleşim bölgeleri, yük aktarımının yoğun olduğu yerlerdir. Bu bölgelerdeki yeterli olmayan etriye sıklaştırması ya da düğüm noktası detaylandırma eksiklikleri, birleşim bölgesinde gevrek kırılmalara neden olabilir. Gözlemler, bu bölgelerde gelişen hasarların çoğu zaman taşıyıcı sistemde göçmeye yol açabildiğini göstermektedir [36]. Katlar arasında rijitlik farkı olması durumunda, özellikle zayıf kat davranışı gelişebilir. Şekil 2.5'de gösterildiği gibi zemin katın daha yüksek olması ya da yeterli sayıda perde elemanının bulunmaması durumunda, üst katlara göre daha fazla deplasman yaparak hasarın bu bölgede yoğunlaşmasına neden olur. Bu tür yapılar "yumuşak kat" olarak tanımlanır ve deprem sırasında hasar gören sistemler arasındadır [37]. Betonarme yapılarda yatay yük taşıma kapasitesini artış sağlamak için kullanılan perdeler, genellikle kesme kuvvetlerine maruz kalır. Yetersiz enkesit alanı, düşük beton kalitesi ve düzensiz donatı yerleşimi gibi faktörlerle bu elemanlarda kesme çatlakları,

ezilme bölgeleri ve donatı kopmaları oluşur. Şekil 2.6'da düşük beton kalitesi ile ilgili şekil gösterilmiştir [35].



Şekil 2.5. Yumuşak kat bulunan bir bina [38]



Şekil 2.6. Betonun tüvenan agregaların içermesi [38]

Deprem esnasında taşıyıcı olmayan duvar, kaplama ve dolgu elemanları da ciddi hasarlara uğrayabilir. Bu hasarlar yapısal bütünlüğü doğrudan etkilemese de, can güvenliği açısından risk oluşturur [36].Bazı durumlarda hasar, doğrudan taşıyıcı sistemin zayıflığından değil; yapının oturduğu zemin koşullarından kaynaklanır. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi yetersiz

temel derinliği, oturma farklılıkları veya sıvılaşma gibi zemin kaynaklı sorunlar, taşıyıcı sistemde hasarların gelişmesine yol açar [35].



Şekil 2.7. Uygun olmayan bir zeminde yapılmış yapı [39]

2.5. Güçlendirme Amaçları ve Gereklilikleri

Deprem riski yüksek olan bölgelerde bulunan mevcut yapı stokunun önemli bir bölümü, istenilen şartları yerine getirememektedir. Bu yapıların bir kısmı mühendislik hizmeti almadan inşa edilmiş; bir kısmı ise eski tasarım ve uygulama anlayışlarıyla yapılmıştır [40]. Güçlendirme, bir binanın mevcut taşıyıcı sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmadan ya da sınırlı müdahalelerle, depreme karşı dayanımının ve sünekliğinin artırılması için uygulanan teknik ve mühendislik sürecidir. Güçlendirme uygulamaları sadece yapısal kapasitenin artırılmasını değil; aynı zamanda düzensizliklerin düzeltilmesi, rijitlik dağılımının dengelenmesini ve enerji tüketim kapasitesinin artırılmasını da sağlar. Böylece yapı, olası bir deprem etkisi altında daha kontrollü, öngörülebilir ve güvenli bir şekilde davranış sergiler [5].

Güçlendirme kararının alınmasındaki temel gerekçeler şu şekilde özetlenebilir; yetersiz taşıyıcı sistem, yönetmelik güncellemeleri, malzeme yetersizliği, deprem sonrası hasar ve risk tespiti ve işçilik zafiyetleridir [35].

2.6. Analiz Türleri

2.6.1. Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi

Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi, yapıların yatay deprem etkilerine karşı tasarımında kullanılan, doğrusal elastik analiz esasına dayanan ve özellikle düşük ve orta yüksekliğe sahip binalar için sıklıkla başvurulan bir hesap yöntemidir [41]. Bu yöntem, dinamik etkilerin statik yükler şeklinde temsil edilmesini sağlayarak, deprem yüklerinin yapıya etkisini sadeleştirilmiş bir biçimde değerlendirme imkânı sağlar. ETABS programı gibi gelişmiş yapısal analiz yazılımlarında, bu yöntem ulusal ve uluslararası deprem yönetmelikleri doğrultusunda otomatik olarak uygulanabilmektedir [42]. Yöntem kapsamında, yapı ağırlığı esas alınarak hesaplanan etkin yerçekimi kuvveti, taban kesme kuvvetinin belirlenmesinde kullanılır. Elde edilen bu taban kesme kuvveti, katlara yapı yüksekliği ve kat kütlelerine bağlı olarak dağıtılır. Böylece her kat için eşdeğer bir yatay kuvvet elde edilmiş olur. Bu kuvvetlerin dağılımında, genellikle üçgen veya ters trapez dağılım kabul edilir; bu durum, binanın rijitlik ve kütle dağılımına göre ETABS programı tarafından otomatik şekilde tespit edilebilir [43]. ETABS programında eşdeğer deprem yükü yöntemi uygulanırken kullanıcı, analiz yapılacak bölgenin deprem tehlike parametrelerini (örneğin S_S, S_1, S_{DS}, S_{D1} değerleri) yönetmeliklere doğru şekilde tanımlar. Ardından program, seçilen yönetmeliğe göre tasarım spektrumunu oluşturur ve bu spektrum aracılığıyla temel sismik kuvvetleri hesaplar. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) esas alındığında, ETABS programı içerisinde bu yönetmelik parametreleri girilerek analiz gerçekleştirilir. Bu bağlamda yapı periyodu, etkin yerçekimi kuvveti ve katlara dağıtılacak eşdeğer kuvvetler ETABS programı tarafından hesaplanır ve kullanıcıya hem sayısal hem de grafik biçiminde gösterilir [42]. Eşdeğer deprem yükü yönteminin en büyük avantajı, hesaplamaların görece basit ve hızlı olmasıdır. Ancak bu yöntem, yapının düzensizlik durumlarını, ileri düzey etkileşimleri ve ikinci mertebe etkilerini sınırlı düzeyde dikkate alır. Bu nedenle yüksek düzensizlik içeren yapılarda veya karmaşık geometriye sahip sistemlerde daha gelişmiş analiz yöntemleri tercih edilmelidir.

2.6.2. Modal Analiz Yöntemi

Modal analiz, yapıların dinamik davranışlarının ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyan ve serbest titreşim modlarının belirlenmesini esas alan bir analiz yöntemidir [44]. Bu yaklaşım, özellikle deprem mühendisliğinde, yapının doğal frekanslarını, mod şekillerini ve modal kütle katılımlarını hesaplamak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. ETABS programı gibi ileri seviye yapısal analiz yazılımları, modal analizleri sayısal olarak doğru ve yüksek çözünürlükle gerçekleştirebilir.

Modal analiz, yapının kütle ve rijitlik özelliklerine göre oluşturulan dinamik denklemlerin çözümüne dayanır. Bu süreçte, yapı sisteminin serbest titreşim modları belirlenir ve her bir mod için doğal titreşim periyodu, titreşim frekansı ve mod şekli hesaplanır. Her mod, yapının belirli bir hareket biçimini temsil eder ve bu modların birleşimi, yapının deprem etkilerine verdiği toplam tepkiyi sağlar [45]. ETABS programında modal analiz gerçekleştirilirken, öncelikle yapının kütle matrisi ile rijitlik matrisi oluşturulur. Sonrasında bu matrislerin çözümü ile sistemin özdeğer ve özvektörleri hesaplanır. İşlem tamamlandıktan sonra elde edilen mod şekilleri ve periyotlar, yapının sismik performansının değerlendirilmesinde temel girdileri oluşturur. ETABS programı, bu işlemleri kullanıcı tanımlı çözüm seçeneklerine göre (örneğin Ritz veya Eigen vektör yöntemleri) gerçekleştirebilir. Modal analiz sonucunda elde edilen modlar, ETABS programı tarafından modal kütle katılım oranları ile birlikte gösterilir. Yönetmeliklerin öngördüğü şekilde, analizde yapının toplam kütlesinin yatay doğrultuda %90'ından fazlasını yeterli sayıda modun dikkate alınması gerekir. Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018 de bu doğrultuda modal analizde yeterli kütle katılımının sağlanmasını zorunlu kılar.[46] Yapılan modal analiz, çoğunlukla modal birleştirme yöntemleri (örneğin SRSS – Square Root of the Sum of Squares veya CQC – Complete Quadratic Combination) ile desteklenerek, her bir modun dinamik etkisinin yapıya olan katkısı bütünleştirilir. Bu sayede yapının farklı modlarda gösterdiği tepkiler, tekil bir analiz sonucu haline çevrilir. Modal analiz, eşdeğer deprem yükü yöntemi' ne kıyasla daha gerçekçi bir dinamik davranış değerlendirmesi sunduğu için, özellikle yüksek yapılar, düzensiz sistemler veya asimetrik kütle ve rijitlik dağılımına sahip yapılarda daha güvenilir sonuçlar sağlar. ETABS programı, bu analiz sürecini hem grafiksel hem de sayısal çıktı formatlarıyla kullanıcıya verir, böylece yapının titreşimsel özellikleri ayrıntılı olarak incelenebilir.

2.6.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Zaman tanım alanında hesap yöntemi, yapıların zamana bağlı olarak değişen deprem hareketlerine verdiği dinamik yanıtın, doğrudan hareket denklemleri çözülerek elde edildiği bir analiz yöntemidir [47]. Söz konusu yöntem, özellikle doğrusal olmayan davranışların değerlendirilmesinde vazgeçilmez bir araç olup, yapıların deprem etkisi altındaki gerçekçi performansının belirlenmesini sağlar. ETABS programı, bu hesap yöntemini hem doğrusal (linear) hem de doğrusal olmayan (nonlinear) analiz çeşitleriyle uygulayabilme ektedir. Zaman tanım alanı analizinin temel mantığı, yapının kütle, rijitlik ve sönüm özelliklerini içeren dinamik sistem denklemlerinin, gerçek bir ivme kaydı altında adım adım ve zamana bağlı olarak çözülmesidir. Her zaman adımında sistemin iç kuvvetleri, yer değiştirmeleri, hızları ve ivmeleri yeniden belirlenir. Bu yöntem sayesinde, deprem sırasında yapı elemanlarının ve sistemin tamamının gösterdiği karmaşık davranış detaylı biçimde elde edilir [47]. Sonlu eleman tabanlı yazılımlar bu analiz sürecini, öncelikle kullanılacak deprem yer hareketi kayıtlarının tanımlanması ile başlar. Program, tanımlanan yer hareketini yapı sistemine uygular ve belirlenen zaman adımlarında hareket denklemlerini çözerek sistemin tepkisini belirler. Çözüm sırasında ETABS programı, genellikle newmark-beta veya benzeri sayısal integrasyon yöntemini uygular. Doğrusal olmayan analizlerde ise, plastikleşen elemanlardaki iç kuvvet-yer değiştirme ilişkileri dikkate alınarak yapı davranışı değerlendirilir. Bu yaklaşım, taşıyıcı sistemin sünekliğini, enerji sönüm kapasitesini ve hasar dağılımının belirlenmesi açısından özellikle önemlidir [46]. Zaman tanım alanı analiz yönteminin en büyük avantajı, yapı davranışının tüm yönleriyle zaman ekseni boyunca izlenebilmesini sağlamasıdır. Bu yöntem, özellikle düzensiz yapılar, asimetrik kütle veya rijitlik dağılımları ve yüksek mertebeli iç kuvvet etkilerinin öne çıktığı durumlarda, diğer analiz yöntemleriyle elde edilmesi güç olan sonuçların elde edilmesine imkân tanır. Ancak, bu analiz türü yüksek hesaplama kapasitesi ve detaylı modelleme gerektirdiğinden, uygulanırken titiz bir mühendislik yaklaşımı gereklidir.

Sonlu eleman tabanlı yazılımları, zaman tanım alanı analizinin sonuçlarını kullanıcıya grafiksel olarak sunar ve zamanla değişen kat ötelemesi, ivme tepkileri, iç kuvvet dağılımları ile plastikleşme bölgeleri gibi kritik verilere kolay erişim sağlar. Bu sayede

mühendis, yapının dinamik davranışını kapsamlı bir şekilde inceleyebilir ve performansa dayalı tasarım kriterlerini değerlendirebilir.

2.7. Performans Hedefleri

Bu çalışmada analiz edilen yapı, eğitim amaçlı kullanılan betonarme bir okul binasıdır. Okul yapıları, Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018 kapsamında, deprem sonrasında işlevini sürdürmesi gereken yapılar arasında değerlendirilmektedir. Bu nedenle, bu tür yapıların yapısal performans hedefleri belirlenirken daha katı kriterler uygulanmaktadır. Bu kapsamda, güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal performans seviyeleri, yapının kullanım amacı ve önemi göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

3. GÜÇLENDİRME YAKLAŞIMLARI

3.1. Betonarme Yapılarda Güçlendirme Yöntemleri

Betonarme yapılarda zamanla meydana gelen taşıyıcı sistem hasarları, kullanım koşullarındaki değişiklikler, yetersiz tasarım veya uygulama hataları nedeniyle yapının taşıma kapasitesi azalabilir. Bu durumda, yapının güvenliğini artırmak ve kullanım ömrünü uzatmak amacıyla güçlendirme yöntemlerine başvurulur. Güçlendirme uygulamaları öncesinde mutlaka detaylı bir yapısal analiz yapılmalı, taşıyıcı sistemin mevcut durumu değerlendirilmelidir. Ayrıca, yapılacak müdahalelerin yapının genel davranışını olumlu yönde etkilemesi için mühendislik hesaplarıyla desteklenmiş doğru bir tasarım yapılması gerekir [48].

3.1.1. Kiriş Kolon Güçlendirme Yöntemi

Kiriş-kolon güçlendirme yöntemi, özellikle deprem etkilerine karşı dayanımın artırılmasında önemli rol oynar. Çünkü kiriş ve kolonların birleşim noktaları, yapının sünekliğini ve enerji sönümleme kapasitesini belirleyen elemanlardır. Bu birleşim bölgelerindeki zayıflıklar, yapının genel davranışını olumsuz etkileyerek göçme riskini artırır [49]. Güçlendirme sürecin de bazı teknikler kullanılır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi mantolama (ceketleme) yöntemi ile kiriş ve kolonlar, betonarme veya çelik elemanlarla sarılarak enkesit alanı artırılır; böylece hem dayanım hem de rijitlik artırılmış olur. Şekil 3.2'da gösterildiği gibi fiber Donatılı Polimer (FRP) sarma uygulamasında, karbon veya cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler birleşim bölgesine sarılarak kesme kapasitesi ve sünekliği artırılır; hafifliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle bu yöntem özellikle mevcut yapılar için tercih edilmektedir.



Şekil 3.1. Mantolamada donatı uygulaması [50]



Şekil 3.2. Kolonun sarılarak güçlendirilmesi [51]

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi çelik plaka veya profil eklenmesi yöntemi ile kiriş ve kolonlara çelik plakalar ya da profiller eklenerek taşıma kapasitesi artırılır; bu uygulama hem birleşim bölgesinde hem de eleman boyunca gerçekleştirilebilir. Epoksi enjeksiyonu ve hasarlı alanların onarımı ile mevcut çatlaklar epoksi ile doldurularak monolitik davranış sağlanır ve eleman dayanımı artırılır [40].



Şekil 3.3. Kolonların çelik ile sarılması [50]

3.1.2. Perdelerle Güçlendirme

Betonarme yapılarda yatay yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla kullanılan güçlendirme tekniklerinden biri de perdelerle güçlendirme yöntemidir. Özellikle depreme karşı dayanıklılığın artırılması açısından, bu yöntem oldukça önemli bir çözümdür [9].Perdeler, rijitlikleri yüksek, sünek davranış gösterebilen düşey taşıyıcı elemanlardır ve yapının yatay yükler altında daha kontrollü şekilde davranmasını sağlar. Bu yönüyle, özellikle taşıyıcı sistemi yetersiz olan veya düzensizlikler içeren betonarme yapılarda perdelendirme, yapısal performansın iyileştirilmesinde kritik rol oynamaktadır [52].Mevcut yapıya, statik ve dinamik analiz sonuçlarına göre uygun konumlara yeni betonarme perdeler eklenebilir. Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi perdeler temelden başlayarak üst kata kadar monolitik olarak inşa edilir ve binanın taşıyıcı sistemi ile ankrajlar ve donatılar aracılığıyla bütünleşerek birlikte çalışması sağlanır. Ayrıca, mevcut yapıda halihazırda bulunan ancak yetersiz kesit alanına veya donatı miktarına sahip perdeler mantolama yöntemiyle güçlendirilir; perdelerin etrafına yeni beton tabakası dökülerek enkesit alanı artırılır ve böylece hem rijitlik hem de dayanım yükseltilmiş olur. Bunun yanı sıra, bazı durumlarda kolon-kiriş çerçeve boşluklarına perde duvar yerleştirilerek mevcut taşıyıcı sistemin burulma ve yatay

yük taşıma kapasitesi artırılır; bu uygulama özellikle çerçeve sistemli yapılarda deprem davranışını iyileştirmek amacıyla tercih edilmektedir [40].



Şekil 3.4. Yeni betonarme perde eklenmesi [53]



Şekil 3.5. Perde güçlendirmesi için yapılan temel güçlendirme işlemi [50]

Perdelerle güçlendirme tasarımı yapılırken, öncelikle mevcut yapı performansı detaylı şekilde analiz edilir. Deprem etkileri altında oluşabilecek talepler belirlenir ve yeni perdelerin konumları, boyutları ve donatı detayları bu analiz sonuçlarına göre belirlenir. Perdelerin yapıya eklenmesiyle ortaya çıkacak rijitlik artışı, yapının doğal periyotlarını

değiştirebilir; bu nedenle yapı genelinde oluşacak iç kuvvetlerin yeniden dağılımı göz önünde bulundurulmalıdır [52].

Perdelerin kullanımı, yapıya yüksek yatay rijitlik kazandırır ve deprem etkilerini sınırlandırır. Aynı zamanda yapının sünek davranış kapasitesini artırarak özellikle burulma düzensizliği gösteren yapılarda denge sağlar. Yanal ötelenmeleri azaltması sayesinde yapının genel stabilitesini de önemli ölçüde artırır [9].

3.1.3. Mantolama ve Lifli Polimerler

Betonarme yapıların zamanla maruz kaldığı çevresel etkiler, kullanım koşullarındaki değişiklikler ve özellikle deprem gibi dinamik yükler, taşıyıcı sistem elemanlarının yetersiz kalmasına neden olabilir. Bu durumda yapıların can ve mal güvenliğini sağlamak amacıyla çeşitli güçlendirme yöntemlerine başvurulur. Bu yöntemlerden ikisi olan mantolama (ceketleme) ve lifli polimer (FRP – Fiber Reinforced Polymer) ile güçlendirme, farklı yapısal ihtiyaçlara cevap verebilen, mühendislik açısından etkili çözümler sunan tekniklerdir.

Mantolama (ceketleme) yöntemi, mevcut betonarme taşıyıcı elemanların enkesit alanını artırmak ve dayanımını yükseltmek sebebiyle bu elemanların etrafının beton, çelik veya lifli kompozit malzemelerle kaplanmasıdır [48]. Betonarme mantolama en sık tercih edilen tür olup, kolon veya kirişin etrafına kalıp yerleştirilerek yeni donatı ve beton dökülmesiyle gerçekleştirilir (Şekil 3.6). Böylelikle kesit alanı artar ve eksenel yük ile moment taşıma kapasitesi yükseltilir. Çelik ceketleme yöntemi, elemanın çevresinin çelik profillerle sarılması yöntemiyle uygulanır ve hızlı yapılabilmesi ile yüksek dayanım artışı sağlaması sebebiyle tercih edilir. Karma ceketleme ise betonarme ve çelik malzemelerin birlikte kullanılmasıyla oluştur [54].

Mantolama uygulamaları, mevcut kesitin artırılmasıyla hem dayanım hem de rijitlik sağlar; aynı zamanda yangına, darbeye ve dış etkilere karşı yüksek dayanım sağlaması ve sünek davranış geliştirilerek göçme riskinin azaltılmasına olanak sağlar. Dezavantajları ise

uygulama sırasında yapının kullanımının kısıtlanabilmesi, ek yük getirmesi ve kalıp, işçilik ile süre açısından daha zor olmasıdır [52].

Lifli polimer (FRP) ile güçlendirme yöntemi, karbon (CFRP), cam (GFRP) veya aramid (AFRP) gibi yüksek dayanımlı liflerin polimer esaslı reçinelerle birlikte kullanılarak taşıyıcı elemanlara sarılması veya yapıştırılması esasına dayanır. Bu malzemeler yüksek çekme dayanımı içeren, betonarme elemanların kesme, eğilme ve eksenel yük taşıma kapasitesini yükseltmek amacıyla kullanılır. Uygulama şekilleri arasında kolonlarda sargı şeklinde sarma, kirişlerin alt yüzeyine boyuna veya eğik yönde FRP şeritleri yapıştırma ve perdeler ile döşemelerde yatay veya düşey eksenli liflerle uygulama yer alır. Bu yöntem yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde yapıya yük getirmez, kolay ve zahmetsiz uygulanabilir; korozyona dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Ayrıca mevcut taşıyıcı sistemin geometrisini değiştirmeden güçlendirme yapılmasına olanak sağlar [55]. Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Dezavantajları ise yangına karşı duyarlılık göstermesi, UV ışınlarından korunma gerekliliği ve uygulama yüzeyinin hazırlığı ile reçine kalitesinin uygulama başarısını doğrudan etkilemesidir [48].



Şekil 3.6. Kolonun betonarme ile mantolanması [51]



Şekil 3.7. Karbon Lifli Polimerle (FRP) kiriş kapasitelerinin arttırılması [51]

3.1.4. Temel Güçlendirme

Temel güçlendirme uygulamalarına başlamadan önce bazı adımların izlenmesi gerekmektedir. İlk olarak yapının mevcut temelleri, malzeme durumu ve boyutları belirlenmelidir. Zemin etüdü yapılarak taşıma gücü, oturma potansiyeli ve yeraltı su seviyesi incelenmelidir. Diğer yandan yapının hasar durumu, oturma eğilimleri ve geçmiş performansı detaylı şekilde incelenmelidir. Son aşamada, uygulanacak güçlendirme yönteminin yapıya olan etkisi statik ve dinamik analizlerle değerlendirilmelidir [56]. Yapıların taşıyıcı sisteminin güvenliği yalnızca üst yapı elemanlarının dayanımıyla kısıtlı değildir. Bir yapının uzun ömürlü ve güvenli olabilmesi için, yüklerin zemine güvenli biçimde aktarılmasını sağlayan temel sisteminin de yeterli taşıma gücüne sahip olması gerekmektedir. Zemin özelliklerinin yetersiz olduğu, oturma farklılıklarının meydana geldiği ya da yapı üzerine ek yüklerin binmesi durumlarında mevcut temel sistemi yetersiz hale gelebilir. Bu gibi durumlarda, yapı güvenliğini sağlamak amacıyla temel güçlendirme yöntemleri uygulanmaktadır [57].

Temel güçlendirme yöntemleri, mevcut temel sisteminin taşıma kapasitesini artırmak, zeminden kaynaklanan problemlerin etkisini azaltmak ve yapının rijitliğini sağlamak için uygulanır (Şekil 3.8). Bu yöntemler arayıcılığıyla hem düşey hem de yatay yüklerin güvenli

bir şekilde zemine aktarılması mümkün hale gelir. Aynı zamanda, farklı oturma problemleri ve taşıma gücü kayıplarının önüne geçilerek yapının ömrünü uzatılır [9]. Temel güçlendirme, yapının özellikleri, zemin koşulları ve hasarın seviyesine göre çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir. Temel alanının artırılması ile mevcut temel elemanlarının etrafına betonarme ilaveler yapılarak temel yüzeyi genişletilir ve yüklerin zemine genişletilmiş bir alana yayılması sağlanır; uygulama sırasında yeni betonarme ilave, mevcut temele ankrajlı bağlantılarla sabitlenir. Bu yöntemin avantajı, yükün yayılma alanını artırarak zemindeki gerilmeleri azaltmasıdır; dezavantajı ise dar alanlarda uygulanmasının zor olmasıdır.

Ülkemizde birçok yapının yeterli güvenlik düzeyine sahip olmadığı ve tasarım hataları ile yapısal düzensizlikler nedeniyle betonarme elemanlarda çeşitli hasarların oluştuğu görülmektedir. İncelemeler, bu yapıların inşa edildiği dönemde gerekli mühendislik ve tasarım koşullarının sağlanamadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, deprem etkisiyle veya imalat hataları nedeniyle hasar gören betonarme kolon ve kirişlerin onarım ve güçlendirme yöntemleri incelenmiş ve bu yöntemler eleman güçlendirmesi ile sistem güçlendirmesi olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirilmiştir. Betonarme mantolama, CFRP uygulamaları ve yerinde dökme perde duvar eklenmesi en yaygın kullanılan güçlendirme yöntemleri olarak ele alınmış; bu yöntemlerin maliyet, işçilik ve dayanım açısından farklı üstünlük ve zayıflıklara sahip olduğu belirtilmiştir [12].



Şekil 3.8. Temellerin güçlendirilmesi [50]

Jet grout yöntemiyle, zemin içine yüksek basınçlı çimento şerbeti enjekte edilerek rijit kolonlar oluşturulur ve yapı temeline destek sağlanır; bu yöntem her türlü zeminde uygulanabilir ve çevreye minimum zarar verir, fakat uzmanlık ve kontrol gerektirir. Temel altı enjeksiyon yöntemi ile zemin boşluklarına çimento esaslı enjeksiyon yapılarak zemin sıkılaştırılır ve taşıma gücü artırılır; özellikle farklı oturma gösteren yapıların altında denge sağlamak amacıyla tercih edilir. Ayrıca, mevcut temelin altına yeni donatılı beton plaka yerleştirilerek yük dağılımı sağlanabilir; yeni plaka ile mevcut temel bütünleşik bir sistem hâlinde çalışır ve temel rijitliğini artırır [57].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, mevcut durumda bulunan bir betonarme okul yapısının deprem etkisi altındaki yapısal davranışı hem güçlendirme öncesi hem de güçlendirme sonrası için incelenmiştir. Çalışma kapsamında izlenen yol, yapının detaylı olarak analiz edilmesi, uygun modelleme tekniklerinin uygulanması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması şeklinde ilerlemiştir. İlk aşamada, yapı ile ilgili mevcut projeler incelenmiş, taşıyıcı sistemin geometrisi, malzeme özellikleri ve genel durumu değerlendirilmiştir. Yapının üç boyutlu modeli, ETABS programı kullanılarak oluşturulmuş ve taşıyıcı sistem elemanları (kolon, kiriş, perde vb.) yapıdaki gerçek konfigürasyonlarına uygun şekilde modellenmiştir. Malzeme dayanımları ve yükleme durumları (sabit, hareketli ve deprem yükleri) ilgili yönetmeliklere göre tanımlanmıştır. Genel şema Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Yapı modellemesi ve analiz süreci genel şeması

4.1. Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Deprem ivme kayıtları, depremin zaman içindeki ivme değişimlerini tespit etmek amacıyla kullanılan veri kaynaklarıdır. Bu, kayıtlar deprem sırasında yerin hızlı hareketini ölçer ve yapıların deprem performansını analiz etmeye yarar. Bu çalışma kapsamında aynı zemin sınıfına ait toplam 14 istasyon analiz edilmiştir. Bu çalışmada 14 adet deprem istasyonunun seçilmesinin nedeni, hem yürürlükteki deprem yönetmeliği hükümlerine uyum sağlamak hem de bu istasyonlara ait deprem kayıtlarının, Bingöl ilinde yer alması olası incelenen okul yapısına yakın bölgelerde meydana gelebilecek depremleri temsil edebilir nitelikte olmasıdır.

Tercih edilen deprem kayıtlarının, benzer kaynak ve yerel zemin özellikleri sebebiyle yapı üzerinde benzer etkiler oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte Bingöl ve çevresini etkileyen başlıca tektonik yapıların Doğu Anadolu fayı ve Kuzey Anadolu fayı olması ve her iki fay zonunun da yanal atımlı fay mekanizmasına sahip olması sebebiyle, Bingöl şehir merkezi veya incelenen okul yapısının bulunduğu bölgede meydana gelmesi olası depremlerin kaynak mekanizmalarının büyük ölçüde benzerlik göstereceği öngörülmüştür. Bu kapsamda, yapısal davranışı temsil etme yeterliliğine sahip olduğu değerlendirilen üç adet deprem kaydı seçilerek analizlerde kullanılmıştır.

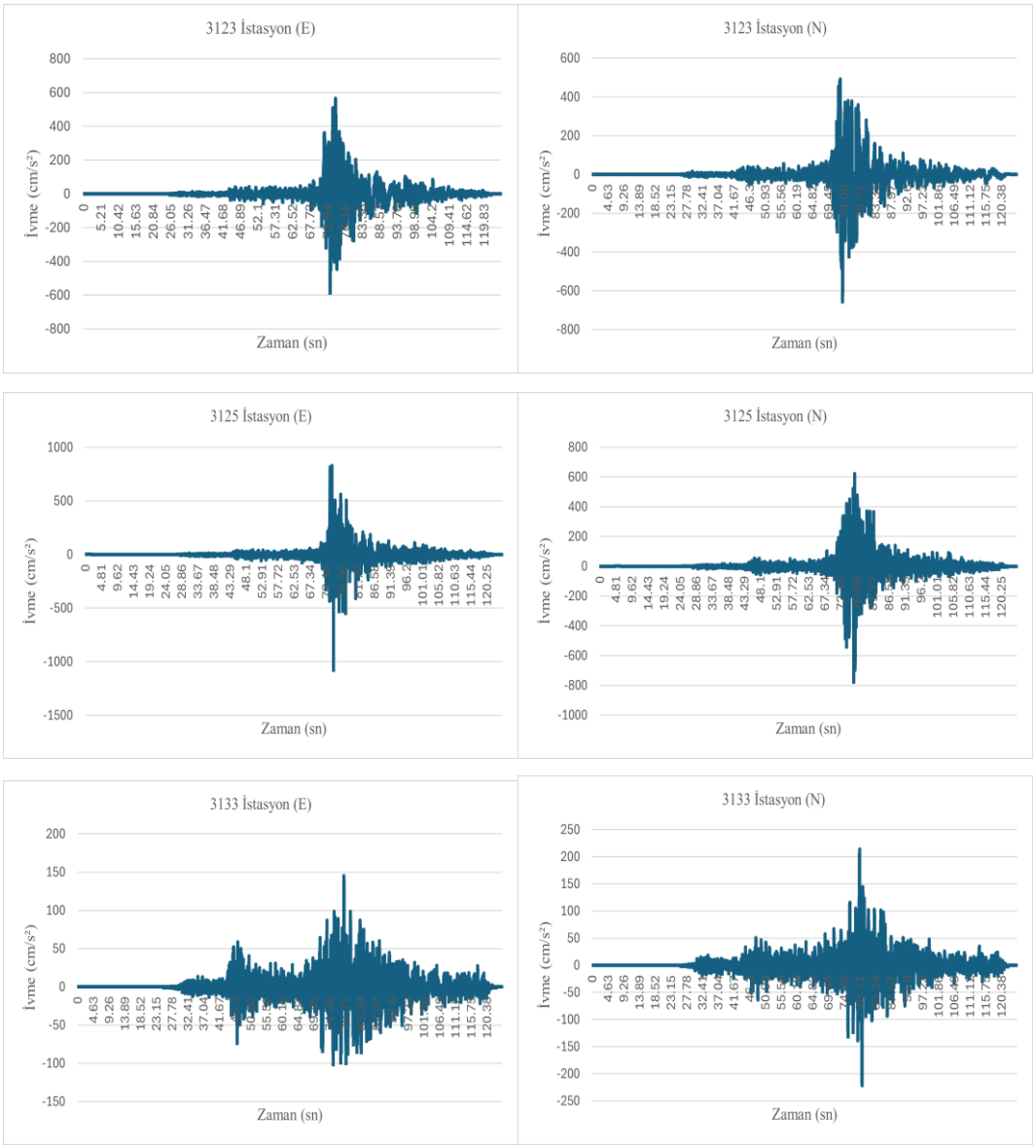
İstasyonlara ait ivme değerleri karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma sonucunda düşük, orta ve yüksek düzeyde ivme etkisini temsil eden üç istasyon seçilmiştir. Seçilen bu istasyonlar sırasıyla 3133, 3123 ve 3125 numaralı istasyonlardır. Türkiye'de bulunan istasyonlar Şekil 4.2 , Şekil 4.3'de ve Tablo 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Türkiye'de bulunan istasyonlar [58]

Tablo 4.1. İstasyon ait bilgiler

İstasyon	**Enlem**	**Boylam**	**PGA_EW**	**PGA_NS**	**VS30**	**Rjb (KM)**
3123	36,21423	36,15973	581,383	651,896	470	72,58
3125	36,23808	36,13264	1072,008	772,669	448	70,82
3133	36,2432	36,5736	145,468	221,322	377	68,21



Şekil 4.3. 3123, 3125 ve 3133 numaralı istasyonlara ait doğu-batı (E) ve kuzey-güney (N) yönlerinde ivme-zaman kayıtları

4.2. Malzeme Özellikleri ve Kabul Kriterleri

Bu çalışmada, analiz konusu olan betonarme okul yapısının yapısal değerlendirmesi ve güçlendirme tasarımı, mevcut malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Malzeme tanımlamaları hem mevcut durumun doğru modellenmesi hem de güçlendirme sonrası yapının davranışının sağlam bir şekilde belirlenebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde mümkün olduğunca yapıdan elde edilen yerinde tespit verileri, laboratuvar sonuçları ve yapı

envanterine ilişkin bilgiler referans alınmıştır. Statik ve mimari projede binada kullanılan beton kalitesine dair herhangi bir bilgi yer almamaktadır.

Mevcut beton dayanımı, çapı ve uzunluğu 100mm olan karotlardan elde edilen test sonuçları kullanılarak, herhangi bir katsayı kullanmaksızın belirlenebilir. Farklı uzunluk çap/oranlarına sahip Karot örneklerinden elde edilen test sonuçlarının dönüştürülmesi ise uygun dönüştürme faktörleri ile yapılmalıdır. Elemanların taşma kapasitesini belirlerken mevcut beton dayanımı için Karot numunelerinden elde edilen değerler arasında ortalamanın %85 ile (ortalama eksi standart sapma) değerlerinden daha büyük olanı esas alınacaktır [1].

En küçük değerin istatiksel olarak sapkın bir sonuç olup olmadığını belirlemek için bir, grup beton numunesinin test sonuçları arasında kalan sonuçların ortalaması ile en küçük değer arasındaki fark ayrıntılı değerlendirilmelidir. Bu nedenle,değerlendirme sırasında en düşük tek değerin kalan sonuçların ortalamasının %75'inden az olması durumunda gruptaki numune sonuçları hesaba katılmaz [1]. TBDY 2018 15.2.4.3 maddesinde "her katta kolonlardan veya perdelerden TS EN 12504-1'de belirtilen koşullara uygun şekilde en az 3 tane beton örneği alınarak deney yapılacaktır." şeklinde belirtilmiştir [41].

Bu sebeple beton kalitesinin yerinde belirlenmesi amacıyla bodrum kat, zemin kat, 1.kat ve 2. Kat kolonlarından 3'er adet olmak kaydıyla toplamda 12 adet karot numunesi daha önce yapılan çalişmalardan alınmiştir. Karot görselleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir ve Karot sonuçlarında Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Karot görüntüleri

Tablo 4.2. Karot sonuçları

KAT İSMİ	ELEMANIN PROJEDEKİ YERİ VE ADI	LAB. RAPORUNDAKİ ELEMAN ADI	NO	Karot Day. N/mm2
BODRUM	PB51	SB01	1	14,750
BODRUM	SB21	SB02	2	11,864
BODRUM	SB06	SB03	3	12,061
ZEMİN	SZ20	SZ01	4	14,666
ZEMİN	SZ18	SZ02	5	14,293
ZEMİN	SZ09	SZ03	6	10,214
1.KAT	S127	S101	7	12,238
1.KAT	S110	S102	8	17,864
1.KAT	S119	S103	9	15,570
2.KAT	S228	S201	10	12,175
2.KAT	S226	S202	11	10,493
2.KAT	S220	S203	12	15,456

TBDY 2018'de yer alan "Bir grup beton örneğine ait deney sonuçları arasında en küçük değer ile geriye kalan sonuçların ortalaması arasındaki farkın değerlendirilmesi ile en küçük değerin istatistiki olarak sapan bir sonuç olup olmadığı kontrol edilecektir. Bu amaçla, gruptaki numune sonuçlarının değerlendirilmesinde, en düşük tek değer, geriye kalan diğer sonuçların ortalamasının %75'inden daha düşük ise bu numune değerlendirmeye alınmaz" ibaresi uyarınca en düşük basınç değeri olan 10,21 MPa'ın değerlendirmeye alınıp alınmayacağı kontrol edilmiştir ve ihmal edilecek sonucun olmadığı tespit edilmiştir [41].

Yine TBDY 2018'de yer alan "Elemanların kapasitelerinin hesaplanmasında, örneklerden elde edilen (ortalama – standart sapma) değeri ile (0,85 x ortalama) değeri arasında yüksek olan değer, mevcut beton dayanımı olarak kabul edilecektir." İbaresi uyarınca performans analizinde dikkate alınarak beton dayanım sınıfı tespit edilmiştir. Beton basınç dayanımı 11,45 MPa olarak elde edilmiştir [41]. Bunlara ek olarak bina genelinde donatı sıyırma işlemleri yapılarak donatı aralıkları ve çapı tespit edilmiş. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

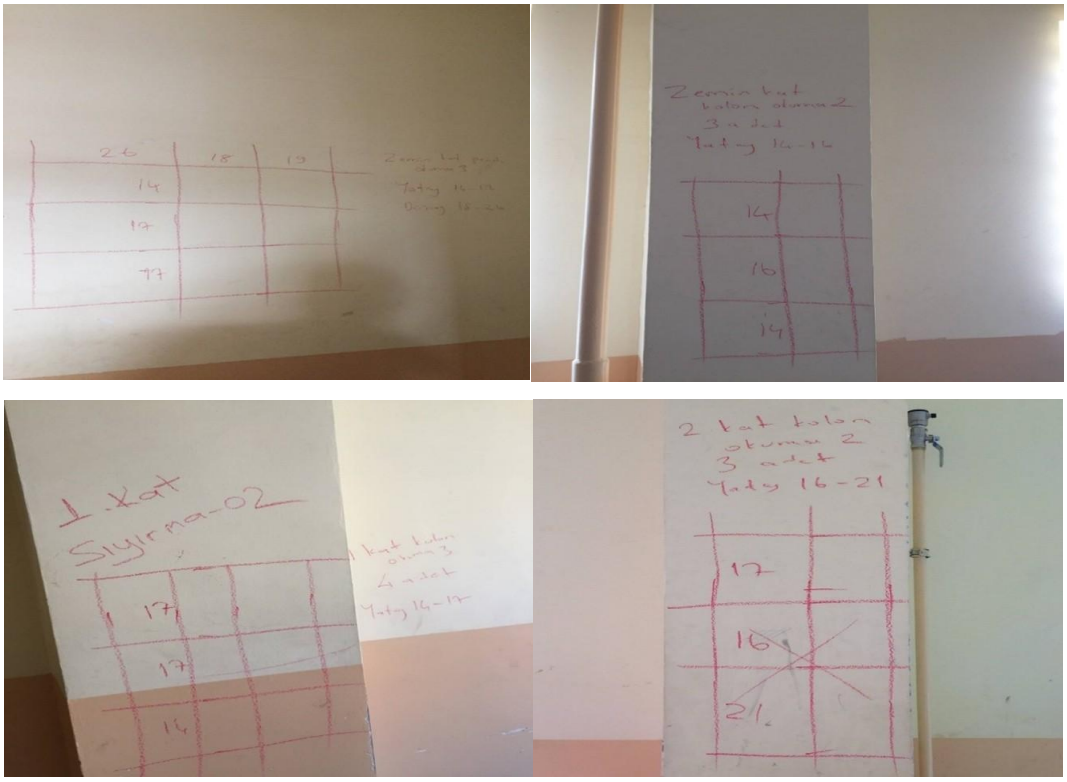


Şekil 4.5. Yapılan donatı testleri



Şekil 4.6. Yapılan sıyırma işlemleri

Ayrıca röntgen yardımıyla donatı konumları, çapı ve derinliği daha önce yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Schmidt çekici deneyi betonun basınç dayanımını tahmin etmek için yapılan bir deney türüdür. Bu deney türünde yapıya zarar vermeden beton kalitesi hakkında hızlı bir sonuç almak için yapılmaktadır. Bu uygulamada beton yüzeyine uygulanan darbenin geri sıçrama değeri ölçülür. Bu şekilde betonun farklı bölgelerine uygulanır ve betonun zayıf bölgeleri tespit edilir. Geri sıçrama değeri düşük çıkan bölgeler tespit edilerek karot alınması gereken yerler bu deney türüyle tespit edilmektedir.



Şekil 4.7. Yapının röntgen görüntüleri

Toplam 16 adet kolon ve perde üzerinde Schmidt çekici uygulaması daha önce yapılan çalişmalarda yapılmıştır. Donatı kalitesinin de S420 olduğu tespit edilmiştir. Tablo 4.3'te belirtilmiştir. Güçlendirme öncesi yapının zemin ve temel durumunun belirlenebilmesi amacıyla saha incelemeleri gerçekleştirilmiş ve radye temel ilişkin gözlem çukurları açılmıştır. Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Yapılan incelemelerde radye temelin derinliği, kalınlığı ve apartman genişlikleri tespit edilmiş mevcut projelerle karşılaştırılmıştır. Bu bulgular, yapının mevcut taşıyıcı sistem davranışının modellenebilmesi ve güçlendirme projesinin doğru zemin-temel parametreleri ile yapılabilmesi açısında büyük öneme sahiptir.

Firma tarafından yapının oturduğu zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla zemin etüdü yaptırılmış yerel zemin sınıfı ZC olduğu tespit edilmiştir. Tablo 4.4'de yerel zemin sınıflandırması tablosu verilmiştir ve Şekil 4.8'da yapıya ait gözlem çukurları görselleri verilmiştir.

Tablo 4.3. Schmidt çekiç sonuçları

No	Deney Yapılan Kat	Deney Yapılan Eleman	Beton Yaşı	Vuruş Yönü	Geri Tepme Sayısı										Ortalama
1	BODRUM	PB51	1000>	O^0	29	29	28	28	26	27	26	27	28	27	27,50
2	BODRUM	SB21	1000>	O^0	29	28	27	26	25	24	23	22	21	22	24,70
3	BODRUM	SB06	1000>	O^0	26	27	26	24	27	26	25	24	23	22	25,00
4	BODRUM	SB15	1000>	O^0	24	25	26	26	25	26	25	24	22	23	24,60
5	ZEMİN	SZ20	1000>	O^0	29	29	28	28	27	27	26	26	28	27	27,50
6	ZEMİN	SZ18	1000>	O^0	29	29	28	28	27	27	28	26	25	24	27,10
7	ZEMİN	SZ09	1000>	O^0	21	22	23	23	24	24	26	22	25	24	23,40
8	ZEMİN	SZ18	1000>	O^0	23	21	25	23	24	25	24	24	27	27	24,30
9	1.KAT	S127	1000>	O^0	27	27	26	25	26	25	25	24	25	23	25,30
10	1.KAT	S110	1000>	O^0	33	32	32	31	31	29	28	28	29	29	30,20
11	1.KAT	S119	1000>	O^0	30	29	28	27	26	30	29	28	28	30	28,50
12	1.KAT	S116	1000>	O^0	28	28	26	27	25	27	25	24	25	26	26,10
13	2.KAT	S228	1000>	O^0	26	26	24	24	26	26	26	25	25	24	25,20
14	2.KAT	S226	1000>	O^0	26	26	25	25	24	23	22	24	21	20	23,60
15	2.KAT	S220	1000>	O^0	29	28	29	27	28	29	25	29	28	29	28,10
16	2.KAT	S217	1000>	O^0	26	27	26	26	24	23	25	22	22	21	24,20

Bu tez kapsamında kullanılan yapı bilgileri, proje dokümanları ve mevcut duruma ilişkin veriler, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Söz konusu veriler; yapının mimari, statik ve taşıyıcı sistem özelliklerini kapsamakta olup, analiz ve değerlendirme çalışmalarında esas alınmıştır. Elde edilen bilgiler, betonarme okul yapısının güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal davranışının karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 4.4. Zemin sınıfları

Yerel Zemin Sınıfı	**Zemin Cinsi**	**Üst 30 metrede ortalama**		
		(Vs)30 (m/s)	**(N60)30 (darbe/30cm)**	**(cu)30 (kPa)**
ZA	Sağlam sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrışmış orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760	>50	>250
ZD	Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	15-50	70-250
ZE	Gevşek Kum, çakıl veya yumuşak-katı kil tabakaları veya PI>20 ve w>%40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (cu<25 kPa) içeren profiller	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1)Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler: sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, vb.) 2)Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3)Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI>50) kille 4)Çok kalın(>35 m) yumuşak veya orta katı killer			



Şekil 4.8. Yapıya ait gözlem çukurları

5. ÖRNEK YAPI TANIMI VE YAPISAL ANALİZİ

5.1. Okul yapısının Tanıtımı

İnceleme konusu yapı Şekil 5.1'de görüldüğü gibi Bingöl ili Yedisu İlçesi Merkez Mahallesi'nde bulunan 7 derslik okul binası olarak hizmet veren betonarme bir binadır. Okulun coğrafi konumu Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Bu yapı 2020 Karlıova depreminde hasar aldığı için güçlendirmeye karar verilmiş yapının aldığı hasarlar Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Okul yapısının görüntüsü



Şekil 5.2. Okul yapısının coğrafi konumu

Yapı ayrık bir nizamda serbest konumdadır. Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Bir bodrum, zemin ve 2 normal kat olmak üzere 4 kattan ibarettir. Okul binası 2012 yılında yapımı başlamış 2015 yılında eğitime açılmıştır.

2020 Karlıova depreminden sonra hasar alan bu yapı, 2023-2024 eğitim döneminde güçlendirilmesi tamamlanmıştır. Okul binasının taşıyıcı sistemi kolon, perde, kiriş, çerçeve ve döşeme plaklarından oluşmaktadır. Zemin sınıfı ZC olup zemin taşıma gücü 54 t/m^2'dir. Yapının proje bilgileri Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Kiriş hasarları



Şekil 5.4. Okul yapısının görüntüsü

Tablo 5.1. Yapının proje bilgileri

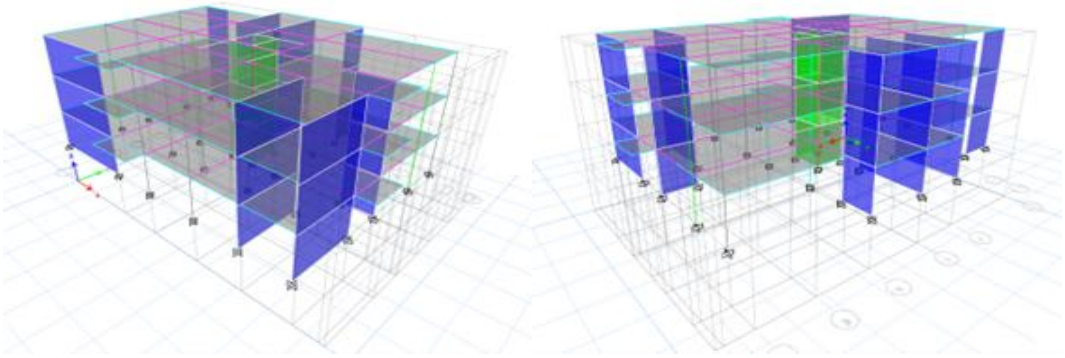
Özellikler	**Yönetmelik Tanımı**
Taşıyıcı Sistem Türü	Betonarme Perde Çerçeve
Kat Sayısı	3
Kat Yüksekliği (m)	3,20
Zemin Sınıfı	ZC
Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı (S_S)	2,956
Uzun Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı (S_1)	0,858
Beton-Çelik Sınıfı	C12–B420
Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	3,547
Uzun Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{D1})	1,201
Spektrum Karakteristik Periyotları (T_A, T_B)	0,068-0,339
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı	1
Dayanım Fazlalığı Katsayısı	3
Bina Kullanım Sınıfı	1
Bina Önem Katsayısı	1,5
Deprem Tasarım Sınıfı	1
Bina Yükseklik Sınıfı	7
Analiz Tipi	Lineer zaman tanım alanında hesap

Gösterilen Tablo 5.1'de okul yapının taşıyıcı sistemi, betonarme perde çerçeve olarak tanımlanmıştır. Bu okul yapısı 3 kat olup kat yükseklikleri 3.20 m'dir. Zemin sınıfı ZC olarak belirlenmiş, bu da yapısal tepkiyi etkileyecek bir parametredir. Deprem tehlike spektrumu, S_S ve S_1 değerleriyle tanımlanmıştır. Bu harita katsayıları kullanılarak, tasarım spektral ivme katsayıları elde edilmiştir. S_{DS} ve S_{D1} belirlenmiştir. Malzeme sınıfı, C12-B420 beton ve çelik kombinasyonu ile tanımlanmıştır. Yapı, taşıyıcı sistem davranış katsayısı, dayanım fazlalığı katsayısı ve bina önem katsayısı ile bina kullanım sınıfı ve deprem tasarım sınıfı olarak sınıflandırılmıştır. Spektrum karakteristik periyotları saniye olup, analiz tipinin lineer zaman tanım alanında hesap olduğu belirtilmiştir. Bu

parametreler, yapının deprem etkileri altındaki davranışını ve tasarım gereklerini belirleyen ana girdileri oluşturmaktadır.

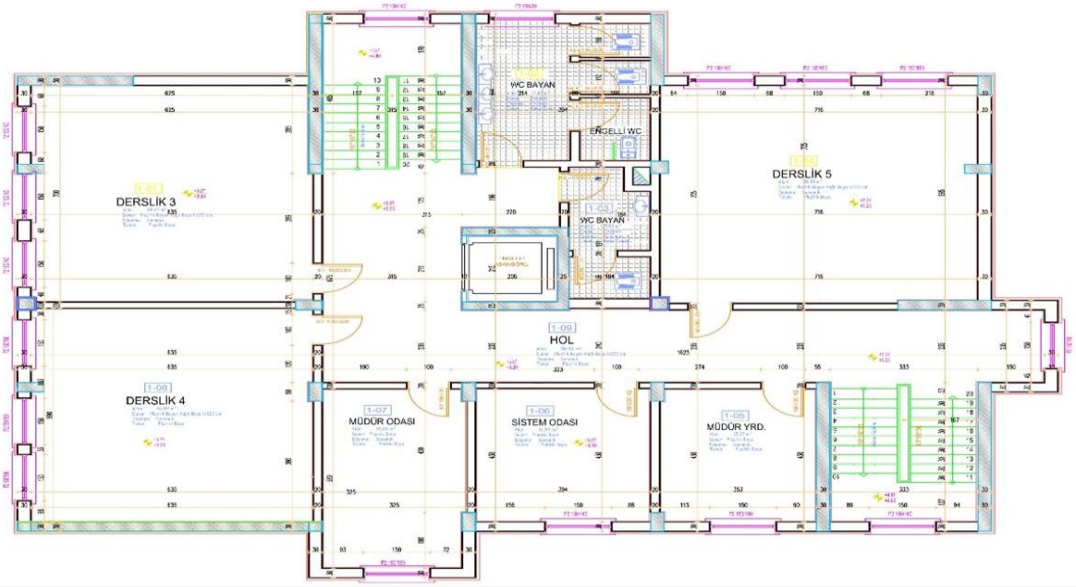
5.2. Mevcut Durum Yapısal Modellemesi

Yapının statik ve mimari projeleri incelenmiştir. Kat planları, kolon ve perde yerleşimleri ile yapı yüksekliği dikkate alınarak taşıyıcı sistemin şematik modeli ETABS programında tasarlanmıştır. Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Modelleme aşamasında, beton sınıfı ve çelik donatı sınıfı tanımlanmıştır. Sonrasında ilgili yönetmelikte belirtilen malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Sonrasında kolon, kiriş ve perde elemanlarına ait kesit boyutları programa girilerek kesit tanımlamaları yapılmıştır.



Şekil 5.5. Mevcut durum ETABS programı görüntüsü

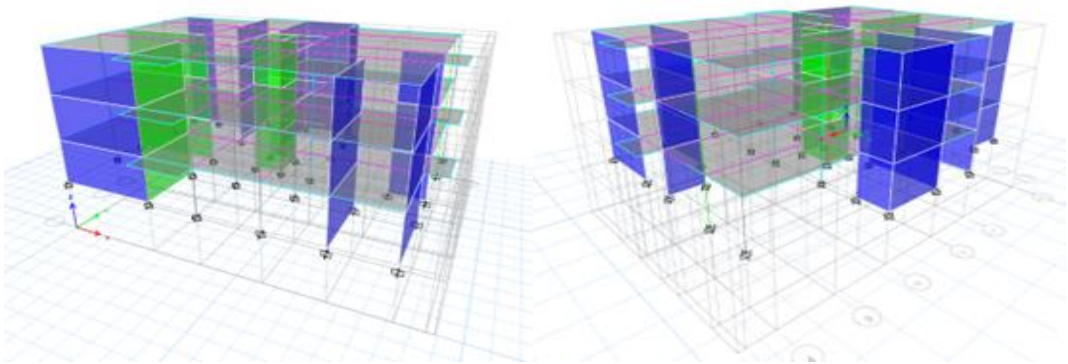
Yük tanımlamaları doğrusunda; sabit yükler (döşeme yükleri, duvar yükleri, merdiven yükleri), hareketli yükler ve deprem yükleri modele entegre edilmiştir. Deprem yüklerinin tanımlanmasında, Türkiye bina deprem yönetmeliği esas alınarak spektrum eğrisi oluşturulmuş; ayrıca doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerin gerçekleştirilebilmesi için ivme kayıtları modele uygulanmıştır. Mevcut durum kat planı Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



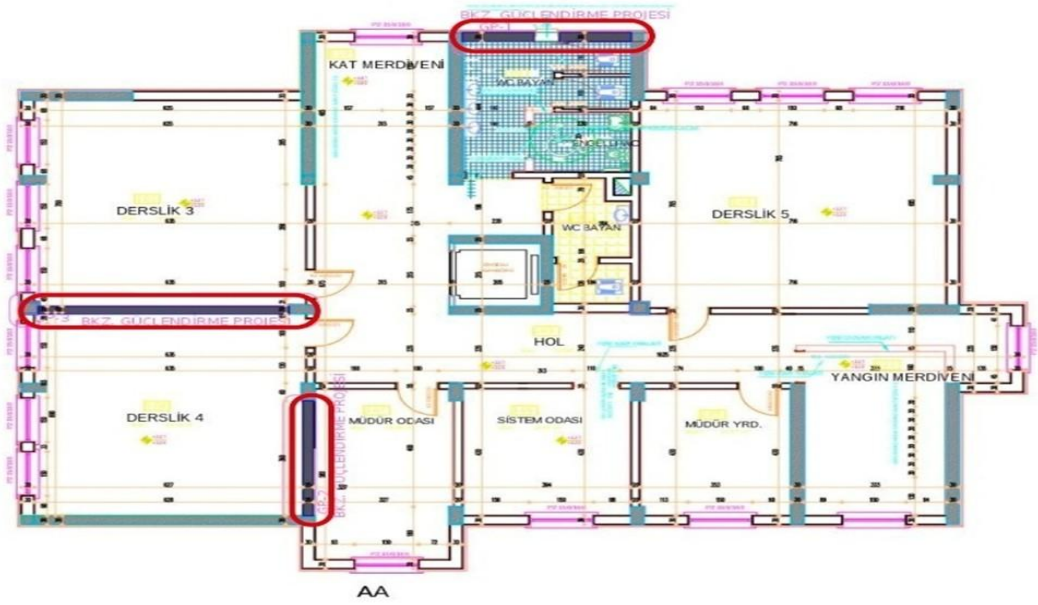
Şekil 5.6. Mevcut durum kat planı

5.3. Güçlendirme Durum Yapısal Modellemesi

Yapının statik ve mimari projeleri incelenmiştir. Bu okul yapısı betonarme perdeler ile güçlendirilmiştir. Mevcut taşıyıcı sistemde yetersiz yatay rijitlik tespit edilip yeni betonarme perdeler eklenmiştir. Bu perdelerin eklenmesindeki amaç yapının yatay yük kapasitesini arttırmak, kat ötelemelerini azaltmak ve burulma düzensizliğini sınırlamaktır. Sonuç olarak perdeler yapının rijitliğini arttırmış periyodları kısaltmış ve deprem performansını iyileştirmesi amaçlanmıştır. Kat planları, kolon ve perde yerleşimleri ile yapı yüksekliği dikkate alınarak taşıyıcı sistemin şematik modeli ETABS programında tasarlanmıştır. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterildiği gibi güçlendirilmiş durumda yapıya 3 perde eklenmiştir. Modelleme aşamasında, beton sınıfı ve çelik donatı sınıfı ile ilgili yönetmelikte belirtilen malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Sonrasında kolon, kiriş ve perde elemanlarına ait kesit boyutları programa girilerek kesit tanımlamaları yapılmıştır.



Şekil 5.7. Güçlendirme durum ETABS programı görüntüsü

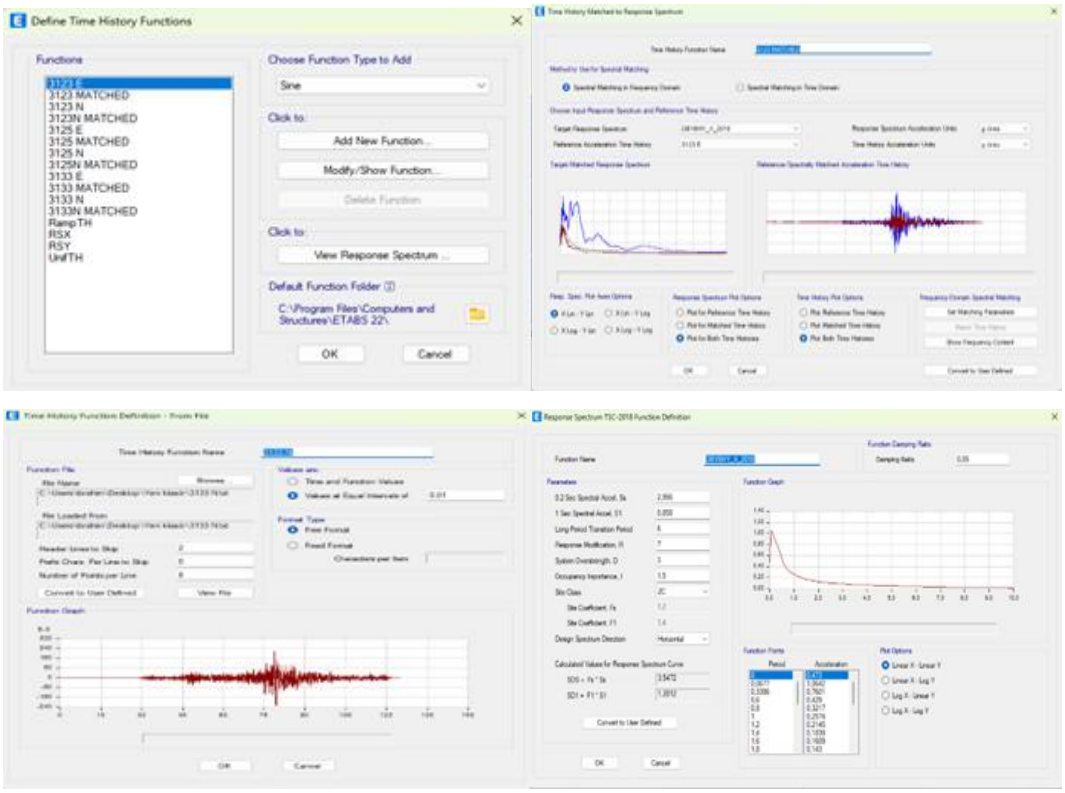


Şekil 5.8. Güçlendirme durum kat planı

5.4. Analiz

ETABS programı kullanarak yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş. Doğrusal zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesine dair yönetmelik kapsamında iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi basit ölçeklendirme yöntemi olup, bu yöntemde seçilen deprem kaydının ivme değerleri belirli bir katsayı ile çarpılarak küçültülmekte veya

büyütülmektedir. İkinci yöntem ise spektrum bazlı ölçeklendirme olup, bu yöntemde deprem kayıtları hedef tasarım spektrumuna uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmektedir. Bu çalışmada, analiz sonuçlarının daha gerçekçi ve yönetmelik esaslarına daha uygun olması amacıyla spektrum bazlı ölçeklendirme yöntemi tercih edilmiştir. 2023 Kahramanmaraş depremlerine ait istasyonlardan aldığımız ivme kayıtlarından düşük ,orta ve yüksek ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu deprem kayıtlarını yönetmelik kurallarına göre ölçeklendirilmesi kullanarak analizler gerçekleşmiştir.



Şekil 5.9. ETABS programında analiz görselleri

Çalışmada kullanılan grafiklerde verilen THA (time history analyses), yapının deprem etkisi altındaki davranışını belirlemek için gerçekleştirilen zaman tanım alanında analizleri belirlemektedir. THA-M (time history analyses-matched) ise ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarını kullanarak gerçekleştirilen zaman tanım alanında analizleri belirlemektir. Deprem kayıtları ile gerçekleştirilen zaman tanım alanı analizlerinde, depremin iki yatay bileşeni esas alınmıştır. Bu kapsamda, her bir deprem kaydı için EW ve NS bileşenleri, yapının X ve Y doğrultularına ayrı ayrı etki ettirilmiştir. Böylece, her iki doğrultuda deprem etkileri değerlendirilmiş ve analizler sonucunda elde edilen değerler arasından en elverişsiz

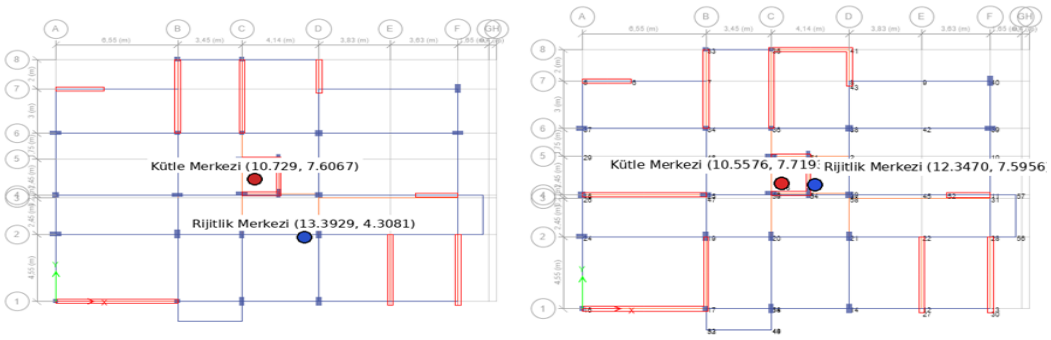
sonuçlar esas alınmıştır. Şekil 5.9'da gösterildiği gibi Mevcut yapıda düşey taşıyıcı elemanlar betonarme kolon ve perdelerden oluşmakta olup aks sistemine düzenli olarak yerleştirilmiş ve katlar boyunca süreklilik göstermiştir. Kirişler kolon ve perdeler arasında sürekli olup çerçeve davranışı sağlayacak şekilde moment aktaran birleşimlere sahiptir. Yapıda döşemeler betonarme plank döşeme olarak oluşturulmuş olup döşeme kalınlıkları 12- 15 cm'dir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Kütle ve Rijitlik Merkezleri

Tablo 6.1. Mevcut ve güçlendirilmiş durum için kütle ve rijitlik merkezleri

	Kütle Merkezi (m)		**Rijitlik Merkezi (m)**	
	X	Y	X	Y
Mevcut durum	10,729	7,6067	13,3929	4,3081
Güçlendirilmiş durum	10,5576	7,7193	12,347	7,5956



Şekil 6.1. Yapının mevcut ve güçlendirilmiş için kütle ve rijitlik merkezlerinin plandaki dağılımı

Yapının güçlendirme öncesi durumunda, plan düzleminde kütle merkezi ve rijitlik merkezi arasında bariz bir fark bulunduğu görülmektedir. Mevcut durumda kütle merkezi (10.7729,7.6067) koordinatlarında yer alırken, rijitlik merkezi (13.3929, 4.3081) koordinatlarından oluşmaktadır. Bu durum hem X hem de Y doğrultularında bir eksantrikside meydana getirmekte ve yapının deprem etkisi altında sadece öteleme değil, burulma davranışı sergilemesinde neden olmaktadır. Özellikle Y doğrultusunda

eksantriksidendin büyük olması, yatay yükler altında bazı aks ve elemanlarda iç kuvvetlerin yoğunlaşmasına neden olmaktadır.

Güçlendirme sonrasında ise kütle merkezi (10,5576, 7,719) ve rijitlik merkezi (12,3470, 7,5956) konumlarına gelmiş olup rijitlik ve kütle merkezinin kesin bir şekilde yaklaştığı görülmektedir. Bu durum güçlendirme uygulamasının rijitliği planda dengeli dağıttığı ve yapının davranışının düzeldiği görülmüştür. Deprem etkisi altındaki yapılarda burulma düzensizliği kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki uyumsuzluk nedeniyle kat düzleminde dönme etkilerinin ortaya çıkması durumudur.

Kütle merkezinde etkiyen deprem kuvvetlerinin rijitlik merkezine göre eksantrik olması, yapının yalnızca ötelenmesine değil aynı zamanda burulmasınada neden olmaktadır.
Tablo 6.1'de ve Şekil 6.1'de gösterilmiştir.Rijitlik merkezinin kütle merkezine yaklaşması deprem etkisi altında oluşacak burulma momentinin azalması ve yatay yüklerin planda daha dengeli bir şekilde yayılmasına neden olmaktadır. Bu tür iyileşme özellikle okul yapısı gibi plan boyutları büyük ve kullanım sürekliliği açısından kritik olan yapılarda hasarların belirli bir bölgede yoğunlaşma riskini azaltan önemli bir avantajdır.

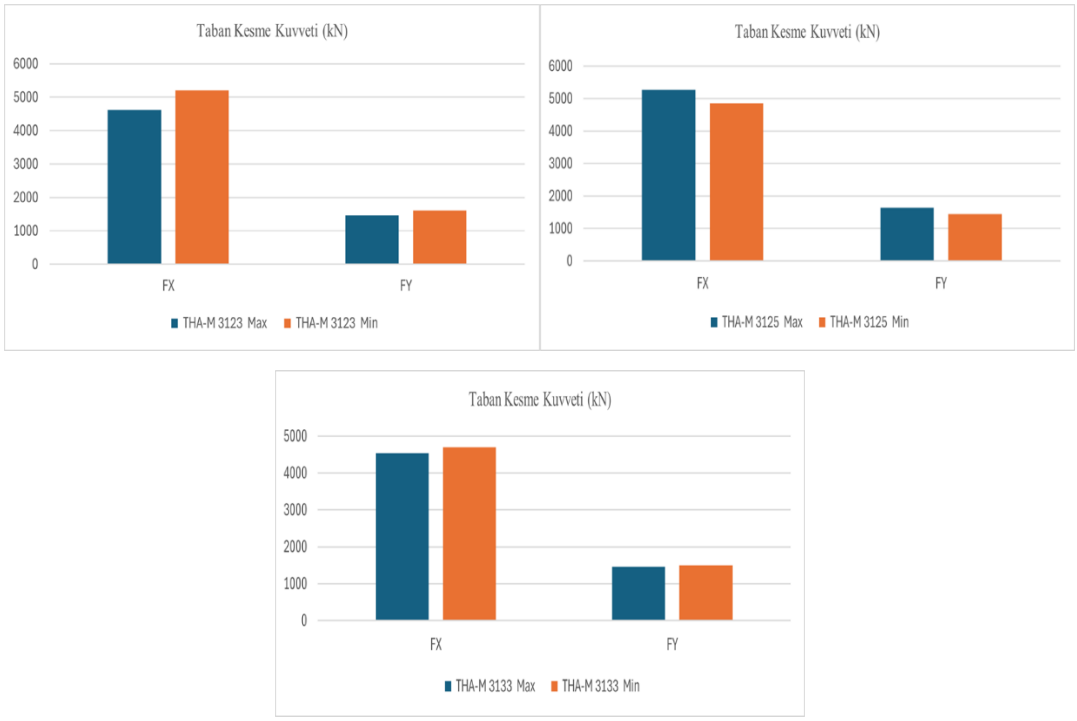
6.2. Mevcut Durum Performans Sonuçları

6.2.1. Taban Kesme Kuvveti

Şekil 6.2'de gösterilen THA 3125 kaydı bu kayıtlar arasında en yüksek Fx taban kesme kuvvetlerini verirken THA 3133 kaydı Fx ve Fy yönlerinde en düşük değeri vermektedir. Üç deprem kaydına ait taban kesme kuvveti incelendiğinde Fx yönünün daha yüksek taban kesme kuvveti ürettiği görülmüştür. Fx yönünde taban kesme kuvvetinin Fy yönüne göre daha büyük çıkmasının nedenleri yapının bu yöndeki etkin kütlesinin daha fazla olması, taşıyıcı sistem rijitliğinin Fx yönünde daha fazla olması, Fx doğrultusundaki modların kütle katılım oranlarının daha yüksek olmasıdır. THA 3125 deprem kaydı, yapının hâkim titreşim periyotları ile uyumlu spektral özellik göstermesi ve en büyük ivme kaydına sahip olması nedeniyle incelenen kayıtlarda en büyük taban kesme kuvvetini üretmiştir. Buna karşı, THA 3133 deprem kaydı daha düşük spektral özellik göstermiştir.



Şekil 6.2. Mevcut durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum taban kesme kuvvetleri



Şekil 6.3. Mevcut durum THA-M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum ölçeklendirilmiş taban kesme kuvvetleri



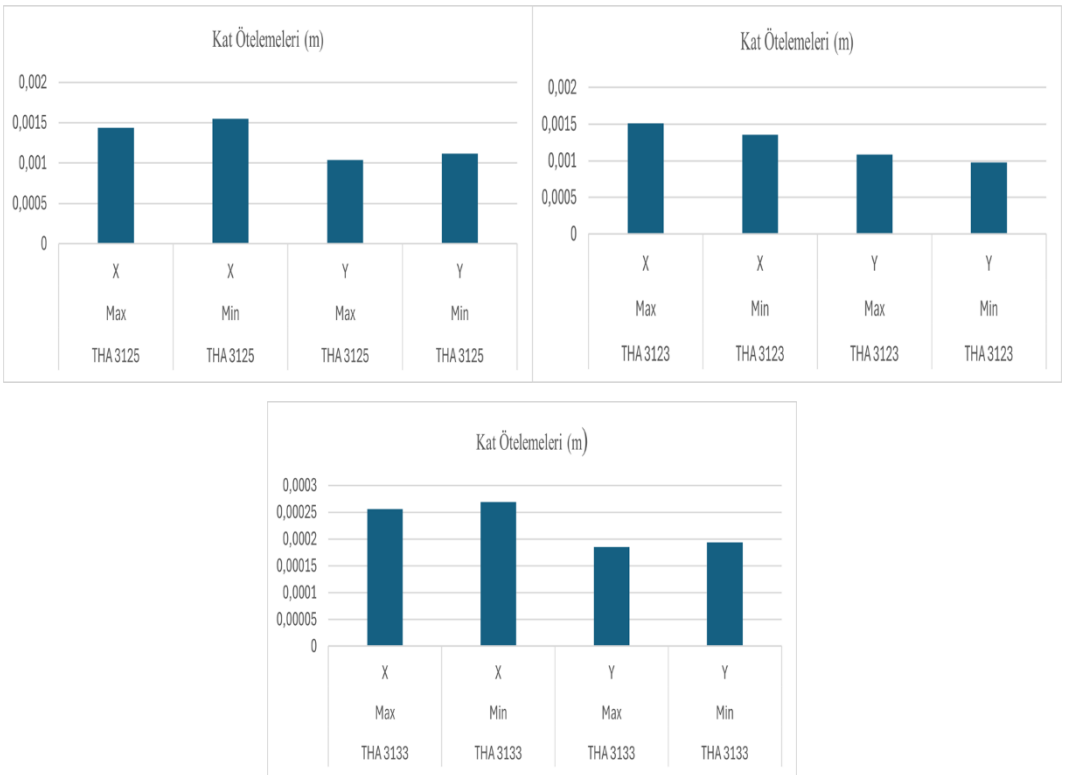
Şekil 6.4. Mevcut durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması

Şekil 6.3. gösterilen üç deprem kaydı içinde Fx yönündeki taban kesme kuvvetlerinin Fy yönüne göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Fx yönünde taban kesme kuvvetinin Fy yönüne göre daha büyük çıkmasının nedenleri yapının bu yöndeki etkin kütlesinin daha fazla olması, taşıyıcı sistem rijitliğinin Fx yönünde daha fazla olması, Fx doğrultusundaki modların kütle katılım oranlarının daha yüksek olmasıdır. Fx taban kesme kuvvetlerinin yaklaşık 4600-5600 kN aralığında olurken Fy yönündeki değerler 1400-1600 kN seviyelerindedir. Buna karşı, THA 3133 deprem kaydı daha düşük spektral özellik

göstermiş ve ivme kaydı daha düşüktür.THA 3125 deprem kaydı, yapının hâkim titreşim periyotları ile uyumlu spektral özellik göstermesi ve en büyük ivme kaydına sahip olması nedeniyle incelenen kayıtlarda en büyük taban kesme kuvvetini üretmiştir.

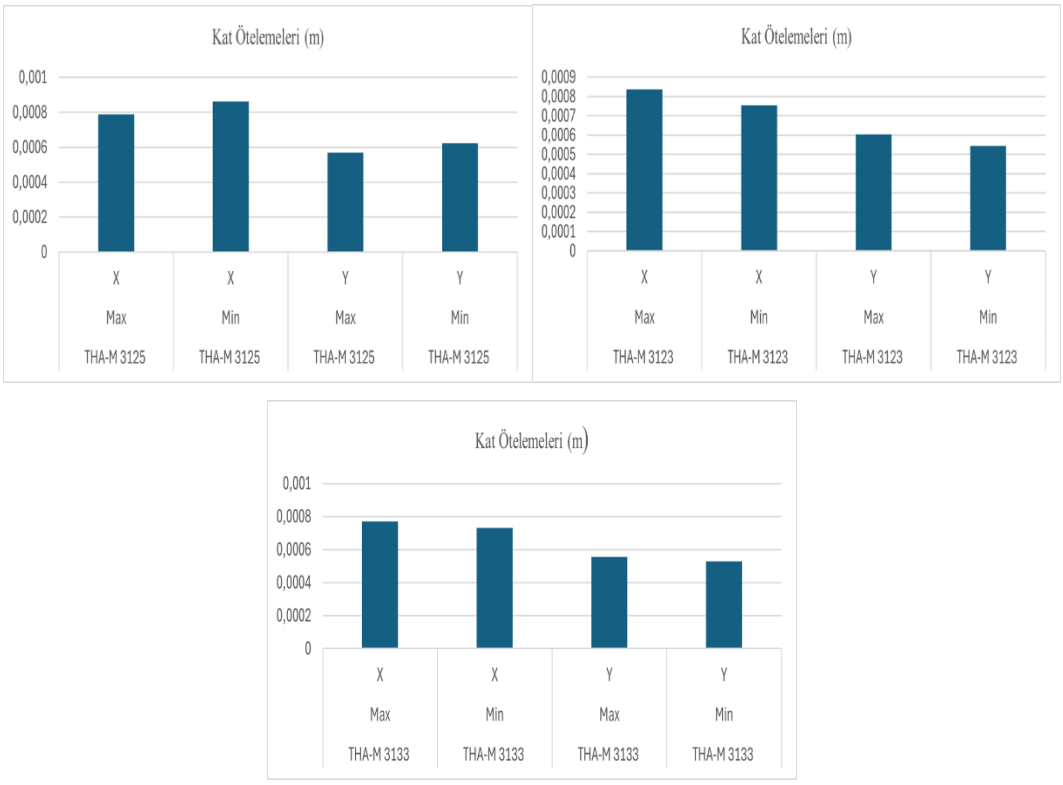
Tüm deprem kayıtlarını yan yana koyduğumuzda Fx yönündeki taban kesme kuvvetinin Fy yönüne göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Fx yönünde taban kesme kuvvetinin Fy yönüne göre daha büyük çıkmasının nedenleri yapının bu yöndeki etkin kütlesinin daha fazla olması, taşıyıcı sistem rijitliğinin Fx yönünde daha fazla olması, Fx doğrultusundaki modların kütle katılım oranlarının daha yüksek olmasıdır. THA-M analizlerde taban kesme kuvvetleri, normal analizlere göre genel olarak düşük çıkmıştır. Çünkü TBDY 2018 hedef ivme spektrumuna göre yapılan ölçeklendirme, bazı deprem kayıtlarında maksimum ivme değerlerini aşağı doğru çekmektedir. Şekil 6.4'de gösterilmiştir.

6.2.2. Zemin Kat Kat Ötelemeleri



Şekil 6.5. Mevcut durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri

Kat ötelemeleri incelendiğinde X yönündeki ötelemelerin Y yönüne göre yüksek değerler üretmiştir. Bu durumun nedeni yapının plan ve taşıyıcı sistemine bağlı olarak X yönünde düşük yatay rijitliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır. THA 3123 ve THA 3125, X yönü ötelemeleri 0,0013-0,0015 m aralığında olup THA 3133 ise daha düşük olup 0,00020-0,00030 m seviyelerindedir. THA 3133 max ve min değerlerinin birbirine oldukça yakın olması deprem harekelerinin benzer deplasman talepleri oluşturduğu göstermektedir. Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Mevcut durum zemin kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri

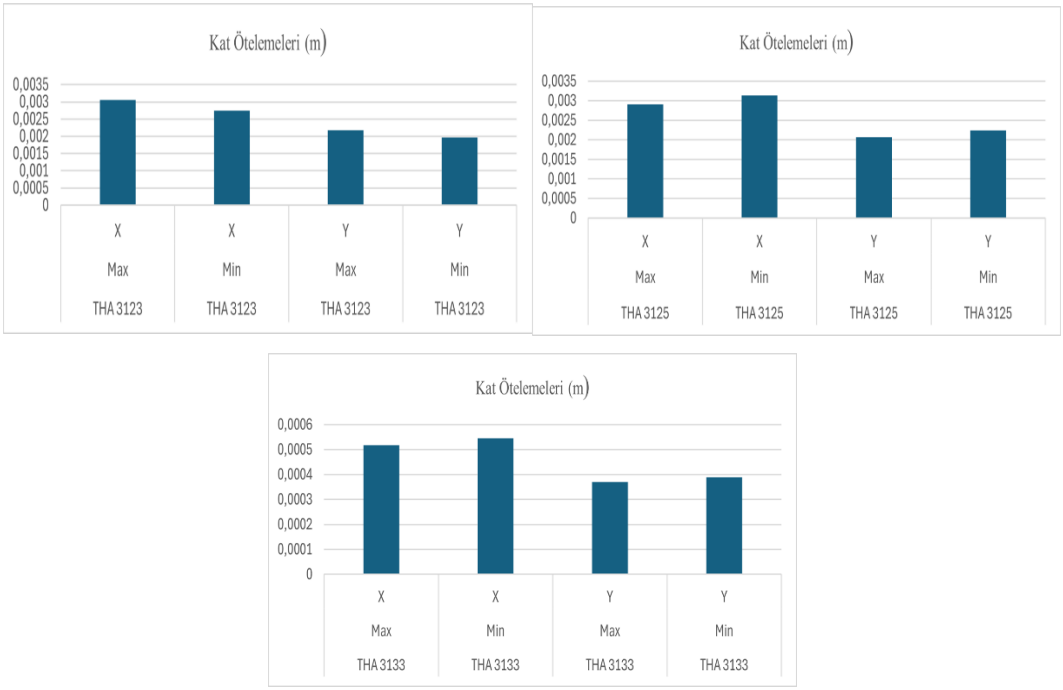
Şekil 6.6'da gösterilen kat ötelemeleri incelendiğinde X yönündeki ötelemelerin Y yönüne göre yüksek değerler üretmiştir. Bu durumun nedeni yapının plan ve taşıyıcı sistemine bağlı olarak X yönünde düşük yatay rijitliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır. THA-M 3123, THA-M 3125, THA-M 3133 kayıtlarında X yönü ötelemeleri yaklaşık 0,00075-0,00090 m aralığında değişirken Y yönü 0,00050 m-0,00065 m aralığında olduğu gözlemlenmiştir. THA 3133 max ve min değerlerinin birbirine oldukça yakın olması deprem harekelerinin benzer deplasman talepleri oluşturduğu göstermektedir.



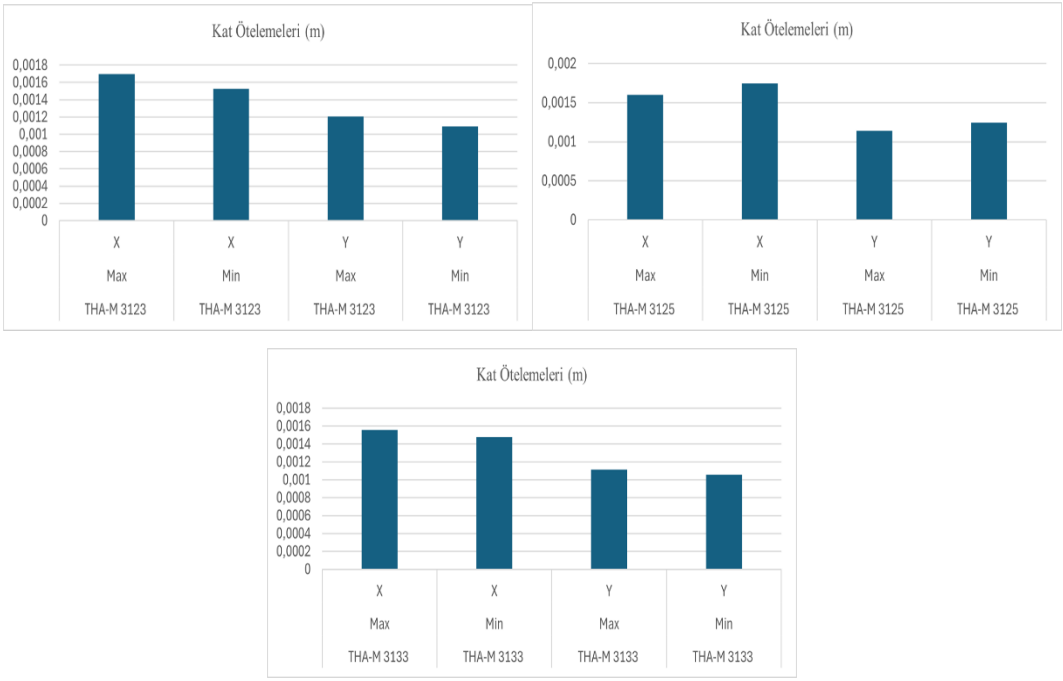
Şekil 6.7. Mevcut durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması

Şekil 6.7'de gösterilen THA-M analizlerde kat ötelemeleri, THA'ya göre genel olarak düşük çıkmıştır. Bunun nedeni THA-M deprem kayıtlarının yüksek genlikte ve kısa periyotlu ivme bileşenlerinin sınırlandırılması sonucunda yapının hakim periyotlarında dengeli dinamik karşılık oluşturmakta ve kat ötelemeleri THA'ya kıyasla daha düşük çıkmaktadır.

6.2.3. 1. Kat Kat Ötelemeleri



Şekil 6.8. Mevcut durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri



Şekil 6.9. Mevcut durum 1.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri



Şekil 6.10. Mevcut durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması

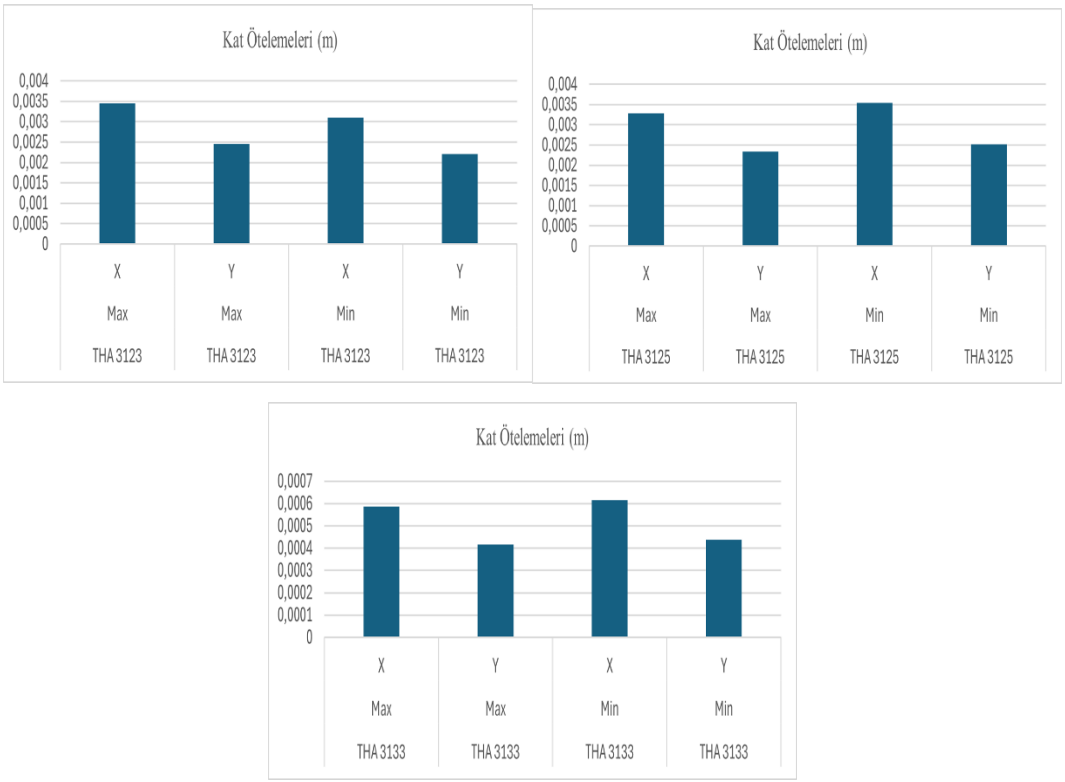
Şekil 6.8'de gösterilen kat ötelemeleri incelendiğinde X yönündeki ötelemelerin Y yönüne göre yüksek değerler üretmiştir. THA 3123 ve THA 3125, X yönü ötelemeleri 0,0026-0,0031 m aralığında olup Y yönü ötelemeleri 0,0019-0,0021 m seviyelerindedir. THA 3133 diğer iki kayda göre daha düşük kat ötelemesi üretmiştir. X yönündeki değer 0,00052-0,00055 m, Y yönündeki değer 0,00038 m-0,00040 m seviyesindedir.

Şekil 6.9'da gösterilen kat ötelemeleri incelendiğinde X yönündeki ötelemelerin Y yönüne göre yüksek değerler üretmiştir. THA-M 3123, THA-M 3125, THA-M 3133 kayıtlarında

X yönü ötelemeleri yaklaşık 0,00145 m-0,00170 m aralığında değişirken Y yönü 0,00090 m-0,00120 m aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.10'da gösterilen THA-M analizlerde kat ötelemeleri, THA'ya göre genel olarak düşük çıkmıştır. Bunun nedeni THA-M deprem kayıtlarının yüksek genlikte ve kısa periyotlu ivme bileşenlerinin sınırlandırılması sonucunda yapının hâkim periyotlarında dengeli dinamik karşılık oluşturmakta ve kat ötelemeleri THA'ya kıyasla daha düşük çıkmaktadır.

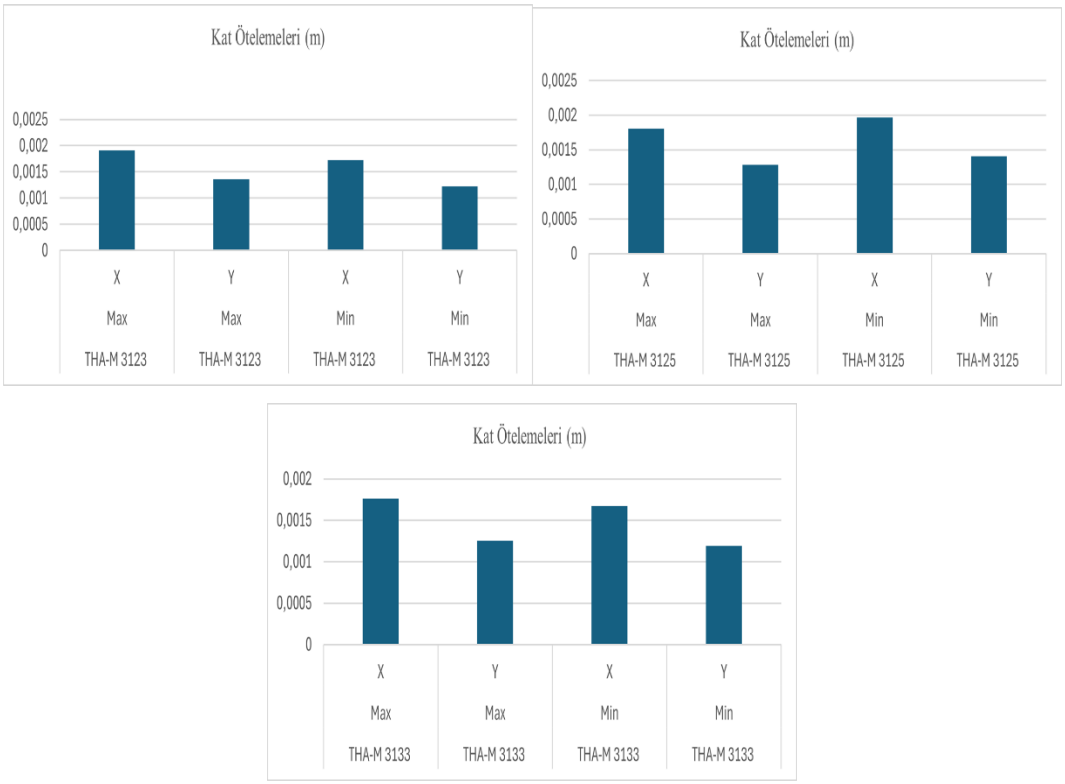
6.2.4. 2. Kat Kat Ötelemeleri



Şekil 6.11. Mevcut durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri

Kat ötelemeleri incelendiğinde X yönündeki ötelemelerin Y yönüne göre yüksek değerler üretmiştir. THA 3123 ve THA 3125, X yönü ötelemeleri 0,0032 m-0,0038 m aralığında olup Y yönü ötelemeleri 0,0022 m-0,0026 m seviyelerindedir. THA 3133 diğer iki kayda

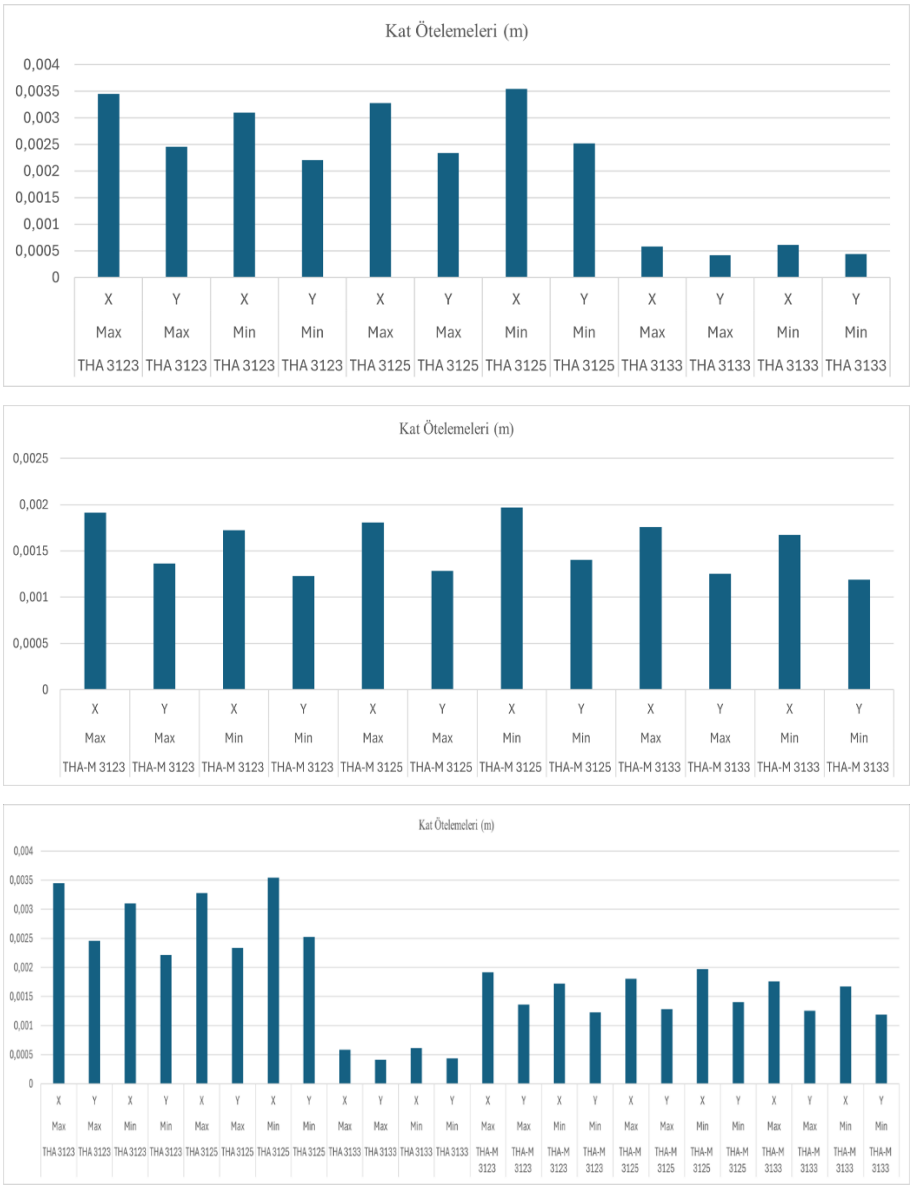
göre daha düşük kat ötelemesi üretmiştir. X yönündeki değer 0,00063-0,00067 m, Y yönündeki değer 0,00043 m-0,00045 m seviyesindedir. Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Mevcut durum 2.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri

Kat ötelemeleri incelendiğinde X yönündeki ötelemelerin Y yönüne göre yüksek değerler üretmiştir. THA-M 3123, THA-M 3125, THA-M 3133 kayıtlarında X yönü ötelemeleri yaklaşık 0,0017 m-0,0020 m aralığında değişirken Y yönü 0,0011 m-0,0014 m aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

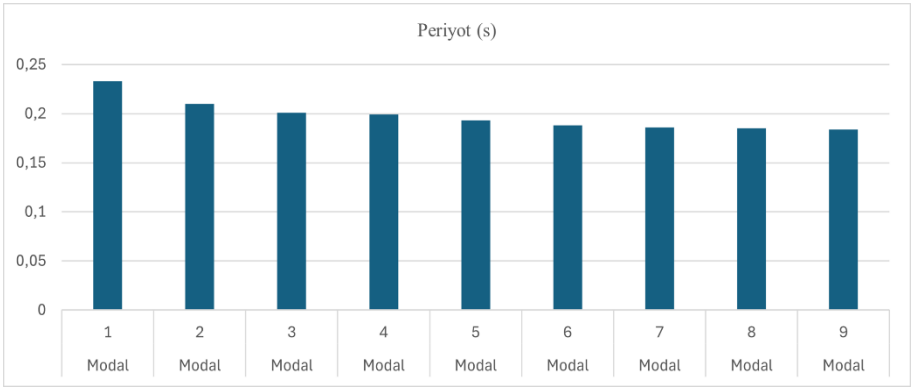
Bu durum ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının yapı üzerinde X doğrultusunda daha baskın yatay deplasman etkisi oluşturmuştur. Şekil 6.12'de gösterilmiştir. THA 3133 diğer iki kayda göre daha düşük kat ötelemesi üretmiştir. THA 3133 kaydının yer ivmesi diğer kayıtlara göre daha düşük olduğu için kat ötelemeleri daha düşük çıkmıştır.



Şekil 6.13. Mevcut durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması

THA-M analizlerde kat ötelemeleri, THA'ya göre genel olarak düşük çıkmıştır. Bunun nedeni THA-M deprem kayıtlarının yüksek genlikte ve kısa periyotlu ivme bileşenlerinin sınırlandırılması sonucunda yapının hakim periyotlarında dengeli dinamik karşılık oluşturmakta ve kat ötelemeleri THA'ya kıyasla daha düşük çıkmaktadır. Şekil 6.13'de gösterilmiştir.

6.2.5. Periyod



Şekil 6.14. Mevcut durum yapının ilk 9 moda ait doğal titreşim periyotları

Şekil 6.14'de gösterilen yapının periyod değerleri incelendiğinde birinci modun 0,233 s ile en büyük periyoda sahip olduğu sonraki modlarda ise kademeli olarak azalarak 0,184 s doğru bir azalış göstermiştir. İkinci moddan itibaren periyodların birbirine yakın olması yapının üst modlarda daha rijit davranış sergilediği ortaya koymaktadır.

6.2.6. Düşey Eleman Momentlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 6.2. Mevcut durum için THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için P, M2 ve M3 iç kuvvetlerinin maksimum–minimum değerleri

C1	**3123**	**3125**	**3133**	**3123 Ölçeklendirilmiş**	**3125 Ölçeklendirilmiş**	**3133 Ölçeklendirilmiş**
Pmax	171,9034	163,4195	29,1689	95,5192	90,0644	87,6459
pmin	-154,1895	-176,9714	-30,652	-85,835	-98,2831	-83,3033
M2max	0,859	0,9457	0,1689	0,4677	0,5293	0,4573
M2min	-0,9391	-0,8896	-0,1585	-0,5173	-0,4841	-0,4793
M3max	9,1818	8,7303	1,5584	5,1023	4,811	4,6822
M3min	-8,2371	-9,4531	-1,6372	-4,5858	-5,2501	-4,4497

Tablo 6.12'de C1 kolonuna ait sonuçları göstermekte, ölçeklendirme sonrası tüm deprem kayıtlarında P (kN), M2 ve M3 (kN.m) iç kuvvet bileşenlerinin mutlak değerlerinde azalmalar olduğu gözlenmektedir. Genellikle 3123 ve 3125 deprem kayıtlarında eksenel

kuvvet (P) ve momentler (M2, M3) meydana gelen düşüşler, yapının depremi etkin biçimde sınırlandığını gözlenmektedir. 3133 deprem kaydında da benzer bir eğilim gözlenmekte, azalmanın diğer kayıtlara kıyasla daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesiyle elde edilen iç kuvvet taleplerinin daha doğru seviyelere indirildiğini ve yapısal değerlendirmede güvenilir bir karşılaştırma sağlandığını ortaya koymaktadır.

6.3. Güçlendirme Durum Performans Sonuçları

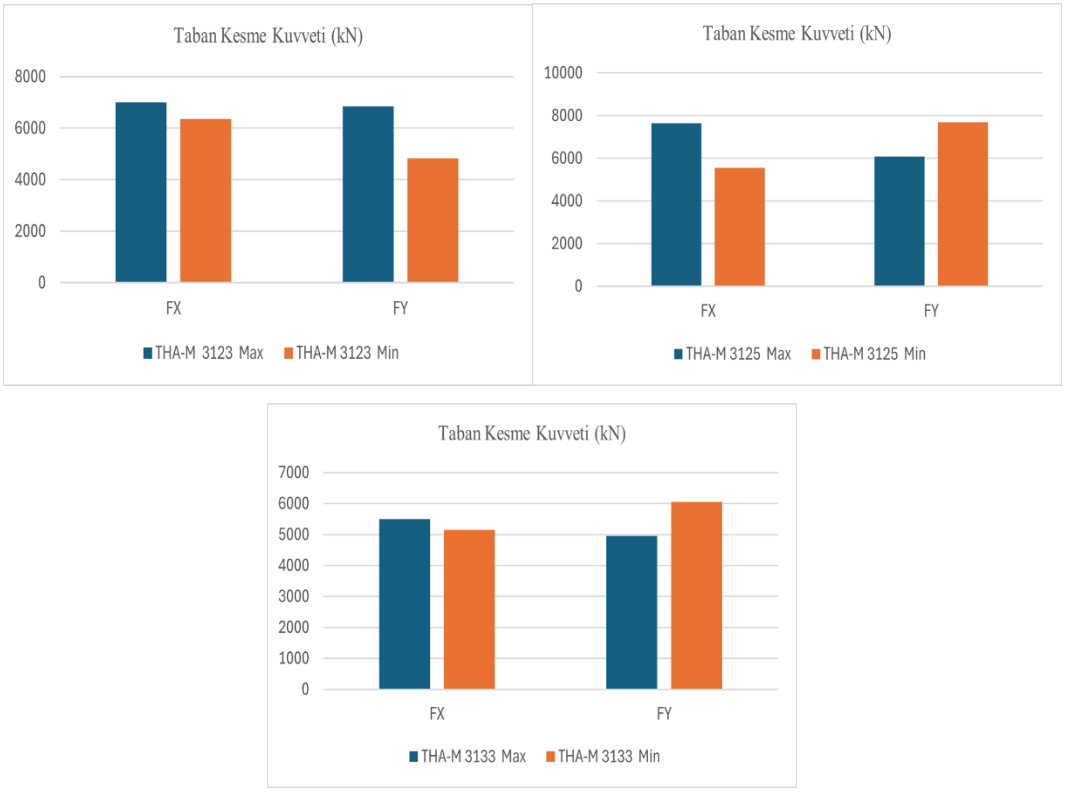
6.3.1. Taban Kesme Kuvveti



Şekil 6.15. Güçlendirilmiş durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum taban kesme kuvvetleri

Şekil 6.15'de gösterilen THA 3125 kaydı bu kayıtlar arasında en yüksek Fx taban kesme kuvvetlerini verirken THA 3133 kaydı Fx ve Fy yönlerinde en düşük değeri vermektedir. Üç deprem kaydına ait taban kesme kuvveti incelendiğinde Fx yönünün daha yüksek taban

kesme kuvveti ürettiği görülmüştür. Fx yönünde taban kesme kuvvetinin Fy yönüne göre daha büyük çıkmasının nedenleri yapının bu yöndeki etkin kütlesinin daha fazla olması, taşıyıcı sistem rijitliğinin Fx yönünde daha fazla olması, Fx doğrultusundaki modların kütle katılım oranlarının daha yüksek olmasıdır. THA 3125 deprem kaydı, yapının hakim titreşim periyotları ile uyumlu spektral özellik göstermesi ve en büyük ivme kaydına sahip olması nedeniyle incelenen kayıtlarda en büyük taban kesme kuvvetini üretmiştir. Buna karşı, THA 3133 deprem kaydı daha düşük spektral özellik göstermiş ve ivme kaydı daha düşüktür.



Şekil 6.16. Güçlendirilmiş durum THA-M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için Fx ve Fy doğrultusunda maksimum ve minimum ölçeklendirilmiş taban kesme kuvvetleri

Şekil 6.16'da gösterilen THA-M 3123 için taban kesme kuvveti Fx yönünde maksimum yaklaşık 7000 kN minimum yaklaşık olarak 6300 kN olarak belirlenmiştir. Fy yönü için maksimum yaklaşık 6800 kN minimum yaklaşık 4800 kN seviyelerindedir. THA-M 3125 için taban kesme kuvveti Fx yönünde maksimum yaklaşık 7700 kN minimum yaklaşık olarak 5600 kN seviyelerindedir yönü için maksimum yaklaşık 6000 kN minimum yaklaşık 7800 kN seviyelerindedir. THA-M 3133 içinse taban kesme kuvveti Fx yönünde

maksimum yaklaşık 5500 kN minimum yaklaşık olarak 5100 kN olarak belirlenmiştir. Fy yönü için maksimum yaklaşık 5000 kN minimum yaklaşık 6000 kN seviyelerindedir. THA-M 3133 diğer iki kayıtla karşılaştırıldığında daha düşük olduğu ve kuvvetlerin her iki doğrultuda oldukça yakın dağıldığı gözlemlenmiştir.

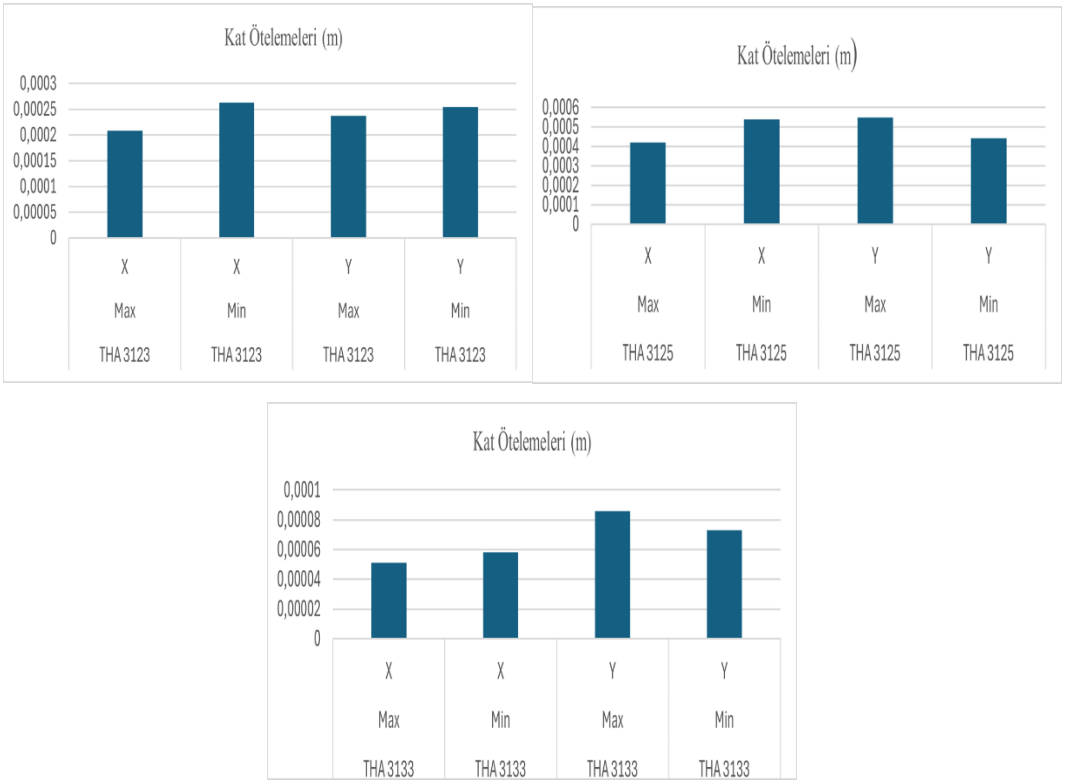


Şekil 6.17. Güçlendirilmiş durum THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması

Tüm deprem kayıtlarını yan yana koyduğumuzda Fx yönündeki taban kesme kuvvetinin Fy yönüne göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Fx yönünde taban kesme kuvvetinin

Fy yönüne göre daha büyük çıkmasının nedenleri yapının bu yöndeki etkin kütlesinin daha fazla olması, taşıyıcı sistem rijitliğinin Fx yönünde daha fazla olması, Fx doğrultusundaki modların kütle katılım oranlarının daha yüksek olmasıdır. THA-M analizlerde taban kesme kuvvetleri, normal analizlere göre genel olarak düşük çıkmıştır. Çünkü TBDY 2018 hedef ivme spektrumuna göre yapılan ölçeklendirme, bazı deprem kayıtlarında maksimum ivme değerlerini aşağı doğru çekmektedir. Şekil 6.17'de gösterilmiştir.

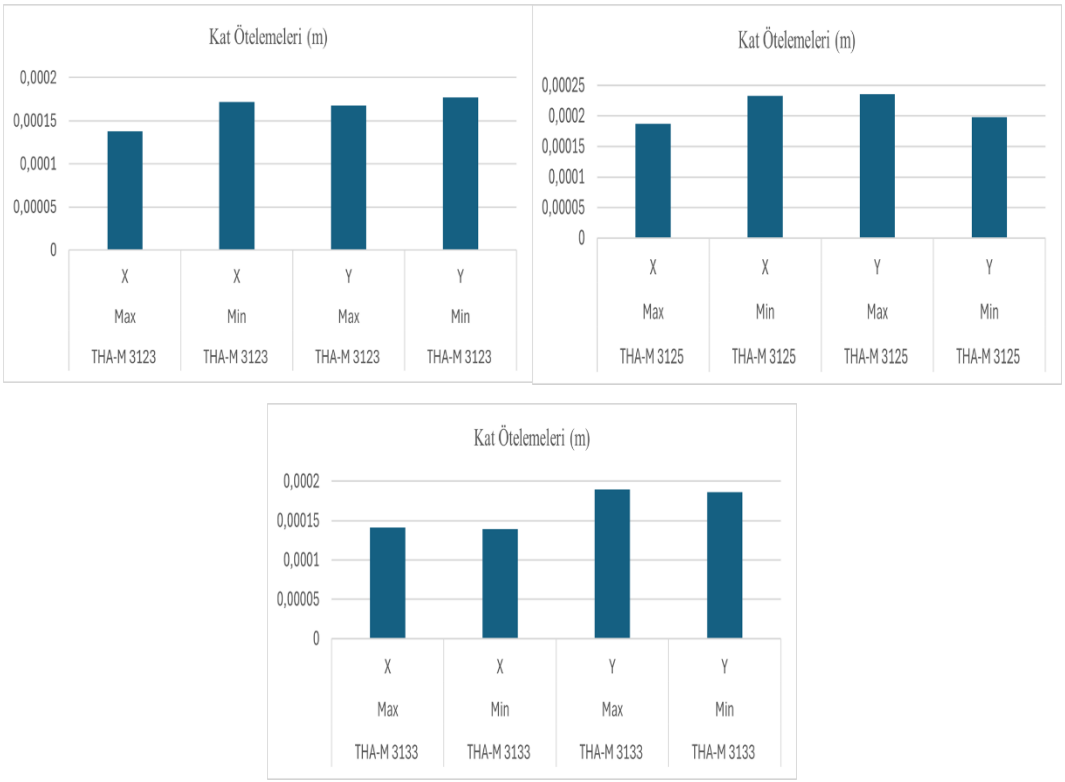
6.3.2. Zemin Kat Kat Ötelemeleri



Şekil 6.18. Güçlendirilmiş durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri

THA 3123 kaydı için Fx yönünde maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00021 m, minimum kat ötelemesi 0,00027 m iken Fy yönüne maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00024 m, minimum kat ötelemesi 0,00026m olarak belirlenmiştir. THA 3125 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00045 m ve 0,00055 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00056 m ve 0,00046 m

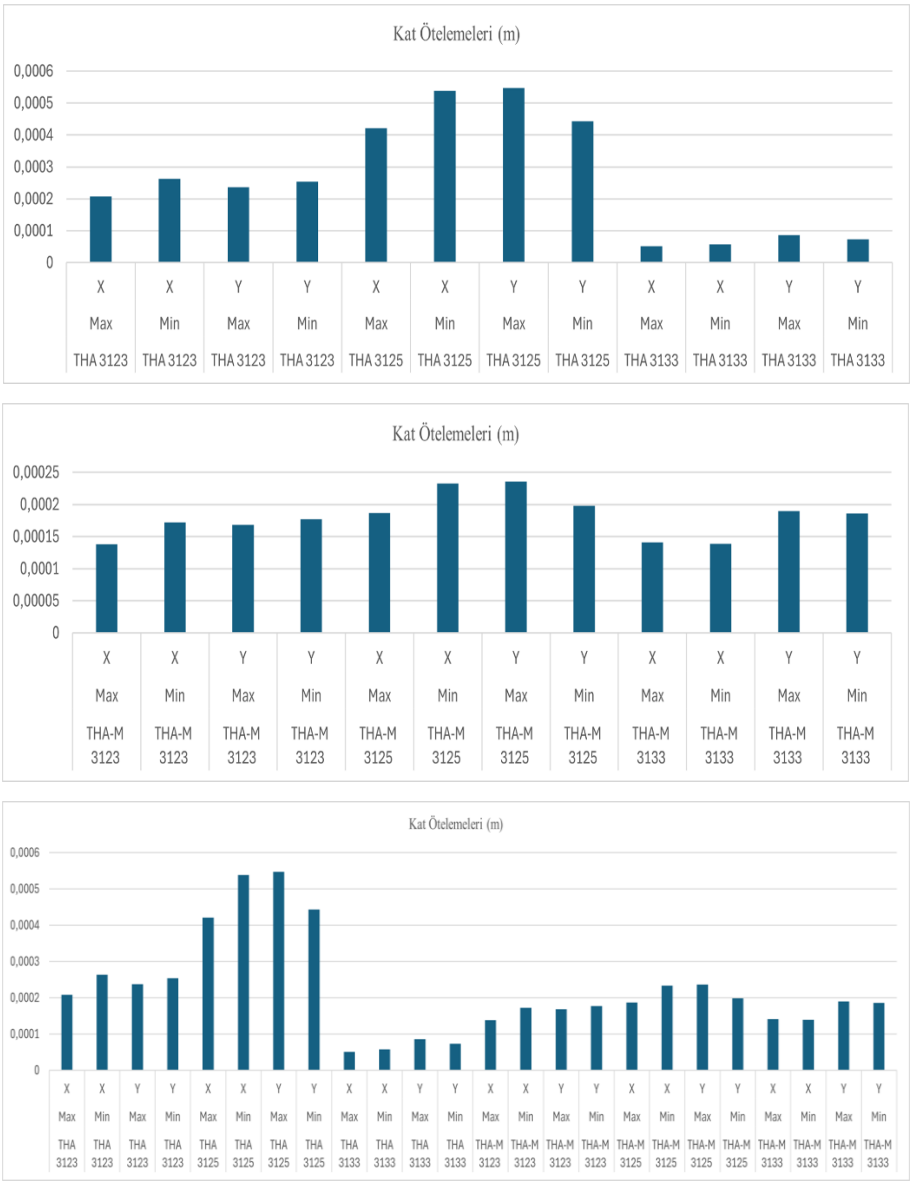
seviyelerindedir. THA 3133 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00005 m ve 0,00006 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,000085 m ve 0,000075 m seviyelerindedir. Genel olarak Fy etkisi altında oluşan kat ötelemelerinin X doğrultusuna göre daha büyük olduğu söylenebilir. Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Güçlendirilmiş durum zemin kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri

Şekil 6.19'da gösterilen THA-M 3123 kaydı için Fx yönünde maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00014 m, minimum kat ötelemesi 0,00017 m iken Fy yönüne maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0.00016 m, minimum kat ötelemesi 0,00018 m olarak belirlenmiştir. THA-M 3125 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00019 m ve 0,00023 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00023 m ve 0,00020 m seviyelerindedir. THA-M 3133 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00014 m ve 0,000139 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00019 m ve 0,00018 m seviyelerindedir.

Genel olarak Fy etkisi altında oluşan kat ötelemelerinin X doğrultusuna göre daha büyük olduğu söylenebilir.

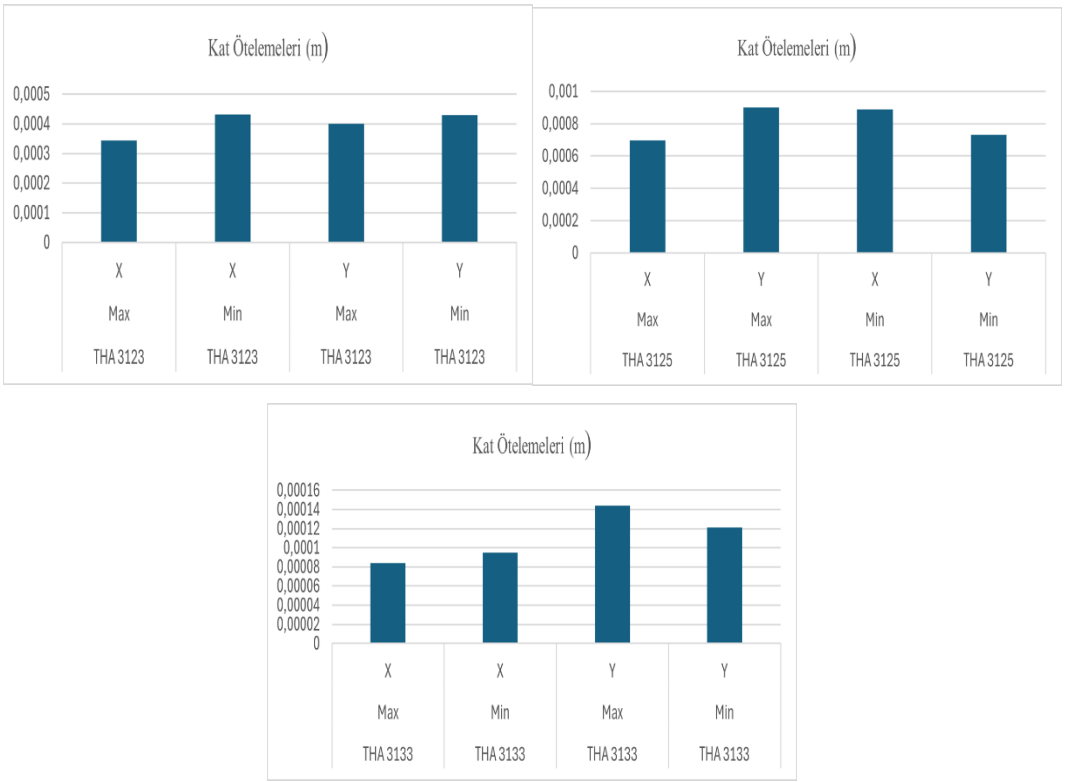


Şekil 6.20. Güçlendirilmiş durum zemin kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması

Şekil 6.20'de gösterilen bu grafikler kat ötelemeleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Güçlendirme sonrası durumda (THA-M) tüm deprem kayıtlarında azaldığı görülmektedir. Bu durum güçlendirme önlemlerinin yapının rijitliğini arttırarak deprem etkisi altındaki yer

değiştirme taleplerinin sınırladığı gösterilmektedir. Sonuç olarak güçlendirme sonrası yapının performansında iyileşme olduğu ve daha güvenli bi hale geldiği gösterilmektedir.

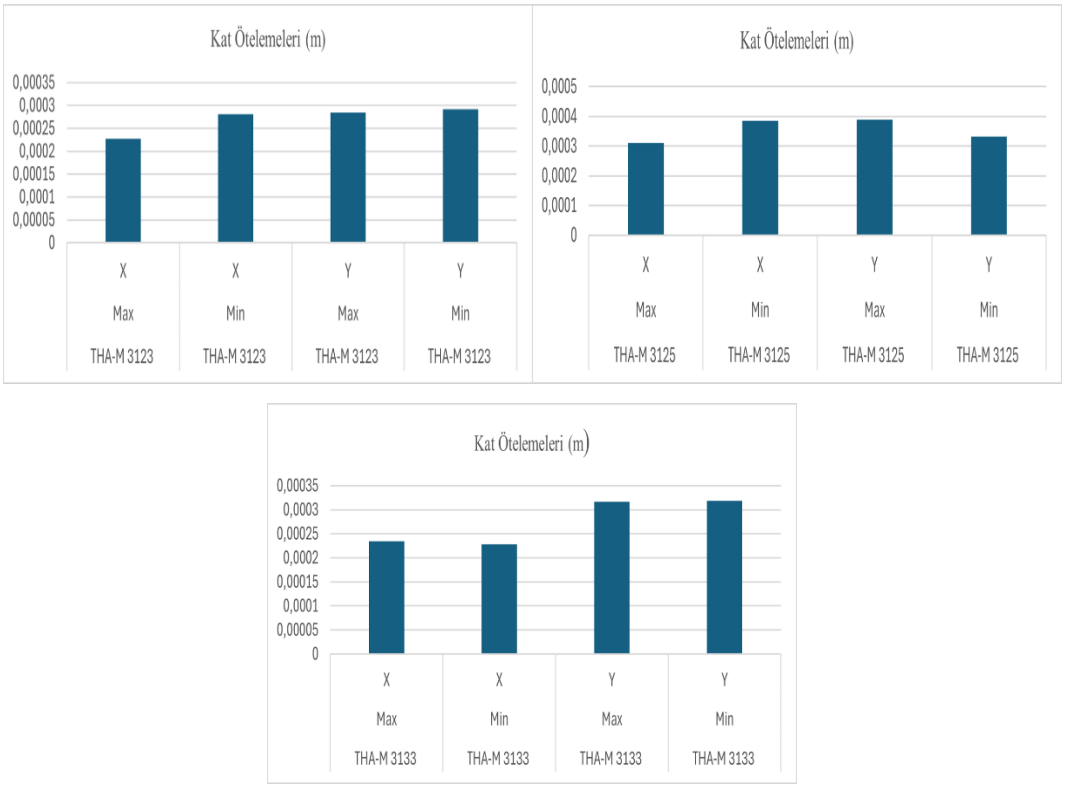
6.3.3. 1. Kat Kat Ötelemeleri



Şekil 6.21. Güçlendirilmiş durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri

THA 3123 kaydı için Fx yönünde maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00033 m, minimum kat ötelemesi 0,00043 m iken Fy yönüne maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00039 m, minimum kat ötelemesi 0,00044 m olarak belirlenmiştir. THA 3125 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00070 m ve 0,00090 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00092 m ve 0,00075 m seviyelerindedir. THA 3133 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00008 m ve 0,00010 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00015 m ve 0,00012 m seviyelerindedir. Genel olarak Fy etkisi altında

oluşan kat ötelemelerinin X doğrultusuna göre daha büyük olduğu söylenebilir. Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



Şekil 6.22. Güçlendirilmiş durum 1.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri

THA-M 3123 kaydı için Fx yönünde maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00023 m, minimum kat ötelemesi 0,00029 m iken Fy yönüne maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00029 m minimum kat ötelemesi 0,00030 m olarak belirlenmiştir. THA-M 3125 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00031 m ve 0,00039 m Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00040 m ve 0,00033 m seviyelerindedir. THA-M 3133 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00023 m ve 0,00022 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00032 m ve 0,00033 m seviyelerindedir.

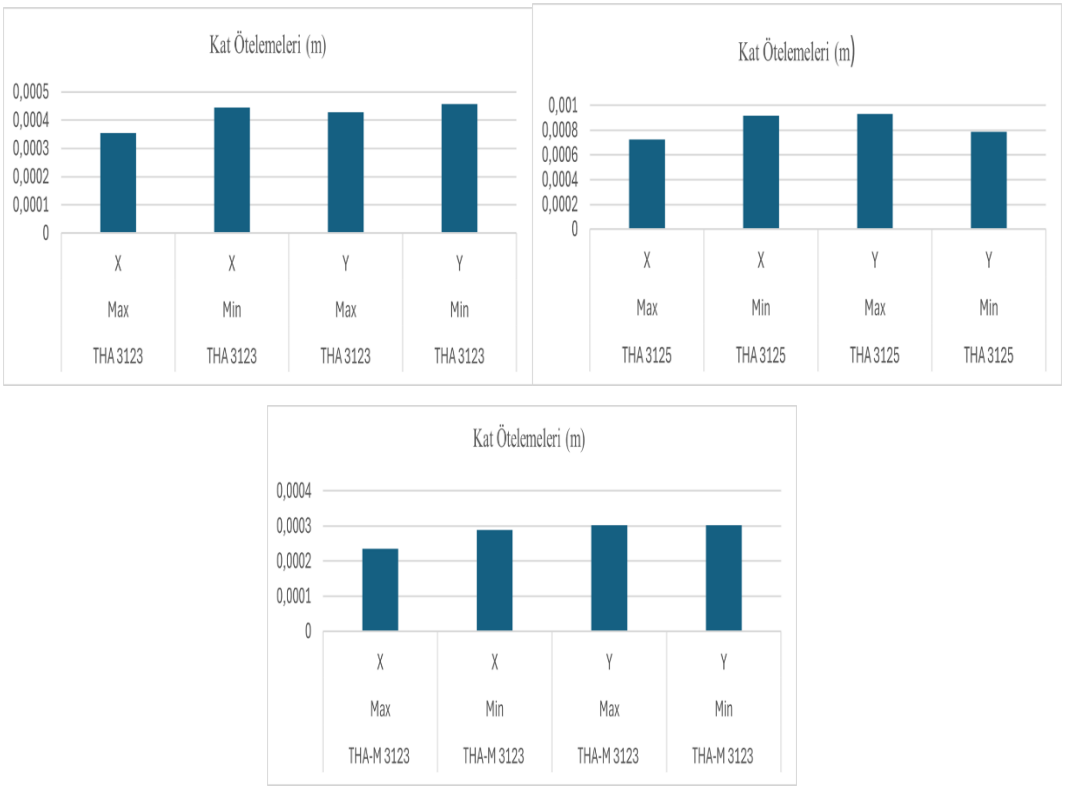
Genel olarak Fy etkisi altında oluşan kat ötelemelerinin X doğrultusuna göre daha büyük olduğu söylenebilir. Yapı Y doğrultusunda daha esnek bir davranış sergilemektedir. Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.23. Güçlendirilmiş durum 1.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırılması

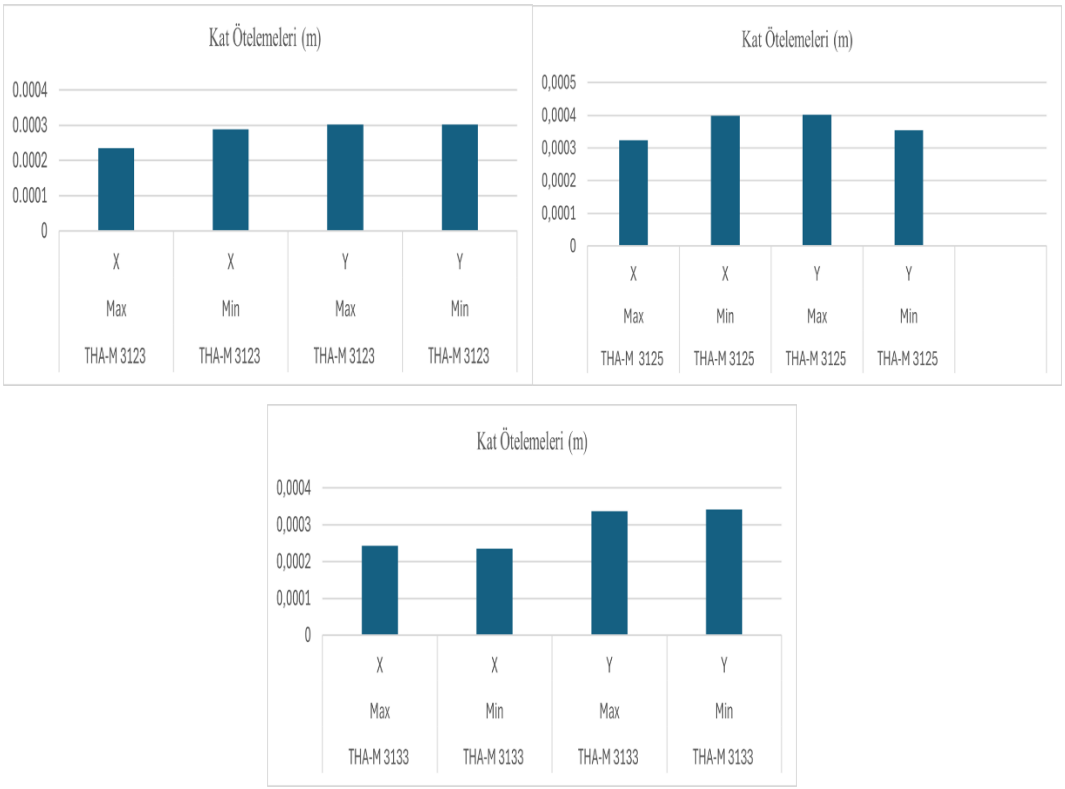
Şekil 6.23'de gösterilen bu grafikler kat ötelemeleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Güçlendirme sonrası durumda (THA-M) tüm deprem kayıtlarında azaldığı görülmektedir. Bu durum güçlendirme önlemlerinin yapının rijitliğini arttırarak deprem etkisi altındaki yer değiştirme taleplerinin sınırladığı gösterilmektedir. Sonuç olarak güçlendirme sonrası yapının performansında iyileşme olduğu ve daha güvenli bir hale geldiği gösterilmektedir.

6.3.4. 2. Kat Kat Ötelemeleri



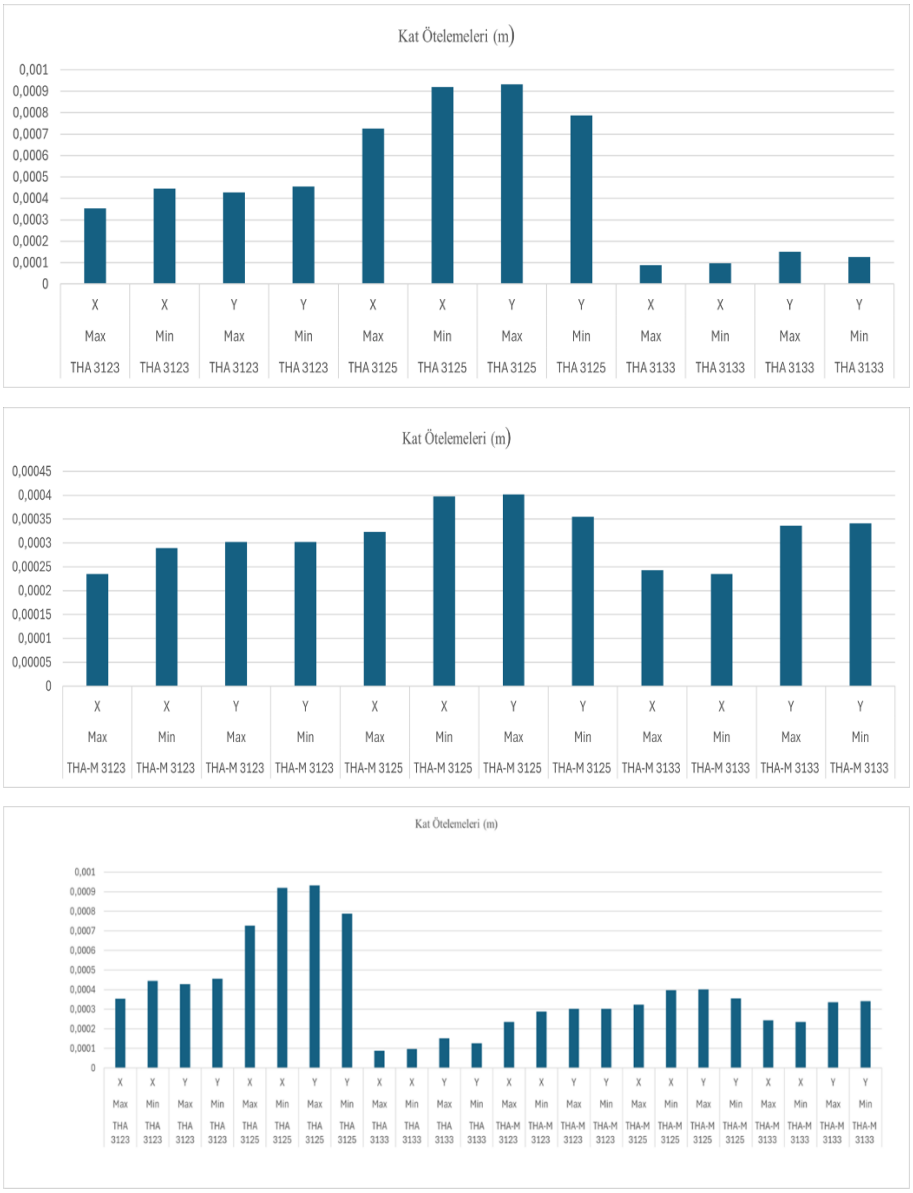
Şekil 6.24. Güçlendirilmiş durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemeleri

Şekil 6.24'de gösterilen THA 3123 kaydı için Fx yönünde maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00035 m minimum kat ötelemesi 0,00045 m iken Fy yönüne maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00043 m, minimum kat ötelemesi 0,00047 m olarak belirlenmiştir. THA 3125 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00075 m ve 0,00090 m Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00095 m ve 0,00080 m seviyelerindedir. THA 3133 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00023 m ve 0,00028 m Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00030 m ve 0,00029 m seviyelerindedir. Genel olarak Fy etkisi altında oluşan kat ötelemelerinin X doğrultusuna göre daha büyük olduğu söylenebilir.



Şekil 6.25. Güçlendirilmiş durum 2.Kat THA- M 3123, THA-M 3125 ve THA-M 3133 deprem kayıtları için X ve Y doğrultularında maksimum–minimum ölçeklendirilmiş kat ötelemeleri

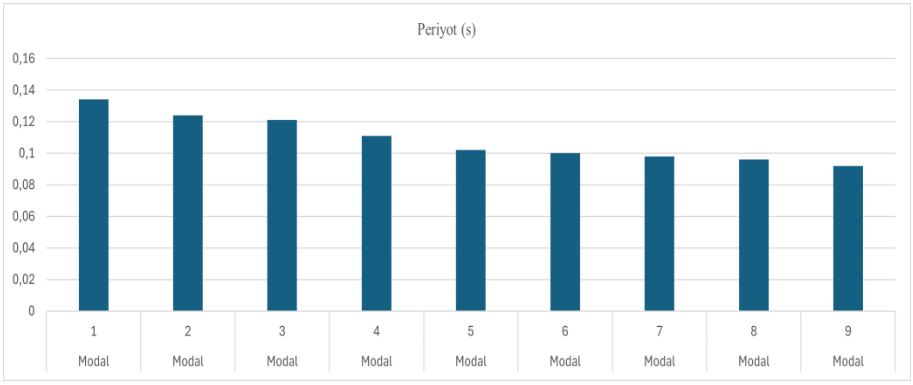
THA-M 3123 kaydı için Fx yönünde maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00024 m, minimum kat ötelemesi 0,00029 m iken Fy yönüne maksimum kat ötelemesi yaklaşık 0,00030 m , minimum kat ötelemesi 0,00031 m olarak belirlenmiştir. THA-M 3125 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00033 m ve 0,00040 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00041 m ve 0,00036 m seviyelerindedir. THA-M 3133 Fx yönünde sırasıyla maksimum ve minimum değerler yaklaşık olarak 0,00024 m ve 0,00023 m , Fy yönünde ise maksimum ve minimum kat ötelemesi sırasıyla 0,00033 m ve 0,00034 m seviyelerindedir. Genel olarak Fy etkisi altında oluşan kat ötelemelerinin X doğrultusuna göre daha büyük olduğu söylenebilir. Şekil 6.25'de gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Güçlendirilmiş durum 2.Kat THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için FX ve FY doğrultularında maksimum–minimum kat ötelemesi karşılaştırılması, ölçeklendirilmiş kayıtlar, gerçek kayıtlar, gerçek ve ölçeklendirilmiş kayıtların birlikte karşılaştırması

Bu grafikler kat ötelemeleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Güçlendirme sonrası durumda (THA-M) tüm deprem kayıtlarında azaldığı görülmektedir. Bu durum güçlendirme önlemlerinin yapının rijitliğini arttırarak deprem etkisi altındaki yer değiştirme taleplerinin sınırladığı gösterilmektedir. Sonuç olarak güçlendirme sonrası yapının performansında iyileşme olduğu ve daha güvenli bir hale geldiği gösterilmektedir. Şekil 6.26'da gösterilmiştir.

6.3.5. Periyod



Şekil 6.27. Güçlendirilmiş durum yapının ilk 9 moda ait doğal titreşim periyotları

Şekil 6.27'de gösterilen yapının periyod değerleri incelendiğinde birinci modun 0,134 s ile en büyük periyoda sahip olduğu sonraki modlarda ise kademeli olarak azalarak 0,092 s doğru bir azalış göstermiştir. Yapının rijit davranış sergilediği ortaya koymaktadır.

6.3.6. Düşey Eleman Momentlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 6.3. Güçlendirilmiş durum için THA3123, THA3125 ve THA3133 deprem kayıtları için P, M2 ve M3 iç kuvvetlerinin maksimum–minimum değerleri

C1	**3123**	**3125**	**3133**	**3123 Ölçeklendirilmiş**	**3125 Ölçeklendirilmiş**	**3133 Ölçeklendirilmiş**
Pmax	79,7789	102,4515	18,8094	53,3834	47,2365	48,9512
pmin	-67,4525	-128,883	-22,4415	-43,4537	-55,1356	-57,4554
M2max	8,0112	11,2985	1,9884	5,3377	5,0958	5,259
M2min	-6,9211	-14,022	-2,3833	-4,3379	-6,0191	-5,8038
M3max	6,4412	10,5334	1,8443	4,3348	4,5063	4,7203
M3min	-6,5298	-10,6374	-1,8375	-4,3743	-6,0191	-4,6267

Tablo 6.3'de C1 kolonuna ait sonuçlar değerlendiğinde, deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi sonrası eksenel kuvvet (P) ve momentler (M2, M3) gereksinimlerinin tüm kayıtlarda belirgin biçimde azaldığı gözlenmektedir. 3123 ve 3125 deprem kayıtlarında, ölçeklendirme sonrası iç kuvvetlerin daha kararlı ve birbirine yakın düzeylere

indiği dikkat çekmektedir. 3133 deprem kaydında iç kuvvet gereksinimleri diğer kayıtlara nispeten daha düşük olmakla birlikte, ölçeklendirme sonrası sonuçların daha tutarlı bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu bulgu, ölçeklendirme işleminin yapısal elemanlarda oluşan deprem gereksinimlerini gerçekçi ve karşılaştırılabilir seviyelere indirdiğini ve değerlendirme güvenilirliğini artırdığını göstermektedir.

6.4. Genel değerlendirme

Deprem kayıtları arasında yapılan karşılaştırmalarda, ölçeklendirilmemiş zaman tanım alanı analizlerinde (THA), 3125 kaydının hem taban kesme hem de kat ötelemesi taleplerini genel itibariyle en yüksek düzeye çıkardığı, 3133 kaydının ise en düşük talepleri ürettiği görülmüştür; örneğin mevcut bina için THA'da taban kesme kuvvetleri yaklaşık Fx=4600–5600 kN ve Fy=1400–1600 kN aralığında değişirken, ötelemelerde de 3123–3125 kayıtları üst katlarda 3133'e kıyasla bariz şekilde daha büyük değerler vermiştir. Mevcut bina ile güçlendirilmiş bina karşılaştırıldığında, güçlendirme (perde ilavesi) sonrası yapının yatay rijitliği artmış, bu doğrultuda periyotlar kısalmış ve kat ötelemeleri önemli ölçüde azalmıştır; ancak rijitlik artışı sebebiyle taban kesme kuvvetlerinde artış eğilimi tespit edilmiştir (örneğin güçlendirilmiş durumda THA 3125 için taban kesmelerin 13000–17000 kN mertebelerine çıktığı görülmektedir. Ölçeklendirilmiş kayıtlarla yapılan analizlerde (THA-M) ise hem mevcut hem de güçlendirilmiş yapıda tepkilerin genel olarak THA'ya göre daha düşük ve daha istikrarlı hale geldiği; ölçeklendirmenin bazı kayıtlarda maksimum ivmeleri aşağı çekmesiyle taban kesmelerin ve kat ötelemelerinin azaldığı görülmektedir (örneğin güçlendirilmiş yapıda 3125 kaydı için THA-M taban kesmelerinin yaklaşık 5600–7700 kN mertebesine indiği raporlanmıştır. Ayrıca doğrultu bazında, mevcut binada X yönü ötelemelerinin çoğu durumda Y yönünden daha büyük olması, X doğrultusunda görece daha düşük yatay rijitlik bulunduğunu; benzer şekilde Fx'in Fy'ye göre daha büyük çıkması da kütle-rijitlik dağılımı ve mod katılımlarının doğrultular arasında farklılaştığını göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerde; özellikle spektral ivme değerleri yüksek olan gerçek deprem kayıtlarının (örneğin THA-3125) ölçeklendirilmesi sonucunda, yapıya etkiyen taban kesme kuvvetlerinin 17000 kN seviyelerinden 7700 kN mertebelerine

kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Teorik olarak ölçeklendirme işleminin kaydı duruma göre yukarı veya aşağı yönlü revize etmesi beklense de mevcut yönetmelik (TBDY-2018) prosedürleri uygulandığında, özellikle büyük deprem kayıtlarının baskın bir şekilde aşağı çekildiği görülmektedir. Bu durum, mühendislik hesaplarında tasarım kuvvetlerinin azalmasına ve dolayısıyla yapısal eleman kesitlerinin daha küçük boyutlandırılmasına zemin hazırlamaktadır. Ancak 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri gibi 'süper-kesme' (super-shear), yakın fay, basen etkisi gibi etkilerinin görüldüğü mega afetler, yönetmeliğin öngördüğü standart tasarım spektrumunun çok üzerinde enerji açığa çıkarabilmektedir. Dolayısıyla, yönetmeliğin kayıtları sürekli olarak aşağı çekme eğilimi, bu denli büyük depremleri tanımlamada ve yapının maruz kalacağı gerçek uç kuvvetleri temsil etmede yetersiz kalmakta; kâğıt üzerinde güvenli görünen yapıların, sahadaki gerçek bir felaket senaryosunda kapasite aşımı nedeniyle ağır hasar alma veya yıkılma riskini artırmaktadır. Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6'da çalışmanın temel bulgularını özetlemektedir.

İncelenen yapı zemin + 2 normal katlı olup, güçlendirme öncesi durumda da perde elemanlara sahip bir betonarme yapıdır. Yapı, 2020 yılında meydana gelen M_w 5,9 büyüklüğündeki deprem de hasar görmüş ve bu durum güçlendirme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Ancak yapı, kat sayısı ve taşıyıcı sistem özellikleri esas alındığında, 5,9 M_w büyüklüğündeki bir depremde belirgin hasar alması beklenen bir yapı değildir. Buna karşın, Şekil 5.3'te görüldüğü üzere, deprem sonrası incelemelerde özellikle kiriş elemanlarında hasarların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, yapının deprem hasarının sadece depremin büyüklüğüne bağlı olmadığını; taşıyıcı sistem tasarımı, düzensizlikler ve yapısal yetersizlikler gibi etkenlerin, küçük veya orta büyüklükteki depremlerde dahi hasar oluşumunda belirleyici olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.5–6.26 arasında verilen sonuçlarda, yapının kat ötelenmeleri güçlendirme öncesi ve sonrası koşullar için değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, yapı her iki durumda da çok yüksek kat ötelenmelerine sahip bir yapı değildir. Literatürde bazı çalışmalarda kat ötelenmesi, yapısal hasar ile ilişkilendirilen önemli parametre olarak incelenmektedir. Ama bu yapı özelinde, kat ötelenmelerinin görece düşük seviyelerde olmasına rağmen yapının hasar görmüş olması, kat ötelenmesinin yalnız başına hasar seviyesini temsil etmede her zaman yeterli ve güvenilir bir gösterge olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle mevcut yapıların değerlendirilmesinde, hasarın doğru

yorumlanabilmesi için iç kuvvet talepleri, eleman bazlı hasar durumları ve performans göstergelerinin birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 6.4. Gerçek ve ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının yapısal tepkiler (taban kesme kuvveti ve kat ötelemeleri) açısından karşılaştırılması

	GERÇEK KAYITLAR	**ÖLÇEKLENDİRİLMİŞ KAYITLAR**
Taban Kesme Kuvveti	Değişken ve yüksek değerler (Özellikle 3125 nolu kayıtta 17.000 kN civarı çok yüksek değerler görülmüştür.)	TBDY-2018'e göre uygulanan ölçeklendirme işlemi, özellikle büyük ve yıkıcı deprem kayıtlarını sistematik olarak aşağı yönlü yenileyerek taban kesme kuvvetlerini yaklaşık 7.700 kN seviyelerine düşürmektedir. Bu azalma, tasarım aşamasında kesit kuvvetlerinin olduğundan düşük hesaplanmasına ve buna bağlı olarak daha küçük kesitlerin seçilmesine yol açmakta; sonuç olarak yapı, gerçek deprem koşullarında daha güvenli değil, aksine daha kırılgan ve kapasite aşımına açık bir duruma neden olabilmektedir.
Kat Ötelemeleri	Yüksek riskli deplasmanlar (Ham kayıtlarda yapının belirli katlarında ani ve büyük ötelemeler oluşmuştur.)	Ölçeklendirilmiş kayıtlar altında elde edilen kat ötelemelerinin belirgin şekilde azaldığı ve bu durumun, yapının maruz kalabileceği gerçek deplasman taleplerini olduğundan düşük temsil ettiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, ölçeklendirme prosedürlerinin yapısal davranışı daha iyimser ve gerçekçi olmayan bir çerçevede sunduğunu göstermektedir.

Tablo 6.5. 3123, 3125 ve 3133 numaralı deprem istasyonlarına ait gerçek kayıtlar altında mevcut ve güçlendirilmiş yapının davranışının incelenmesi

	MEVCUT YAPI	GÜÇLENDİRİLMİŞ YAPI
3123	3123 numaralı istasyona ait gerçek deprem kaydı altında mevcut yapının, özellikle rijitliği zayıf doğrultularda belirgin yatay deplasman talepleri geliştirdiği gözlemlenmiştir. Göreli kat ötelenmelerinin arttığı, bazı taşıyıcı elemanlarda iç kuvvet taleplerinin yoğunlaştığı ve yapının deprem etkisi altında düzensiz bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, mevcut yapının orta büyüklüklü gerçek deprem etkileri karşısında yeterli rijitlik ve süneklik kapasitesine sahip olmadığını göstermektedir	Aynı gerçek deprem kaydı altında güçlendirilmiş yapının, ilave perde ve/veya taşıyıcı sistem iyileştirmeleri sayesinde daha rijit ve kontrollü bir davranış sergilediği görülmüştür. Kat deplasmanları ve göreli kat ötelenmeleri belirgin biçimde azalmış, iç kuvvet dağılımı daha dengeli hale gelmiştir. Güçlendirme uygulamaları, yapının gerçek deprem etkileri altındaki performansını belirgin şekilde iyileştirmiştir.
3125	3125 numaralı istasyon, yüksek ivme içeriği nedeniyle gerçek kayıtlar arasında mevcut yapıyı en fazla zorlayan deprem kaydı olmuştur. Mevcut yapı altında yapılan analizlerde, taban kesme kuvvetlerinin ve üst kat deplasmanlarının yüksek değerlere ulaştığı, bazı elemanlarda talep/kapasite oranlarının kritik seviyelere yaklaştığı belirlenmiştir. Bu kayıt, mevcut yapının büyük ölçekli depremler karşısında ciddi hasar riski taşıdığını ortaya koymaktadır.	Güçlendirilmiş yapı, aynı gerçek deprem kaydı altında dahi mevcut yapıya kıyasla daha güvenli ve kontrollü bir davranış sergilemiştir. Yatay deplasmanlar ve göreli kat ötelenmeleri önemli ölçüde azalmış, taban kesme kuvvetleri taşıyıcı sistem genelinde daha dengeli bir şekilde paylaşılmıştır. Bu sonuçlar, güçlendirme uygulamalarının büyük ölçekli depremler karşısında yapının göçme riskini azalttığını ve yapısal dayanımı artırdığını göstermektedir.
3133	3133 numaralı istasyona ait düşük ivmeli gerçek deprem kaydı altında mevcut yapının, görece sınırlı deplasman ve iç kuvvet talepleri geliştirdiği görülmüştür. Yapı genel olarak elastik sınırlara yakın bir davranış sergilemiş, ancak bazı doğrultularda rijitlik yetersizliği nedeniyle yerel deformasyon artışları gözlemlenmiştir. Bu kayıt, mevcut yapının düşük büyüklüklü depremler karşısındaki davranışını temsil etmektedir.	Aynı gerçek kayıt altında güçlendirilmiş yapının, düşük ivmeli deprem etkileri karşısında dahi daha rijit ve düzenli bir davranış sergilediği görülmüştür. Kat deplasmanları minimum seviyelerde kalmış ve yapının genel performansı iyileşmiştir. Güçlendirme sonrası yapının, hem düşük hem de yüksek büyüklüklü gerçek depremler karşısında güvenli davranış gösterdiği açıkça ortaya konmuştur.

Tablo 6.6. 3123, 3125 ve 3133 numaralı deprem istasyonlarına ait ölçeklendirilmiş kayıtlar altında mevcut ve güçlendirilmiş yapının davranışının incelenmesi

	MEVCUT YAPI	**GÜÇLENDİRİLMİŞ YAPI**
3123	Ölçeklendirilmiş 3123 deprem kaydı altında mevcut yapının taban kesme kuvvetlerinin belirgin şekilde azaldığı ve buna bağlı olarak yatay deplasman taleplerinin düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Ölçeklendirme işlemi, deprem etkilerini aşağı çekerek yapının olduğundan daha güvenli bir davranış sergilediği izlenimini oluşturmuştur. Ancak bu durum, tasarım veya değerlendirme aşamasında kesit taleplerinin küçülmesine yol açabilmekte ve yapının olası daha büyük bir deprem karşısında yetersiz kalma riskini artırabilmektedir.	Aynı ölçeklendirilmiş kayıt altında güçlendirilmiş yapının oldukça düşük deplasman ve iç kuvvet talepleri geliştirdiği görülmüştür. Ölçeklendirme nedeniyle deprem etkilerinin azaltılması, güçlendirilmiş yapının performansının olduğundan daha iyi değerlendirilmesine neden olmuştur. Bu durum, güçlendirme etkinliğinin gerçek büyük deprem senaryoları için tam olarak test edilemediğini göstermektedir.
3125	3125 numaralı istasyona ait ölçeklendirilmiş deprem kaydı altında, yüksek ivmeli gerçek bir depremin etkileri yönetmelik esasları doğrultusunda aşağı çekilmiş ve mevcut yapının taban kesme kuvvetleri önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu durum, kesit taleplerinin küçülmesine ve yapının daha az zorlandığı yönünde iyimser sonuçlar elde edilmesine neden olmuştur. Ancak gerçek deprem etkilerinin bu şekilde bastırılması, Maraş depremleri gibi büyük ölçekli depremlerin yıkıcı potansiyelini yeterince temsil edememektedir.	Güçlendirilmiş yapı, ölçeklendirilmiş 3125 kaydı altında yönetmelik sınırları içerisinde kalan iç kuvvet ve deplasman talepleri sergilemiştir. Ancak deprem kaydının ölçeklendirilmesi ile yapının maruz kaldığı sismik taleplerin yapay olarak düşürülmesi, güçlendirilmiş yapının gerçek bir büyük deprem altında nasıl davranacağına dair sınırlı bilgi sunmaktadır. Bu durum, ölçeklendirilmiş analizlerin büyük depremler için güvenli tarafta olmayan sonuçlar üretebileceğini göstermektedir.
3133	Düşük ivmeli 3133 deprem kaydının ölçeklendirilmesi sonucunda, mevcut yapının maruz kaldığı deprem etkileri daha da azaltılmış ve yapı genel olarak elastik sınırlar içerisinde kalmıştır. Ölçeklendirme işlemi, bu istasyon için dahi deprem etkilerini aşağı yönlü normalize etmiş ve yapının gerçek deprem davranışını olduğundan daha az zorlayıcı şekilde yansıtmıştır.	Aynı ölçeklendirilmiş kayıt altında güçlendirilmiş yapı, son derece düşük deplasman ve iç kuvvet talepleri ile güvenli bir davranış sergilemiştir. Ancak bu sonuçlar, yönetmeliğin deprem kayıtlarını sistematik olarak aşağı çekmesi nedeniyle elde edilmiş olup, büyük ölçekli depremler karşısındaki gerçek performansı temsil etmekte yetersiz kalmaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, deprem tehlikesi yüksek olan bir bölgede bulunan betonarme okul yapısının güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal davranışı, 2018 Türkiye bina deprem yönetmeliği esasları kapsamında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı; Türkiye'de son yıllarda meydana gelen depremlerin (özellikle 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri gibi) mevcut yapı stokunun ve özellikle eğitim yapılarının deprem güvenliğinin değerlendirilmesi zorunlu hale getirmesi nedeniyle incelenmesi ihtiyacına cevap vermektir. Okul yapıları; kullanıcı yoğunluğu, deprem sonrası barınma ve toplanma gibi işlevleri ve kullanım sürekliliği nedeniyle "göçmenin önlenmesi" değil, aynı zamanda daha iyi performans hedeflerini sağlaması gereken önemli yapılardır. Bu nedenle tez kapsamında, incelenen okul binasının deprem etkileri altındaki performansının somut biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu yapıda ilk olarak yapının mevcut durumuna ilişkin proje verileri, taşıyıcı sistem yerleşimi, malzeme özellikleri ve hasar gözlemleri bütün olarak ele alınmıştır. Mevcut yapı stokunda sıklıkla karşılaşılan problemlerden biri olan "malzeme belirsizliği" bu tezde önemli bir biçimde dikkate alınmış; beton dayanımı yerinde yapılan deneyler ile belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda okul ile ilgili daha önceden elde edilmiş karot numuneleri, beton dayanımı yönetmelik esaslarına göre değerlendirilmiş, ayrıca donatı tespiti için sıyırma işlemleri ve görüntüleme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Böylece modelleme ve analizlerin gerçekçi bir zemine oturtulması sağlanmıştır.

Yapının üç boyutlu taşıyıcı sistemi ETABS programı ortamında modellenmiş; sabit ve hareketli yükler ile deprem etkileri yönetmeliğe uygun şekilde tanımlanmıştır. Çalışmanın temelini, seçilmiş gerçek deprem kayıtları ile yapılan zaman tanım alanı analizleri oluşturmuştur. Deprem kayıtlarının seçiminde, 2023 Kahramanmaraş depremlerine ait ivme kayıtlarından düşük, orta ve yüksek şiddet seviyelerini temsil edecek şekilde yararlanılmış; kayıtların hem ölçeklendirilmeden hem de TBDY-2018 hedef spektrumuna göre ölçeklendirilmiş halleriyle (THA / THA-M yaklaşımı) yapısal tepkiler

karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşımın en önemli katkısı; kayıt seçimi ve ölçeklendirme esasları taban kesme kuvveti, kat ötelemeleri, periyot ve kütle ve rijitlik merkezi üzerindeki etkisini incelemektir.

Mevcut durum sonuçlarında yapının deprem etkisi altında öteleme ve burulma davranışı eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, planda kütle merkezi ve rijitlik merkezinin arasında belirgin bir eksantrisite olması ve bu durum özellikle bazı akslarda iç kuvvet yığılmalarına ve eleman taleplerinin dengesiz dağılımına sebep olmaktadır. Bu sonuç, okul yapılarında sık karşılaşılan plan düzensizliklerinin ve rijitlik dağılımı problemlerinin performans açısından ne kadar önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Güçlendirme esnasında, mevcut yapının zayıflıklarını gidermek amacıyla taşıyıcı sistemin yatay yük taşıma kapasitesini artıran ve rijitlik dağılımını güçlendirici müdahaleler (iki doğrultuda perde eklenmesi) uygulanmıştır. Bu yaklaşımın mantığı, sadece "dayanımı artırmak" değil; aynı zamanda yapının deprem davranışını daha düzenli hale getirmek, deplasman taleplerini azaltmak, burulma etkilerini sınırlamak ve eleman bazında süneklik ve kapasite dengesini iyileştirmektir.

Farklı deprem kayıtları yapıyı farklı düzeyde olumsuz etkilemekte; bunlar içinde 3125 kaydı genelde en büyük taban kesme kuvveti ve en yüksek etkileri, 3133 kaydı ise en düşük etkileri vermektedir. Mevcut bina ile güçlendirilmiş bina kıyaslandığında, güçlendirme sonrası yapının daha rijit hale geldiği görülmektedir. Bu sayede kat ötelemeleri azalmakta ama bunun karşılığında taban kesme kuvvetleri artmaktadır. Bunun yanı sıra mevcut binada kütle merkezi ile rijitlik merkezi birbirinden daha uzak olduğu için depremde yapı daha fazla burulma eğilimi göstermektedir. Güçlendirme sonrası bu merkezler birbirine yaklaştığı için burulma azalmakta ve yükler daha düzenli dağılmaktadır. Ölçeklendirilmiş kayıtlarla yapılan analizlerde (THA-M) ise deprem kayıtları hedef spektruma uydurulduğu için sonuçlar genelde daha dengeli ve daha düşük çıkmaktadır yani taban kesme ve ötelemeler çoğu durumda ölçeklendirilmemiş analize göre azalım göstermiştir.

Güçlendirme sonrası analizler, hedeflenen performans düzeyinde belirgin bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Özellikle planda rijitlik dağılımının daha dengeli hale gelmesiyle burulma etkilerinin azalması, kat ötelemesi oranlarının düşmesi ve katlar arası rijitlik süreksizliklerinin daha kontrollü bir hale gelmiştir. Güçlendirme stratejisinin doğru

hedefleri yakaladığını göstermektedir. Bu sonuç, okul gibi kritik yapılarda “sadece eleman güçlendirmesi” değil, sistem düzeyinde davranışı iyileştiren perde ve rijitlik düzenlemelerinin ne kadar etkili olduğunu desteklemektedir.

Bu çalışma, düşük katlı ve perde elemanlar içeren betonarme yapılarda bile, düşük ve orta büyüklükteki deprem etkileri altında hasar oluşabileceğini ortaya koymaktadır. İncelenen yapı, düşük katlı olması ve plan düzleminde belirgin bir geometrik düzensizlik içermemesi sebebiyle, ilk bakışta deprem açısından güvenli kabul edilebilecek bir yapı niteliğindedir. Ancak analiz ve gözlemler sonucunda, bu yapı özelinde hasar oluşumunun mümkün olduğu görülmüştür. Bu durumun temel nedeninin, taşıyıcı sistem tasarımına bağlı yetersizlikler olduğu değerlendirilmiştir. Özellikle rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki mesafenin fazla olması, yapı mod şekillerinde belirgin burulma davranışlarının ortaya çıkmasına neden olmuş ve bu durum hasarın tasarım kaynaklı olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, bu tez kapsamında elde edilen bulgular, düşük katlı ve geometrik olarak düzenli yapılarda dahi, taşıyıcı sistemin doğru ve dengeli bir şekilde tasarlanmaması durumunda deprem hasarının kaçınılmaz olabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

Diğer yandan yapılan analizler sonucunda, yapının güçlendirme öncesi ve sonrasındaki kat ötelenmelerinin makul seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Buna rağmen yapıda meydana gelen hasarlar, kat ötelenmesi parametresinin hasar seviyesini temsil etmedeki kısıtlarını göstermektedir. Bu çalışma, yapısal performansın doğru yorumlanabilmesi için kat ötelenmesinin yanı sıra iç kuvvet talepleri ve eleman düzeyindeki hasar verilerinin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Dolayısıyla, mevcut yapıların performans değerlendirmelerinde tekil parametreler yerine kapsamlı bir gösterge setinin kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmada, 2023 Kahramanmaraş depremlerine ait Hatay istasyonlarında kaydedilen deprem kayıtları kullanılmıştır. Söz konusu kayıtlarda, yerel zemin etkileri, yönelim ve yakın fay etkileri gibi bazı özel durumların mevcut olduğu bilinmektedir. Ancak bu çalışmada uygulanan ölçeklendirme işlemi, yönetmelik esasları doğrultusunda gerçekleştirilmiş olup, bu tür özel etkileri doğrudan dikkate almamaktadır. Başka bir ifadeyle, deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmesi, bu etkilerin bir

kısmının analizlerde dolaylı olarak göz ardı edilmesine neden olmuş olabilir. Bununla birlikte, yapılacak ileri çalışmalarda, söz konusu özel deprem etkilerinin özellikle düşük katlı yapılar üzerindeki hasar oluşumu ile ne ölçüde ilişkili olduğunun ayrıntılı olarak incelenmesi, bu etkilerin her zaman belirleyici olmayabileceğini ortaya koyabilir.

KAYNAKLAR

[1] Ekinci, E. ve Özmen, A. 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonucu Hasar Gören 11 Katlı Betonarme Bir Yapının Deprem Performansının Değerlendirilmesi. *Black Sea J. Eng. Sci*, (2025); 8(2), 285–297.

[2] Nemutlu, ÖF. Bingöl ili şehir merkezindeki binalarda deprem performansı, yapısal riskler ve kayıpların incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2023).

[3] Apuhan, F. Son Yüzyılda Bingöl'de Meydana Gelen Depremler ve Etkileri. *Bingöl Araştırmaları Derg,* (2020); 6(2), 79–102.

[4] Özpalanlar, CG., Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolasyon ve Enerji Sönümleyici Sistemler. *Yüksek Lisans Tezi*, (2004

[5] Yiğit, Y., Betonarme Yapılarda Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri ve Bir Güçlendirme Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, (2015); Fen Bilimleri Enstitüsü.

[6] Yörükcü, B., Hasarlı yapıların onarım güçlendirme ilkeleri. *Yüksek Lisans Tezi*, (2007).

[7] Atay, H., Betonarme yapıların güçlendirilmesi üzerine bir çalışma. *Yüksek Lisans Tezi*, (2010);

[8] Çalişkan, H., Betonarme yapıların güçlendirme teknikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, (2003).

[9] Yaşa, S., 1998 Ceyhan depremi depremde hasar gören yapılar ve güçlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2006).

[10] Yörükcü, B., Hasarlı yapıların onarım güçlendirme ilkeleri. *Yüksek Lisans Tezi*, (2007).

[11] Batmacı, H., Depremde hasar gören bir binanın mantolama, perde ilavesi ve kat azaltılması yöntemi ile güçlendirilmelerinin karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, (2011).

[12] Demirkan, D., Betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme yöntemleri. *Yüksek Lisans Tezi*, (2014).

[13] Görgülü, O., Mevcut betonarme okul binalarında güçlendirme perdelerinin etkinliğinin doğrusal olmayan dinamik analiz ile irdelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2015).

[14] Kap, T., Özgan, E. ve Uzunoğlu, MM. Betonarme Bir Okul Binasının 2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Performans Analizi. *İleri Teknoloji Bilimleri Derg*, (2017); 6(1), 1–10.

[15] Zolmaz, Y. Mevcut betonarme bir yapının perdelerle esnekliği ve dayanıklılığının TBDY-2018'e göre değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2019).

[16] Akbaş, A. Çalişkan, Ö. Deprem Etkisinde Hasar Alan ,Betonarme Yapıların Düzensizlik Türleri Yönü İle İncelenmesi. *Araştırma Raporu*, (2023).

[17] Çeltik, B. Mevcut betonarme bir yapının performans değerlendirmesi ile güçlendirme sonrası analiz sonuçlarının doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, (2023).

[18] Çizmeci, M. Antalya'da 1987 yılında yapılan bir binanın doğrusal analiz yöntemi ile performans değerlendirmesi ve güçlendirme önerisi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2023).

[19] Coşkun, ME., Gürsoy, Ş., Garip, ZŞ. Betonarme bir okul binasında güçlendirme ilkelerinin 2007 ve 2019 Türk deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniv. Fen Bilimleri Enst. Derg, (2023); 13(1)*, 127–144.

[20] Nakipoğlu, A. Betonarme binalarda hasar, onarım ve güçlendirmelerin dinamik davranışa etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Doktora Tezi*, (2024).

[21] Coşkun, M. Etriyesiz olarak imal edilen kolon-temel birleşim bölgelerinin güçlendirilmesi ve yapısal onarımının deneysel yöntemle incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2025).

[22] Şenel, MH. Betonarme taşıyıcı sistemlerde güçlendirme yöntemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, (2025).

[23] Bozdoğan, Y. E. Kahramanmaraş ili deprem risk değerlendirmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2023).

[24] Tağıl, Ş. Balıkesir Ovası ve Yakın Çevresinin Neotektonik Özellikleri ve Depremselliği. *Coğrafi Bilimler Derg,* (2004); 2(1), 73–92.

[25] Edemen, M. Deprem Nedir? Nasıl Oluşur? Türkiye'de Oluşmuş Depremler ve Etkileri Nelerdir? Depremlere Karşı Alınabilecek Tedbirler Hususunda Öneriler. *Int. J. Soc. Humanit. Sci. Res. (JSHSR)*, (2023).

[26] Kılıçer, S. ve Özgan, K. Deprem Yükü Etkisindeki Betonarme Yapıların Tasarımında Yapı-Zemin Etkileşiminin İncelenmesi. *Doğ. Afet Çev. Derg*, (2018); 4(1), 1–10.

[27] Azak, TE., Ay, BÖ. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Etkilediği İllerdeki Bina Stokunun Özellikleri. *J. Geol. Eng. (Jeol. Müh. Derg.)*, (2023); 47(1), 47–66.

[28] TRT Haber. Kahramanmaraş'ta 7,7 ve 7,6 büyüklüğünde art arda iki büyük deprem - Son Dakika Haberleri. (2023).

[29] T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Yeniden İmar ve Gelişme Raporu. (2025).

[30] T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu. (2023).

[31] İncir, A., Alel, J., Kocaman, C., Doğan, A. 6 Şubat 2023 Depremleri Gözlem ve Değerlendirme Raporu. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, (2023).

[32] Cansız, S. Türkiye'de Kullanılan Deprem Yönetmeliklerinin Özellikleri ve Eşdeğer Yatay Deprem Yükü Hesabının Değişim. *Int. J. Eng. Res. Dev. (UMAGD),* (2022); 14(1), 58–71.

[33] Tazgel, F. Yeni tasarlanan betonarme bir yapının TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 ile karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, (2023).

[34] Yıldırım, S. TBDY-2018'e göre Yapı Performans Analizi ve Güçlendirme. (2025).

[35] Kırıcı, S., Soyluk, A. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinde Meydana Gelen Yapı Hasar Türleri ve Yapı Yıkım Çeşitlerinin Saha Analizlerinin Değerlendirilmesi. *J. Archit. Sci. Appl,* (2024); 9(1), 327–35.

[36] Ergün, A. ve Yurtcu, Ş. Yığma ve Betonarme Yapılarda Deprem Sonrası Oluşan Hasarların Teknik Analizi. *Yapı Teknolojileri Elektron. Derg,* (2016); 3(1), 65–76.

[37] Akbaş, A., Çalişkan, Ö. Deprem Etkisinde Hasar Alan Betonarme Yapıların Düzensizlik Türleri Yönü İle İncelenmesi. *Int. Conf. Sci. Acad. Res. (ICSAR)*, (2023).

[38] Çağlar, N., Bayhan, B., Avcı, E., Kocakaplan, S., Özen, S., Yıldırım, E. Kahramanmaraş Depremleri İnceleme ve Değerlendirme Raporu. *Bursa Teknik Üniversitesi,* (2023).

[39] Kocaman, C. Ülkemizde Deprem Tehlikesi Yüksek… Deprem Riski Neden Yüksek?. *Teknik Makale/Rapor*, (2020).

[40] Elmas, M., Çalişkan, H. Betonarme Yapıların Güçlendirme Teknikleri. *Sakarya Univ. J. Sci,* (2003); 7(2), 25–30.

[41] Ek Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar. *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)*, (2018).

[42] Korkut, O., diğerleri. Deprem Etkisinde Çok Katlı Betonarme Bir Binanın TDY-2007 ve TBDY-2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Eşdeğer Deprem Yüklerinin Karşılaştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniv. Fen Bilimleri Enst. Derg*, (2021); 4(2), 124–133.

[43] Hava, Ş. Betonarme Bir Binanın Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ile TDY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2019).

[44] Akbaş, A. Güçlendirme yapılacak betonarme bir binanın operasyonel modal analiz tekniği ile dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2023).

[45] Akbaş, T. İki betonarme binada bağ kirişleri etkisinin operasyonel modal analiz ve sonlu eleman yöntemleriyle belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2020).

[46] Özmen, G., Orakdögen, E., Darılmaz, K. Örneklerle ETABS 2013. *İstanbul: Birsen Yayınevi*, (2014).

[47] Dok, G. 32 Katlı Betonarme Bir Yapının Deprem Performansının Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi Uygulanarak Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2011).

[48] Ajoudani, N. Mevcut betonarme yapıların lifli polimerler ile güçlendirilmesi ve ANSYS programı kullanarak karbon lifli polimer ile güçlendirilmiş bir kolonun analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2015).

[49] Beyli, E. Betonarme Binalara Uygulanan Güçlendirme Yöntemleri ve Perde Yüksekliğinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2002).

[50] Şik, H. Deprem güvenliği yetersiz betonarme bir bina için farklı güçlendirme önerilerinin karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, (2015).

[51] Yıldırım, M. Deprem etkisindeki betonarme yapıların onarılması ve bozulması. *Yüksek Lisans Tezi*, (2008).

[52] Atay, H. Depremde Hasar Görmüş Yapıların Güçlendirme Yöntemleri ve Güçlendirmede Kullanılan Malzemeler. *Yüksek Lisans Tezi*, (2010).

[53] Karatepe, Y. Okul binalarında uygulanan güçlendirme yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2024).

[54] Güçlendirme Yapılar. *Ders Notları Eki*, (2025).

[55] Öncü, G. Mevcut betonarme ve yığma binaların depreme karşı onarım ve güçlendirme yöntemleri ve İzmir'deki bazı uygulama örneklerinin irdelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, (2011).

[56] Demirkan, D. Betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme yöntemleri. *Yüksek Lisans Tezi,* (2014).

[57] Ekmen, A. B. Jet grout kolonlarla güçlendirilmiş zeminler üzerine oturan plak temellerin tasarım stratejileri ve modelleme teknikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, (2016).

[58] AFAD. Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi (TADAS).