

**GEPOLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DOLGU
DUVARLARIN ÇELİK ÇERÇEVELERİN SİSMİK
DAVRANIŞLARINA OLAN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Muhammet Mücahit DEMİR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GEPOLİMERLERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DOLGU DUVARLARIN ÇELİK
ÇERÇEVELERİN SİSMİK DAVRANIŞLARINA OLAN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

(Investigation of the Effects of Infill Walls Reinforced with Geopolymers on the Seismic
Behavior of Steel Frames)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Mücahit DEMİR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ

Erzurum
Haziran, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**GEOPOLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DOLGU DUVARLARIN ÇELİK
ÇERÇEVELERİN SİSMİK DAVRANIŞLARINA OLAN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ danışmanlığında, Muhammet Mücahit DEMİR tarafından hazırlanan bu çalışma, 15/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oy birliği / oy~~ ~~çokluğu (3./3.)~~ ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğretim Üyesi Barış BAYRAK <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ danışmanlığında sunulan “Geopolimerlerle Güçlendirilmiş Dolgu Duvarların Çelik Çerçevelerin Sismik Davranışlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Metot	12	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar ve Öneriler	2	20
Tezin Geneli	20	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Muhammet Mücahit DEMİR	Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ
15.6.2025	15.6.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

TEŞEKKÜR

Tez çalışması süreci içerisinde bilgileri ve tecrübesiyle bana yön veren değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ' ye ve yapısal olarak çelik taşıyıcı sistemlerinin önemini bana öğreten Doç. Dr. Mahmut KILIÇ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi, fikir ve tecrübeleri ile çalışmaya katkılar sağlayan yüksek lisans tezi jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN'a ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Barış BAYRAK'a teşekkür ederim.

Tezin deneysel çalışmaları sürecindeki yardımları ve kıymetli önerilerinden dolayı Doç. Dr. Gökhan KAPLAN, Doç. Dr. Mahmut KILIÇ, Araş. Gör. Muhammet Ahmet Mecit Işık'a, Araş. Gör. Oğuzhan UĞURLU'ya ve Araş. Gör. Atakan YILDIRIM'a çok teşekkür ederim.

Desteklerini her zaman hissettiğim kıymetli aileme ve oğlum Mehmet Cihan DEMİR'e teşekkür ederim.

Muhammet Mücahit DEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GEPOLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DOLGU DUVARLARIN ÇELİK ÇERÇEVELERİN SİSMİK DAVRANIŞLARINA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Mücahit DEMİR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇELEBİ

Amaç: Sismik aktivitesi yüksek olan ülkemizde bulunan mevcut ya da yeni tasarımı yapılacak olan yapıların depreme karşı dayanıklılığında kullanılabilecek olan modüler geopolimer harçlı dolgu duvarların kullanılmasının araştırılması bu tez kapsamında amaçlanmıştır. Ayrıca bu tezin amacı yapıların depreme karşı korunmasının yanı sıra yeşil bir bina perspektifinde karbondioksit salınımını azaltabilen geopolimer harçların kullanımının yapısal boyutta olmasının önünü açmaktır. Çalışmanın sonunda geopolimer harçların kullanılmasıyla

Yöntem: Geopolimer harçların taşıyıcı sistemlerin sismik performansına etkilerini araştırmak amacıyla, standartlara uygun dört farklı çerçeve modeli laboratuvar ortamında üretilmiştir. Modellerde, dolgu duvarlar çelik çerçeve kolonlarına rijit ve esnek bağlantı detaylarıyla uygulanmış; her iki bağlantı türü hem geleneksel beton hem de geopolimer harçlarla teşkil edilmiştir. Böylece dört farklı yapı konfigürasyonu elde edilmiştir. Modeller, sarsma tablası deneylerine tabi tutulmuş ve deney sırasında birleşim bölgelerine yerleştirilen ivmeölçerlerle tepki ivmeleri, LVDT' lerle ise yer değiştirme verileri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular doğrultusunda, dolgu duvarlı çelik çerçevelerin deprem etkisi altındaki göçme mekanizmaları analiz edilmiştir.

Bulgular: Deprem testleri sonucunda, en yüksek tepki ivmesi ve yer değiştirme değerlerinin, geopolimer harçlı esnek bağlantılı dolgu duvarlı çelik çerçeve sisteminde meydana geldiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, söz konusu sistemde deprem kaynaklı hasar düzeyinin en düşük seviyede gerçekleştiği tespit edilmiştir. Öte yandan, geleneksel beton harçla rijit olarak bağlanan dolgu duvarlı çerçeve sisteminin yer değiştirme kapasitesinin en düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç: Çalışma sonucunda, karbondioksit (CO₂) salınımını azaltma potansiyeline sahip geopolimer harçların, taşıyıcı sistemlerin deprem performansını iyileştirmede etkin bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, dolgu duvarların taşıyıcı sistem elemanlarına esnek derzlerle bağlanmasının, sismik davranış açısından en uygun çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik Çerçeve Sistemleri, Deprem, Dolgu Duvarlar, Geopolimer Beton, Sarsma Tablası Deneyleri.

Haziran 2025, 107 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF INFILL WALLS REINFORCED WITH GEOPOLYMERS ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF STEEL FRAMES

Muhammet MÜCAHİT DEMİR

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Oğuzhan ÇELEBİ

Purpose: This thesis aims to investigate the use of modular geopolymer mortar-infused infill walls that can be employed to enhance the earthquake resistance of both existing and newly designed buildings in our country, which is characterized by high seismic activity. Additionally, the study seeks to promote the structural-scale application of geopolymer mortars that not only contribute to the seismic safety of structures but also support environmental sustainability by reducing carbon dioxide (CO₂) emissions in line with the green building concept.

Method: To examine the effects of geopolymer mortars on the seismic performance of structural systems, four different frame models were produced in a laboratory setting in accordance with relevant standards. In these models, infill walls were attached to steel frame columns using both rigid and flexible connection details; each connection type was constructed with both conventional cement-based mortar and geopolymer mortar. Accordingly, four distinct structural configurations were obtained. These models were subjected to shake table tests, during which accelerometers placed at the connection regions recorded acceleration responses, while LVDTs measured displacement data. Based on the collected experimental data, the collapse mechanisms of steel frames with infill walls under seismic loading were analyzed.

Findings: Shake table test results revealed that the highest acceleration and displacement values occurred in the steel frame system with geopolymer mortar and flexible infill wall connections. Nevertheless, this configuration also exhibited the lowest level of earthquake-induced damage. On the other hand, the steel frame system with conventionally bonded rigid infill walls demonstrated the lowest displacement capacity.

Conclusion: The study concluded that geopolymer mortars, which offer a significant reduction in CO₂ emissions, can be effectively utilized to enhance the seismic performance of load-bearing structural systems. Furthermore, flexible joint connections between infill walls and structural elements were found to provide the most favorable seismic behavior among the configurations tested.

Keywords: Steel Frame Systems, Earthquake, Infill Walls, Geopolymer Concrete, Shaking Table Tests.

June 2025, 107 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Depremler ve Özellikleri.....	4
Çelik Taşıyıcı Sistemler	7
Dolgu Duvarlar.....	12
Geopolimer Beton Harçları	17
MATERYAL VE YÖNTEM	22
Deney Yöntemi	22
Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Üretilen Numuneler	29
Deprem Kayıtları.....	32
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	36
Tepe İvme Değerleri	36
Düzlem içi tepe ivme değerleri	36
Düzlem dışı tepe ivme değerleri	44
Tepe Yer Değiştirme Değerleri.....	53
Düzlem içi tepe yer değiştirme değerleri	53
Düzlem dışı dinamik tepe yer değiştirme değerleri	63
Frekans Tanım Alanında Yapılan Çözümlemeler.....	73
Sarsma Tablası Deneylerinde Oluşan Hasar Mekanizmaları.....	75
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	91

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Erzurum ve Çevresini Etkileyen Depremlerin ($M_w > 6$) Listesi	7
Tablo 2. Beton Karışım Oranları (gr/cm^3)	29
Tablo 3. Çelik Elemanlara Ait Mekanik Özellikler	29
Tablo 4. Tuğla Duvarın Mekanik Özellikleri	29
Tablo 5. Depremlere Ait Özellikler	32
Tablo 6. Çelik Çerçevelere Ait Yerel Deprem Parametreleri	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Sismik dalgalar.....	5
Şekil 2. Dünyada depremlere sebebiyet veren plakların hareketleri	6
Şekil 3. Türkiye’ deki fay hatları ve sismik bölgeler	6
Şekil 4. Çelik yapı birleşim sistemleri; a) moment aktaran birleşim, b) yarı moment aktaran birleşim, c) moment aktarmayan birleşim	8
Şekil 5. Çelik profil kesitleri	10
Şekil 6. Dolgu duvarın göçme modu; a) basınç çatlakları, b) eş değer basınç çubuğu ile duvarın temsil edilmesi	13
Şekil 7. Dolgu duvar modelleri; a) eş değer basınç çubuğu modeli, b) sonlu elemanlar modeli	13
Şekil 8. Dolgu duvarlı çerçevelere deprem testlerinin uygulanması	16
Şekil 9. Geopolimer harçların üretim aşamaları.....	18
Şekil 10. Polipropilen fiberler takviyeli geopolimer harçlar	20
Şekil 11. Deneylerde kullanılan sarsma tablası.....	22
Şekil 12. Sarsma tablası yazılım programı	22
Şekil 13. Veri toplama ünitesi	23
Şekil 14. İvme ölçerler; a) tek eksenli ivmeölçer, b) iki eksenli ivmeölçer	23
Şekil 15. LVDT (yer değiştirme ölçer sensor)	24
Şekil 16. Çelik çerçevelerin sarsma tablasında yerleşim bölgesi.....	24
Şekil 17. Çelik çerçevelerin kayma çivileri ile hazırlanması	25
Şekil 18. Rijit birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeve.....	26
Şekil 19. Esnek derzin bırakılmasıyla dolgu duvarların çelik kolona bağlantısının yapılması	26
Şekil 20. Esnek derzli dolgu duvarlı çelik çerçeve modeli	27
Şekil 21. Esnek birleşimde kullanılan çelik levha detayı	27
Şekil 22. Dolgu duvarlı çelik çerçevelerin testlerinde kullanılması planlanan test düzeneği.....	28
Şekil 23. Dolgu duvarlı çelik çerçevelere uygulanan yüklemeler.....	28
Şekil 24. Harç numuneleri.....	30
Şekil 25. Sertleşmiş beton deneyleri	30
Şekil 26. Sertleşmiş beton deneylerinde numunelerin kırılmış halleri.....	30

Şekil 27. Çelik çerçevenin kesme çivileri ile hazırlanması.....	31
Şekil 28. Rijit birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeveler; a) RBGBH, b) RBGH	31
Şekil 29. Esnek derzli dolgu duvarlı çelik çerçeveler; a) EDGBH, b) EDGH.....	32
Şekil 30. Model çelik çerçevelerin yatay elastik spektrumları.....	33
Şekil 31. Model çelik çerçevelerin sarsma tablası deneylerinde kullanılan depremlerin ölçeksiz ve ölçekli ivme zaman grafikleri	34
Şekil 32. Deprem ivme spektrumları; a) ölçeksiz, b) ölçekli	34
Şekil 33. Ortalama deprem ivme spektrumları.....	35
Şekil 34. RBGBHA0 tepe ivmesi değerleri.....	37
Şekil 35. RBGHA0 tepe ivmesi değerleri	38
Şekil 36. EDGBHA0'da oluşan tepe ivmesi değerleri	39
Şekil 37. EDGHA0 tepe ivmesi değerleri.	39
Şekil 38. Minimum düzlem içi tepe ivmesi değerleri.	40
Şekil 39. Maksimum düzlem içi tepe ivmesi değerleri.	40
Şekil 40. Düzlem içi ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi	41
Şekil 41. Düzlem içi ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi	42
Şekil 42. Düzlem içi ve rijit birleşimde geopolimer harçların etkisi.....	42
Şekil 43. Düzlem içi ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların etkisi	43
Şekil 44. Düzlem içi durumda tepe ivme değerlerinin karşılaştırılması	44
Şekil 45. RBGBHA1 tepe ivmesi değerleri.....	45
Şekil 46. RBGHA1 tepe ivmesi değerleri	46
Şekil 47. EDGBHA1'de oluşan tepe ivmesi değerleri	46
Şekil 48. EDGHA1 tepe ivmesi değerleri	47
Şekil 49. Minimum düzlem dışı tepe ivmesi değerleri.....	48
Şekil 50. Maksimum düzlem dışı tepe ivmesi değerleri.	48
Şekil 51. Düzlem dışı ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi	50
Şekil 52. Düzlem dışı ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi	50
Şekil 53. Düzlem dışı ve rijit birleşimde geopolimer harçların etkisi.....	51
Şekil 54. Düzlem dışı ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların etkisi	51
Şekil 55. Düzlem dışı durumda tepe ivme değerlerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 56. RBGBHD0 dinamik yer değiştirme değerleri.....	54

Şekil 57. RBGHD0 dinamik yer değiştirme değerleri	55
Şekil 58. EDGBHD0’da oluşan dinamik yer değiştirme değerleri	56
Şekil 59. EDGHDO dinamik yer değiştirme değerleri	57
Şekil 60. Minimum düzlem içi dinamik yer değiştirme değerleri.....	58
Şekil 61. Maksimum düzlem içi dinamik yer değiştirme değerleri	58
Şekil 62. Düzlem içi ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin yer değiştirmeye olan etkisi.....	59
Şekil 63. Düzlem içi ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin yer değiştirmeye olan etkisi.....	60
Şekil 64. Düzlem içi ve rijit birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi	61
Şekil 65. Düzlem içi ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi	61
Şekil 66. Düzlem içi durumda dinamik yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 67. RBGBHD1 dinamik yer değiştirme değerleri.....	64
Şekil 68. RBGHD1 dinamik yer değiştirme değerleri	65
Şekil 69. EDGBHD1’de oluşan dinamik yer değiştirme değerleri	66
Şekil 70. EDGHHD1 dinamik yer değiştirme değerleri	67
Şekil 71. Minimum düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerleri.....	68
Şekil 72. Maksimum düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerleri.....	68
Şekil 73. Düzlem dışı ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin yer değiştirmeye olan etkisi.....	70
Şekil 74. Düzlem dışı ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin ye değiştirmelere olan etkisi.....	71
Şekil 75. Düzlem dışı ve rijit birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi	71
Şekil 76. Düzlem dışı ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi	72
Şekil 77. Düzlem dışı durumda dinamik yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması	73
Şekil 78. Frekans tanım alanında yapılan çözümlemeler	74
Şekil 79. Frekans tanım alanında yapılan çözümlemelerin birlikte çizdirilmiş hali	75
Şekil 80. Düzlem içi durumda RBGBH modelinde oluşan hasarlar	76
Şekil 81. Düzlem içi durumda RBGH modelinde oluşan hasarlar.....	77
Şekil 82. Düzlem dışı durumda RBGH modelinde oluşan hasarlar	78
Şekil 83. Düzlem dışı durumda RBGBH modelinde oluşan hasarlar	79

Şekil 84. Düzlem içi durumda EDGBH modelinde oluşan hasarlar	79
Şekil 85. Düzlem içi durumda EDGH modelinde oluşan hasarlar	80
Şekil 86. Düzlem dışı durumda EDGBH modelinde oluşan hasarlar	80
Şekil 87. Düzlem dışı durumda EDGH modelinde oluşan hasarlar	81

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

af	: Afyon Depremi
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AISC 341-10	: American Institute of Steel Construction – Sismik Tasarım Kılavuzu (2010)
AISC 341-16	: American Institute of Steel Construction – Sismik Tasarım Kılavuzu (2016)
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
ASTM A673	: Charpy V-Çentik Darbe Testi Standardı (Amerikan Standardı)
Bit	: Dijital veri birimi
bn	: Bingöl Depremi
CFRP	: Karbon Elyafla Güçlendirilmiş Polimer
cm	: Santimetre
cm^3	: Santimetreküp
CO_2	: Karbondioksit
CVN	: Charpy V-Notch (V-Çentik Darbe Dayanımı)
DAF	: Doğu Anadolu Fayı
DD-1 / DD-2	: Deprem Yer Hareketi Düzeyleri
DD-1	: Deprem Düzeyi 1
DD-2	: Deprem Düzeyi 2
dz	: Düzce Depremi
EDGBH	: Esnek Derzli Geleneksel Beton Harçlı Model
EDGBHA0	: Esnek Derzli Geleneksel Beton Harçlı Model (Düzlem İçi)
EDGBHA1	: Esnek Derzli Geleneksel Beton Harçlı Model (Düzlem Dışı)
EDGH	: Esnek Derzli Geopolimer Harçlı Model
EDGHA0	: Esnek Derzli Geopolimer Harçlı Model (Düzlem İçi)
EDGHA1	: Esnek Derzli Geopolimer Harçlı Model (Düzlem Dışı)
el	: Elbistan Depremi
elc	: El Centro Depremi
EN1993-1-8	: Eurocode 3 – Bölüm 1-8: Çelik yapıların birleşim detayları
erz	: Erzincan Depremi
g	: Yer ivmesi
GKT	: Güvenlik Katsayıları ile Tasarım
gr	: Gram

Hz.	: Hertz (Frekans birimi)
IL	: Illinois (ABD'de bir eyalet; bazı teknik yayınlarda kurum yeri olarak geçer)
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
kb	: Kahramanmaraş-Baz Depremi
lo	: Loma Prieta Depremi
LVDT	: Doğrusal Deplasman Dönüştürücüsü
m	: Metre
m ³	: Metreküp
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
Ms	: Yüzey dalgası büyüklüğü
Mw	: Moment büyüklüğü (Moment Magnitudü)
N	: Newton
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
PGA	: En Büyük Yer İvmesi
PGV	: En Büyük Yer Hızı
pz	: Pazarcık Depremi
RBGBH	: Rijit Birleşimli Geleneksel Beton Harçlı Model
RBGBHA0	: Rijit Geleneksel Beton Harçlı Model (Deprem A0)
RBGBHA1	: Rijit Geleneksel Beton Harçlı Model (Deprem A1)
RBGH	: Rijit Birleşimli Geopolimer Harçlı Model
RBGHA0	: Rijit Geopolimer Harçlı Model (Düzlem İçi)
RBGHA1	: Rijit Geopolimer Harçlı Model (Düzlem Dışı)
S1	: 1.0 saniye Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı
s2	: Saniye kare (ivme birimi)
S235	: Akma dayanımı 235 MPa olan yapı çeliği
S275	: Akma dayanımı 275 MPa olan yapı çeliği
S355	: Akma dayanımı 355 MPa olan yapı çeliği
S450	: Akma dayanımı 450 MPa olan yapı çeliği
Sae	: Spektral İvme (elastic)
SD1	: 1.0 saniye Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
SDS	: Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
SMA	: Şekil Hafızalı Alaşım

sn	: Saniye
SS	: Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı
sv	: Sivrice Depremi
T	: Periyot
TÇY 2016	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2016
TESTBOX2010	: Veri toplama sistemi modeli
UBC	: Birleşik Yapı Yönetmeliği (Uniform Building Code)
UBC-88	: Uniform Building Code – 1988
USD	: Amerikan Doları
YDKT	: Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım
ZD	: Zemin Davranışı
zm	: Gölcük Depremi

GİRİŞ

Sismik aktivitesi yüksek olan ülkemizde yeni tasarımı yapılacak ve ayrıca mevcut yapı stoklarının depreme dayanıklı olması önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizde yapılarımız genellikle betonarme, çelik, ahşap ve yığma yapı olarak tanzim edilmektedir (TBDY 2018). Bu yapı türlerinin birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu avantaj ve dezavantajlar yapının konumu, sismik aktivitesi, zemin durumu, yapısal ve malzeme özellikleri açısından ele alınabilmektedir. Çelik yapıların betonarme sistemlere göre daha hafif olması, daha kolay imalat ve montajının yapılması ve aynı zamanda daha sünek olması depreme dayanıklılık ilkeleri açısından birçok avantaj sunmaktadır (Akbaş 2018). Ancak betonarme yapı elemanlarının ise mühendislik hizmeti görmesi durumunda daha büyük hacimlerinden dolayı daha yüksek sönüm enerjisi oluşturduğu da aşîkardır. Ayrıca betonarme elemanların çelik elemanlara göre daha çok yangına dirençli olması gibi avantajları da bulunmaktadır (Doğangün 2021). Çelik elemanların olumsuz özelliklerinin beton ile giderilmesi ve betonun olumsuz özelliklerinin ise çelik ile giderilmesi doğru bir yaklaşım olarak düşünülmektedir. Çelik yapılara ait bulon ve kaynaklı birleşim elemanlarının göstereceği sönüm ile ve aynı zamanda profillerin yapacağı sünek davranışın depreme karşı dayanıklılık açısından önemli olmaktadır. Ancak Ülkemizde meydana gelen 06 Şubat 2022 Maraş merkezli depremlerinin yer ivmesi değerlerinin yüksek olması ve aynı zamanda şiddetinin büyük olması açısından yıkıcı etkiler oluşturmuştur (AFAD, 2023). Acil ve Afet Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından hazırlanan Türkiye Tehlike Deprem Yer Haritalarında tanımlanan ivme değerlerinden daha yüksek ivme değerleri bu depremlerde görüldüğünden dolayı yapıların depreme dayanıklı olabilmesi için yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesi gerekli olmuştur. Ancak, Maraş Merkezli depremlerin oluşturduğu ivme değerlerinin harita ivme değerlerinden daha yüksek olması uzmanlar tarafından kötü zeminlerin tespit edilmesi ve yapı zemin etkileşimlerinin dikkate alınmasıyla sahaya özgü deprem spektrumlarının çıkarılmasına dayandırılabilir (Erdem vd. 2024). Ülkemizin herhangi bölgesinde yüksek maliyet gerektirdiğinden sahaya özgü spektrumlarının yapılamayacak olmasının göz önünde bulundurulmasıyla söz konusu yapı sistemlerinin daha yüksek enerji sönümleyebilecek mekanizmaya sahip olacak şekilde tasarlanması çok önemli bir durumdur.

Ülkemizde yaşanan depremlerde dolgu duvarların taşıyıcı elemanlara yardımcı bir eleman olduğu gözlemlenmiştir. Dolgu duvarların yapıya ait ilgi katlarda kullanılmamasının taşıyıcı elemanlarda önemli hasarları meydana getirmiştir (Beyen 2015). Deprem esnasında ilk

hasar alan eleman olarak ön plana çıkan eleman dolgu duvarlar yapısal sigorta elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır (Çelebi 2018). Dolgu duvarların bu durumda güçlendirilmesi yapıların sismik performansı açısından önemli olacaktır.

Dünya genelinde insanlığın deprem riskinin dışında da bazı problemlerle karşılaşabileceği bilinmektedir. İnşaat yapılarının yaygınlaşması sürdürülebilir çevrenin oluşturulabilmesini günden güne azaltmaktadır. Çünkü inşaat yapıları karbondioksit salınımını arttırarak küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir. Dünya genelinde inşaat yapıları karbondioksit salınımını çok arttırarak mevcut enerjinin yaklaşık olarak %40'nı tüketmektedir (Nodehi and Taghvaei 2022). Karbondioksit salınımının günden güne artması Dünya'da yaşanılabilir ortamın azalmasına sebebiyet vermektedir. Geleneksel betonların karbondioksit salınımı ve enerji tüketiminin yaygınlaşmasının önüne geçilebilmesi için son zamanlarda geopolimer beton çalışmaları bilim dünyasında yaygınlaşmaktadır (Sukmak vd. 2013; Provis vd 2005; Kaplan vd. 2022). Geopolimer beton geleneksel betona göre daha az karbondioksit salınımı ve daha az enerji tüketimi yapmaktadır. Ayrıca bazı durumlarda geleneksel betona göre daha yüksek basınç ve çekme dayanımı verebilmektedir (Wetzel and Middendorf 2019). Su geçirimsizliğinin az olması, karbonatlaşmaya ve buharlaşma gibi bazı olumsuz özelliklere karşı direnci yüksek olan geopolimer betonun yapısal mukavemet gerektiren taşıyıcı elemanlarda kullanılmasının yaygınlaşması beklenmektedir. Geopolimer beton yığma yapılarda bağlayıcı harç ve aynı zamanda dış ve iç duvarlarda bir yalıtım malzemesi olarak kullanılabilmesi içinde zamanla çalışmaların yapılması beklenmektedir.

Tez kapsamında çelik çerçevelerin sismik performansı açısından betonarme yapılara göre daha hafif ve sünek olması gibi avantajlarının kullanılmasının yanı sıra dolgu duvarların yapı deprem performansına olumlu etkileri dikkate alınarak bir güçlendirme çerçevesi tasarlanmıştır. Bu güçlendirme çerçevesinin aynı zamanda yeşil yapı olgusuna dolayısıyla sürdürülebilir çevre inşaatına olumlu katkısı olmasının da dikkate alınmasıyla geopolimer harçların geleneksel beton harçlarına karşın alternatif olarak düşünülmüştür. Sürdürülebilir bir bina için kullanılabilecek olan geopolimer harçların dolgu duvarların güçlendirilmesiyle yapıların deprem performansına olumlu katkılarının araştırılması bu çalışmada yapılmıştır.

Yüksek lisans tezi, Kuramsal Temeller, Materyal ve Yöntem, Araştırma Bulguları ve Tartışma ve son olarak Sonuçlar kısmı olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır.

Kuramsal Temeller bölümünde tez konusunun anlaşılabilmesi için deprem ve etkileri, çelik taşıyıcı sistemler, dolgu duvarlar ve geopolimer harçlar açıklanmıştır. Bu bölümlerin tez konusuyla olan ilişkileri değerlendirilmiştir. Literatürde bu kapsamda var olan boşluklar ortaya çıkarılarak yeni bir çalışmanın neden yapılması gerektiği açıkça ortaya konulmuştur.

Materyal ve Yöntem bölümünde çalışma kapsamında önerilen çelik çerçeve sistemlerinin üretilme aşamaları, bu çerçevelerin deprem testlerinin yapılması için kullanılacak olan sarsma tablası ve ölçüm sistemleri ve deneylerde kullanılmış olan deprem yer hareketi kayıtlarının karakteristik özellikleri verilecektir. Ayrıca birleşimlerde kullanılan geopolimer ve geleneksel beton harçlarının mekanik ve fiziksel özellikleri verilecektir. Son olarak çalışma sonunda elde edilecek olan deney parametreleri tanımlanacaktır.

Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde çelik çerçeve sistemlerinde depremlerden kaynaklı oluşacak olan kat ivme değerleri, yer değiştirme değerleri ve modal parametreler verilecektir. Dört farklı çerçeve türünde oluşan bu değerler karşılaştırılarak mukayese edilecektir. Ayrıca farklı harçlarla teşkil edilen dolgu duvarların çelik çerçeve sistemlerinin enerji sönmleme kapasitelerine ne kadar etki edeceği tartışılmış olacaktır.

Sonuçlar bölümünde, araştırma bulguları ve tartışma bölümünde elde edilen bulgular derlenerek eksi ve artı yönleriyle ifade edilecektir. Çalışma sonunda geopolimer betonların deprem performansı açısından önemi belirtilmiş olacaktır. Ayrıca gelecekte bu alanda yapılabilecek yenilikçi çalışmaların ne olabileceği hakkında yeni öneriler verilmiş olacaktır.

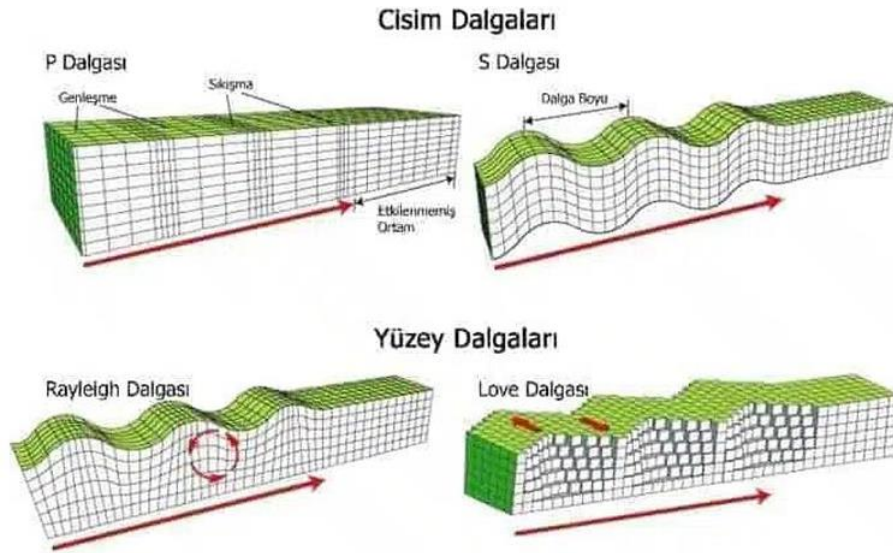
KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde depremler ve özellikleri, çelik taşıyıcı sistemler, dolgu duvarlar ve geopolimer harçlar incelenmiştir. Bu alt başlıkların tanıtımı yapılarak teorik bilgiler verilmiştir. Daha sonra literatürde yapılmış çalışmalar hakkında genel bilgiler verilerek tezin çıkış noktası oluşturulmuştur.

Depremler ve Özellikleri

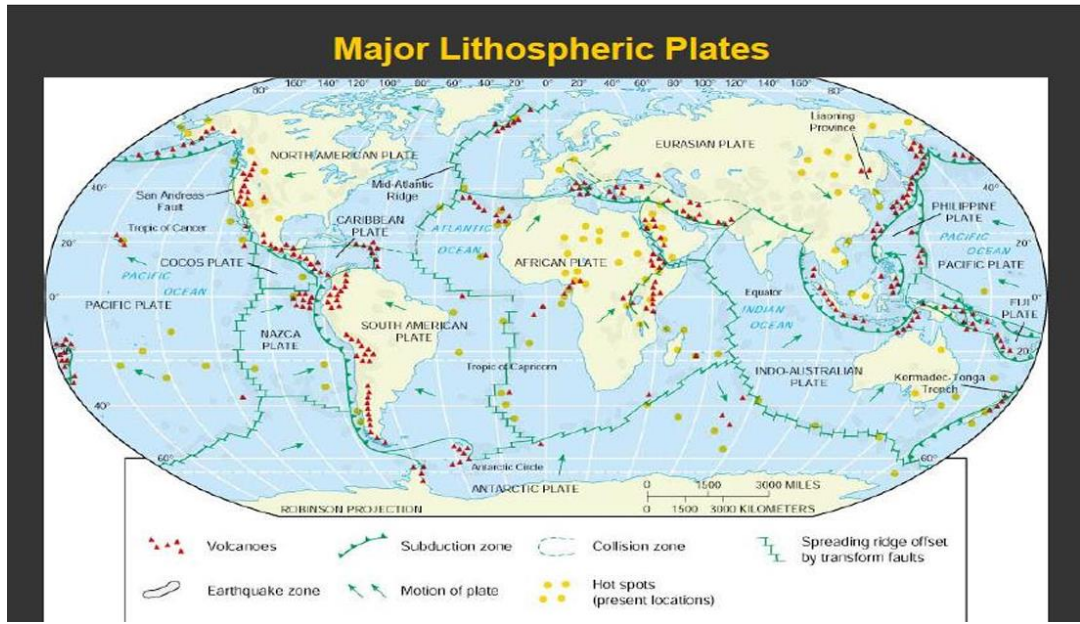
Yer kabuğunda bulunan fayların birbirlerine karşı yapmış olduğu görece hareketler sonucunda biriken enerjinin yer yüzeyine bir dalga hareketi olarak yayılması olayına deprem denir. Deprem tektonik ve tektonik olmayan deprem olarak sınıflandırılır. Yer kabuğunu oluşturan plakalar kendisini sınırlayan çizgiler olan faylar boyunca ani olarak kırılır ve fay çizgisinde atım meydana gelir. Bu olay sonucu ortaya çıkan yer değiştirme dalgaları sönümlenerek uzaklara yayılır. Bu tektonik depremdir. Bazı depremler, volkanik hareketlere, yer altı mağaraların çökmesine ve hatta yer altına basılarak oluşabilmektedir. Bu depremler tektonik olmayan depremdir (Saroglu vd. 1992). Odak derinliği 70 km'den düşük olan sığ deprem, 70-300 km arasında olan deprem orta deprem ve 300 km'den büyük olması durumunda ise derin deprem adını alır. Yurdumuzda olan depremler 10 km-30 km arasındadır. Sığ olmakla birlikte yıkıcıdır. Derin deprem küçük genliklidir etki alanı büyüktür. Sığ deprem etki alanı küçük etki alanı dardır. Yüzeyde deprem odağının hemen izdüşümü merkez üssü yani episantır, depremin başladığı bölge deprem odağı yani hiposantırdır. P ve S dalgaları cisim dalgalarıdır. P dalgası olarak isimlendirilmedi, ortam zamana bağlı olarak titreşim biçimde hacimsel değişikliğe uğrarken dalga hareketi yayılır. Ana dalga veya basınç-çekme dalgası olarak ta bilinen bir dalga hareketinde yayılma sırasında bu doğrultuda yer değiştirmeler ve ortamda normal gerilmeler meydana gelir. Hızı görece olarak daha düşük olan S dalgası olarak ikinci tür olarak bilinen dalga hareketinde, yer değiştirmeler yayılma doğrultusuna dik olup ortamda hacim değişikliği olmadan biçim değişikliği meydana gelir. İkincil dalga veya kayma hareketi olarak da bilinen bu dalga hareketinin özel olarak yatay veya düşey düzlemde meydana gelmesi veya SH dalgası ve düşeyde kayma dalgası veya SV dalgası olarak bilinir. Şekil 1'de sismik dalgaların yayılışı sunulmuştur. Rayleigh ve Love dalgaları yüzey dalgalarıdır. Rayleigh dalgasında genlikler serbest yüzeyden derinlere inildikçe azalır. Yer değiştirmeler ilerleme doğrultusunu içeren düşey düzlemde bulunur. İlerleme yönüne dik bir yer değiştirme bileşeni mevcut değildir. Deprem dalgalarının incelenmesinden bunların yayılma doğrultusuna dik

yerleştirme bileşenleri bulunan ve SH Dalgasına benzeyebilecek türden dalgaları da içerdiği göstermiştir. Yapılan araştırmaların bu tür dalgaların yarı sonsuz homojen ortamın üstünde bir elastik tabaka bulunması durumunda meydana gelebileceğini ortaya çıkarmıştır. Love dalgası olarak bilinen bu dalgalar kayma dalgasının üstteki tabaka içine yansıması sonucu ortaya çıkmıştır. Türkiye’deki depremler tektonik deprem ve derinliği az olan sığ depremler olduğundan dolayı yıkıcı etkiye sahiptir.

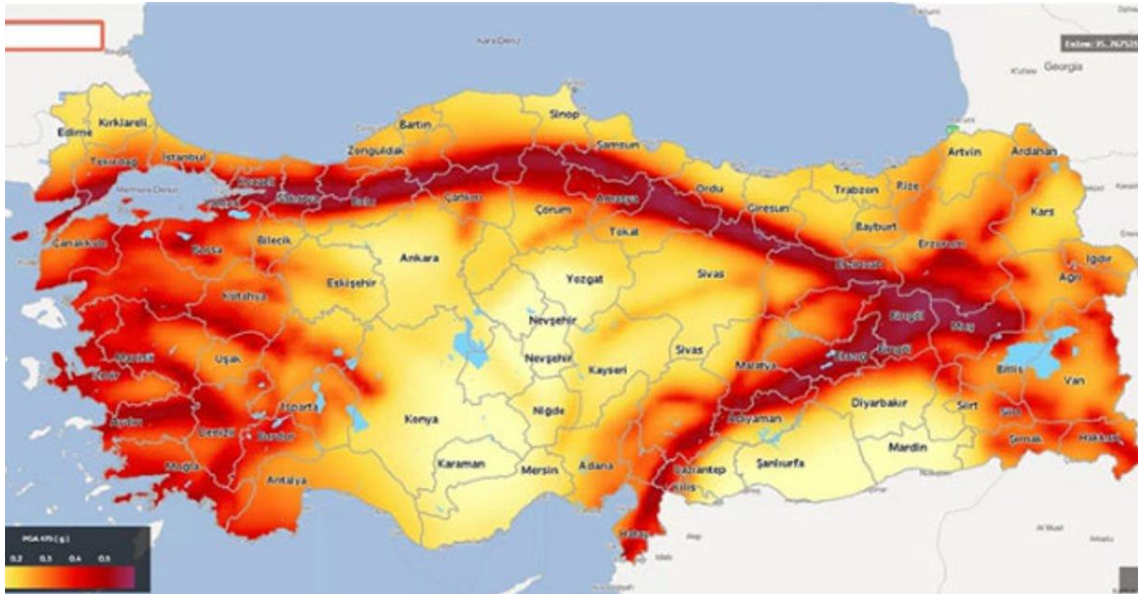


Şekil 1. Sismik dalgalar (Barka, 1992)

Ülkemizde oluşan depremler Arap ve Avrasya Plakalarından dolayı meydana gelmektedir. Arap ve Avrasya plakalarının birbirlerine göre yapmış olduğu hareketler sonucunda Ülkemizde Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF) oluşmuştur. Ayrıca yine bu iki plakanın birbirine karşı göstermiş olduğu dalma batma hareketi sonucunda Ege Çöküntü bölgesi oluşmuştur. KAF Bingöl Karlıova’dan başlayarak Marmara Denizinden Soros Körfezine ve bir kolu da Ege Bölgesine uzanmaktadır. DAF ise Karlıova’dan başlayıp Güney-Batıda Türkoğlu’ ya, Kuzeyde Kıbrıs’ a ve Güneyde ise Ölü denize kadar ilerlemektedir (Yalçın vd. 2013). Kuzey Anadolu Fay hattında oluşan İzmit Depremi (1999), Doğu Anadolu Fay hattında oluşan 1998 Adana Ceyhan Depremi ve 2022 Kahramanmaraş Depremleri, Ege Çöküntü Bölgesinde 1995 Dinar Depremi oluşmuştur (Celep, 2018). Dünyamızda depreme sebebiyet veren plakaların dağılımı Şekil 2’de ve Yurdumuzdaki fayların konumu Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 2. Dünyada depremlere sebebiyet veren plakların hareketleri (Sucuoğlu and Erberik 1997)



Şekil 3. Türkiye’deki fay hatları ve sismik bölgeler (AFAD 2023)

Tez kapsamında çalışmaya konu edinilen Erzurum ve çevresi yoğun sismik titreşimlere maruz kalabilecek 0,5g’den büyük deprem yer ivmesi üretebilecek bir bölge olarak geçmektedir (AFAD 2023). Tarihsel dönemde Erzurum ve yakın çevresinde meydana gelen depremler incelendiğinde 10 şiddetine kadar olan depremlerin olduğu görülmektedir. Erzurum’un Kuzeybatısında yer alan Horasan-Şenkaya Fay Zonu; birbirine paralel uzunluğu 10 km’ye kadar uzanan kırıklardan oluşmaktadır. Bu Fay Zonu 30 Ekim 1983 tarihinde, Mw=6.6 büyüklüğünde bir deprem üretmiştir (Özer vd. 2019). Erzurum ve çevresinin tektoniği sol yönlü doğrultu atımlı Erzurum-Dumlu Fay Zonu, sol yanal atımlı ters faylardan oluşan Palandöken Fay Zonu, Başköy Kandilli Fay Zonu ve sol yönlü doğrultu atımlı fayı Aşkale Fay Zonu

tarafından yönetilmektedir (Koçyiğit ve Canoğlu 2017). Erzurum ve çevresini etkileyen bazı büyük depremlerin listesi Tablo 1’de verilmiştir.

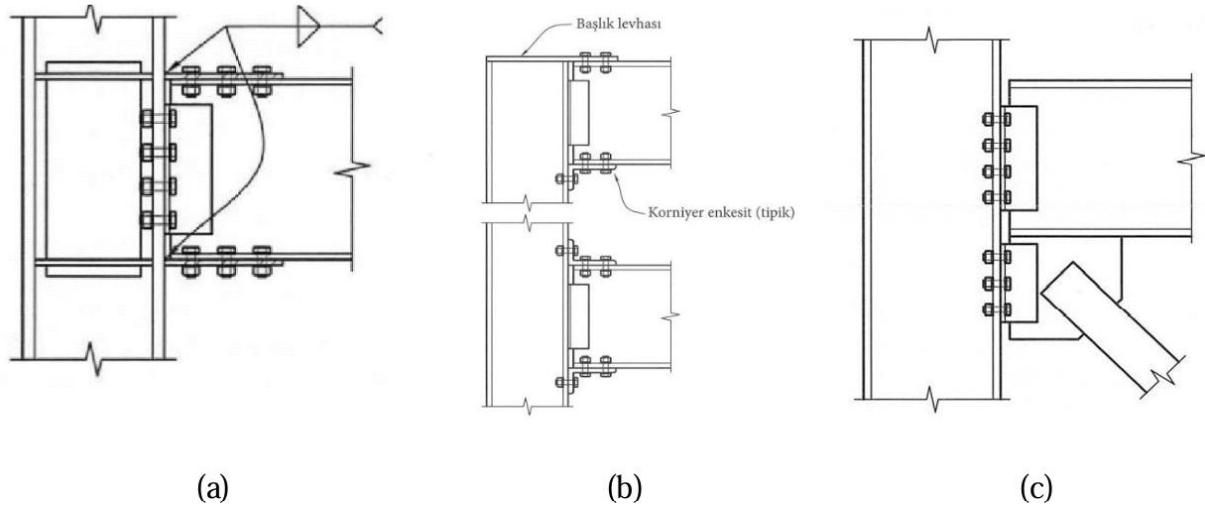
Tablo 1. Erzurum ve Çevresini Etkileyen Depremlerin ($M_w > 6$) Listesi (AFAD 2023)

Oluş Tarihi	Oluş Zamanı	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyükölük	Tür	Yer
30.10.1983	04:12:29	40.331	42.173	15	6.6	Mw	Narman-Erzurum
20.08.1966	11:59:09	39.420	40.983	14	6.2	Ms	Karlıova-Bingöl
19.08.1966	12:22:11	39.170	41.560	26	6.9	Ms	Varto-Muş
17.08.1949	18:44:20	39.570	40.620	40	6.7	Ms	Tercan-Erzincan
13.09.1924	14:34:14	39.960	41.940	10	6.8	Ms	Köprüköy-Erzurum
28.12.1906	00:00:00	40.500	42.000	30	6.0	Ms	Oltu-Erzurum
28.04.1903	23:46:00	39.100	42.500	30	6.3	Ms	Malazgirt-Muş
08.11.1911	10:18:00	40.030	41.530	10	6.1	Ms	Pasinler-Erzurum

Çelik Taşıyıcı Sistemler

Yapısal olarak çelik yüksek mukavemeti, hafifliği ve düşük enerji tüketimi açısından önemli bir yere sahip malzemedir (Yardımcı, 2009). İmalat ve montaj kolaylığı ve geri dönüşümde kullanılması açısından da birtakım avantajlara sahiptir (Yardımcı, 2009). Homojen ve izotrop malzeme olan çelik malzemesinden yapılan imalatlarda oluşan atıkların çok az olmasından dolayı betonarmeye nazaran taşıyıcı sistem elemanı olarak kullanılması büyük avantajlara sahiptir. Özellikle endüstriyel yapılarında tercih edilen çelik ile montaj süresinin kısılması ve büyük açıklıklar geçilmesi çelik yapı sistemlerinin önemini ortaya koymaktadır (Yardımcı, 2009). Ülkemizde çelik yapılar deprem, rüzgar, sabit ve hareketli gibi yükler etkisi altında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) ve Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliği 2016 (TÇY 2016)’ya göre tasarlanmaktadır (TBDY 2018; TÇY 2016). Çelik yapı sistemleri TBDY 2018’e göre süneklik düzeyi yüksek, süneklik düzeyi sınırlı ve süneklik düzeyi karma sistemler olarak düzenlenmektedir (TBDY 2018). Deprem etkilerinin karşılanması açısından merkezi çapraz çelik sistemleri ve dış merkezi çelik çapraz sistemleri olarak tasarlanmaktadır. Çelik yapı birleşimleri ise moment aktaran birleşim (rijit birleşim), yarı moment aktaran birleşim (yarı rijit birleşim) ve moment aktarmayan birleşim (mafsallı olarak üç grupta incelenmektedir. Moment aktaran birleşimler genellikle tam penetrasyonlu küt kaynak ve bulonlar sayesinde, yarı moment aktaran birleşimler bulonlar ve mafsallı birleşimler

ise yine bulonlar sayesinde yapılmaktadır (TÇY 2016). Şekil 4'te çelik yapı sistemlerinin birleşimlerine ait örnekler sunulmuştur.



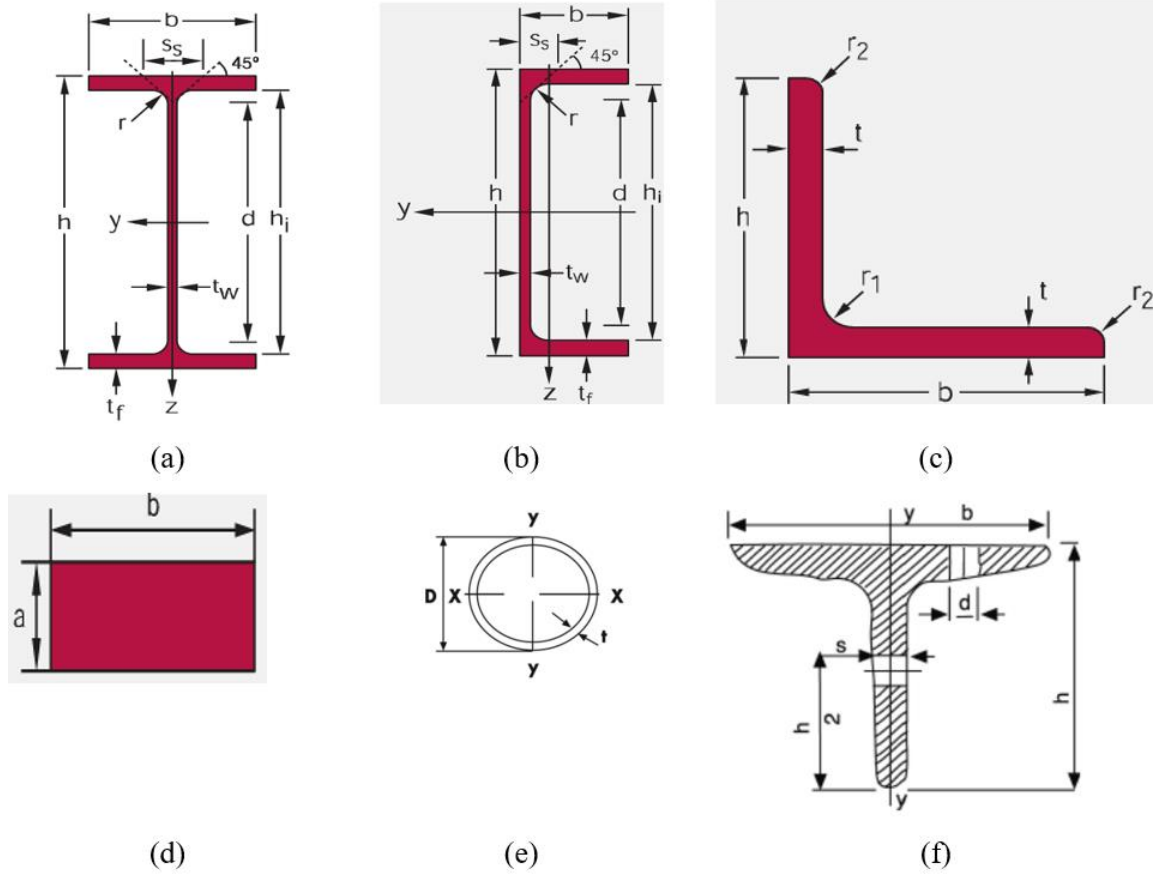
Şekil 4. Çelik yapı birleşim sistemleri; a) moment aktaran birleşim, b) yarı moment aktaran birleşim, c) moment aktarmayan birleşim (Akbaş, 2018)

Zemin yapısı, sismik aktivite ve taşıyıcı sistem türüne göre tasarlanan birleşim türleri değişkenlik göstermektedir. Birleşim araçları olarak kaynak ve bulonlar tercih edilmektedir. TÇY 2016'ya göre bulon sınıfları, 4.6, 4.8, 5.6, 6.8, 8.8 ve 10.9 olarak tanımlanmıştır (TÇY 2016). Örneğin 4.6 bulon sınıfında kopma dayanımı 600 MPa iken akma dayanımı 240 MPa'dır. TBDY 2018'e göre ise deprem bölgelerinde yapılacak olan çelik yapı sistemlerinde kullanılacak olan bulonların tam ön çekme verilmesi şartıyla 8.8 ve 10.9 sınıfı kullanılma zorunluluğu bulunmaktadır (TBDY 2018). Kaynak olarak ise TBDY 2018'de E480 ve E550 kaynak sınıflarının kullanılma şartı getirilmiştir (TBDY 2018). Çelik yapı sistemlerinin kolonunu, kirişini, çaprazını ve panelini oluşturacak olan profiller ise yine TÇY 2016'ya göre S235, S275, S355 ve S450 olarak sınıflandırılmıştır. Çelik profillerin kullanılacağı bölgenin hava şartlarına göre sınıflandırma ve buna karşılık olarak ta akma ve çekme dayanımları verilmiştir. Ayrıca profil kesitlerinin içi boş ve dolu olmasına karşılıkta bir sınıflandırma yapılmıştır. TBDY 2018'e göre doğrusal olmayan davranış göstermesi beklenen elemanlarda kullanılacak yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi 355 N/mm^2 değerini aşmamalıdır. Ayrıca süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çelik çerçevelerin kolonları hariç olmak üzere yatay yük taşıyıcı sistemlerin kolonlarında kullanılacak yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi 460 N/mm^2 'yi aşmayacağı tanımlanmıştır. Yine TBDY 2018'e göre başlıklarının kalınlığı en az 40 mm olan hadde profillerinde, kalınlığı en az 50 mm olan levhalar ve bu levhalar ile imal edilen yapma profillerde, ASTM A673 veya eşdeğeri standartlar uyarınca yapılan deneylerde minimum Charpy-V-Notch (CVN) dayanımı (Çentik Tokluğu) değeri 21°C 'de 27 Nm (27 J) olması gerekmektedir (TBDY 2018).

Çelik taşıyıcı sistem düzenlenmesinde yukarıda ifade edilen sıcak haddelenmiş çelik elemanlar dışında soğuk şekil verilmiş çelik elemanlarda kullanılmaktadır (TBDY 2018). Hafif çelik olarak isimlendirilen soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar rezidans ve ofis gibi yapılarda son yıllarda tercih edilmektedir (Ye, 2016). Bazı çalışmalar soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlarla taşıyıcı sisteme sahip yapıların deprem performansının yüksek olduğunu göstermiştir (Li vd. 2012; Senkardesler vd. 2017; Leng vd. 2017). Hu vd. (2021) yakın ve uzak alan kaynaklı depremler etkisi altında orta katlı soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlarla oluşan yapının hasar indekslerini incelemiştir. İlgili yapının her iki deprem türüne karşıda iyi bir performans sergilediği tespit edilmiştir (Hu vd. 2021).

Çelik taşıyıcı elemanların tasarımı Yük ve Dayanım Katsayıları Yöntemi (YDKT) ve Güvenlik Katsayıları Yöntemine (GKT) göre yapılmaktadır. Deprem etkilerinin güvenle karşılaması ve buna karşılık optimum ekonomi için YDKT yönteminin yapılan araştırmalar neticesinde daha etkili olduğu belirlenmiştir (TBDY 2018; Sarma ve Hojjat 2005).

Çelik yapı taşıyıcı sistemlerinin teşkilinde bir dizi profil kullanılmaktadır. Bu profiller I, H, kutu, boru, T, L ve U kesitli olarak karşımıza çıkmaktadır (AISC 341-16; AISC 341-10). Deprem bölgelerinde yapılacak binaların tasarımında profillerin kompakt ve narin olmayan başlık ve gövdelere sahip olması gerektiği önerilmiştir (AISC 341-16; AISC 341-10; UBC-88; TBDY 2018; Eurocode EN1993-1-8). Yani profillerin elastik bölgede herhangi bir burkulmaya maruz kalmadan elastik ötesi davranışta burkulma davranışını göstermesi beklenmektedir. Bu durumda başlık/kalınlık ve gövde/kalınlık oranları yerel burkulma olmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir (TBDY 2018; Eurocode EN1993-1-8). Şekil 5'te taşıyıcı eleman olarak kullanılan profil kesitleri verilmiştir.



Şekil 5. Çelik profil kesitleri

Çelik taşıyıcı sistem elemanlarından kolonlar bileşik eğilme ve kesme kuvveti etkisi altında tasarlanır. Kirişler eğilme ve kesme kuvveti etkisi altında, aşıklar eğilme etkisi altında, çapraz elemanlar ise basınç ve çekme kuvveti etkisi altında tasarlanmaktadır (Akbaş 2018; TCY 2016). Eğilme etkisi altında çift simetri eksenli ve kompakt I kesitlerde yanal burulmalı burkulma sınır durumu ve akma sınır durumları beklenir. Eğer bu profiller kompakt değillerse başlıkta ve gövdede yerel burkulma meydana gelir. Eğilme etkisi altındaki kutu enkesitli elemanlarda akma sınır durumu, başlık ve gövdenin yerel burkulması oluşabilmektedir. Korniyerlerde ise hem yerel hem de global bazda yanal burulmalı burkulma problemleri oluşabilmektedir. Kesme kuvveti etkisi altında I kesitli profillerde çekme etkilerinin de dikkate alınması gerekliken kutu enkesit elemanlarda bu durum dikkate alınmamaktadır. Depremi çelik yapı elemanlarında oluşturabileceği muhtemel basınç, çekme, eğilme ve kesme etkileri dikkate alındığında aynı kesit alanına sahip profillerden atalet momenti daha yüksek olan I profillerin tercih edilmesi gereklidir. Ayrıca üniform yük dağılımı açısından boru ve iki doğrultusunda eşit boyutlara sahip kutu enkesitli elemanlarında tercih edilmesi gereklidir. Eğilme etkisinde sadece akma ve başlık-gövde yerel burkulma sınır durumunun incelenmesi açısından kolaylık sunan kutu enkesitli elemanlarında tercih edilmesi hesap kolaylığı açısından önem arz etmektedir.

Literatürde, çelik çerçevelerin güçlendirilmesi ve sismik performanslarının iyileştirilmesine yönelik birçok çalışma yürütülmüştür. Pourkeramat vd. (2021), farklı deprem yer hareketlerinin ardından moment aktaran çelik çerçevelerin yangına karşı dayanıklılık performansını incelemiş; sayısal analiz sonuçları, deprem etkisine ek olarak yangın etkisinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Shen vd. (2022), AISC 341-22 şartnamesine göre eş merkezli çelik çapraz sistemine sahip çerçevelerin sismik performansını değerlendirmiştir. Çalışma, çelik çapraz sisteminin yapıların görelî kat ötelemesi ve inelastik şekil değiştirme kapasitelerini artırdığını göstermiştir. Liu vd. (2022) ise kendiliğinden merkezlenen çapraz sistem ile kesme levhalı perde duvarın birleştiği bir sistemin sismik tasarımını incelemiştir. Yüksek yer ivmelerine maruz kalan senaryolarda, taşıyıcı elemanlarda kısmi inelastik davranışların meydana geldiği; daha düşük ivme seviyelerinde ise kolonların elastik bölgede kaldığı belirlenmiştir. Etli ve Güneyisi (2023), yakın ve uzak alan kaynaklı depremlere maruz bırakılan, farklı uzunluklara sahip eksantrik çaprazlı kompozit kiriş-beton dolgulu boru kesitli kolon birleşimlerini sayısal analizlerle değerlendirmiştir. Kılıç vd. (2023), farklı üçgen geometrilere sahip T kesitli yarı rijit birleşimleri incelemiş; başlık ve gövde kalınlıklarının artmasıyla moment-dönme kapasitelerinin de arttığını raporlamıştır. Wang vd. (2023), dolgu duvarlı prefabrike çelik-betonarme elemanları sismik performansı artırıcı takviye sistemi olarak kullanmıştır. Cai vd. (2023) ise betonarme dolgulu boru kesitli profillerde donatı yerleşiminin etkisini, döngüsel yüklemelerle deneysel olarak değerlendirmiştir. Huang vd. (2024), kendi kendini merkezleyen şekil hafızalı alaşımlı (SMA) U kesitli sönümleyicilerin çelik çerçevelerin deprem performansına katkılarını araştırmıştır. Sarsma tablası deneyleriyle yapılan bu çalışmada, herhangi bir ilave güçlendirme yapılmadan yalnızca sönümleyici entegre edilerek önemli performans artışı sağlandığı belirlenmiştir. Woo vd. (2024), sürtünmeli sönümleyici elemanlarla güçlendirilmiş betonarme çerçeveleri hem deneysel olarak hem de sayısal analizlerle incelemiştir. Bulgular, sürtünmeli sistemlerin görelî kat ötelemesini %75, kat ivmesini ise %95 oranında azalttığını göstermiştir. Bu sonuç, yapının beklenen fonksiyonelliğini sürdürebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Öztürk vd. (2024), yuvarlak tipli taban izolasyon sistemlerinin çok katlı çelik yapıların sismik davranışına etkilerini değerlendirmiştir. Altı eksenli sarsma tablasında yapılan deneyler sonucunda, kat ivmesi ve yer değiştirme değerlerinin yaklaşık %50 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Shakeri vd. (2024), moment aktaran çelik çerçevelerin deprem performansını artırmak amacıyla, desteklenmemiş kiriş başlıklarını modifiye ederek azaltılmış kesitli kirişler kullanmıştır. Bu modüler sistemin, çerçevenin göçme modunu daha ileri safhalara taşıdığı görülmüştür.

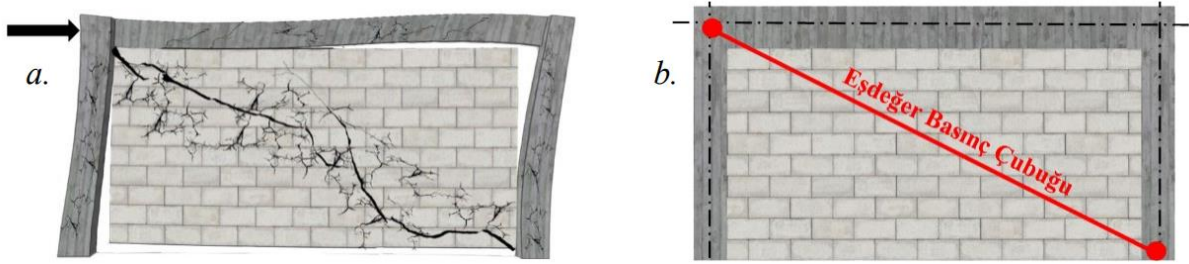
Literatürde yapılan çalışmalar çelik taşıyıcı elemanların burkulma boylarını sınırlandırması ve sönüm kapasitesini arttırması amacıyla merkezi ya da eksantrik çapraz

elemanlarıyla desteklendiğini göstermektedir. Ayrıca sismik performansın iyileştirilmesi için duvar ve beton gibi dolgu malzemelerinin kullanıldığı da belirlenmiştir. Son olarak sönümleyici ve taban izolasyon sistemleri gibi pasif kontrol elemanlarıyla da çelik çerçevelerin sismik performanslarının iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Çelik profillerin açıklanan özelliklerinin ve literatürde yapılan bazı çalışmaların dikkate alınmasıyla kutu en kesitli profillerin kiriş ve kolon olarak kullanılabileceği moment aktaran çelik çerçevenin tasarlanması bu tez kapsamında düşünülmüştür. Çünkü eğilme etkisi altında sadece akma sınır durumu ve başlık/gövde yerel burkulma sınır durumunun kullanılması kutu en kesitli profilin seçilmesinde etkili bir neden olmuştur. Ayrıca kutu en kesitli moment aktaran çelik çerçevelerin de sismik performanslarının geliştirilmesi için basınç etkisiyle çalışabilecek bir çapraz dolgu sistemine de ihtiyaç duyulduğu karşımıza çıkan önemli bir parametredir.

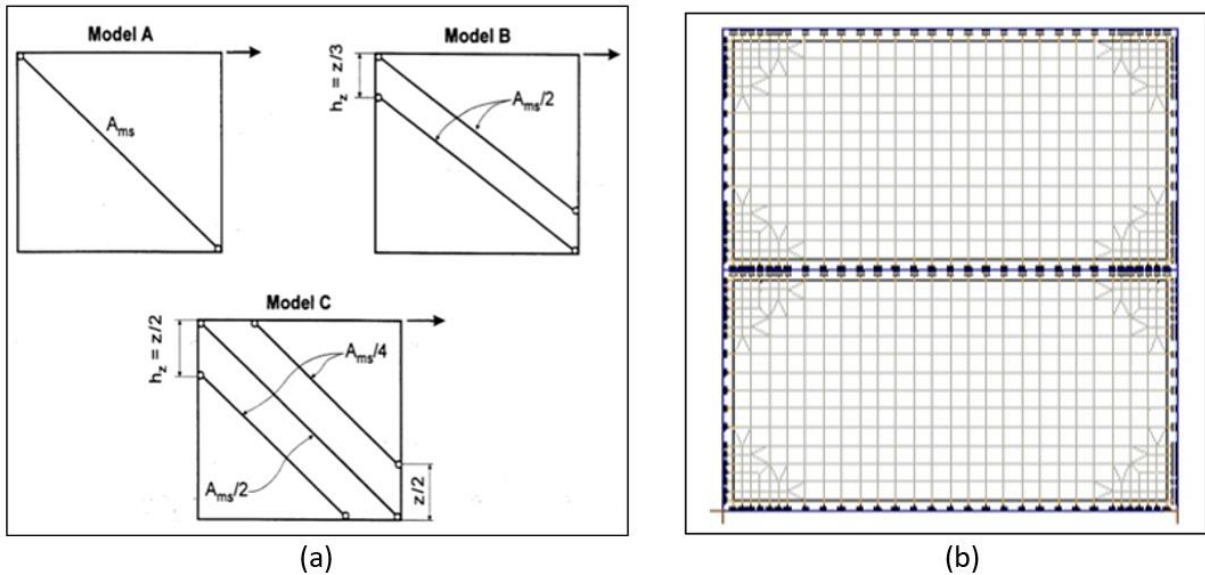
Dolgu Duvarlar

Yapı sistemlerinde dolgu duvarlar genel olarak iç ve dış bölme elemanı olarak kullanılmaktadır (Crisafulli 1997). Yapı tasarımı ve analizinde dolgu duvarlar taşıyıcı eleman olmadığı düşünüldüğü için göz ardı edilmektedir. Ancak dolgu duvarların yapıya ilave edilmesiyle birlikte sistemin periyodunu, kütle ve rijitliği arttırdığı yapılan bir dizi çalışmalarla ispatlanmıştır (Maganes ve Pampanin 2004). Dolgu duvarlar, yapıların dinamik parametrelerini etkiledikleri için hem yerel hem de global düzeyde göçme modlarını değiştirmektedir (Shing ve Mehrabi, 2002). Son yıllarda meydana gelen depremler, dolgu duvarların yalnızca bölme elemanı olarak değil, aynı zamanda yapısal performansa olumlu katkı sağlayan bir unsur olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Özellikle deprem etkisi altında, dolgu duvarların yapıya entegre edilmesi; sönüm oranını artırmakta, yanal rijitliği iyileştirmekte ve taşıyıcı elemanlarda oluşabilecek kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ile yer değiştirme değerlerini azaltmaktadır (Çelebi, 2018). Depremler sırasında yapılarda oluşabilecek düzensizliklerin ve hasarların azaltılmasında dolgu duvar kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Çelik veya betonarme yapılarda, deprem etkisiyle oluşan ilk hasarın genellikle dolgu duvarlarda başladığı, bunu kiriş ve kolon hasarlarının takip ettiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle dolgu duvarlar, yapıda adeta bir "yapısal sigorta" görevi üstlenmektedir (Memari ve Aliari, 2018). Özellikle bodrum veya zemin katlarında dolgu duvar bulunmayan binalar, orta ve büyük ölçekli depremlerde ciddi hasarlar almıştır (Beyen, 2015). Deprem sırasında ilk hasarın meydana geldiği dolgu duvarların göçme davranışı Şekil 6'da sunulmuştur. Bu hasarlar genellikle basınca bağlı çatlaklar şeklinde ortaya çıkmakta (Şekil 6a) ve bu durum dolgu duvarların yapı sisteminde eşdeğer bir basınç çubuğu gibi davrandığını göstermektedir (Şekil 6b). Dolgu duvarların yapısal sistem üzerindeki etkilerinin analizlerde dikkate alınabilmesi için

hem mikro hem de makro düzeyde modeller geliştirilmiştir. Makro modelleme yaklaşımında, dolgu duvarlar; duvarın eşdeğer kalınlığı ve mekanik özellikleri temel alınarak yapı sistemine eşdeğer basınç çubuğu olarak entegre edilir (Angel, 1994). Bu model, dolgu duvar davranışını sadeleştirerek temsil etmeyi amaçlar. Mikro modellemede ise, dolgu duvarın tüm karakteristik özellikleri — mekanik, fiziksel ve geometrik parametreleri — dikkate alınarak detaylı bir sonlu eleman modeli oluşturulur (Crisafulli, 1997). Bu yöntemde, duvar her bir bölgeye özgü olarak ele alınır ve daha gerçekçi ancak daha karmaşık bir analiz süreci gerektirir. Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenmesi, Şekil 7a'da sunulmuştur (Crisafulli, 1997). Bu modelde, çubuğun boyutları dolgu duvarın fiziksel, geometrik ve mekanik özelliklerine göre belirlenmektedir. Öte yandan, sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan ayrıntılı modelleme Şekil 7b'de verilmiş olup, bu yaklaşımda her bir sonlu elemana dolgu duvarın birebir özellikleri tanımlanarak gerçekçi bir simülasyon elde edilmektedir.



Şekil 6. Dolgu duvarın göçme modu; a) basınç çatlakları, b) eş değeri basınç çubuğu ile duvarın temsil edilmesi (Bayrak ve Bıkçe 2019)



Şekil 7. Dolgu duvar modelleri; a) eş değeri basınç çubuğu modeli (Crisafulli 1997), b) sonlu elemanlar modeli (Haris ve Hortobágyi 2007)

Deprem etkisi altındaki yapılarda dolgu duvarların yapısal sistemlerin sismik performansına etkisini inceleyen çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır. Bu bağlamda yapılan güncel araştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

D'Ayala vd. (2009), dolgu duvarı; tuğla ve harç özelliklerini içeren, "mezo model" olarak adlandırılan süreksiz ancak homojen kabul edilen bir malzeme modeliyle temsil etmiştir. Çalışma, dolgu duvar davranışının yalnızca basınç çubuğu modeliyle değil, daha genel simülasyon araçlarıyla modellenmesinin, yapılar içerisindeki yük aktarım yollarının doğru belirlenmesi açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur.

Alam vd. (2009), düzlem içi yanal yüklemeler altında dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin analizinde mikro model yaklaşımını kullanmıştır. Bu modelde, çerçeve ve dolgu duvar arasındaki etkileşim, normal ve kesme gerilmelerini aktarabilen arayüz elemanları aracılığıyla tanımlanmıştır. Sayısal sonuçlar, bu yöntemin nihai taşıma kapasitesini doğru biçimde öngördüğünü göstermiştir.

Ju vd. (2012), dolgu duvarlı çelik ve betonarme çerçevelerin sismik performansını deneysel ve sayısal yöntemlerle değerlendirmiştir. Çalışmada, duvar ile çerçeve arasında bırakılan derz boşluklarının hem çelik hem betonarme sistemlerde yatay rijitliği artırarak yumuşak kat oluşumunu engellediği belirlenmiştir.

Shan vd. (2016), 1/3 ölçekli, kısmen dolgu duvarlı betonarme çerçeveler üzerinde gerçekleştirdikleri deneylerle dolgu duvarların aşamalı göçme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgular, kısmi dolguların alternatif yük yolları oluşturarak göçme direnci ve süneklik kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Sakr vd. (2017), CFRP ile güçlendirilmiş yığma dolgu duvarlı betonarme çerçeveleri sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Sonuçlar, CFRP uygulamasının enerji yutma ve taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir.

Feng vd. (2017), dolgu duvarlarla birlikte çelik levha takviyeli perdelerin kullanımının yapı rijitliğini %103,17, enerji yutma kapasitesini ise %291,37 oranında artırdığını tespit etmiştir.

Borujeni ve Mahdi (2017), dolgu duvarların çelik çerçevelerden tamamen ayrıştırılması durumunda sismik performansın daha iyi olduğunu belirtmiştir.

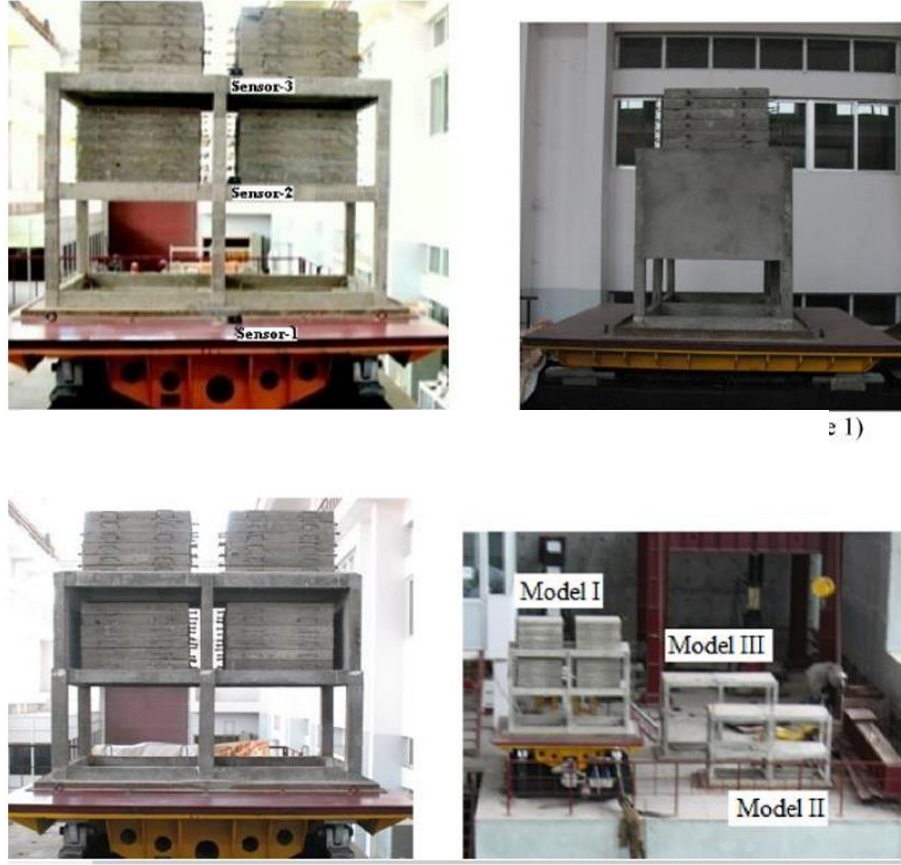
Budiwati vd. (2018) ise çapraz çelik elemanların sismik performansa katkısının, dolgu duvarlara kıyasla daha fazla olduğunu ortaya koymuştur.

Sarno vd. (2021), moment aktaran elik çerçevelerin dinamik davranışına dolgu duvarların etkisini belirlemek amacıyla hem nümerik analiz hem de dinamik testler gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, eşdeğer basınç çubuğu modelinin dolgu duvar davranışını başarıyla temsil ettiğini ve yer değiştirme değerlerini yaklaşık %40 oranında azalttığını ortaya koymuştur. Hasarların genellikle kiriş–duvar birleşimlerinde çatlaklar ve diyagonal basınç çatlakları şeklinde oluştuğu belirtilmiştir.

Furtado vd. (2020), dolgu duvarların deprem enerjisini sönümlemedeki potansiyelini değerlendiren çeşitli uygulamaları derlemiştir. Bu uygulamalar arasında ereve–duvar arasına boşluk bırakılması, enerji sönümleyici sistemlerin entegre edilmesi, kayma direncini artıracak detaylar ile TRM, FRP ve ferrosiment takviyeleri yer almaktadır.

Belghiat vd. (2021), mikro modellerle gerçekleştirdikleri statik itme ve zaman tanım alanı analizleri ile dolgu duvarların yapı performansına etkisini değerlendirmiştir. Bulgular, dolgu duvarların hem düşey hem yatay yük taşıma kapasitesini artırdığını; ayrıca, deprem anında ilk hasarı alarak diğer taşıyıcı elemanların korunmasına katkı sağladığını göstermiştir.

Borsaikia vd. (2021), farklı ölçeklerdeki model betonarme binalara sarsma tablası testleri uygulayarak geleneksel harçlı dolgu duvarların deprem performansına etkisini incelemiştir (Şekil 8). 18 farklı deprem kaydının kullanıldığı çalışmada, hâkim frekanslar ve bunlara karşılık gelen ivme değerleri analiz edilmiştir.



Şekil 8. Dolgu duvarlı çerçevelere deprem testlerinin uygulanması (Borsaikia vd. 2021)

Zhang vd. (2023), kayan derzlere ve boşluklara sahip dolgu duvarlı, yarı rijit birleşimli çelik çerçevelerin sismik davranışını incelemiştir. Çalışma sonucunda, kayma derzlerinin varlığına rağmen %3,3 görelî kat ötelenmesi oluşmasına karşın, tam dolgu duvarlı modellerle benzer hasar modlarının meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca, geliştirilen modelde boşluklu yapıların daha az hasara maruz kaldığı da gözlemlenmiştir.

Yu vd. (2023), plastik mafsal oluşumuna izin veren dolgu duvarlı çelik çerçevelerin sismik davranışlarını değerlendirmiştir. Bulgular, dolgu duvarların kat ivme değerlerini %50 oranında, kat yer değiştirme değerlerini ise yaklaşık 18 kat azalttığını ortaya koymuştur.

Literatürdeki çok sayıda çalışma, dolgu duvarların çelik ve betonarme taşıyıcı sistemlerin sismik performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, bu duvarlara yönelik yapılan çeşitli güçlendirme uygulamaları, yapıların deprem performansını daha da artırmaktadır. Elde edilen bulgular, dolgu duvarların yapısal sistemlerde bir tür “yapısal sigorta” görevi gördüğünü ortaya koymuştur. Deprem etkisi altında, ilk hasarın genellikle dolgu duvarlarda meydana gelmesi; buna karşılık, kolon ve kiriş gibi ana taşıyıcı elemanların elastik bölgede kalabilmesi, bu durumu desteklemektedir.

Bu bağlamda, dolgu duvarların sönümleme potansiyelini artırmaya yönelik yeni çalışmalar yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Tez kapsamında, taşıyıcı sistem ile dolgu duvarlar arasında derz boşluğu bırakılarak bu etki araştırılmıştır. Ancak mevcut literatürde, dolgu duvarları birbirine bağlayan harç malzemelerine yönelik yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu tezde uygun harç malzemesinin seçimi ve uygulanmasına yönelik detaylı bir inceleme de gerçekleştirilmiştir.

Geopolimer Beton Harçları

Günümüzde hızla artan nüfusa bağlı olarak sanayileşme ve kentleşme oranları yükselmektedir (Si vd. 2020). Bu artış, karbondioksit (CO_2) salınımı ile doğal kaynaklara dayalı enerji tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır (Sarkar ve Dana 2021; Nodehi vd. 2022). İnşaat sektörü, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %35'ini oluşturmakta olup, beton harçlar ve tuğla gibi yapı malzemeleri CO_2 salınımına doğrudan katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan atıklar çevresel kirliliği artırarak, küresel düzeyde ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Sarkar ve Dana 2021; Stocker 2013).

Bu sorunlara çözüm üretmek amacıyla, inşaat mühendisleri çimento, su, agrega ve kimyasal katkılarla üretilen geleneksel betonlara alternatif olarak geopolimer betonları geliştirmiştir (Davidovits 2020). Sürdürülebilir inşaat malzemesi arayışında olan araştırmacılar, CO_2 salınımını azaltan bağlayıcılar olarak uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ve kuvars tozlarını çimentoya alternatif olarak önermektedir (Turner ve Collins 2013; Zhou vd. 2024; Zhu vd. 2021). Geopolimer betonlarda agrega olarak dere agregası, kuvars kumu, doğal ve hafif agregalar kullanılmaktadır (Medri vd. 2020; Rosi vd. 2013).

Geopolimer betonlar, düşük enerji tüketimi ile öne çıkan ve SiO_2 ile Al_2O_3 içeren uçucu kül, fırın cürufu ve metakaolin gibi bağlayıcıların alkali aktivatörlerle reaksiyona sokulmasıyla elde edilmektedir (Bai vd. 2018). Bu süreçte yaygın olarak kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileridir (Sun vd. 2011). Şekil 9'da, geopolimer harçların üretim aşamaları şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 9. Geopolimer harçların üretim aşamaları (Öz vd. 2022)

Literatürde, geopolimer harçların üretimi ile fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik birçok çalışma mevcuttur. Öz vd. (2022), kuvars ve metakaolin esaslı geopolimer betonun mikroyapısını ve radyasyona karşı dayanımını incelemiş; hazırlanan betonun maksimum basınç ve eğilme dayanımlarının sırasıyla 160 MPa ve 8,8 MPa olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu betonun nötron ve gama ışını radyasyonlarına karşı yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir.

Kaplan vd. (2022), düşük kür ortamında uçucu külün bağlayıcı, kuvarsın agrega ve alkali aktivatörlerin NaOH ile Na₂SiO₃ içerikli olarak kullanıldığı karışımlarda üretilen geopolimer harçların, maksimum 60 MPa basınç ve 10 MPa eğilme dayanımı sağladığını bildirmiştir. Daha düşük enerji tüketimi ve CO₂ salınımı açısından geliştirilen bu karışımın geleneksel betona alternatif olabileceği doğrulanmıştır.

Kaplan vd. (2023), diatomit ve atapulgit esaslı geopolimer köpük betonun fiziksel, mekanik, ısı yalıtımı ve dayanım özelliklerini farklı kür sıcaklıklarında incelemiş; üretilen harcın bir yalıtım malzemesi olarak da kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklıklarda (900 °C) 5 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

Bayrak vd. (2023), metakaolin bağlayıcı ve koral agrega içeren karışımların alkali aktivatörle çözülmesiyle elde edilen geopolimer harçların mekanik, durabilite, mikroyapı ve karbon ayak izi özelliklerini incelemişlerdir. 80 °C’de 8 saat kürlenen harcın 80 MPa basınç dayanımına ulaştığı; CO₂ emisyonlarının 328–340 kg CO₂/kg aralığında, maliyetinin ise 411–

442 USD/m³ arasında değiştiği rapor edilmiştir. Bu harcın prefabrik ve yapısal beton malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kılıç vd. (2023), modüler sistemlere uygun, atık miktarı düşük, hafif elik yapılarla birlikte kullanılabilen geopolimer betonların kompozit yapı elemanı olarak davranabildiğini bildirmiştir. Böylece daha az atık üreten, yüksek dayanımlı ve CO₂ salınımını azaltarak enerji verimliliği sağlayan bir kompozit yapı elemanı geliştirilmiştir.

Maranhao vd. (2023), atık geopolimer tozu ve kireç katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiş, sonuçları makine öğrenmesi modelleriyle desteklemişlerdir. 80 C’de 12 saat krlen bu harçların, taşıyıcı sistem elemanlarında kullanılabilecek yeterli yapısal dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, mermer tozu ve atık kolomonit içeren geri dönüşümlü geopolimer harçların da geleneksel betonlara alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır (Bayrak vd. 2023).

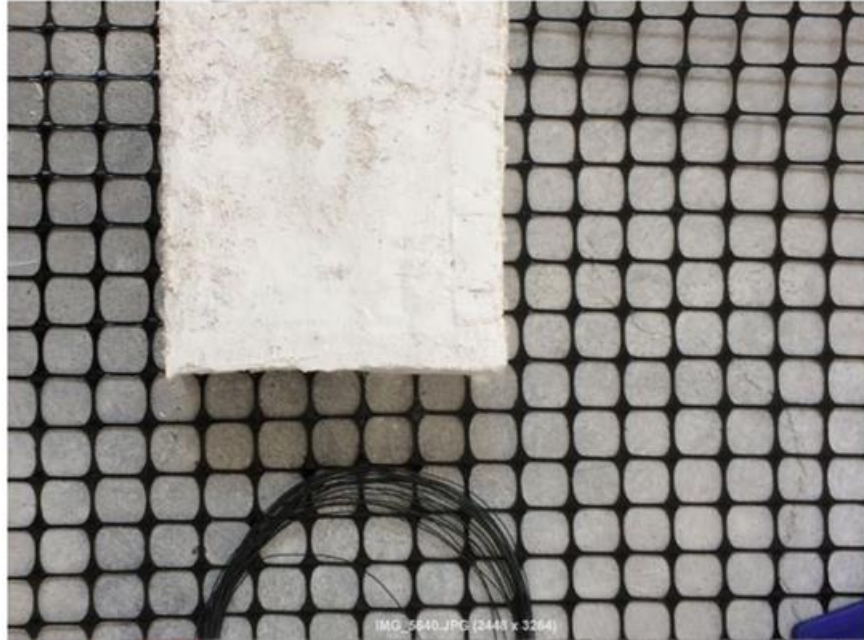
Alcan vd. (2024), mermer tozunun agrega, ğtlm yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olarak kullanıldığı ve alkali aktivatörlerle çözeltiye sokulan karışımların farklı kr sıcaklıklarında fiziksel, mekanik ve maliyet analizlerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca cam ve karbon fiber takviyesinin bu karışımların özelliklerine etkisi araştırılmış; fiber katkısıyla eğilme dayanımında %397, deformasyon kapasitesinde ise %657 artış elde edilmiştir. CO₂ salınımının da %29 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Danish vd. (2024), kuaterner karışımlı geopolimerlerin farklı kr sıcaklıkları altındaki performanslarını değerlendirmiştir. Mermer tozu ve beton atıklarının geri dönüştürülerek yeniden yapı malzemesi olarak kullanılabileceği gösterilmiş, bu yaklaşımın evre kirliliğini azaltarak sürdürülebilir yapılaşmaya katkı sunduğu vurgulanmıştır.

Yukarıda aktarılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, sürdürülebilir evre hedefleri doğrultusunda geliştirilen geopolimer betonlar; düşük enerji tüketimi, düşük CO₂ salınımı ve yüksek mekanik dayanım özellikleriyle geleneksel betonlara alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca literatürde, geopolimer harçların güçlendirme ve yapı-deprem ilişkisini irdeleyen çalışmalara da yer verilmektedir.

Kılıç vd. (2023), soğuk şekillendirilmiş elik-geopolimer kompozit yapı elemanlarının eğilme momenti, kesme dayanımı ve burulma momenti üzerindeki etkilerini incelemiş; geopolimer harçların bu özellikleri önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Maraş ve Köse (2021), geopolimer kompozitleri dolgu duvarların güçlendirilmesinde kullanmışlardır. Polipropilen takviyeli geopolimer harçlarla hazırlanan dolgu duvarların (bkz. şekil 10) basınç

dayanımı ve süneklik kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmada uçucu kül bağlayıcı malzeme olarak, alkali aktivatörler ise çözelti olarak kullanılmıştır.



Şekil 10. Polipropilen fiberler takviyeli geopolimer harçlar (Maraş ve Köse 2021)

Maraş (2021), yığma duvarların güçlendirilmesinde stiren-bütadien lateks katkılı geopolimer harçları kullanmıştır. Bu harçlar, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karışımından oluşan bağlayıcıların NaOH ve Na_2SiO_3 içeren alkali aktivatörlerle çözündürülmesiyle elde edilmiştir. Lateks katkılı geopolimer harçla güçlendirilen dolgu duvarlara basınç testleri uygulanmış ve sonuç olarak duvarların basınç dayanımının yaklaşık %40 oranında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, güçlendirme malzemesi olarak kullanılan harcın yüksek viskozitesi, dayanımı ve çevre dostu yapısı, dolgu duvarlara çeşitli performans avantajları sağlamıştır.

Choudhury ve Laskar (2022), betonarme kolon-kiriş birleşimlerinin güçlendirilmesi amacıyla geopolimer harç (GM) ve çelik fiber takviyeli geopolimer harç (GMSF) kullanımını incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre, GMSF; süneklik, enerji sönümleme kapasitesi ve hasar indeksi bakımından daha üstün performans sergilemiş, buna karşılık GM'nin güçlendirme açısından yetersiz kaldığı belirlenmiştir.

Li vd. (2024), bağlayıcı olarak uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun, agrega olarak ise ateş tuğlası atıklarının kullanıldığı bir geopolimer harç karışımını betonarme bir yapıda beton malzemesi olarak uygulamışlardır. Söz konusu karışım, alkali aktivatörlerle çözülerek hazırlanmıştır. Elde edilen geopolimer betonarme çerçeve ile geleneksel betonarme çerçeveye sarsma tablası deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları, her iki sistemin benzer sismik performansa sahip olduğunu, her iki yapıda da birinci kat giriş uçlarında plastik

mafsallar oluştuğunu göstermiştir. Ancak geopolimer betonarme çerçevenin daha rijit bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir (Li vd. 2024).

Literatürde elde edilen bulgular, geopolimer harçların sürdürülebilir yapı malzemesi olarak kullanılması durumunda hem çevresel etkilerin azaltılabileceğini hem de daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, geopolimer harçların dolgu duvar birleşimlerinde tercih edilmesi; elik çerçeveli yapıların deprem performansını iyileştirmek, CO₂ salınımını azaltmak ve düşük enerji tüketimli yapılar geliştirmek açısından önemli bir çözüm olarak önerilmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

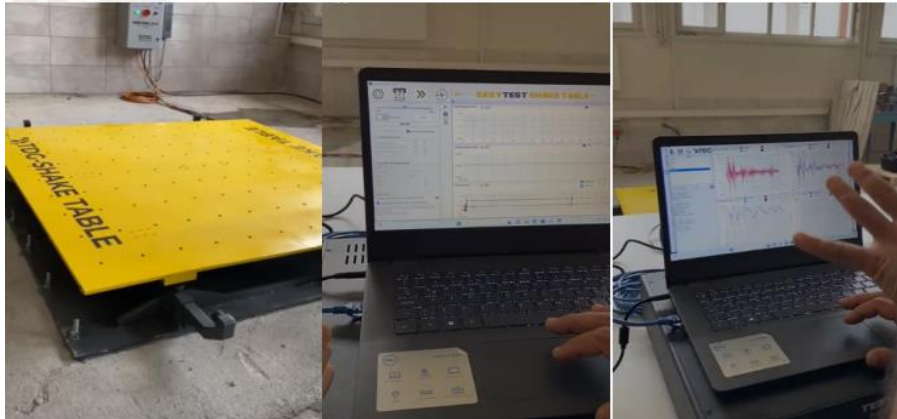
Deney Yöntemi

Geopolimer harçlı çelik çerçevelerin sismik davranışının tespiti için bir dizi deprem senaryolarının etkisi altında sarsma tablası deney yöntemi kullanılmıştır. Sarsma tablası servo-elektrikli aktüatörlü, 2000 mm x 2000 mm boyutlarına sahip, 1,5 ton düşey yük kapasitesine, 200 mm hareket boyuna, maksimum boş tabla ivmesi 4g, maksimum hızı 500 mm/sn ve 1g deprem ivmesi yükleme kapasitesine sahiptir (Şekil 11).



Şekil 11. Deneylerde kullanılan sarsma tablası

Sarsma tablasının kullanılmasıyla ilgili deprem senaryoları sarsma tablası yazılım arayüzü (Şekil 12) ile yapı sistemine ivme verisi olarak verilmiştir. Deprem etkilerinin yapıya verilmesinden sonra yapıdan alınan ivme ve yer değiştirme tepkileri veri toplama ünitesinde elde edilerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 13'te gösterilen veri toplama ünitesi 16 kanallıdır. Aynı anda yer değiştirme, ivme ve şekil değiştirme ölçer sensörleri bağlanabilmektedir. Veri toplama ünitesi hem statik hem de dinamik ölçümler için uygundur.



Şekil 12. Sarsma tablası yazılım programı



Şekil 13. Veri toplama ünitesi

Deprem etkisinde yapıda oluşan ivme değerleri Şekil 14a’da gösterilen tek eksenli ve Şekil 14b’de gösterilen iki eksenli ivmeölçer sensörlerinden alınmaktadır. Tek ve iki eksenli ivmeölçerler $\pm 8g$ ivme kapasitesine sahip ve analog çıkış veren bu sensörden gelen verilerin sayısala dönüştürülebilmesi ve kaydedilebilmesi için 24-Bit, en az sensör kadar hassas sayısallaştırıcılar kullanılmalıdır. TESTBOX2010 tipi sayısallaştırıcılar ile birebir uyumludur. Bu ivme ölçerler düşük gürültülü ve düşük güç tüketimine sahiptir. Ayrıca yapı sağlığı izleme uygulamalarında da kullanılmaktadır.



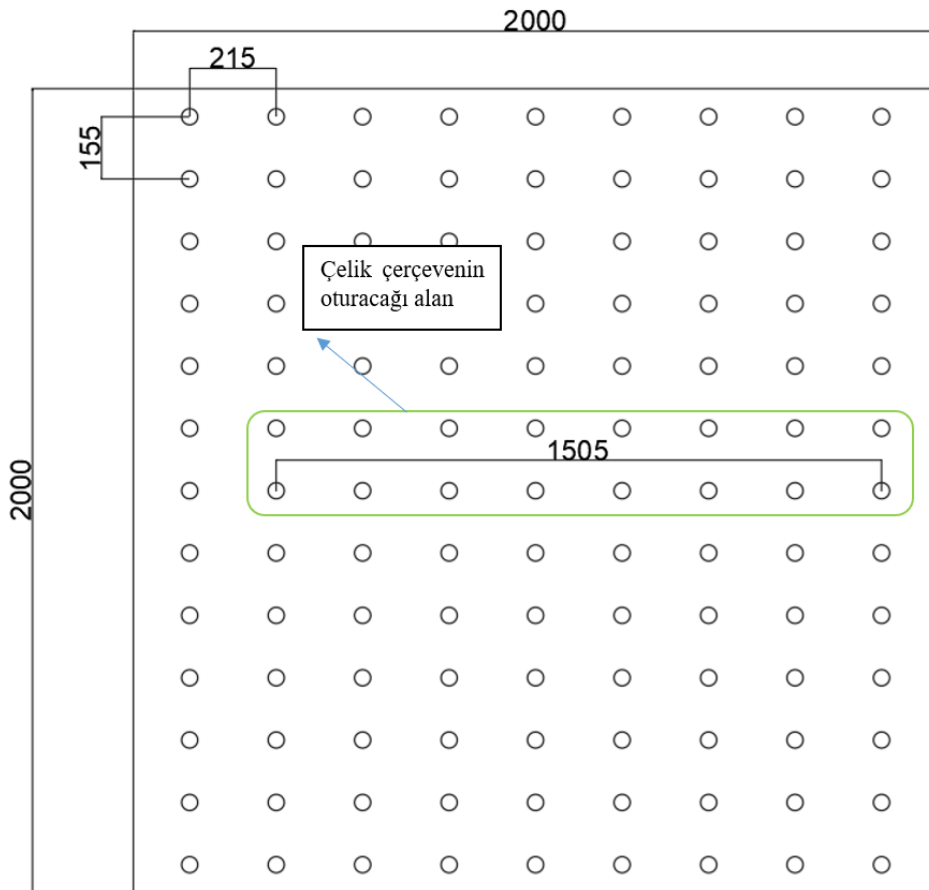
Şekil 14. İvme ölçerler; a) tek eksenli ivmeölçer, b) iki eksenli ivmeölçer

Yapıda deprem etkisiyle oluşan yer değiştirme değerleri LVDT (yer değiştirme ölçer) yardımıyla alınmıştır. LVDT’ ler 200 mm yer değiştirme kapasitesine sahiptir (Şekil 15).

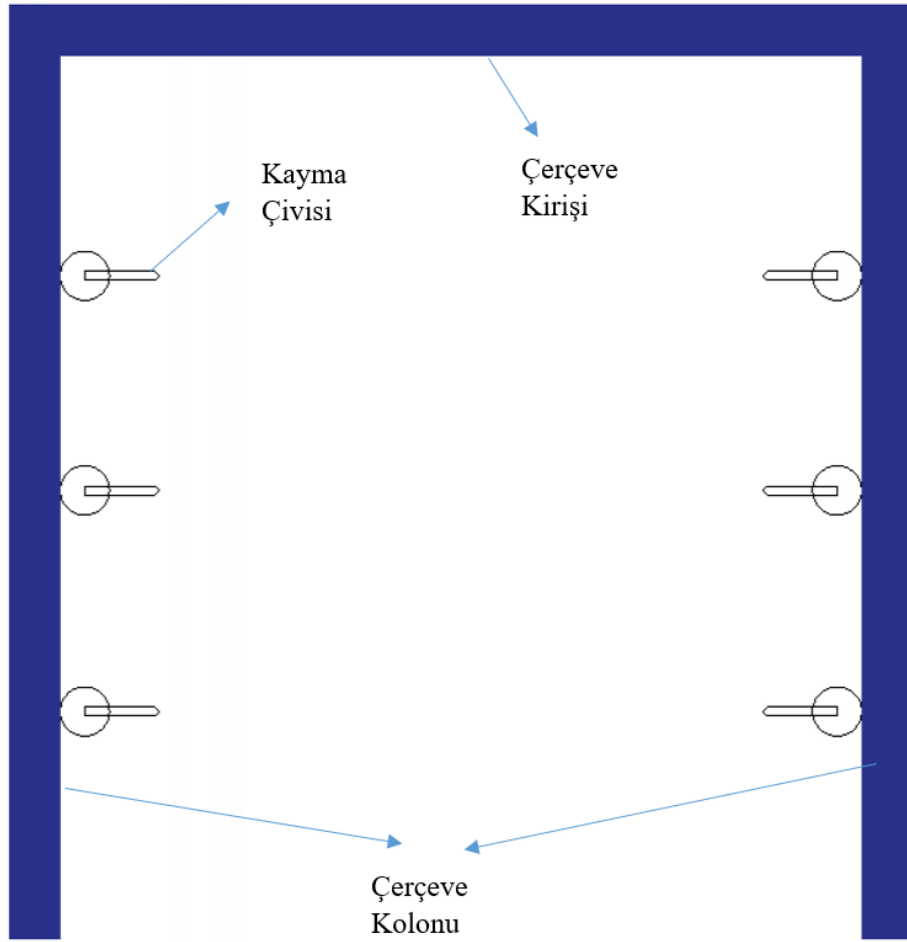


Şekil 15. LVDT (yer değıştirme ölçer sensor)

Şekil 16’da verilen sarsma tablası en, boy ve delik ölçüleri verilmiştir. Tez kapsamında oluşturulması planlanan çelik çerçeveler Şekil 16’da verilen ölçülere göre hazırlanmıştır. İlk olarak rijit birleşimli iki tane çerçeve modeli tasarlanmıştır. Çerçeve modellerinde dolgu duvarların titreşim etkisi altında kayma yapmaması için 355 mm aralıklarla her iki tarafta da kayma çivileri kullanılmıştır (Şekil 17). Kayma çivileri ile hazırlanan çerçevelerde dolgu duvarlar birbirlerine geopolimer ve geleneksel beton harçları ile birleştirilmiştir.

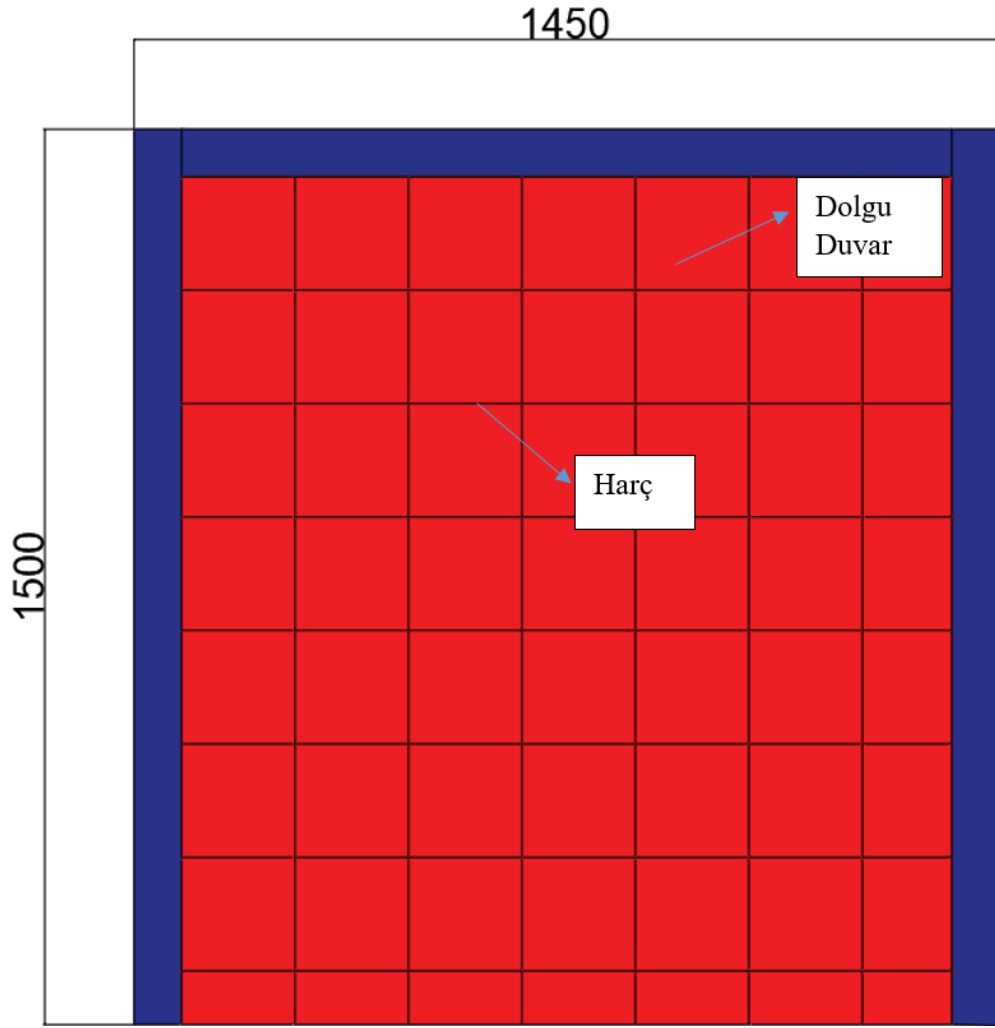


Şekil 16. Çelik çerçevelerin sarsma tablasında yerleşim bölgesi

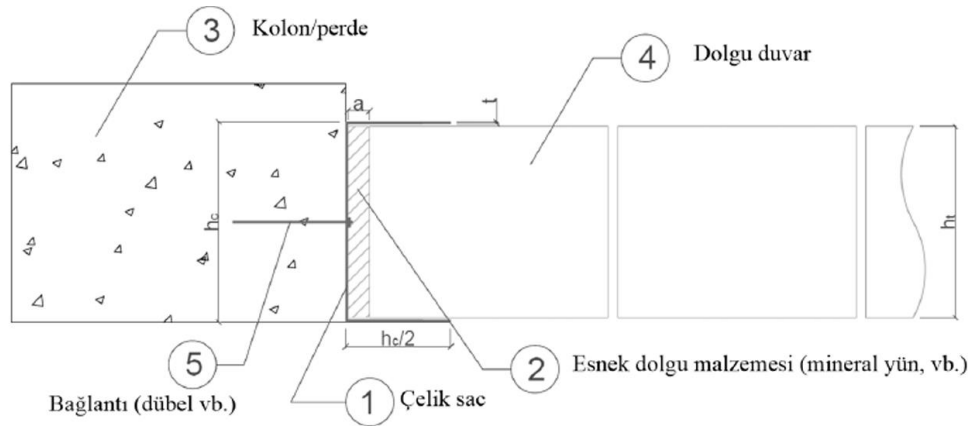


Şekil 17. Çelik çerçevelerin kayma çivileri ile hazırlanması

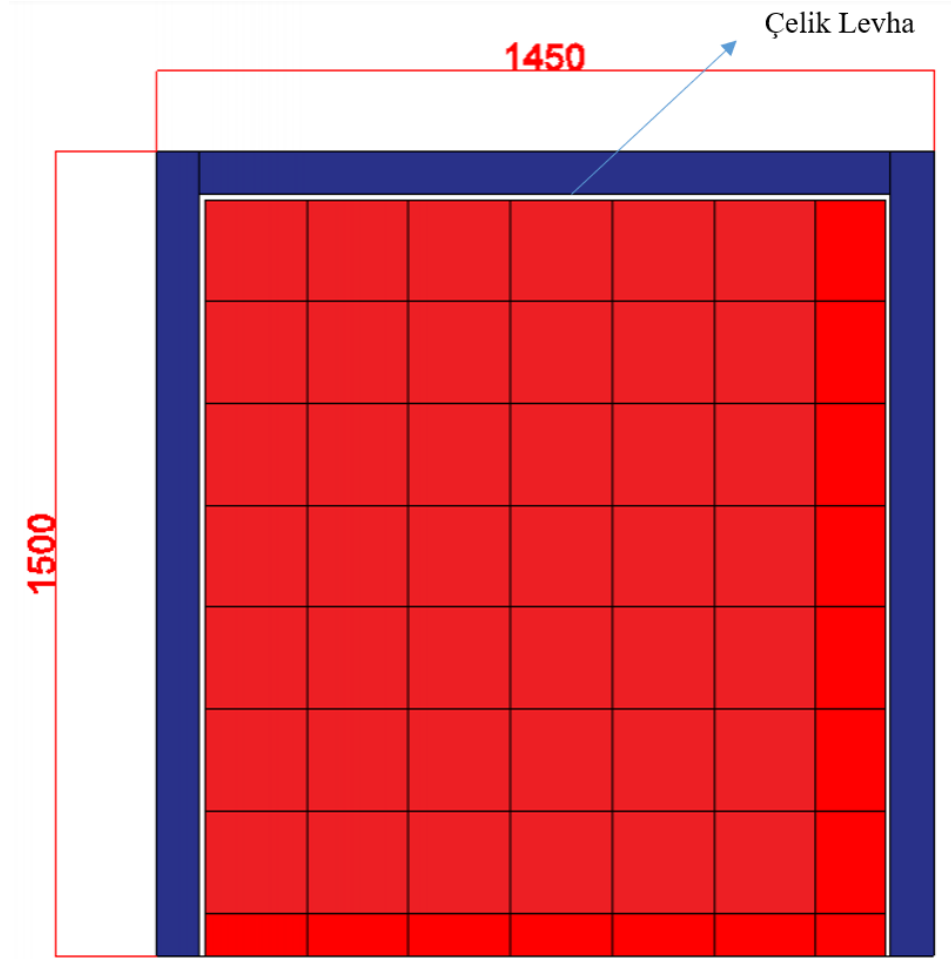
Şekil 18’de yüksekliği 1,50 m ve bir doğrultuda ki açıklığı 1,45 m olan rijit birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeve sistemi verilmiştir. Burada harç olarak geopolimer ve geleneksel beton olmak üzere iki farklı harç türü kullanılmıştır. İkinci tip çerçeve modeli ise esnek birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeve modelidir. Çelik çerçeve modeli Şekil 19’da gösterildiği gibi kolon ile dolgu duvar arasında bir esnek derz bırakılarak hazırlanması planlanmıştır. Şekil 20’de bir çelik levha ile çelik kolon ve dolgu duvar arasında yaklaşık 2 cm kalınlığında boşluk bırakılarak dolgu duvarlı çelik çerçeve modeli oluşturulmuştur. Dolgu duvarları birleştirmek için kullanılan harçlar geopolimer ve geleneksel beton olarak tasarlanmıştır. Şekil 21’de dolgu duvarlar ile çelik çerçeve sistemi arasında esnek birleşim oluşturan 2 mm kalınlığa sahip çelik levha şablonu sunulmuştur. Kolon bölgelerinde 3 ve kiriş bölgelerinde 2 boşluk bırakılacak şekilde çelik levha şablonu oluşturulmuştur. Levhalar kolon v kirişlere boşluklar sayesinde dübellenmiştir. Rijit birleşimde kayma çivilerinin aralığı kadar bulonlar arası mesafe bırakılmıştır.



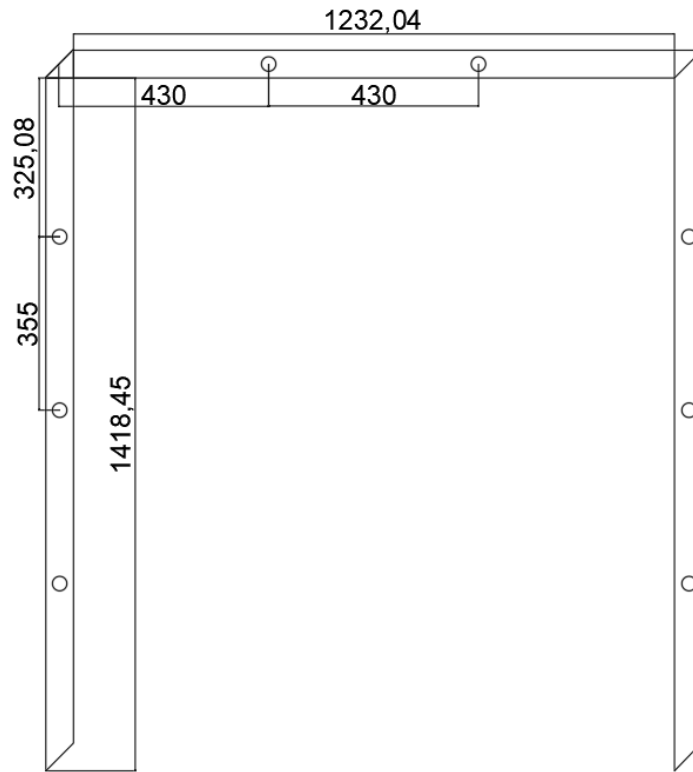
Şekil 18. Rijit birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeve



Şekil 19. Esnek derzin bırakılmasıyla dolgu duvarların çelik kolona bağlantısının yapılması

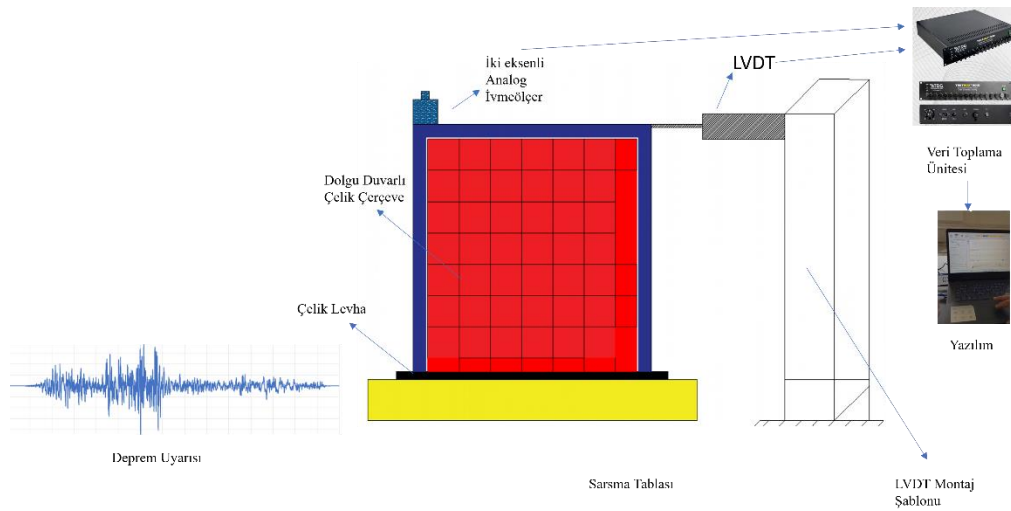


Şekil 20. Esnek derzli dolgu duvarlı çelik çerçeve modeli



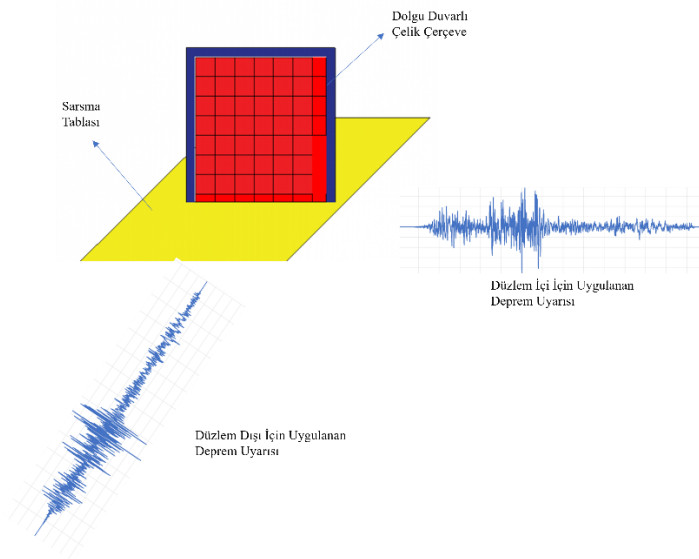
Şekil 21. Esnek birleşimde kullanılan çelik levha detayı

Tasarlanan rijit birleşimli ve geleneksel beton harçlı model (RBBGH), rijit birleşimli ve geopolimer harçlı model (RBGH), esnek derzli ve geleneksel beton harçlı model (EDBBH) ve esnek derzli ve geopolimer harçlı model (EDGH) Şekil 22’de deney düzeneği gösterilen sistemde test edilmesi planlanmıştır. Tüm modeller düzlem içi ve düzlem dışı olarak sarsma tablasında bir dizi deprem senaryosunun kullanılması suretiyle deprem testlerine maruz tutulmuştur. Deney düzeneğinde 8g ivme kapasitesine sahip analog iki eksenli ivmeölçer ve 200 mm yer değiştirme kapasitesine sahip yer değiştirme ölçer kullanılmıştır. İvme ölçerler hareket doğrultusuna göre tüm çerçevelerde tepe noktasına ve LVDT’ler de yine hareket doğrultusunda çerçevenin tepe noktasına yerleştirilmesi planlanmıştır.



Şekil 22. Dolgu duvarlı çelik çerçevelerin testlerinde kullanılması planlanan test düzeneği

Her bir deney numunesine Şekil 23’te de gösterildiği gibi düzlem içi ve düzlem dışı olarak deprem uyarılarının verilmesi planlanmıştır.



Şekil 23. Dolgu duvarlı çelik çerçevelere uygulanan yüklemeler

Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Üretilen Numuneler

Tek açıklıklı çelik çerçevelerde kolon ve kiriş için 80x5 mm boyutlarında kutu en kesitli profiller S235 kalitesinde kullanılmıştır (TÇY 2016). Kolon ve kiriş birleşimleri moment aktaracak şekilde kaynaklı olarak tasarlanmıştır. Kaynaklar E480 kalitesinde tam penetrasyonlu küt kaynak olarak tercih edilmiştir (TBDY 2018). Çelik çerçeveler dolgu duvarların rijit ve esnek derz ile bağlı olacak şekilde iki farklı şekilde üretilmiştir. Rijit birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeve geopolimer ve geleneksel beton harçlı olarak ayrı ayrı üretilmiştir. Dolgu duvarlar her iki çerçeve türünde de 8 cm kalınlıklı delikli tuğla olarak tasarlanmıştır. Geleneksel beton ve geopolimer beton harç karışımları Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 3’te çelik profile ait mekanik özellikler ve Tablo 4’te tuğla duvara ait mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 2. Beton Karışım Oranları (gr/cm³)

Harç	Yüksek Fırın Cürufu (gr)	Su (gr)	NaOH (gr)	Na ₂ SiO ₃ (gr)	Kireç Taşı (gr)	Çimento (gr)	Dere Kumu (gr)
Geopolimer	750	150	64,35	160,65	1121	-	-
Geleneksel	-	200	-	-	-	350	1780

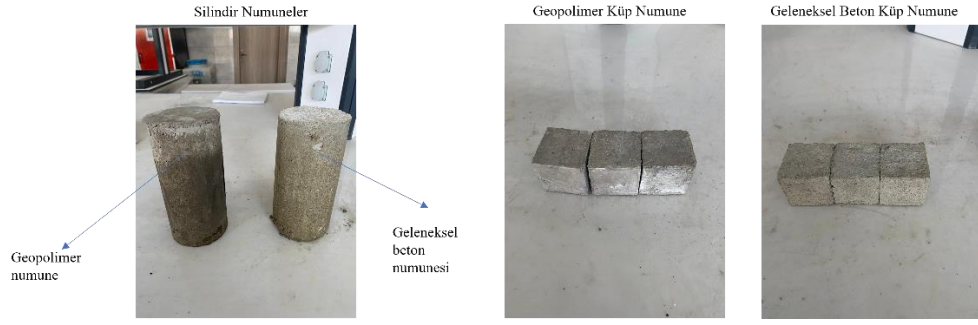
Tablo 3. Çelik Elemanlara Ait Mekanik Özellikler

	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Çelik Profil (80x5 mm)	235	360
Kaynak	400	480

Tablo 4. Tuğla Duvarın Mekanik Özellikleri

Tuğla Duvar (8 cm)	Elastisite Modülü (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kesme Dayanımı (MPa)
	2000	3,0	0,20

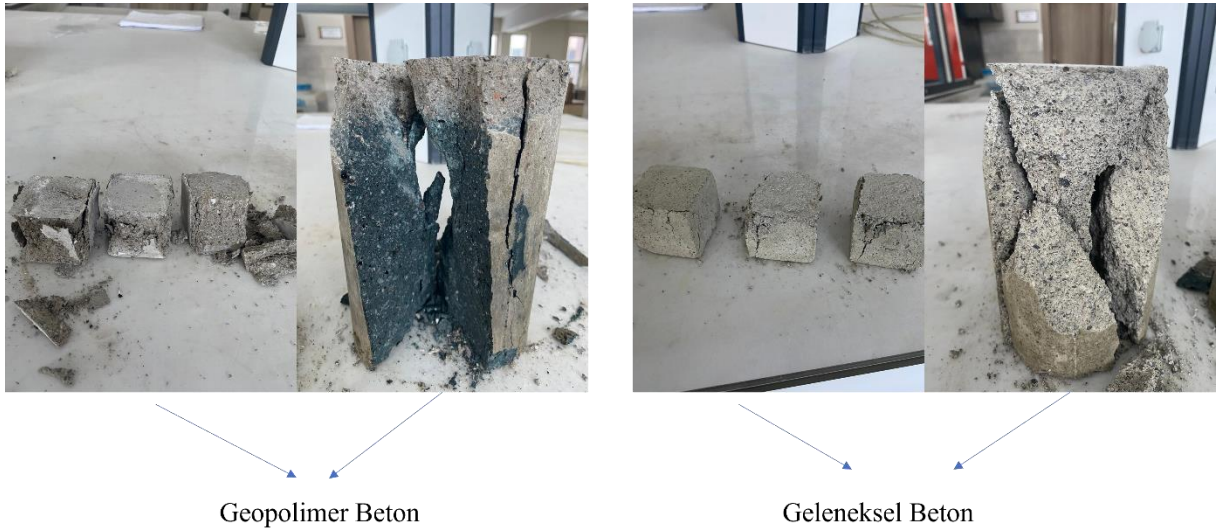
Geopolimer ve geleneksel beton harçları Tablo 2’de verilen karışım oranlarına göre küp (5x5x5 cm) ve silindir numuneler (10x20 cm) olarak hazırlanmıştır (TS EN 12350-6). Şekil 24’te gösterilen numuneler 3 küp ve 1 silindir olmak üzere hem geleneksel hem de geopolimer harçlarla hazırlanmıştır. Şekil 25’te de gösterildiği gibi silindir ve küp numunelere sertleşmiş beton deneyleri uygulanmıştır (TS 12390-7). Sertleşmiş beton deney sonuçları hem geleneksel hem de geopolimer harç basınç dayanımlarının yaklaşık 12-13 MPa arasında olduğunu göstermiştir. Deney sonuçlarında elde edilen numune görüntüleri geleneksel ve geopolimer harçlar için Şekil 26’da verilmiştir. Her iki harçla yapılmış beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlıkları 2,23 gr/cm³ olarak elde edilmiştir.



Şekil 24. Harç numuneleri



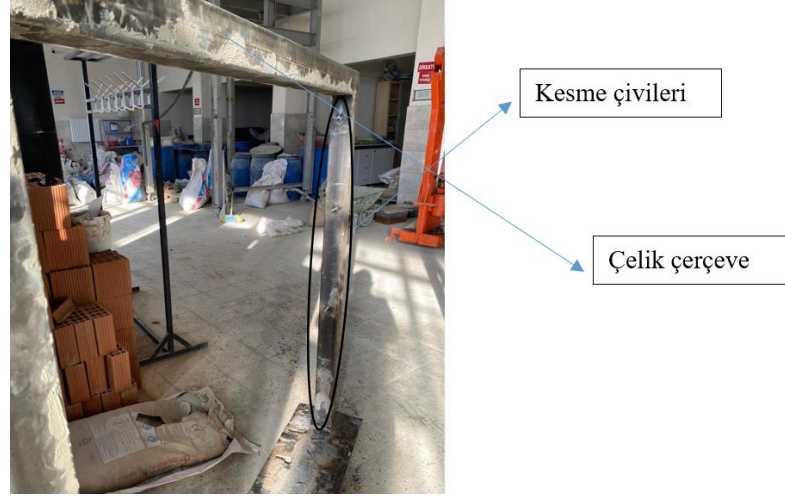
Şekil 25. Sertleşmiş beton deneyleri



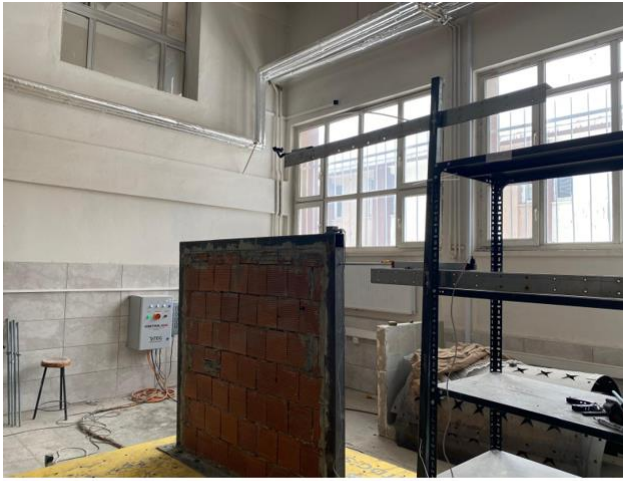
Şekil 26. Sertleşmiş beton deneylerinde numunelerin kırılmış halleri

Tez kapsamında belirtilen karışımlarla oluşturulan geleneksel ve geopolimer harçlı dolgu duvarlı çelik çerçeveler esnek ve rijit birleşimli olarak üretilmiştir. İlk olarak kolon ve kirişler kaynak yardımıyla birleştirilerek çelik çerçeve oluşturulmuştur. Daha sonra Şekil 17’de

gösterilen ölçülerle kesme çivileri her iki kolon elemana kaynaklanmıştır (Şekil 27). Geopolimer ve geleneksel beton harçlarla birleştirilen dolgu duvarlar Şekil 28’de gösterildiği gibi rijit olarak kolon ve kirişlere bağlanmıştır. Şekil 29’da gösterildiği gibi esnek derz birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeveler üretilmiştir. Bu çerçevelerde herhangi bir kesme çivisi kullanılmamıştır.



Şekil 27. Çelik çerçevenin kesme çivileri ile hazırlanması



(a)



(b)

Şekil 28. Rijit birleşimli dolgu duvarlı çelik çerçeveler; a) RBGBH, b) RBGH



(a)



(b)

Şekil 29. Esnek derzli dolgu duvarlı çelik çerçeveler; a) EDGBH, b) EDGH

Deprem Kayıtları

Tez kapsamında yapılan deneylerde Dünya genelinde meydana gelmiş büyük depremlerden 11 tanesinin verisi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan depremlere ait özellikler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Depremlere Ait Özellikler

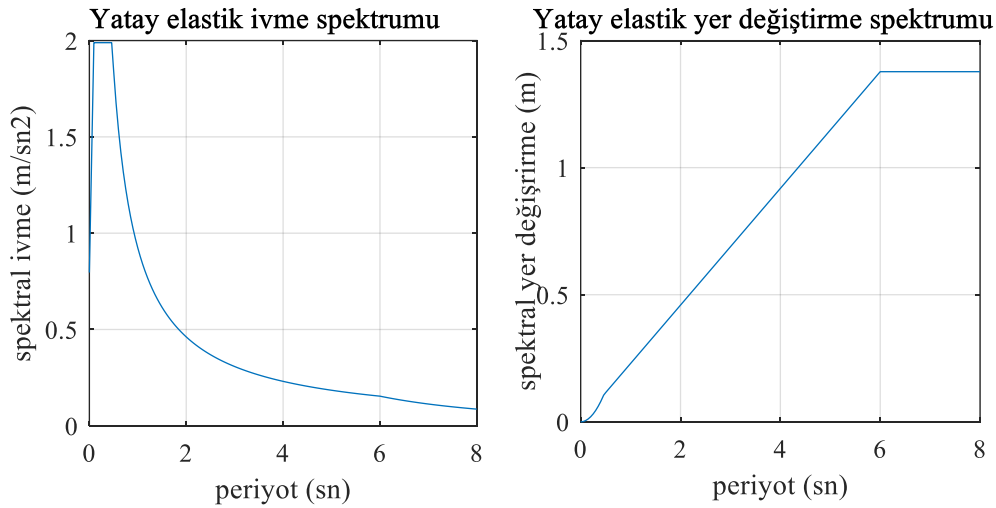
Deprem	Tarih	İstasyon	Enlem	Boylam	PGA (g)	Büyükklük (Mw)
Erzincan (erz)	13.03.1992	Erzincan Merkez	39.7159	39.6292	0,488	6,6
Gölcük (zm)	17.08.1999	Yarımca Petkim	40.756	29.955	0,235	7,6
Düzce (dz)	12.11.1999	Bolu Merkez	40.806	31.187	0,819	7,1
Afyon (af) (Sultandağı)	03.02.2002	Afyon Merkez	38.52	31.202	0,115	6,5
Bingöl (bn)	05.01.2003	Bingöl Merkez	38.9987	40.4637	0,511	6,3
Sivrice (sv)	24.01.2020	Sivrice	38.3593	39.063	0,298	6,8
Elbistan (el)	06.02.2023	Göksun	38.089	37.239	0,648	7,6
Pazarcık (pz)	06.02.2023	Pazarcık	37.288	37.043	2,07	7,7
Loma (lo)	17.10.1989	Loma Prieta	-	-	0,55	6,9
Kobe (kb)	17.01.1995	Kobe	34.5983	135.035	0,908	7,2
El-Centro (elc)	15.10.1979	İmperial	32.3700	111.1900	0,177	6,5

TBDY 2018’e göre yapılarda deprem kayıtlarının analizlerde kullanılabilmesi için etkin periyot aralıklarında deprem spektrumu ivme değerlerinin yatay elastik ivme spektrumu

değerlerini karşılaması gerekmektedir. Söz konusu yapıya ait yatay elastik ivme spektrumu TBDY 2018 kriterleri gereğince AFAD haritalarından (Türkiye Deprem Tehlike Haritası) elde edilmiştir (Şekil 30). Deneylerde kullanılan sarsma tablası tek yatay doğrultuda çalıştığı için deprem kayıtlarının X doğrultusunda ki yatay bileşenleri kullanılmıştır. Şekil 30'da gösterilen yatay elastik ivme spektrumu yapıya ait yerel zemin parametrelerinden elde edilmiştir. Çelik çerçeveler 39.9026 Enlem ve 41.2498 Boylam lokasyonlarında bulunduğu ve zemin sınıfının ZD olduğu kabul edilmiştir. Bu parametrelere göre AFAD haritalarından DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyleri için elde edilen yerel zemin parametreleri Tablo 6'da gösterilmiştir. Tablo 6'da S_{DS} kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı, S_{D1} 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı, S_s kısa periyot harita spektral ivme katsayısı, S_1 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı, PGA en büyük yer ivmesi ve PGV ise en büyük yer hızını temsil etmektedir.

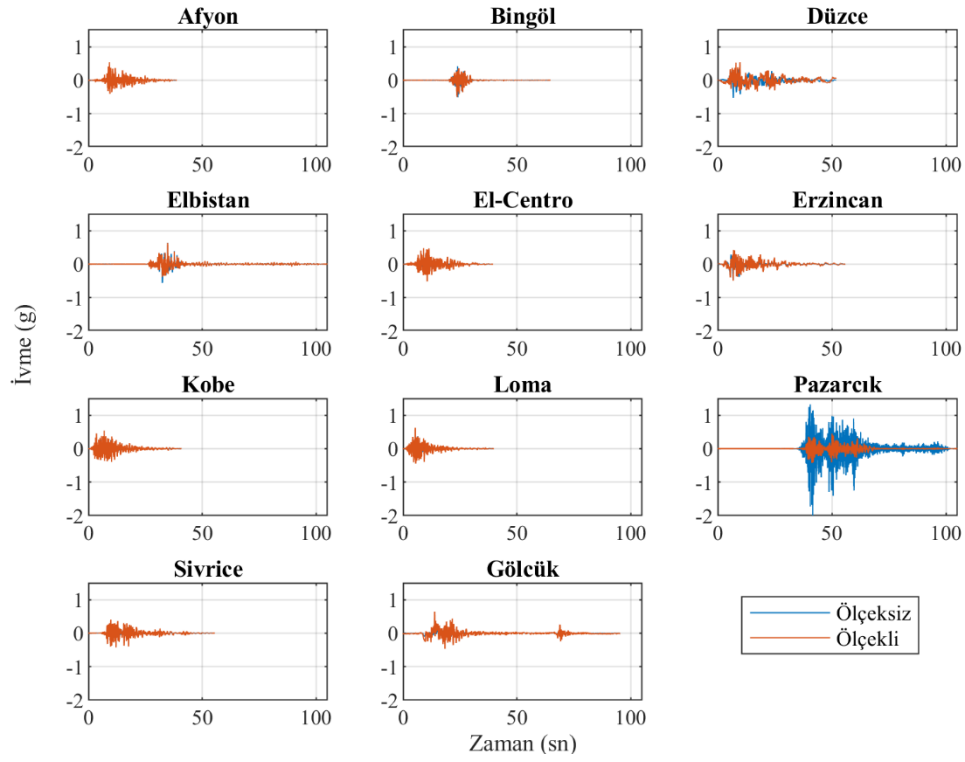
Tablo 6. Çelik Çerçevelere Ait Yerel Deprem Parametreleri

DYD	S_{DS}	S_{D1}	S_s	S_1	PGA (g)	PGV (cm/sn)
DD-1	1,989	0,923	1,989	0,518	0,798	49,155
DD-2	1,13	0,567	1,048	0,277	0,440	26,664



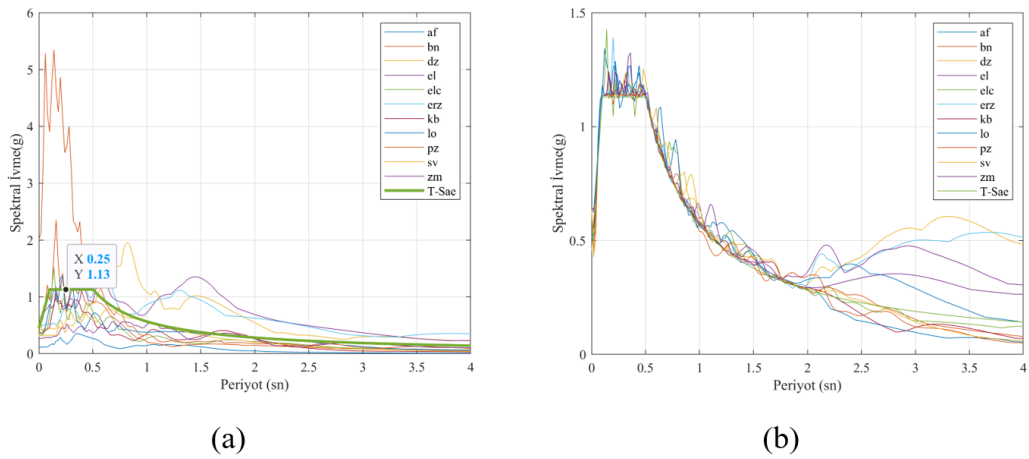
Şekil 30. Model çelik çerçevelerin yatay elastik spektrumları

Deprem kayıtları Şekil 30'da gösterilen yatay elastik ivme spektrum eğrisi ile eşleştirilerek ölçeklendirilmiştir (TBDY 2018). Şekil 31'de model çelik çerçevelerde kullanılacak olan depremlerin ölçeksiz ve ölçekli ivme zaman grafikleri verilmiştir.

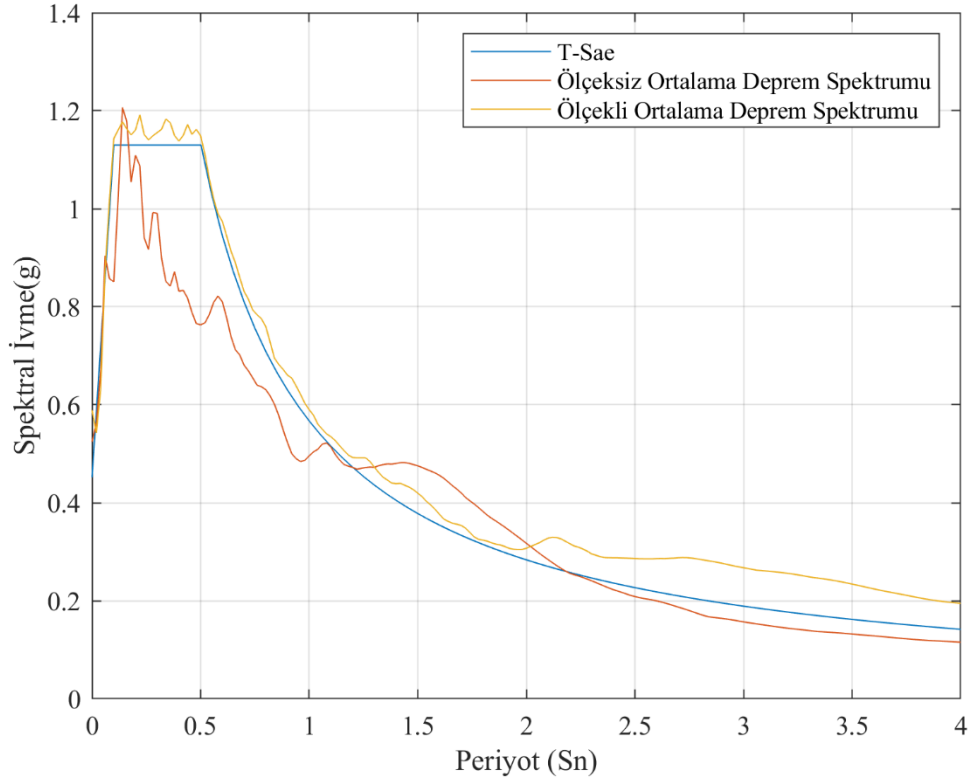


Şekil 31. Model çelik çerçevelerin sarsma tablası deneylerinde kullanılan depremlerin ölçeksiz ve ölçekli ivme zaman grafikleri

Şekil 32’de ölçeksiz ve ölçekli deprem ivme spektrumları ile yatay elastik ivme spektrumlarının birlikte çizilmiş hali sırasıyla verilmiştir. Şekil 33’te ise ölçeksiz ve ölçekli ortalama deprem ivme spektrumlarıyla yatay elastik ivme spektrumunun birlikte çizilmiş halleri sunulmuştur. Şekil 32 ve Şekil 33’ten yola çıkılarak ölçeklemenin yapılarak yatay elastik ivme spektrumuyla eşleştirildiği görülmüştür.



Şekil 32. Deprem ivme spektrumları; a) ölçeksiz, b) ölçekli



Şekil 33. Ortalama deprem ivme spektrumları

Sarsma tablası deneylerinde ortalama olarak yaklaşık 0,6g'den daha büyük deprem yer ivme değerleri ölçeklendirilmiş olarak kullanılmıştır. Bu depremlerin spektral ivme değeri olarak ortalama değeri yaklaşık olarak 1,15g'dir. Ölçekli olarak spektral ivme ve en büyük yer ivme değeri açısından Tablo 6'da yapıya özgü olarak gösterilen değerleri yeterince karşıladığı görülmektedir.

Zaman tanım alanında elde edilen deprem yer ivme değerleri ile rijit ve esnek derzli birleşimlere sahip dolgu duvarlı çelik çerçevelerde sarsma tablası deneylerinin uygulanması planlanmıştır. Her bir deney numunesi 11 farklı deprem yer hareketi etkisine ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Sarsma tablası deneyleri düzlem içi ve düzlem dışı olarak gerçekleşmesi düşünülmüştür. Deneylerde tepe ivme ve tepe yer değiştirme değerlerinin elde edilmesi planlanmıştır. Bu değerlerin değişmesinde geopolimer harçların, kesme çivilerinin ve birleşim türlerinin hangi oranda etki ettiği belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

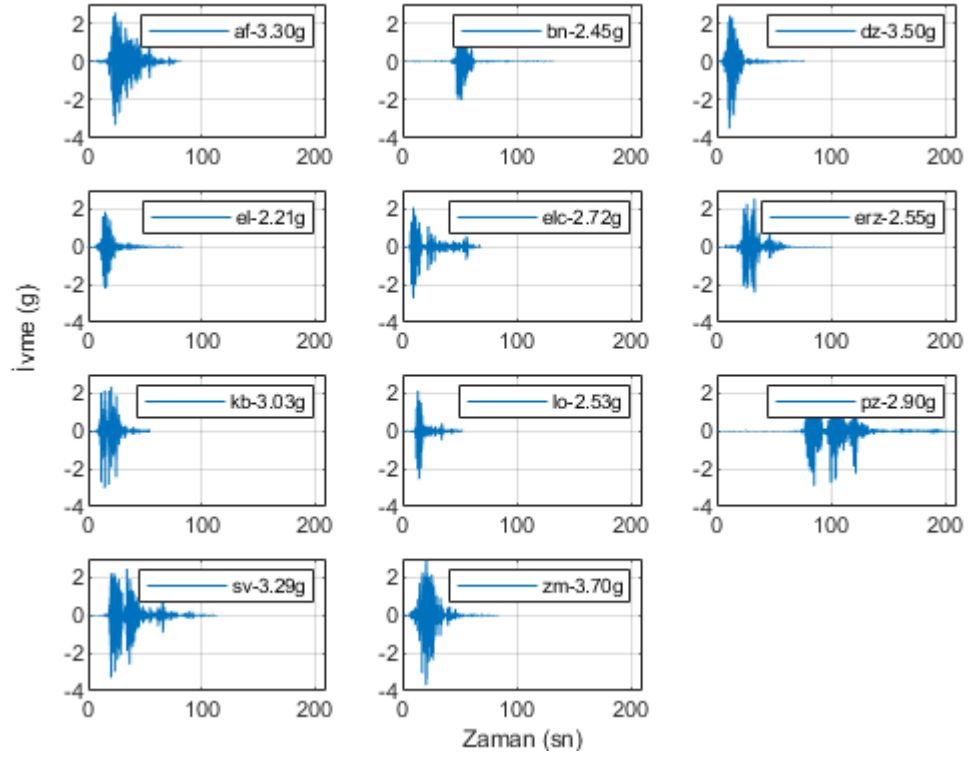
Tez kapsamında, farklı birleşim türlerine sahip dolgu duvarlı model çelik çerçevelerde depremlerden kaynaklanan tepe ivmesi ve dinamik tepe yer değiştirme değerleri analiz edilmiştir. Harç türünün değişimiyle birlikte periyot ve frekans gibi dinamik parametrelerde meydana gelen düzlem içi ve düzlem dışı yüklemelerinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, model çerçevelerde oluşan hasar mekanizmaları karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Tepe İvme Değerleri

Tepe ivme değerleri her bir model çelik çerçeve için düzlem içi ve düzlem dışı olarak elde edilmiştir. Bu ivme değerleri sarsma tablasının tek eksenli olmasından dolayı sadece göze alınan X doğrultusunda elde edilmiştir.

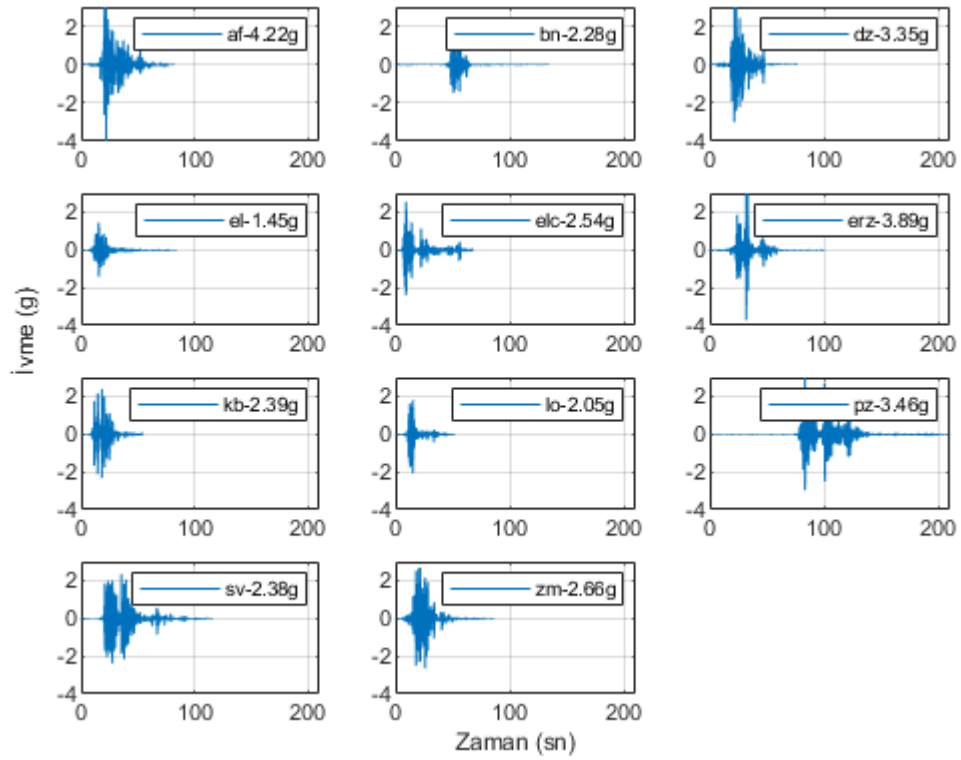
Düzlem içi tepe ivme değerleri

Tez kapsamında kullanılan sarsma tablası tek eksenli olduğu için yapının tepesinde X yönlü ivme kayıtları tüm depremler için alınmıştır. Şekil 34'te rijit birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevenin tepesinde oluşan düzlem içi ivme değerleri (RBGBHA0) zaman tanım alanında verilmiştir. Model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (3,70g) Gölcük depreminin (zm) ve en düşük ivme değerini (2,21g) Elbistan depreminin oluşturduğu tespit edilmiştir.



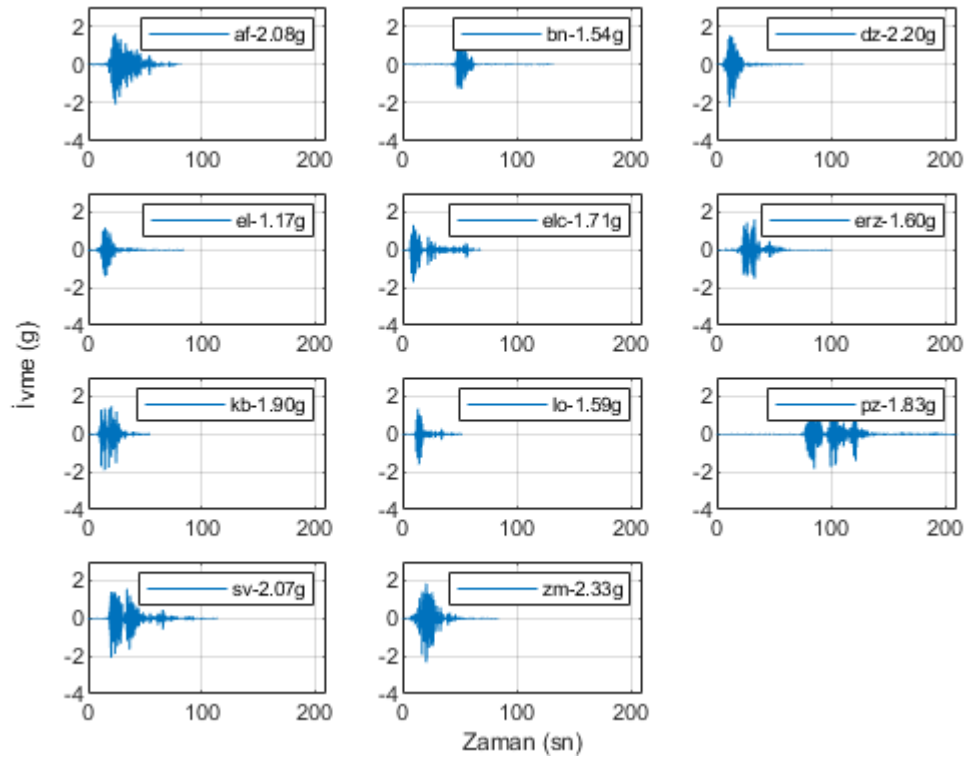
Şekil 34. RGBBHA0 tepe ivmesi değerleri

Şekil 35 rijit birleşimli geopolimer harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (RBGHA0) oluşan tepe ivme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (4,22g) Afyon depreminin en düşük tepe ivmesi değerini (1,45g) ise Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Afyon, Erzincan ve Pazarcık depremlerinin dışında geopolimer betonun harç olarak kullanılmasıyla rijit birleşimde tepe ivme değerlerini azalttığı izlenmiştir.



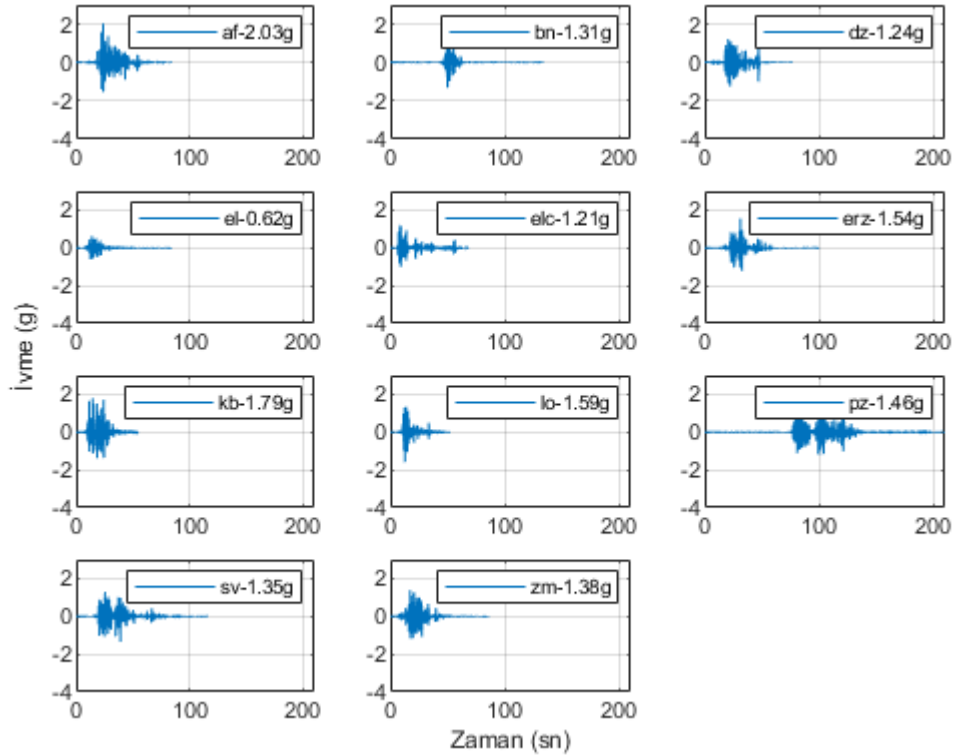
Şekil 35. RBGHA0 tepe ivmesi değerleri

Şekil 36 esnek derz birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGBHA0) oluşan tepe ivme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (2,33g) Gölcük depreminin en düşük tepe ivmesi değerini (1,17g) ise Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Esnek derz yapılmasının tepe ivmesi değerlerini rijit birleşimli modellere göre yaklaşık %40 oranında azalttığı tespit edilmiştir.



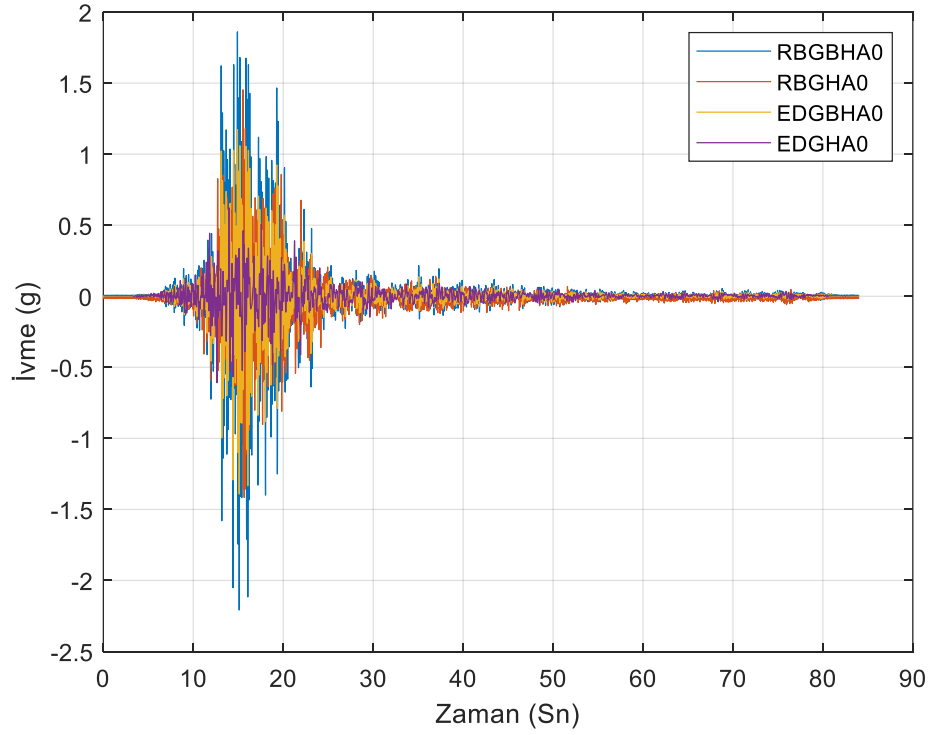
Şekil 36. EDGBHA0’da oluşan tepe ivmesi değerleri

Şekil 37 esnek derz birleşimli geopolimer beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGHA0) oluşan tepe ivme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (2,33g) Gölcük depreminin en düşük tepe ivmesi değerini (1,17g) ise Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir.

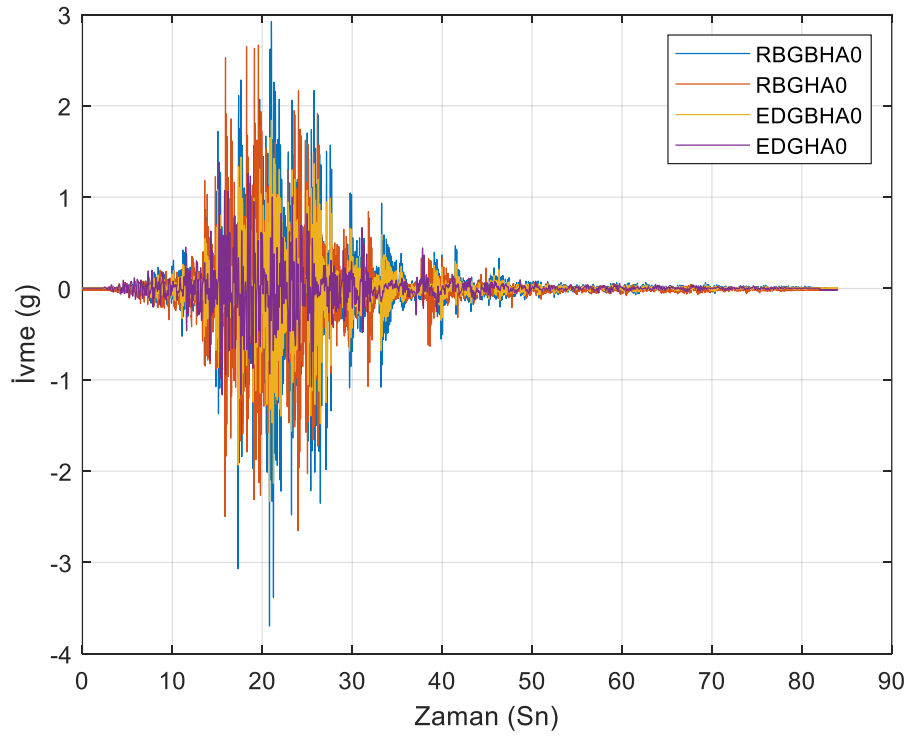


Şekil 37. EDGHA0 tepe ivmesi değerleri.

Esnek derzli birleşimlerde geopolimer beton harçların kullanılmasının geleneksel beton harçların kullanılmasına nazaran daha düşük tepe ivmesi değerleri elde edildiği sonucuna varılmıştır. Şekil 38’de minimum düzlem içi tepe ivme değerleri verilmiştir. Şekil 39’da ise maksimum düzlem içi tepe ivme değerleri verilmiştir.



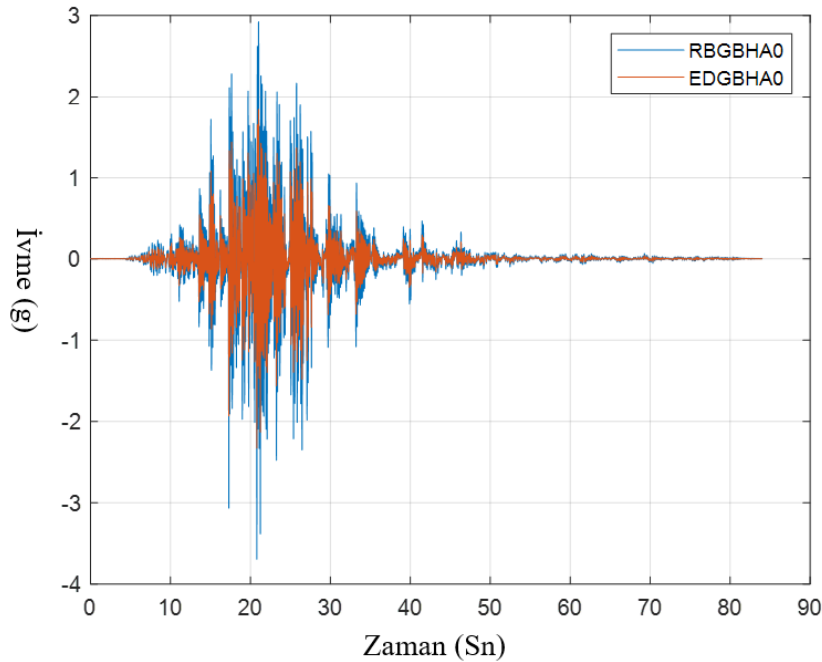
Şekil 38. Minimum düzlem içi tepe ivmesi değerleri.



Şekil 39. Maksimum düzlem içi tepe ivmesi değerleri.

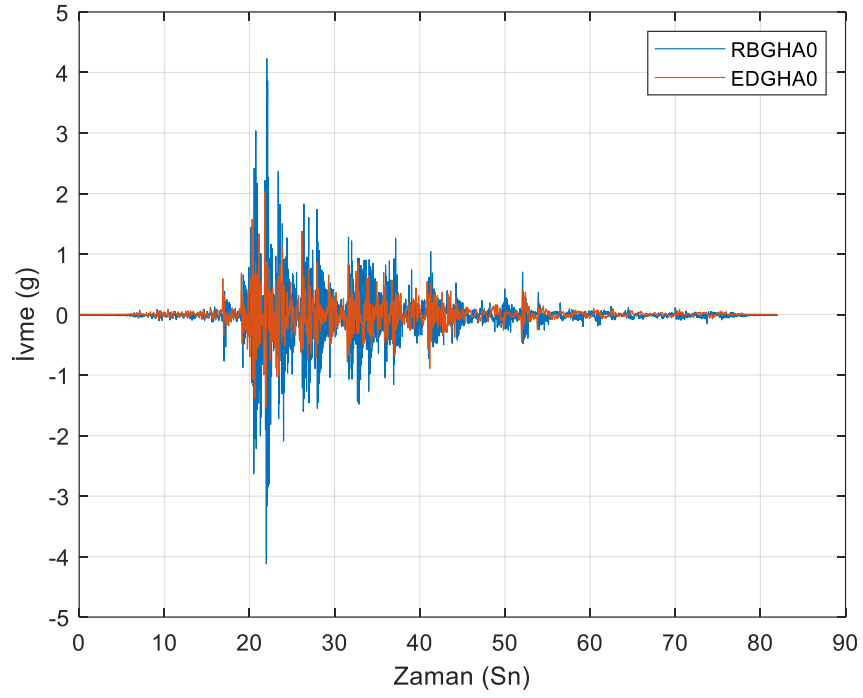
Düzlem içi olarak en yüksek ivme değerini Gölcük en düşük ivme değerini ise Elbistan depreminin oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Minimum ve maksimum tepe ivmesi değerlerinde en düşük ivme değerini EDGBHA0 modelinde en yüksek ivme değerinin RBGBHA0 modelinde elde edildiği tespit edilmiştir. Rijit birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda tepe ivme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %27,89 ve %34,19 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Esnek derzli birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda tepe ivme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %50,02 ve %55,38 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda esnek derzli birleşimlerin dolgu duvarlarda kullanılmasının rijit birleşimlere nazaran daha düşük tepe ivme değerlerini oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca geopolimer harçların her iki birleşim türünde de tepe ivme değerlerini etkili bir şekilde azalttığı belirlenmiştir. Sarsma tablası deney sonuçları geopolimer harçların esnek derzli birleşimlerde tepe ivme değerlerini azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir.

Düzlem içinde geleneksel beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılmasıyla tepe ivme değerlerinde oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Kayma çivisi yerine birleşimlerde esnek derz yapılmasının tepe ivme değerlerini yaklaşık %48,40 oranında azalttığı belirlenmiştir (Şekil 40).



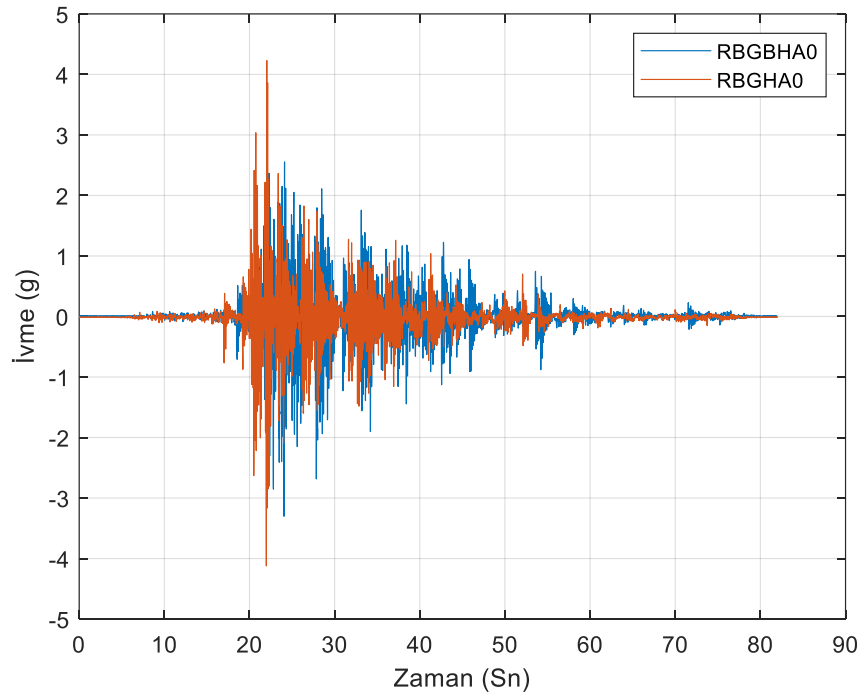
Şekil 40. Düzlem içi ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi

Düzlem içinde geopolimer beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılmasıyla tepe ivme değerlerinde oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Kayma çivisi yerine birleşimlerde esnek derz yapılmasının tepe ivme değerlerini yaklaşık %52,38 oranında azalttığı belirlenmiştir (Şekil 41).



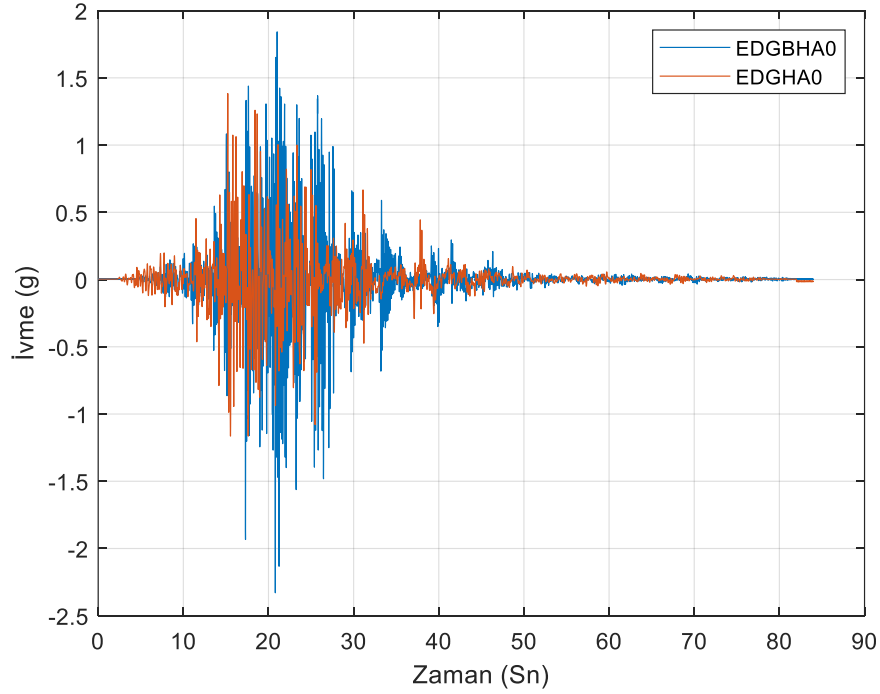
Şekil 41. Düzlem içi ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi

Düzlem içinde dolgu duvarla çelik çerçeve arasında rijit birleşim yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda tepe ivmelerinin %34,88 oranında arttığı tespit edilmiştir (Şekil 42).



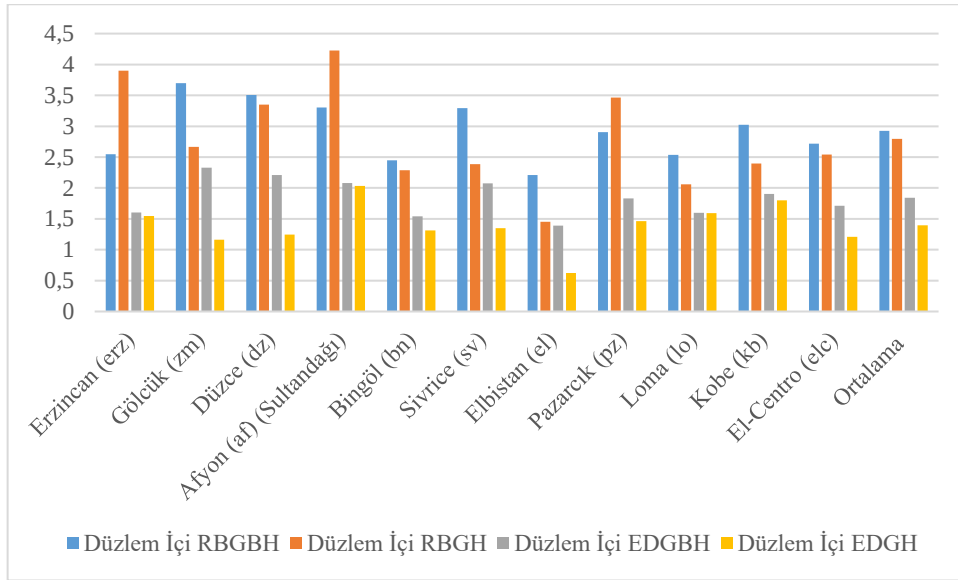
Şekil 42. Düzlem içi ve rijit birleşimde geopolimer harçların etkisi

Düzlem içinde dolgu duvarla çelik çerçeve arasında esnek derz yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda tepe ivmelerinin %27,78 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 43).



Şekil 43. Düzlem içi ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların etkisi

Düzlem içinde yapılan yüklemeler sonucunda ortalama olarak model çelik çerçevelerde oluşan tepe ivme değerlerinden en az olan modelin esnek derzli ve geopolimer harç birleşimli modelin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 44). Rijit bağlantılı model çelik çerçevede geopolimer harçların kullanılmasının ortalama olarak tepe ivme değerlerinin %4,51 oranında azaldığı belirlenmiştir. Esnek derz bağlantılı model çelik çerçevede geopolimer harçların kullanılmasının ortalama olarak tepe ivme değerlerinin %24,36 oranında azaldığı belirlenmiştir. Rijit birleşimlerde kayma çivilerinin kullanılmasının tepe ivme değerlerini azaltmada geopolimer ve geleneksel beton harçlarda etkin rol oynamadığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak düzlem içi durumda esnek derzli birleşimlerin yapılabileceği ve bu birleşimlerde de geopolimer harçların kullanılmasının deprem etkilerinin azaldığı tespit edilmiştir.

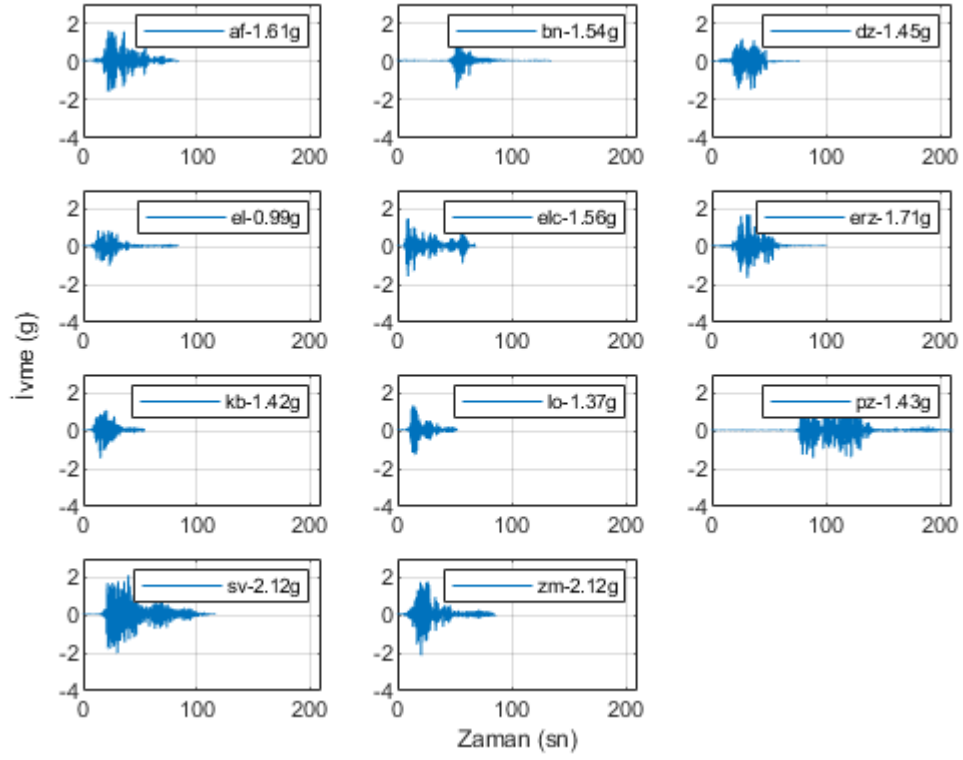


Şekil 44. Düzlem içi durumda tepe ivme değerlerinin karşılaştırılması

Çalışmada geopolimer harçlarla güçlendirilmiş esnek bağlantılı sistemlerde yüksek ivme değerlerinin görülmesi ancak yapısal hasarın sınırlı kalması, literatürde Kılıç vd. (2023) ve Maraş ve Köse (2021) tarafından ortaya konan bulgularla uyumludur. Kılıç vd. (2023), geopolimer harç kullanılan kompozit çelik sistemlerde sünekliğin önemli ölçüde arttığını ve yük aktarım kapasitesinin geliştiğini ifade etmiştir. Benzer şekilde Maraş ve Köse (2021), geopolimer katkılı harçların dolgu duvar güçlendirmesinde basınç dayanımını ve enerji sönümleme kapasitesini artırdığını vurgulamaktadır. Ayrıca Li vd. (2024) tarafından yürütülen sarsma tablası deneylerinde de, geopolimer beton kullanılan çerçeve sistemlerinin geleneksel beton sistemlere kıyasla daha rijit davranış sergilediği, ancak benzer sismik performans değerleri sunduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın bulguları mevcut literatürle tutarlı olup, geopolimer harçların deprem mühendisliğinde sürdürülebilir ve performans artırıcı bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

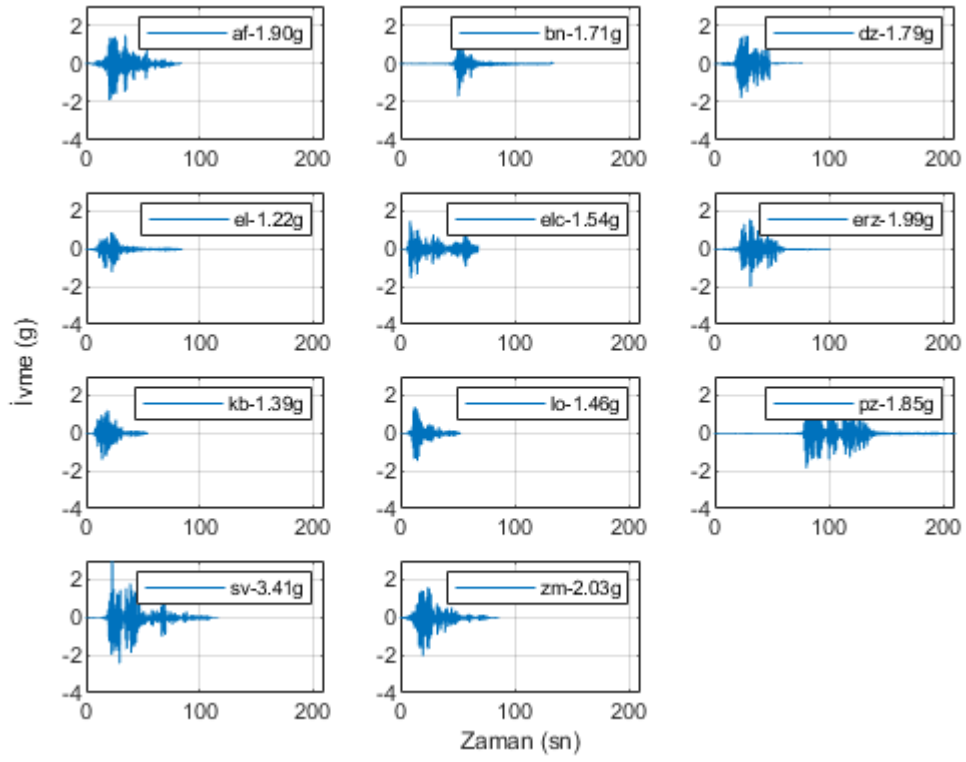
Düzlem dışı tepe ivme değerleri

Tez kapsamında kullanılan sarsma tablası tek eksenli olduğu için yapının tepesinde X yönlü ivme kayıtları tüm depremler için alınmıştır. Şekil 45'te rijit birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevenin tepesinde oluşan düzlem dışı ivme değerleri (RBGBHA1) zaman tanım alanında verilmiştir. Model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (2,12 g) Sivrice depreminin ve en düşük ivme değerini (0,995g) Elbistan depreminin oluşturduğu tespit edilmiştir.



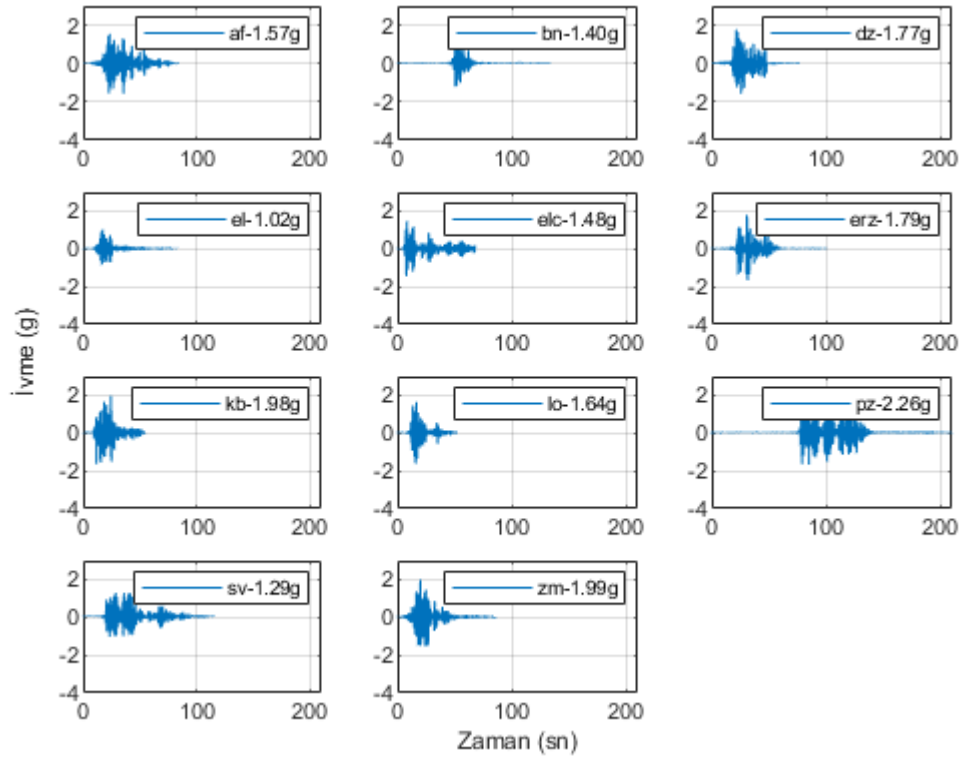
Şekil 45. RBGBHA1 tepe ivmesi değerleri

Şekil 46 rijit birleşimli geopolimer harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (RBGHA1) oluşan tepe ivme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (3,41g) Sivrice depreminin en düşük tepe ivmesi değerini (1,22g) ise Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Gölcül, El-Centro ve Kobe depremlerinin dışında geopolimer betonun harç olarak kullanılmasıyla rijit birleşimde tepe ivme değerlerini arttırdığı izlenmiştir.



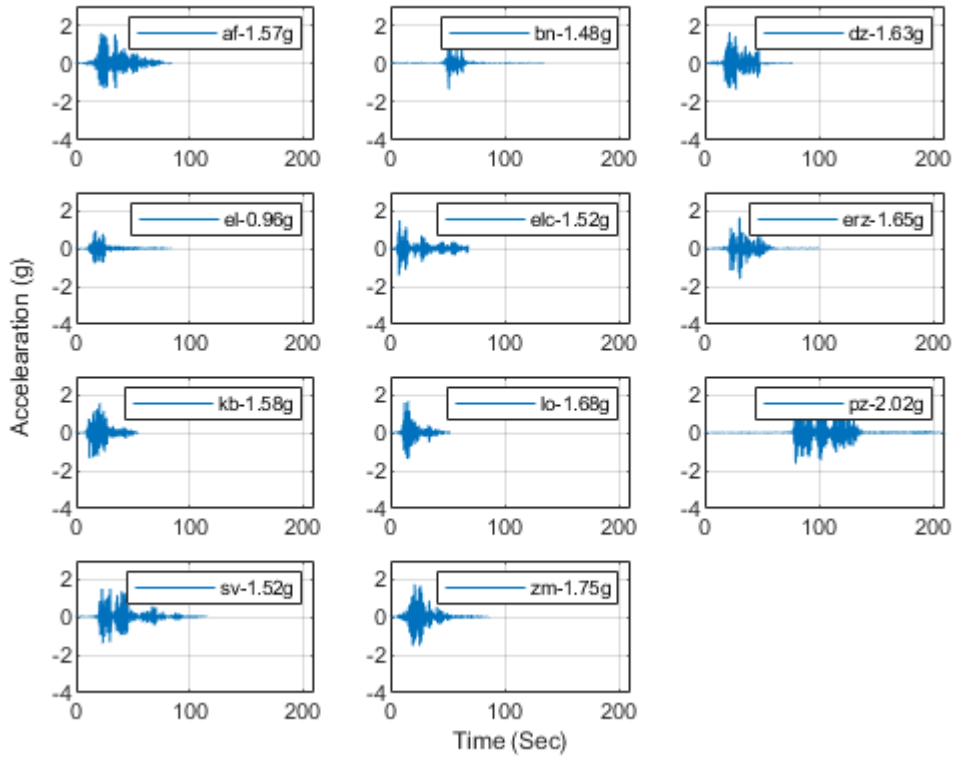
Şekil 46. RBGHA1 tepe ivmesi değerleri

Şekil 47 esnek derz birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGBHA1) oluşan tepe ivme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (2,26g) Pazarcık depreminin en düşük tepe ivmesi değerini (1,02g) ise Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir.



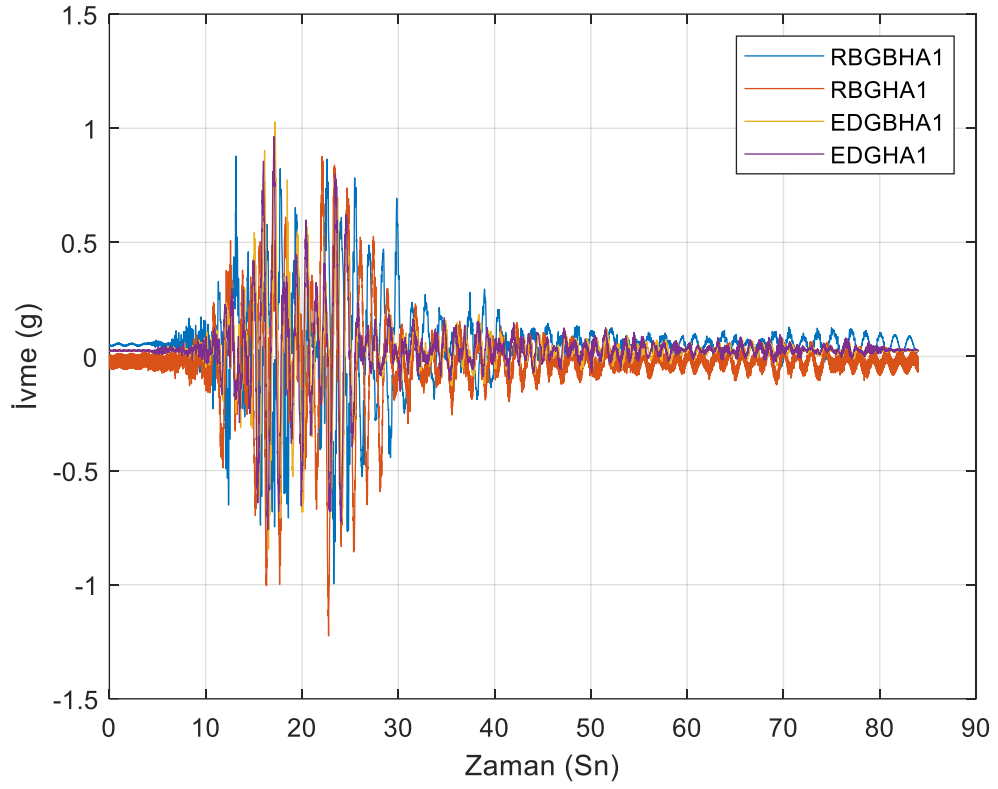
Şekil 47. EDGBHA1’de oluşan tepe ivmesi değerleri

Şekil 48 esnek derz birleşimli geopolimer beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGHA1) oluşan tepe ivme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek tepe ivmesi değerini (2,02g) Pazarcık depreminin en düşük tepe ivmesi değerini (0,96g) ise Elbistan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir.

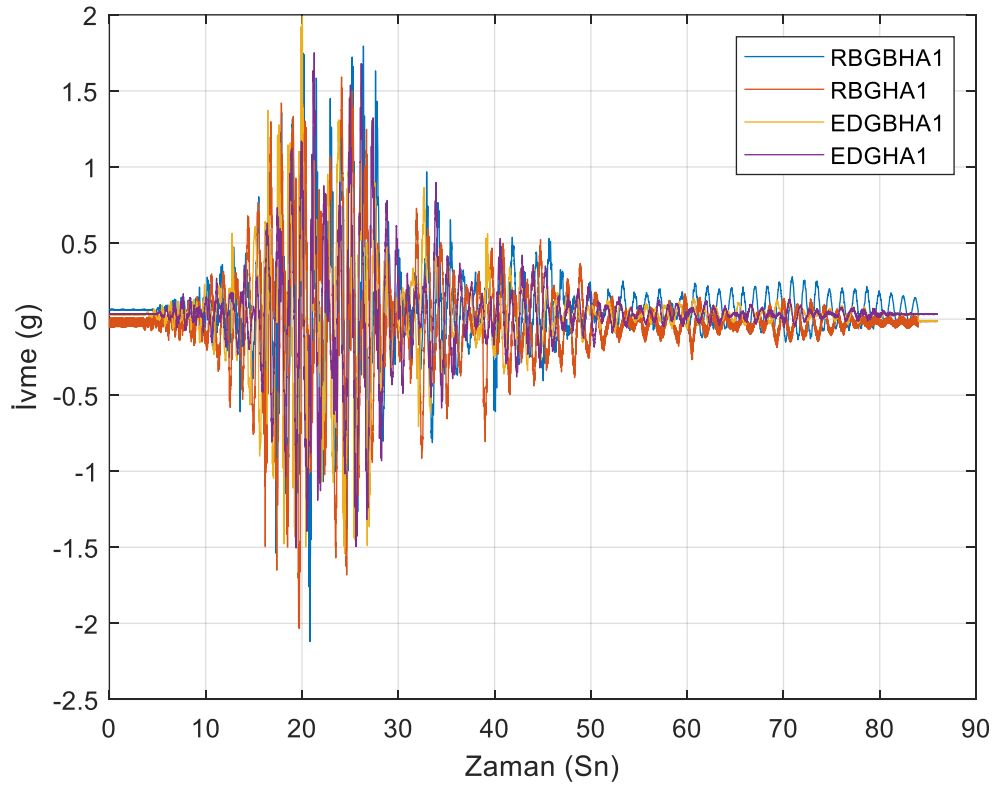


Şekil 48. EDGHA1 tepe ivmesi değerleri

Düzlem dışı yüklemelerde esnek derzli birleşimlerde geopolimer beton harçların kullanılmasının geleneksel beton harçların kullanılmasına nazaran daha düşük tepe ivmesi değerleri elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ancak rijit birleşimlerde geleneksel beton harçlarının kullanılmasının tepe ivme değerlerini daha da azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 49’da minimum düzlem dışı tepe ivme değerleri verilmiştir. Şekil 50’de ise maksimum düzlem dışı tepe ivme değerleri verilmiştir.



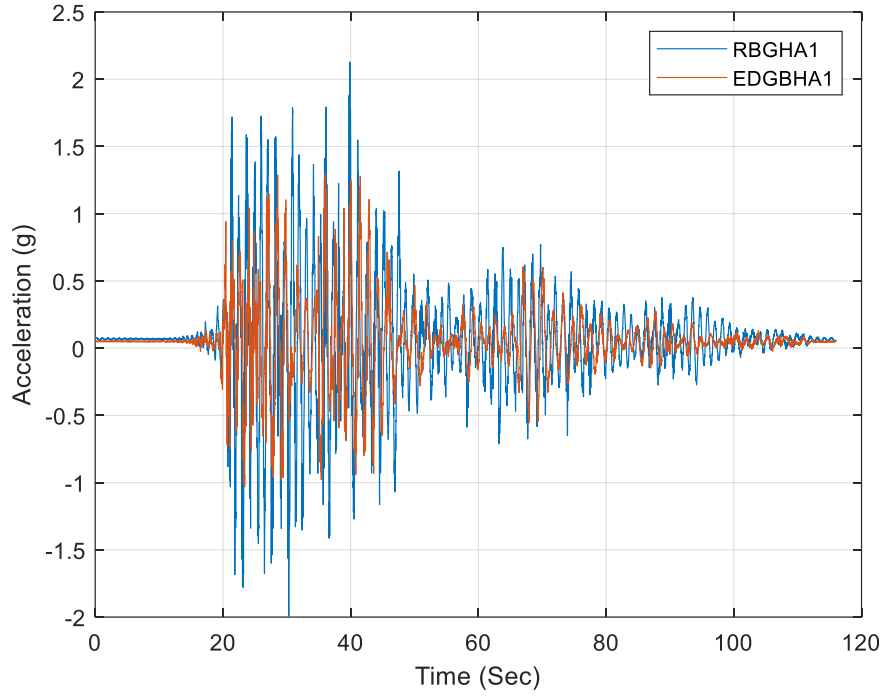
Şekil 49. Minimum düzlem dışı tepe ivmesi değerleri



Şekil 50. Maksimum düzlem dışı tepe ivmesi değerleri.

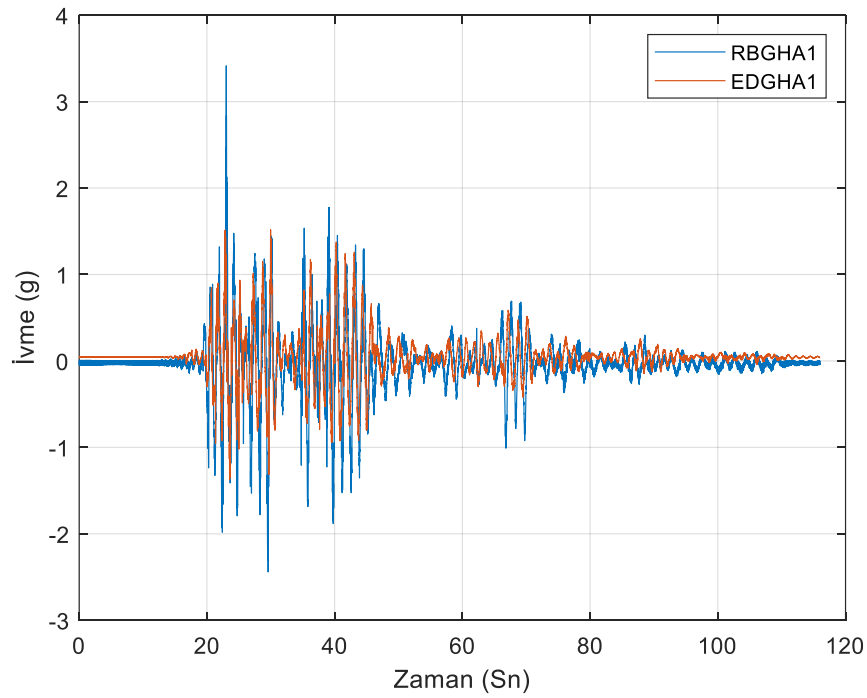
Düzlem dışı olarak en yüksek ivme değerini Sivrice en düşük ivme değerini ise Elbistan depreminin oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Minimum ve maksimum tepe imesi değerlerinde en düşük ivme değerini RBGBHA1 modelinde en yüksek ivme değerini RBGHA1 modelinde elde edildiği tespit edilmiştir. Rijit birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda tepe ivme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %60,60 ve %18,70 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Esnek derzli birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda tepe ivme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %10,08 ve %6,32 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda esnek derzli birleşimlerin dolgu duvarlarda kullanılmasının rijit birleşimlere nazaran daha düşük tepe ivme değerlerini oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca geopolimer harçların sadece esnek derzli birleşimlerde tepe ivme değerlerini etkili bir şekilde azalttığı belirlenmiştir. Sarsma tablası deney sonuçları düzlem dışında geopolimer harçların esnek derzli birleşimlerde tepe ivme değerlerini azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir.

Düzlem dışında geleneksel beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılması durumunda tepe ivme değerlerinde oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Değerlendirme de rijit birleşimde en büyük tepe ivme değerini oluşturan Sivrice depremi dikkate alınmıştır. Geleneksel beton harç kullanılan model çelik çerçevelerde kayma çivisi kullanılmasının esnek derz yapılmasına karşı tepe ivme değerlerini yaklaşık %39,30 oranında azalttığı belirlenmiştir (Şekil 51). Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmelerde, kayma çivilerinin kullanıldığı modellerde tepe ivmesi değerlerinin beklenenin aksine önemli ölçüde azalması ya da artış göstermemesi, bu elemanların sismik performans üzerindeki etkisinin tartışmalı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle geleneksel beton harçlı modelde kayma çivisi kullanımının tepe ivmesini yaklaşık %39,30 oranında azalttığı, buna karşılık başka modellerde anlamlı bir azalma sağlamadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kayma çivilerinin performansının yapısal konfigürasyona, malzeme türüne ve birleşim detaylarına bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Çivilerin çerçeve ile dolgu duvar arasında yük aktarımını sağladığı düşünülse de, rijit sistemlerde bu bağlantıların enerji yayılımını sınırlayarak yerel gerilmeleri artırabileceği, bu nedenle de beklenen sönümleme etkisinin oluşmayabileceği değerlendirilmektedir. Literatürde Shan vd. (2016) ve Sarno vd. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer şekilde, kayma çivilerinin yalnızca doğru ayrıntılandırıldığında etkili olduğu, aksi takdirde sistem davranışını olumsuz yönde etkileyebileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, kayma çivilerinin sismik performansa etkisinin yalnızca kullanılıp kullanılmamasıyla değil, çivinin konumu, boyutu, yerleştirme açısı ve duvar-çerçeve etkileşimi ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.



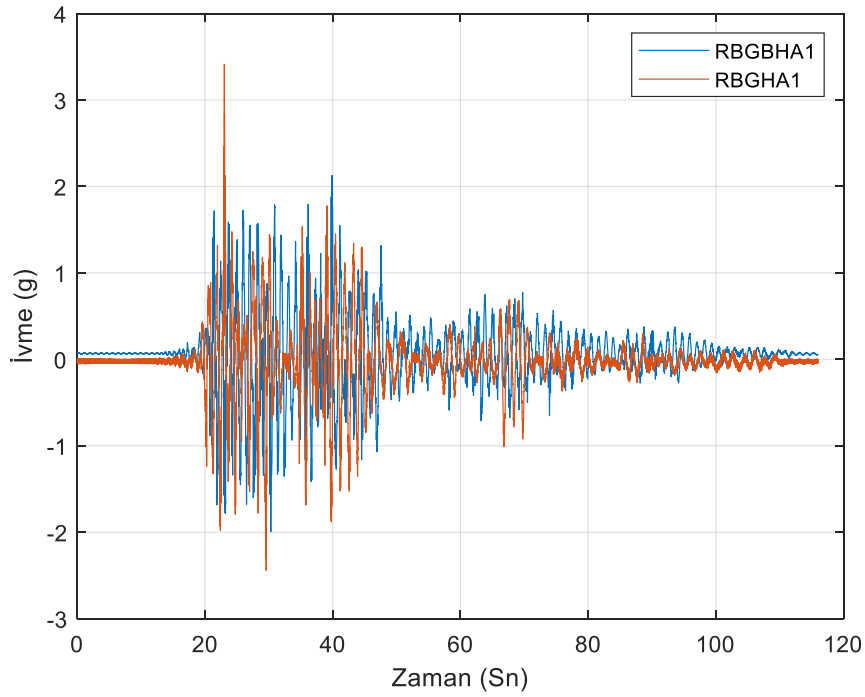
Şekil 51. Düzlem dışı ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi

Düzlem dışında geopolimer beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılması durumunda tepe ivme değerlerinde oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Kayma çivisi yerine birleşimlerde esnek derz yapılmasının tepe ivme değerlerini yaklaşık %57,57 oranında azalttığı belirlenmiştir (Şekil 52).



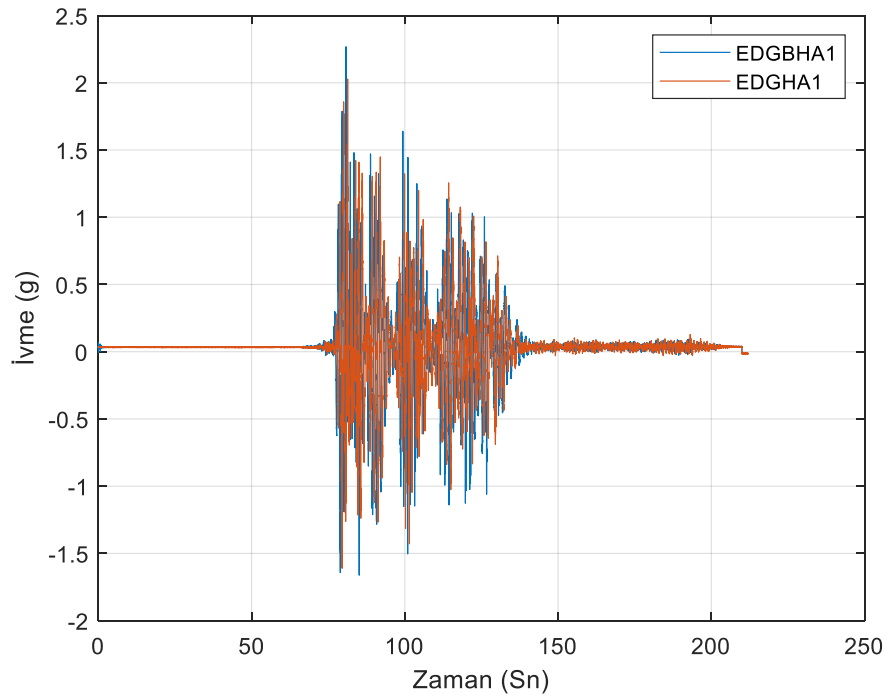
Şekil 52. Düzlem dışı ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin etkisi

Düzlem dışında dolgu duvarla çelik çerçeve arasında rijit birleşim yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda tepe ivmelerinin %36,36 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 53).



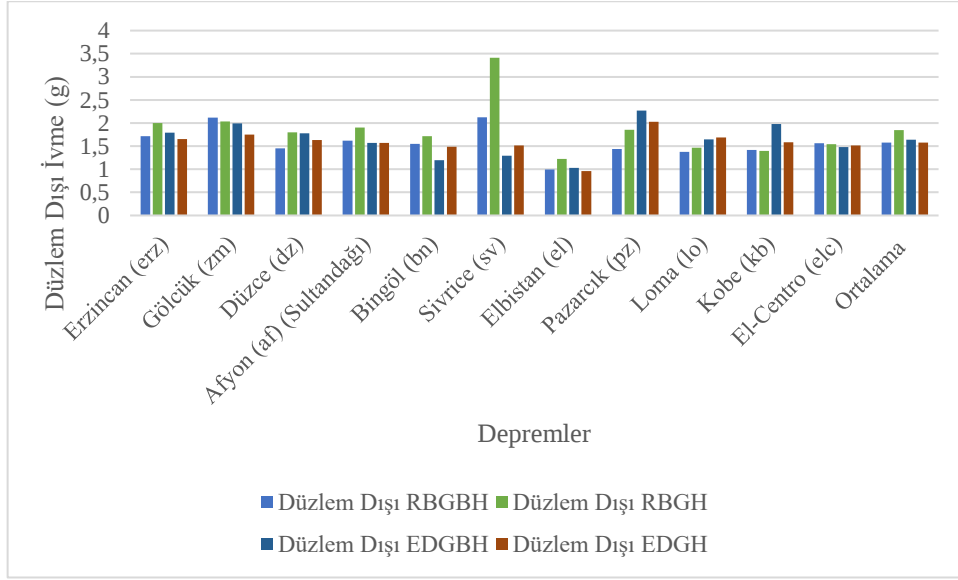
Şekil 53. Düzlem dışı ve rijit birleşimde geopolimer harçların etkisi

Düzlem dışında dolgu duvarla çelik çerçeve arasında esnek derz yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda tepe ivmelerinin %10,67 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 54).



Şekil 54. Düzlem dışı ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların etkisi

Düzlem dışında yapılan yüklemeler sonucunda ortalama olarak model çelik çerçevelerde oluşan tepe ivme değerlerinden en az olan modelin rijit birleşimli (kayma çivili) ve geleneksel beton harç birleşimli modelin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 55). Çalışmada, rijit birleşimli geopolimer harçlı modelin, bazı deprem kayıtlarında tepe ivme değerlerini geleneksel harçlı modele kıyasla yaklaşık %17,16 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, geopolimer harçların sismik performansı iyileştirdiğine dair genel beklentinin aksine bir sonuç ortaya koymaktadır. Bu çelişkinin temel nedenleri arasında, geopolimer harçların geleneksel harçlara kıyasla daha yüksek rijitliğe sahip olması nedeniyle, rijit birleşimlerle birlikte çalıştığında sistemin daha sert bir davranış sergilemesi ve deprem enerjisini daha ani şekilde aktarması yer almaktadır. Ayrıca, test koşullarında uygulanan yer hareketlerinin yönü, frekans içeriği ve süresi gibi parametrelerin, rijit sistemlerde lokal ivme büyütmelerine neden olabileceği düşünülmektedir. Hasar mekanizmalarının farklılaşması da önemli bir etkidir; rijit birleşimlerde duvar-çerçeve etkileşiminin daha ani kopmalarla sonuçlanması, ivme değerlerinde artışa yol açabilmektedir. Literatürde Belghiat vd. (2021) ve Shan vd. (2016) gibi araştırmalarda, dolgu malzemesinin rijitliği ile sistemin sönümlleme davranışı arasında doğrudan bir ilişki olduğu ifade edilmiş; rijit malzemelerin kontrollü deformasyon yerine ani kuvvet aktarımına neden olabileceği belirtilmiştir. Bu bulgular, geopolimer harçların etkinliğinin yalnızca malzeme türüne değil, aynı zamanda bağlantı detayı ve birleşim davranışıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Esnek derz bağlantılı model çelik çerçevede geopolimer harçların kullanılmasının ortalama olarak tepe ivme değerlerinin %3,54 oranında azaldığı belirlenmiştir. Rijit birleşimlerde kayma çivilerinin kullanılmasının tepe ivme değerlerini azaltmada geleneksel beton harçlarda etkin rol oynadığı ancak geopolimer harçlarda etkisiz sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak düzlem dışı durumda kayma çivili geleneksel beton harçlı birleşimin yapılmasının tepe ivme değerlerini azaltmada daha etkili olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 55. Düzlem dışı durumda tepe ivme değerlerinin karşılaştırılması

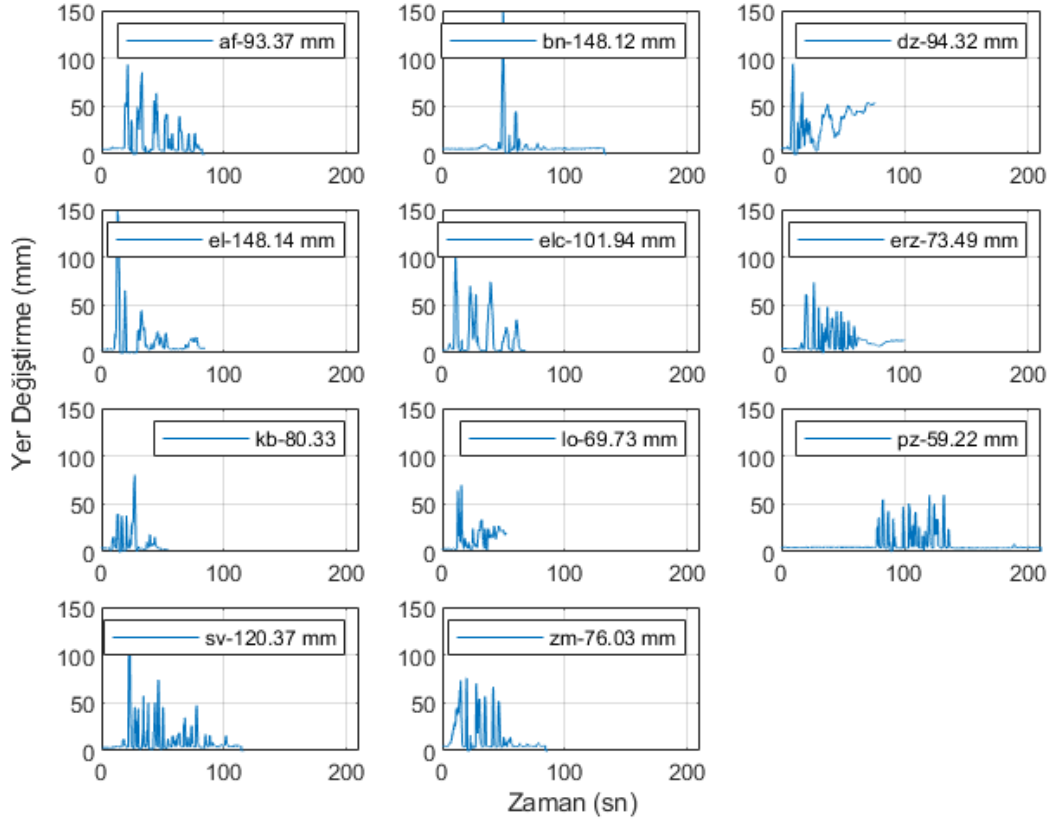
Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, düzlem dışı tepe ivme değerlerinin en yüksek olduğu modelin RBGBHA0 (rijit birleşimli, geleneksel beton harçlı) olduğu görülmüştür. Bu modelde oluşan yüksek tepe ivmeleri, rijit bağlantılar nedeniyle duvarla çerçeve arasında enerji sönümlemesinin gerçekleşmemesi ve kuvvetlerin ani aktarılmasıyla açıklanabilir. Öte yandan, esnek derzli ve geopolimer harçlı modellerin (özellikle EDGH) düzlem dışı ivmeleri önemli ölçüde azaltabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, Yu vd. (2023) tarafından raporlanan dolgu duvarların düzlem dışı performans üzerindeki kontrol edici rolü de bu çalışmadaki EDGH modelinde gözlemlenen düşük ivme değerleriyle örtüşmektedir. Sonuç olarak, geopolimer esaslı harçlar ve esnek derz tasarımı, yapı sistemlerinin düzlem dışı dinamik taleplerini azaltarak sismik performans üzerinde pozitif bir katkı sağlamıştır.

Tepe Yer Değiştirme Değerleri

Tepe dinamik yer değiştirme değerleri her bir model çelik çerçeve için düzlem içi ve düzlem dışı olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri sarsma tablasının tek eksenli olmasından dolayı sadece göze alınan +X doğrultusunda elde edilmiştir.

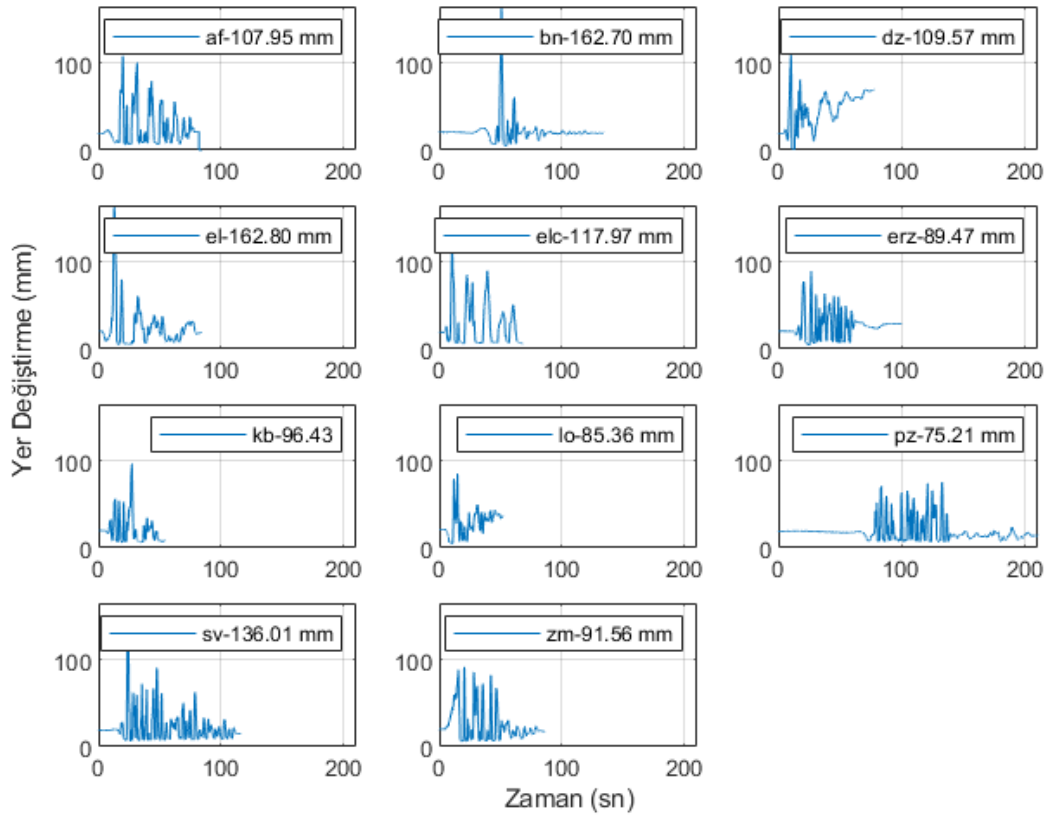
Düzlem içi tepe yer değiştirme değerleri

Tez kapsamında kullanılan sarsma tablası tek eksenli olduğu için yapının tepesinde +X yönlü yer değiştirme değerleri tüm depremler için alınmıştır. Şekil 56'da rijit birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevenin tepesinde oluşan düzlem içi yer değiştirme değerleri (RBGBHD0) zaman tanım alanında verilmiştir. Model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (148,39 mm) Elbistan depreminin ve en düşük dinamik yer değiştirme değerini (59,22 mm) Pazarcık depreminin oluşturduğu tespit edilmiştir.



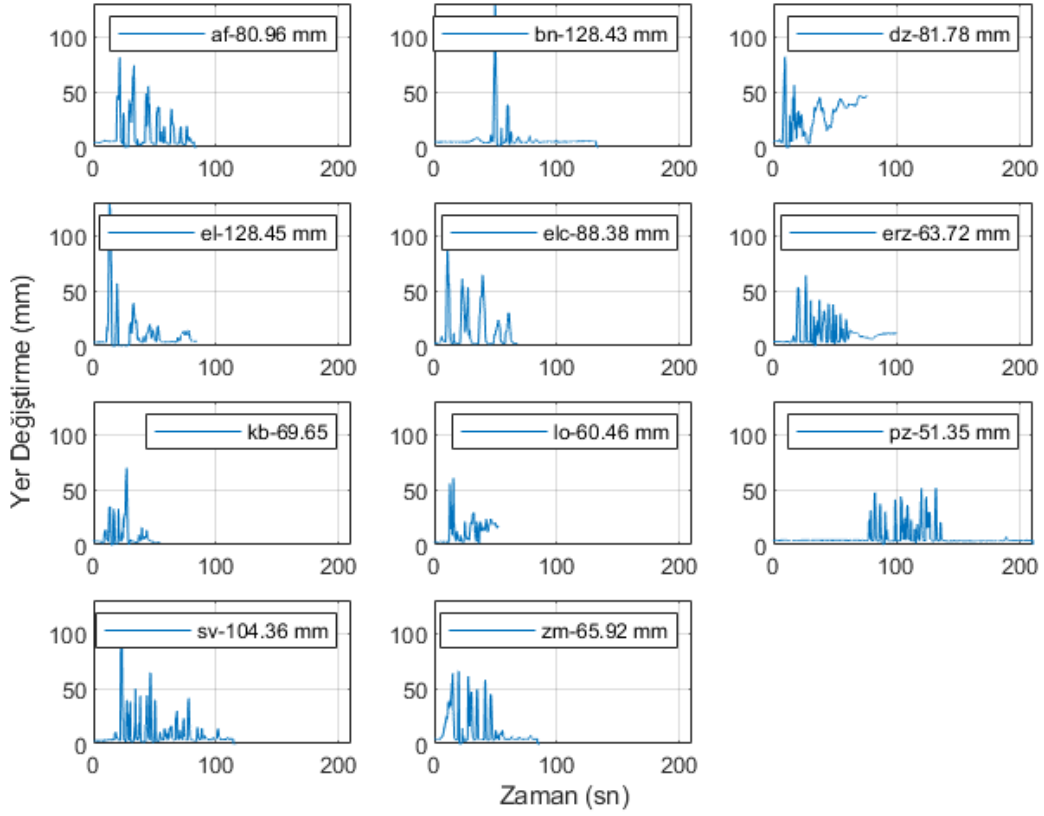
Şekil 56. RGBHD0 dinamik yer değiştirme değerleri

Şekil 57 rijit birleşimli geopolimer harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (RBGHD0) oluşan dinamik yer değiştirme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (162,70 mm) Bingöl depreminin en düşük yer değiştirme değerini (59,22 mm) ise Pazarcık depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Testlerde kullanılan tüm deprem etkilerinde geopolimer betonun harç olarak kullanılmasıyla rijit birleşimde dinamik yer değiştirmelerin arttığı izlenmiştir.



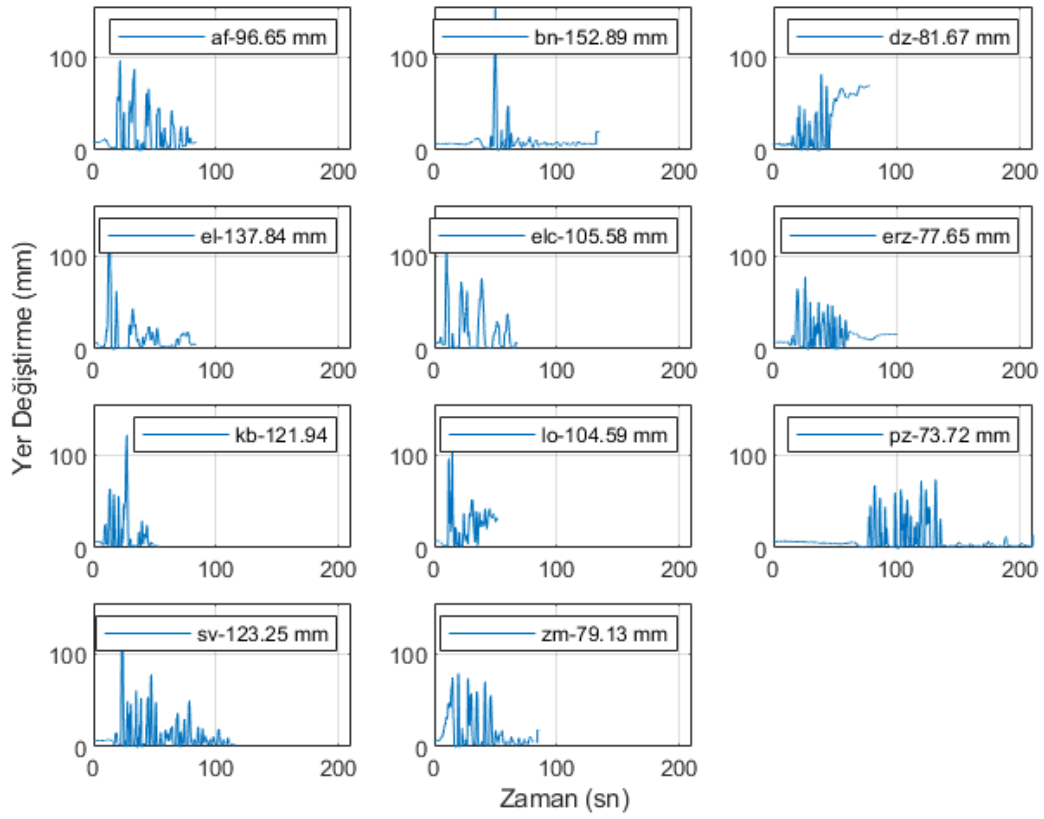
Şekil 57. RBGHD0 dinamik yer değiştirme değerleri

Şekil 58 esnek derz birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGBHD0) oluşan dinamik yer değiştirme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (128,66 mm) Elbistan depreminin en düşük dinamik yer değiştirme değerini (75,21 mm) ise Pazarcık depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Esnek derz yapılmasının dinamik yer değiştirme değerlerini rijit birleşimli modellere göre yaklaşık %15 oranında azalttığı tespit edilmiştir.



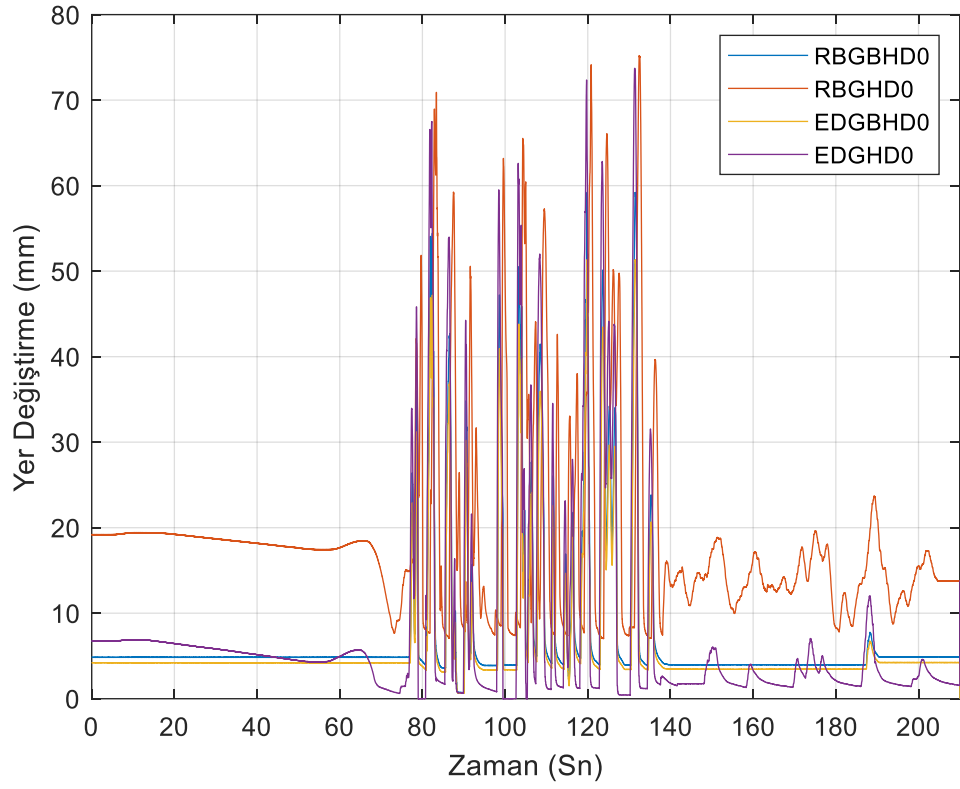
Şekil 58. EDGBHD0’da oluşan dinamik yer değiştirme değerleri

Şekil 59 esnek derz birleşimli geopolimer beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGHD0) oluşan dinamik yer değiştirme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (152,89 mm) Bingöl depreminin en düşük dinamik yer değiştirme değerini (73,72 mm) ise Pazarcık depreminin oluşturduğu belirlenmiştir.

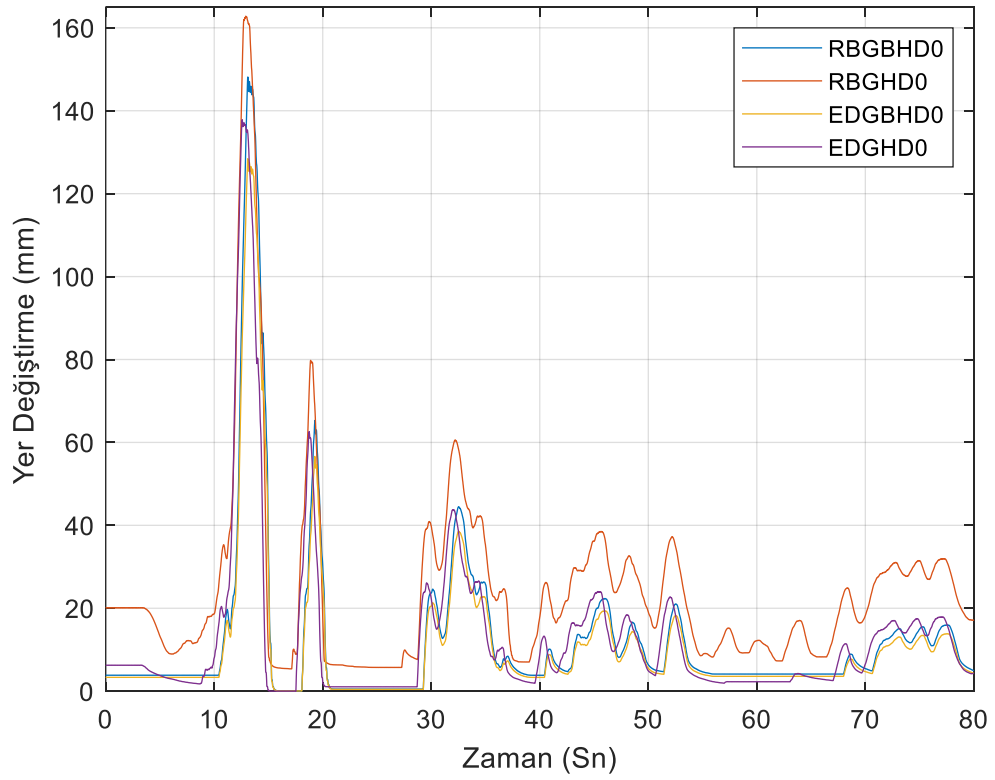


Şekil 59. EDGHDO dinamik yer değiştirme değerleri

Rijit ve esnek derzli birleşimlerde geleneksel beton harçların kullanılmasının geopolimer beton harçların kullanılmasına nazaran daha düşük dinamik yer değiştirmesi değerleri elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ancak bazı depremlerde bu sonuç değişmektedir. Şekil 60'ta minimum düzlem içi dinamik yer değiştirme değerleri verilmiştir. Şekil 61'de ise maksimum düzlem içi dinamik yer değiştirme değerleri verilmiştir.



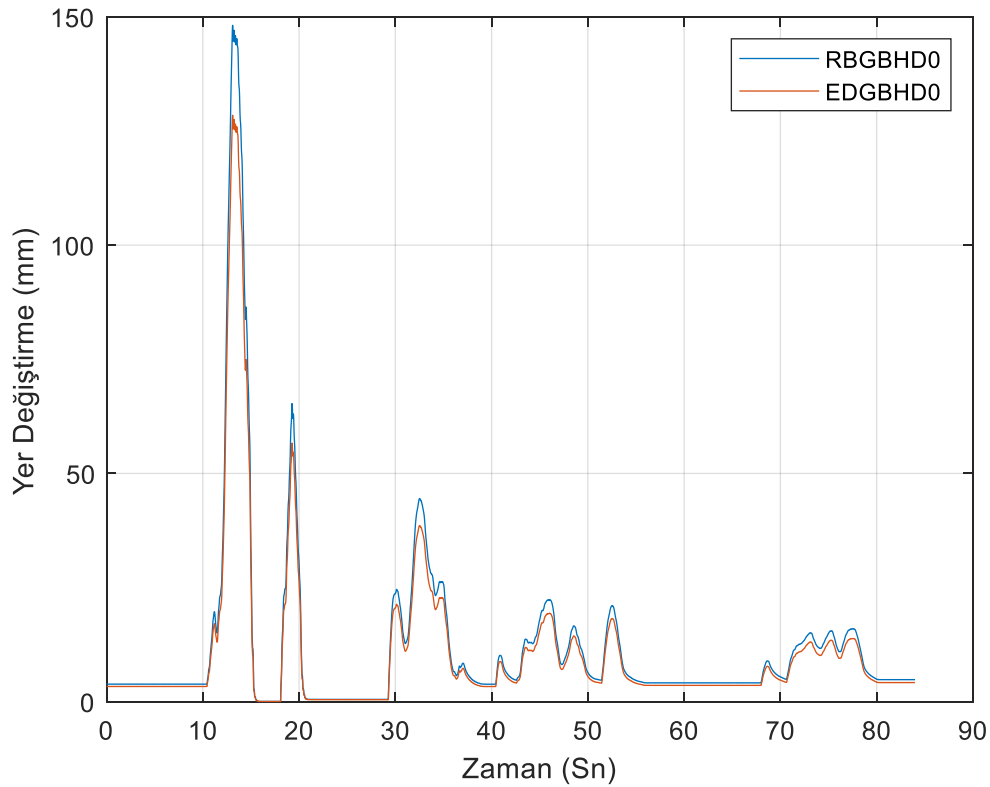
Şekil 60. Minimum düzlem içi dinamik yer değiştirme değerleri



Şekil 61. Maksimum düzlem içi dinamik yer değiştirme değerleri

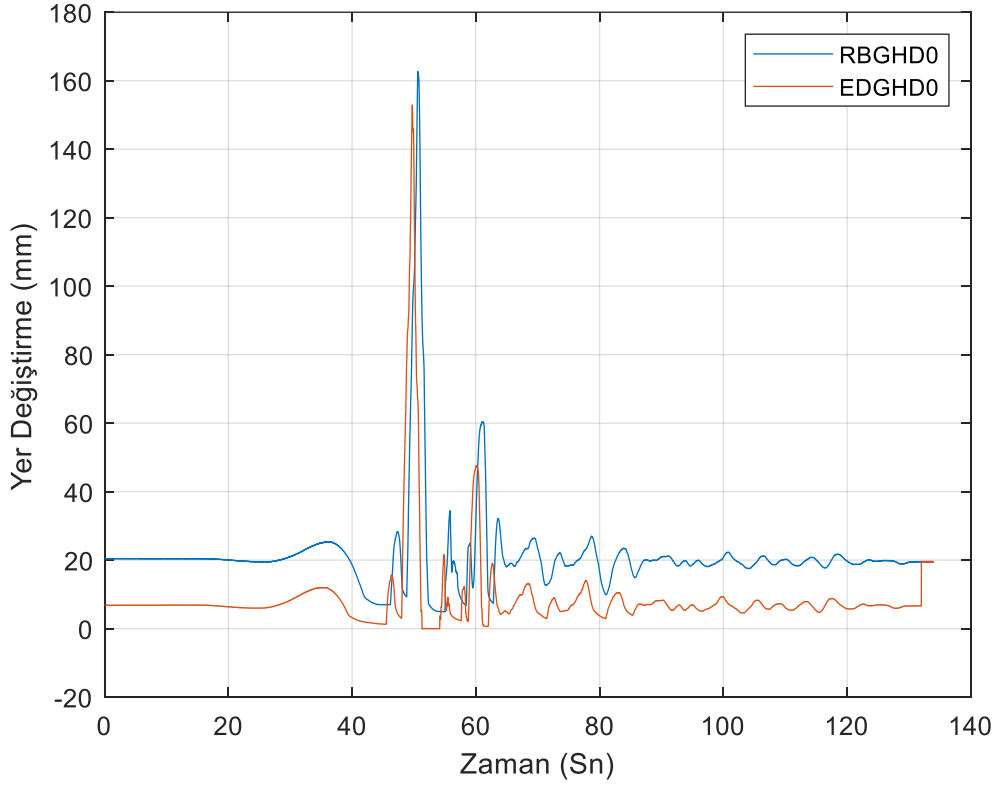
Düzlem içi olarak en yüksek dinamik yer değiştirme değerini Bingöl en düşük dinamik yer değiştirme değerini ise Pazarcık depreminin oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Minimum ve maksimum dinamik yer değiştirme değerlerinde en düşük yer değiştirme değerini EDGBHD0 modelinde en yüksek yer değiştirme değerinin EDGHD0 modelinde elde edildiği tespit edilmiştir. Rijit birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda tepe yer değiştirme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %12,34 ve %5,10 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Esnek derzli birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda tepe ivme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %3,84 ve %1,02 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak ortalama etkiyen deprem olarak esnek derzli birleşimlerin dolgu duvarlarda kullanılmasının rijit birleşimlere nazaran daha düşük dinamik yer değiştirme değerlerini oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca geopolimer harçların her iki birleşim türünde de dinamik yer değiştirme değerlerini arttırdığı belirlenmiştir.

Düzlem içinde geleneksel beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılmasıyla dinamik yer değiştirme değerlerinde oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Esnek derzli bağlantı yerine birleşimlerde kayma çivisinin kullanılmasının dinamik yer değiştirme değerlerini maksimum depremde yaklaşık %20,50 oranında arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 62).



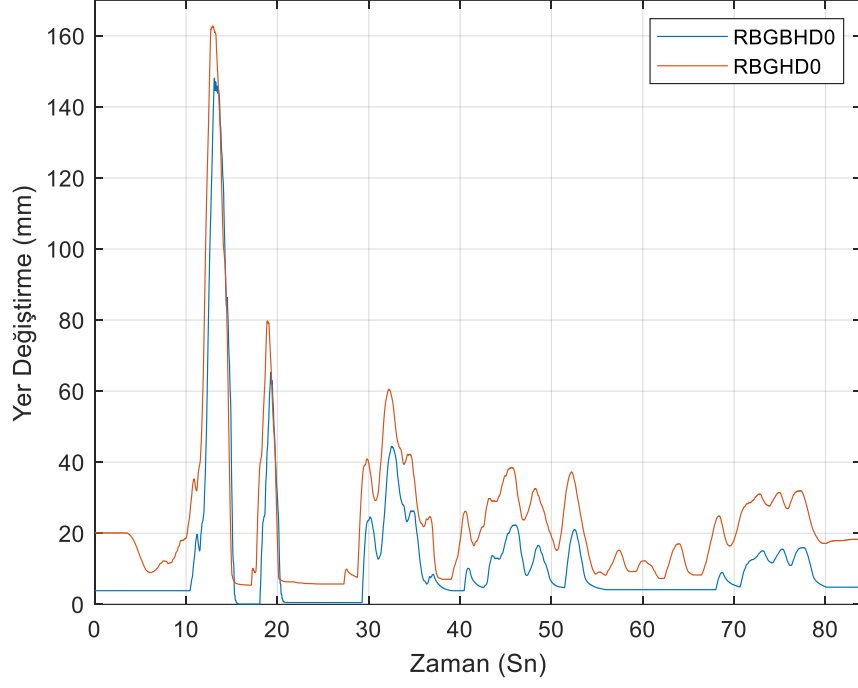
Şekil 62. Düzlem içi ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin yer değiştirmeye olan etkisi

Düzlem içinde geopolimer beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılması durumunda dinamik yer değiştirme değerlerinde oluşan değişimler maksimum etkiyen deprem için değerlendirilmiştir. Kayma çivisi yerine birleşimlerde esnek derz yapılmasının tepe ivme değerlerini yaklaşık %52,38 oranında azalttığı belirlenmiştir (Şekil 63).



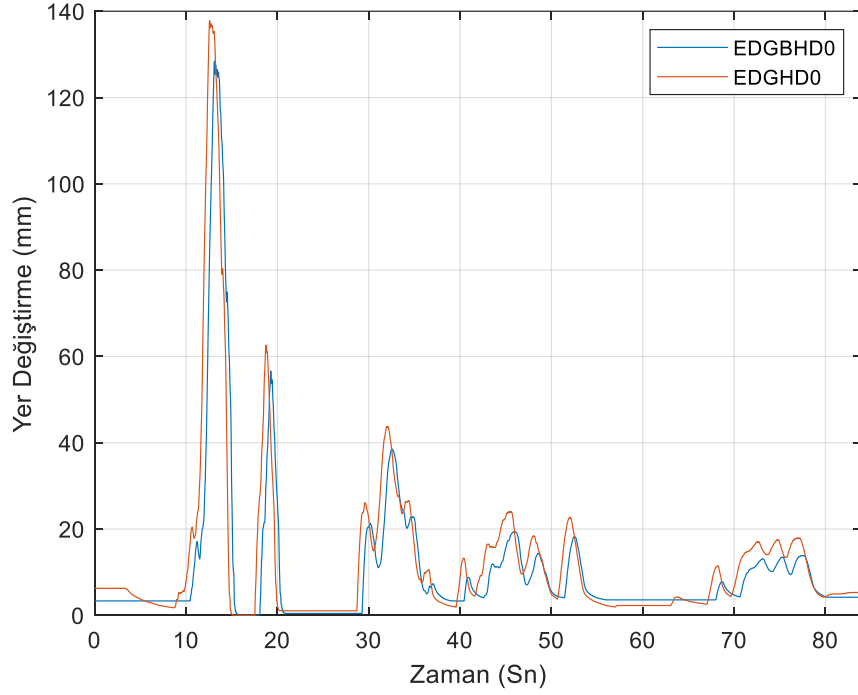
Şekil 63. Düzlem içi ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin yer değiştirmeye olan etkisi

Düzlem içinde dolgu duvarla çelik çerçeve arasında rijit birleşim yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda dinamik yer değiştirmelerin %12,34 oranında arttığı tespit edilmiştir (Şekil 64).



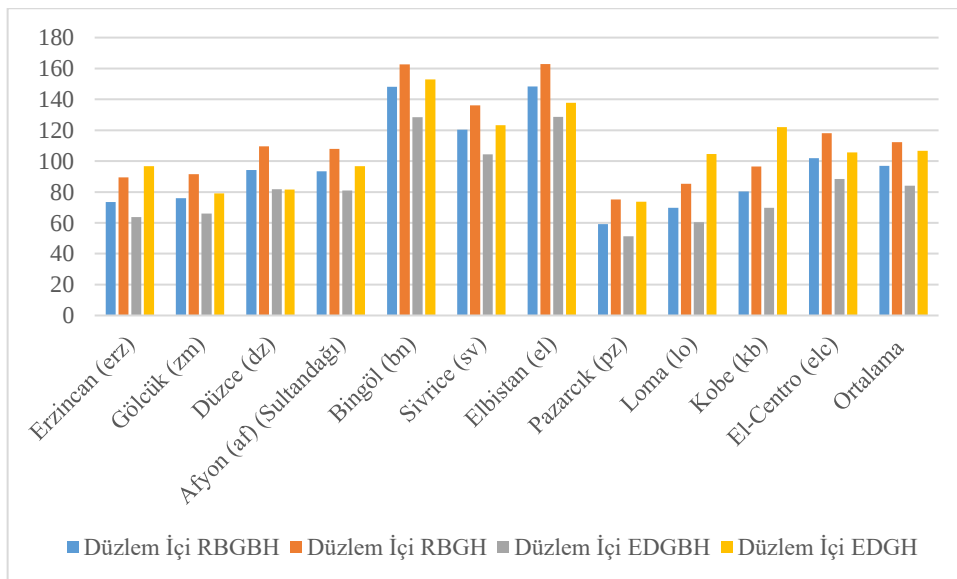
Şekil 64. Düzlem içi ve rijit birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi

Düzlem içinde dolgu duvarla çelik çerçeve arasında esnek derz yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda dinamik yer değiştirmelerin %9,42 oranında arttığı tespit edilmiştir (Şekil 65).



Şekil 65. Düzlem içi ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi

Düzlem içinde yapılan yüklemeler sonucunda ortalama olarak model çelik çerçevelerde oluşan dinamik yer değiştirmelerin en az olduğu modelin esnek derzli ve geleneksel beton harç birleşimli modelin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 66). Rijit bağlantılı model çelik çerçevede geopolimer harçların kullanılmasının ortalama olarak dinamik yer değiştirme değerlerinin %15,93 oranında arttırdığı belirlenmiştir. Esnek derz bağlantılı model çelik çerçevede geopolimer harçların kullanılmasının ortalama olarak dinamik yer değiştirme değerlerinin %27,09 oranında arttırdığı belirlenmiştir. Rijit birleşimlerde kayma çivilerinin kullanılmasının dinamik yer değiştirme değerlerini azaltmada geopolimer ve geleneksel beton harçlarda etkin rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak düzlem içi durumda esnek derzli birleşimlerin yapılabileceği ve bu birleşimlerde de geleneksel beton harçların kullanılmasının deprem etkilerini azalttığı tespit edilmiştir. Tez kapsamında elde edilen sonuçlara göre, geopolimer harçlı modellerde rijit birleşim kullanıldığında düzlem içi ve düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerlerinde sırasıyla %15,93 ve %8,06 oranında artış meydana gelirken, esnek derzli birleşimlerde bu değerler sırasıyla %27,09 ve %14,66 oranında azalmıştır. Bu durum, bağlantı detayının ve dolgu malzemesinin yapı sisteminin dinamik davranışına etkisini net bir biçimde ortaya koymaktadır. Rijit birleşimli modellerde geopolimer harcın yüksek elastisite modülü ve düşük deformasyon toleransı, yapı sisteminin daha sert davranmasına neden olmakta, bu da deprem enerjisinin yapıya doğrudan aktarılmasına ve yer değiştirmelerin artmasına yol açmaktadır. Buna karşın, esnek derzli birleşimlerde, enerji belirli bir düzeyde emilmekte ve yayılmakta, bu da sistemin doğrusal olmayan davranış sergileyerek deformasyonu kontrollü biçimde karşılamasını sağlamaktadır. Enerji sönümleme kapasitesi, rijit sistemlerde lokal birikim ve hasar oluşumuna neden olurken, esnek birleşimlerde sistematik yayılım sayesinde yer değiştirme talepleri azalmakta ve yapısal hasar minimize edilmektedir.

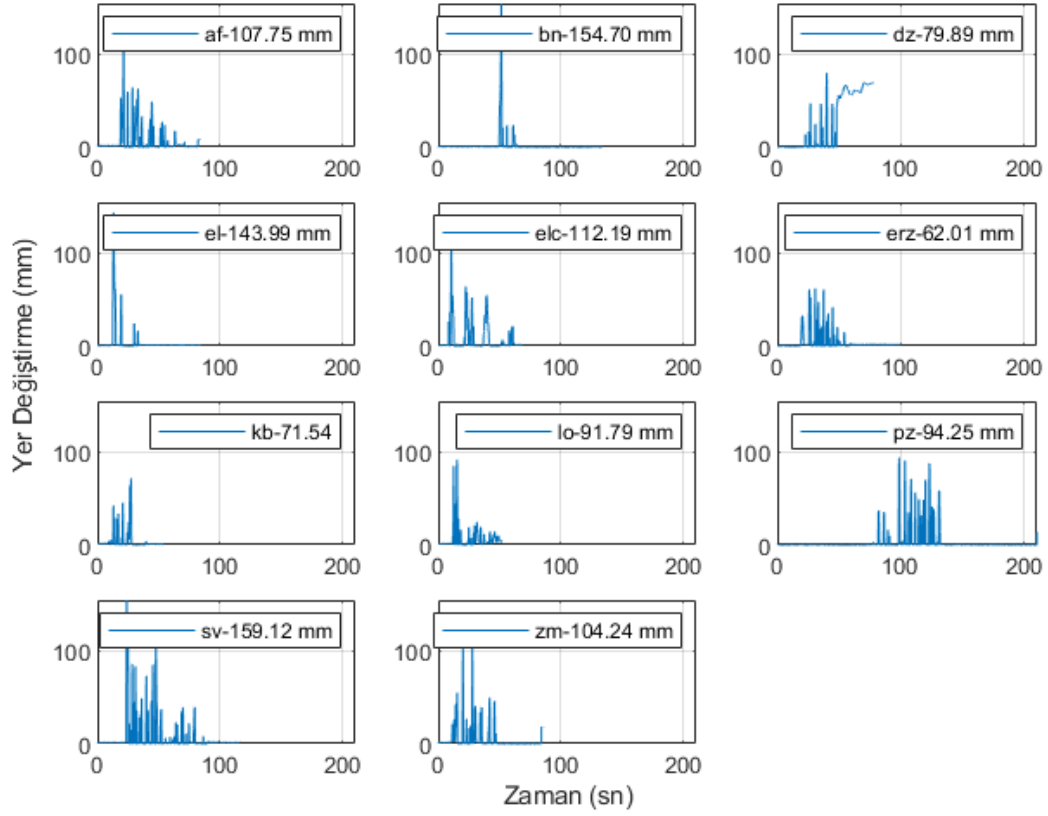


Şekil 66. Düzlem içi durumda dinamik yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

Geleneksel beton harçlı dolgu duvar modeli (RBBHA0) en yüksek düzlem içi tepe yer değiştirme değerlerini sergilemiştir. Bu durum, rijit birleşimli dolgu duvarların ani yük aktarımı sebebiyle yapının yatay deformasyonlarını kontrol altına almakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Diğer yandan, geopolimer harç kullanımı ve esnek derz detaylandırması (özellikle EDGH modelinde) yapı performansını olumlu yönde etkileyerek deplasmanları önemli ölçüde azaltmıştır. Bu bulgular, literatürde Ju vd. (2012) ve Yu vd. (2023) tarafından ortaya konulan, esnek derz ve alternatif dolgu malzemelerinin yatay yer değiştirmeler üzerindeki azaltıcı etkisiyle uyumludur. Özellikle Yu vd.'nin kat yer değiştirmelerinde %90'a varan azalma tespiti, bu çalışmada elde edilen EDGH model sonuçları ile doğrudan örtüşmektedir. Sonuç olarak, düzlem içi yer değiştirme analizleri, dolgu duvar detaylandırmasının yapısal davranış üzerindeki belirleyici etkisini net bir biçimde ortaya koymuştur.

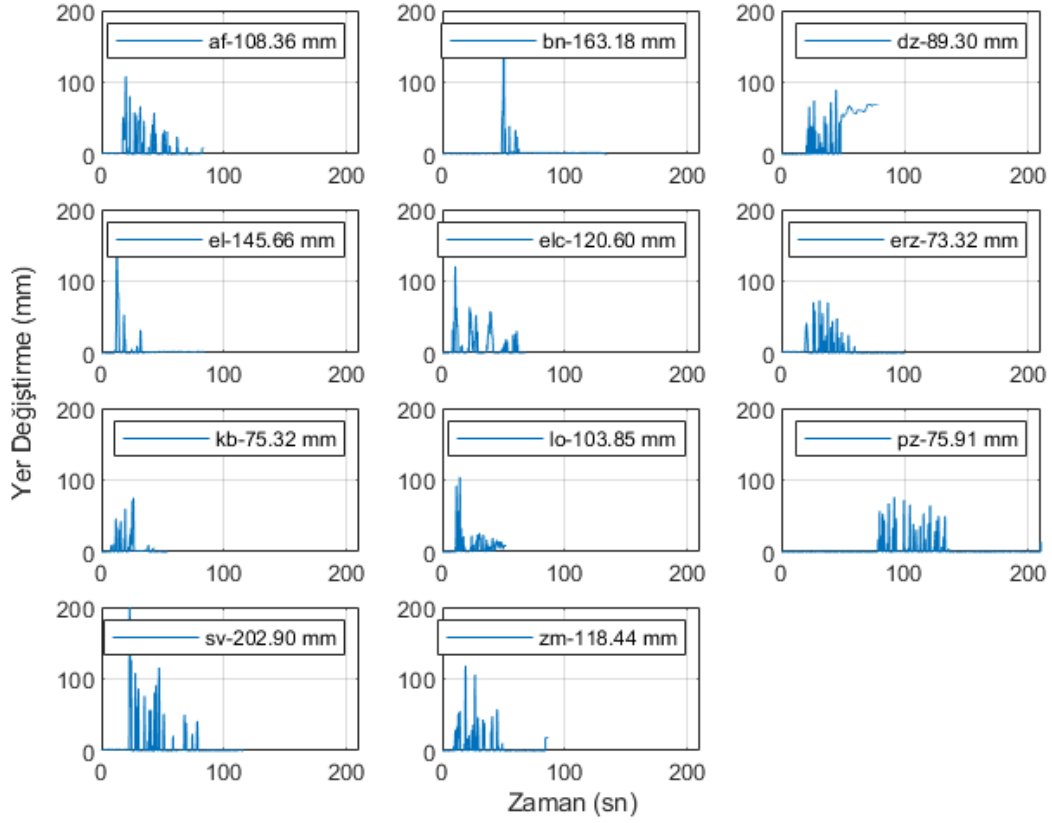
Düzlem dışı dinamik tepe yer değiştirme değerleri

Tez kapsamında kullanılan sarsma tablası tek eksenli olduğu için yapının tepesinde +X yönlü dinamik yer değiştirme değerleri tüm depremler için alınmıştır. Şekil 67'de rijit birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevenin tepesinde oluşan düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerleri (RBBHD1) zaman tanım alanında verilmiştir. Model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (159,12 mm) Sivrice depreminin ve en düşük dinamik yer değiştirme değerini (0,995g) Erzincan depreminin oluşturduğu tespit edilmiştir.



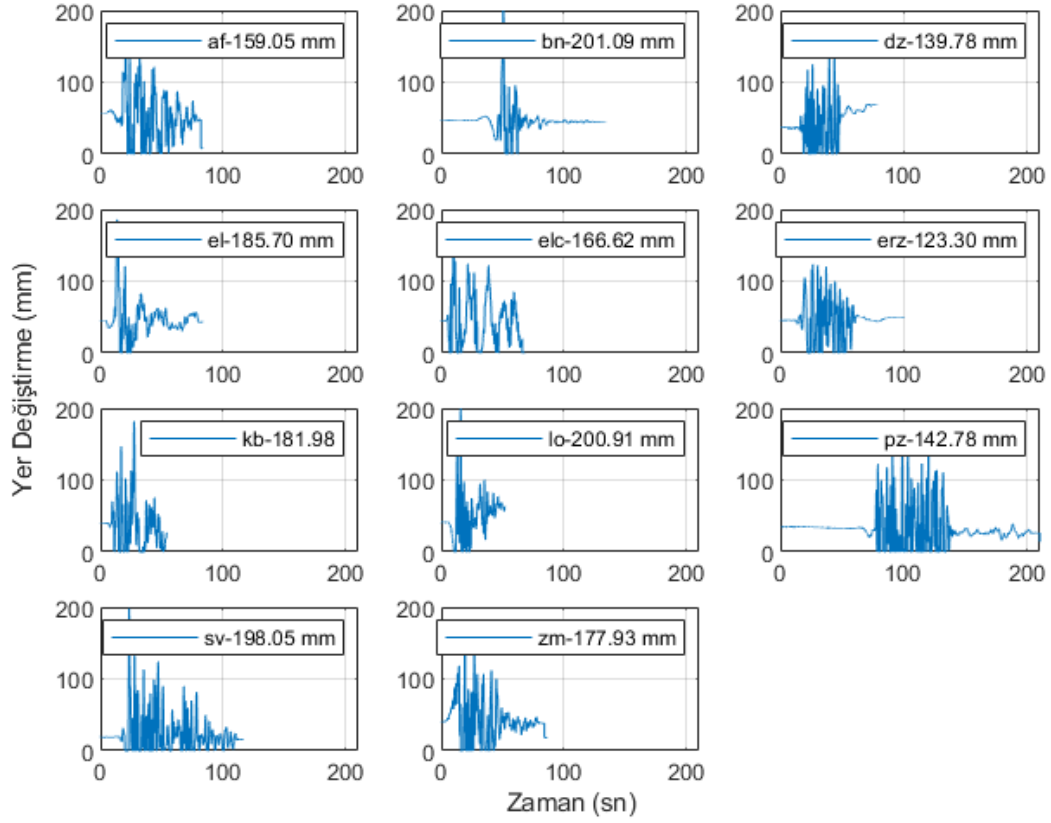
Şekil 67. RGBBHD1 dinamik yer değiştirme değerleri

Şekil 68 rijit birleşimli geopolimer harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (RBGHA1) oluşan dinamik yer değiştirme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (202,90 mm) Sivrice depreminin en düşük dinamik yer değiştirme değerini (75,22 mm) ise Kobe depreminin oluşturduğu belirlenmiştir. Pazarcık depreminin dışında geopolimer betonun harç olarak kullanılmasıyla rijit birleşimde dinamik yer değiştirmelerin arttığı izlenmiştir.



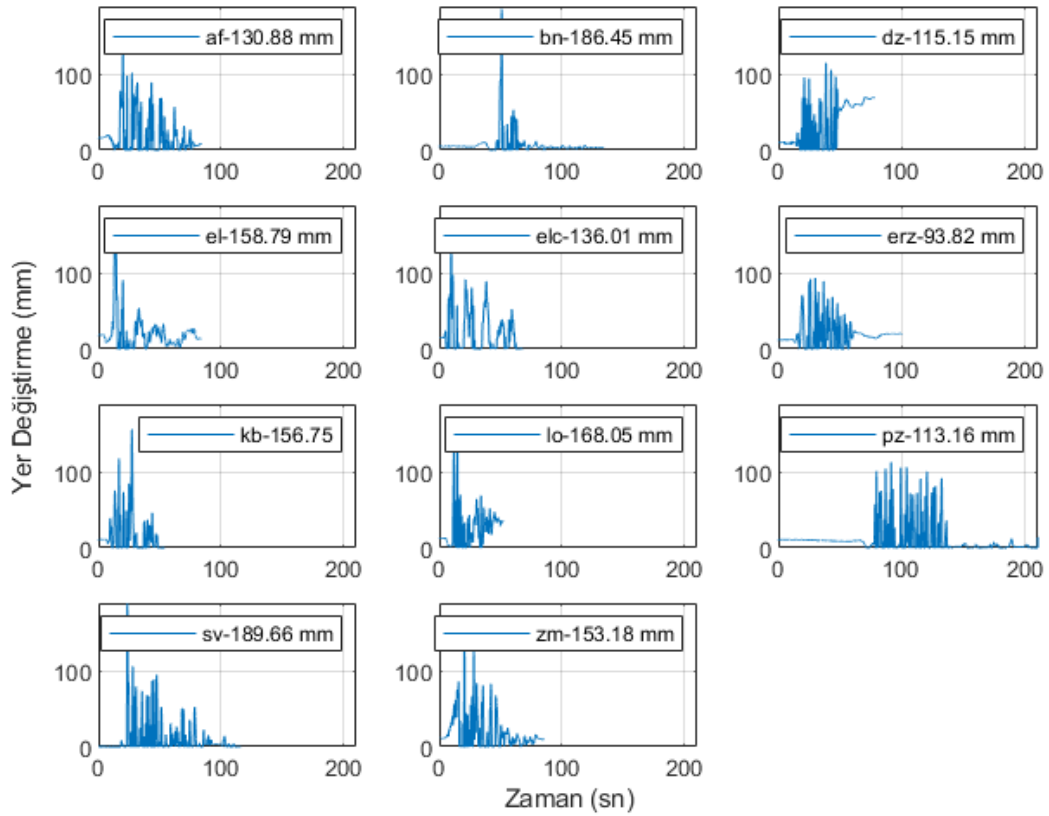
Şekil 68. RBGHD1 dinamik yer değiştirme değerleri

Şekil 69 esnek derz birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGBHD1) oluşan dinamik yer değiştirme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (201,09 mm) Bingöl depreminin en düşük dinamik yer değiştirme değerini (123,30 mm) ise Erzinan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir.



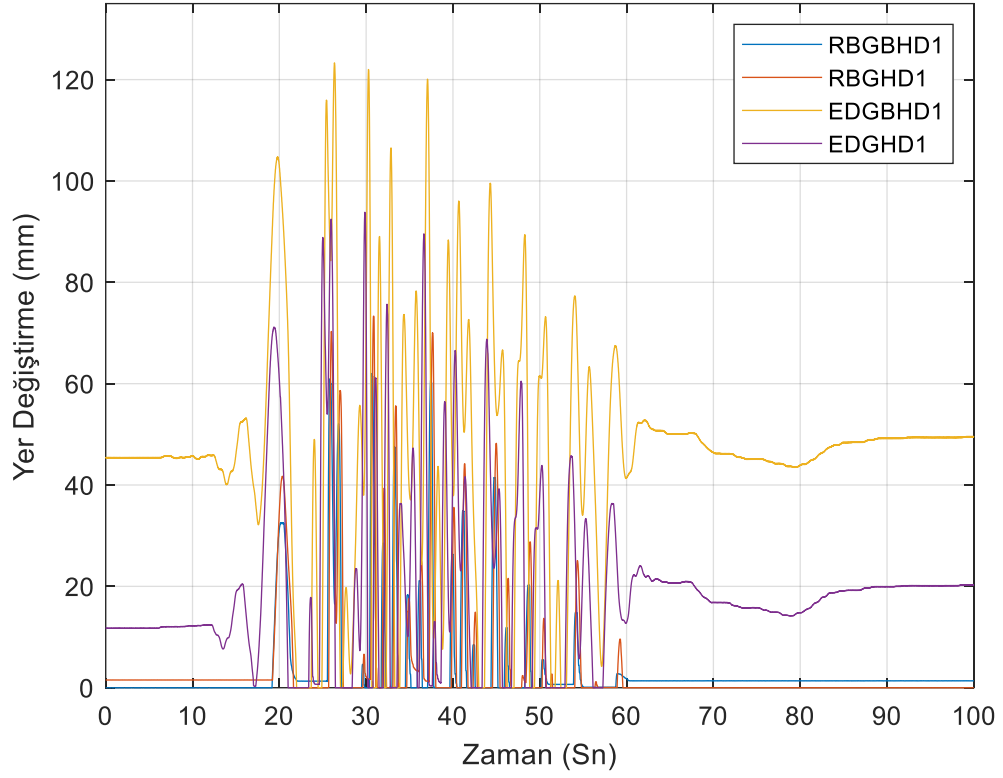
Şekil 69. EDGBHD1’de oluşan dinamik yer değiştirme değerleri

Şekil 70 esnek derz birleşimli geopolimer beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede (EDGHD1) oluşan dinamik yer değiştirme değerlerini göstermiştir. Bu model çelik çerçevede en yüksek dinamik yer değiştirme değerini (189,66 mm) Sivrice depreminin en düşük tepe ivmesi değerini (93,82 mm) ise Erzincan depreminin oluşturduğu belirlenmiştir.

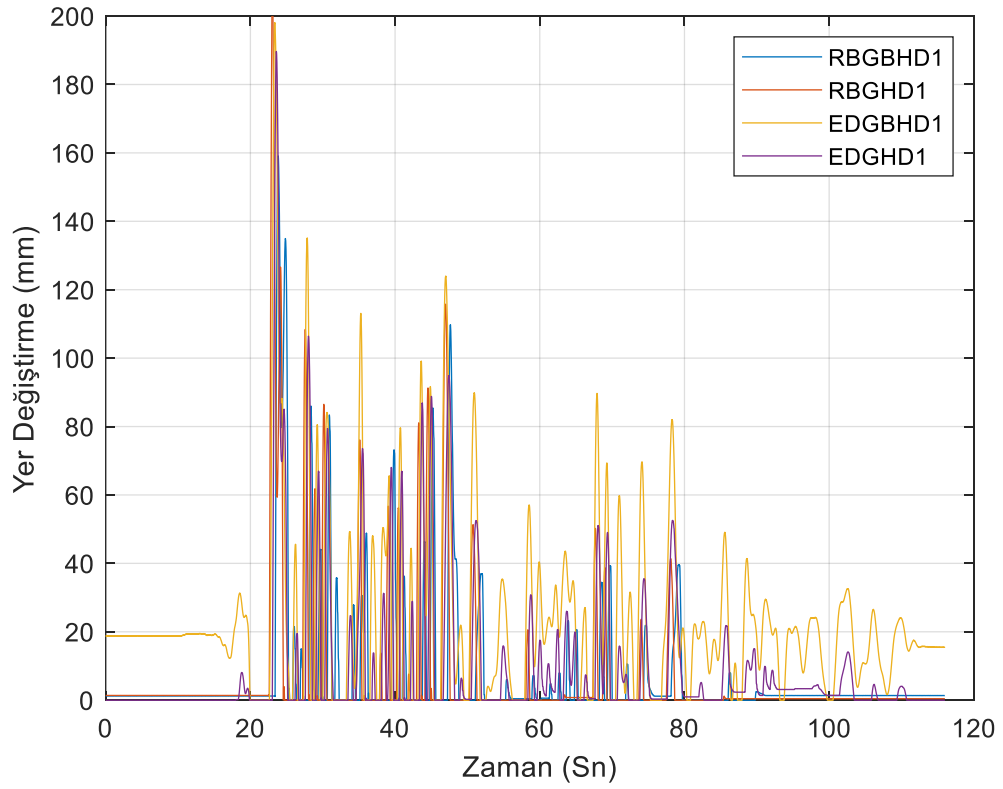


Şekil 70. EDGHD1 dinamik yer değiştirme değerleri

Düzlem dışı yüklemelerde esnek derzli birleşimlerde geopolimer beton harçların kullanılmasının geleneksel beton harçların kullanılmasına nazaran daha düşük dinamik yer değiştirme değerleri elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ancak rijit birleşimlerde geleneksel beton harçlarının kullanılmasının dinamik yer değiştirme değerlerini daha da azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 71’de minimum düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerleri verilmiştir. Şekil 72’de ise maksimum düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerleri verilmiştir.



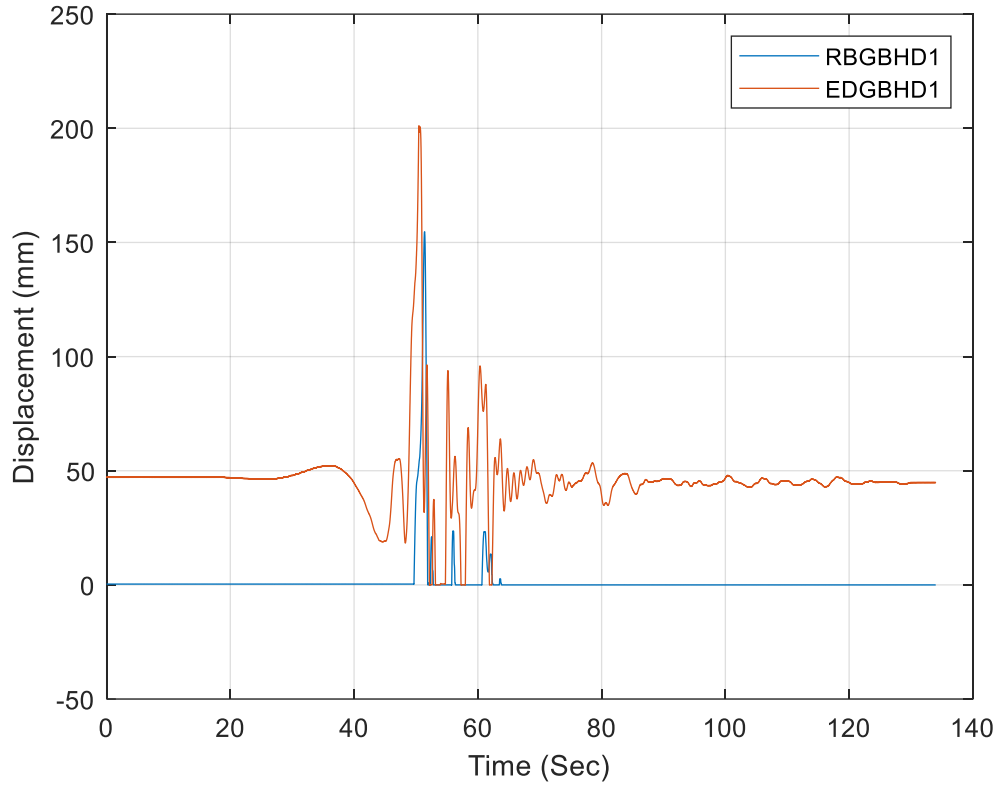
Şekil 71. Minimum düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerleri



Şekil 72. Maksimum düzlem dışı dinamik yer değiştirme değerleri

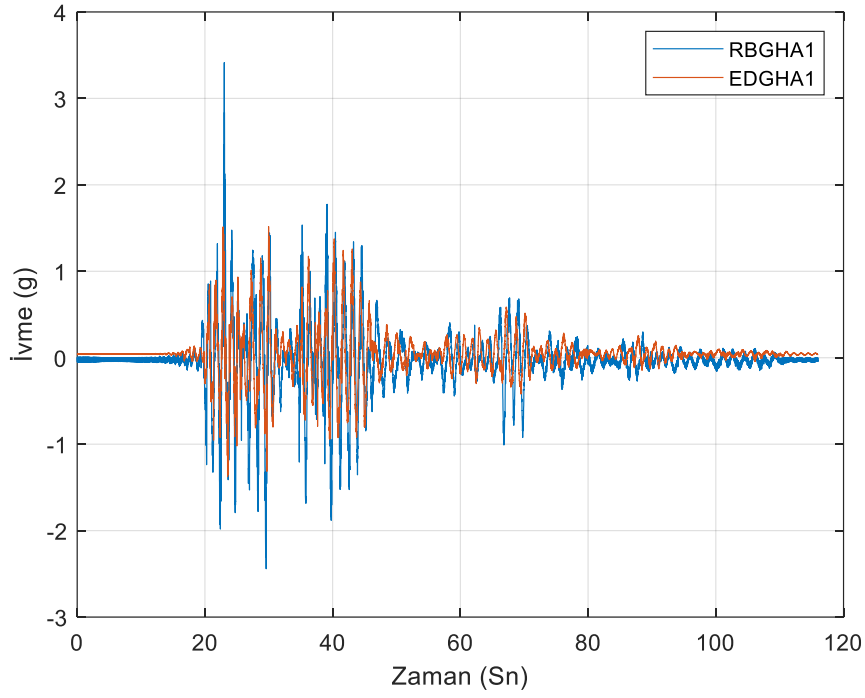
Düzlem dışı olarak en yüksek dinamik yer değiştirme değerini Sivrice en düşük ivme değerini ise Erzincan depreminin oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Minimum ve maksimum dinamik yer değiştirmesi değerlerinde en düşük yer değiştirme değerlerini RBGBHD1 modelinde en yüksek yer değiştirme değerlerinin EDGBHD1 modelinde elde edildiği tespit edilmiştir. Rijit birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda dinamik yer değiştirme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %21,58 ve %15,42 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Esnek derzli birleşimde geopolimer harçların kullanılması sonucunda dinamik yer değiştirme değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla %16,35 ve %23,90 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda esnek derzli birleşimlerin dolgu duvarlarda kullanılmasının rijit birleşimlere nazaran daha yüksek dinamik yer değiştirme değerlerini oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca geopolimer harçların sadece esnek derzli birleşimlerde dinamik yer değiştirmeleri etkili bir şekilde azalttığı belirlenmiştir. Sarsma tablası deney sonuçları düzlem dışında geopolimer harçların esnek derzli birleşimlerde dinamik yer değiştirme değerlerini azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir.

Düzlem dışında geleneksel beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılmasıyla dinamik yer değiştirme değerlerinde oluşan değişimler maksimum etkiyen deprem için değerlendirilmiştir. Değerlendirme de rijit birleşimde en büyük dinamik yer değiştirme değerini oluşturan Sivrice depremi dikkate alınmıştır. Geleneksel beton harç kullanılan model çelik çerçevelerde kayma çivisi kullanılmasının esnek derz yapılmasına karşı tepe ivme değerlerini yaklaşık %19,65 oranında azalttığı belirlenmiştir (Şekil 73).



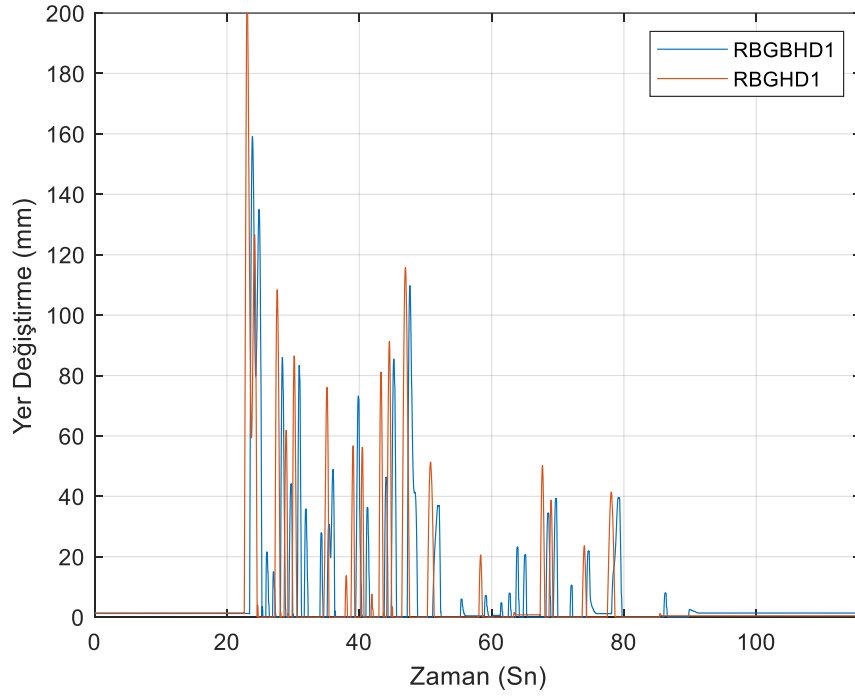
Şekil 73. Düzlem dışı ve geleneksel beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin yer değiştirmeye olan etkisi

Düzlem dışında geopolimer beton harçların kullanılması durumunda kayma çivilerinin model çelik çerçevelerde kullanılması durumunda dinamik yer değiştirme değerlerinde oluşan değişimler maksimum etkiyen deprem için değerlendirilmiştir. Geopolimer harç kullanılmasında kayma çivisi yerine birleşimlerde esnek derz yapılmasının dinamik yer değiştirmeleri yaklaşık %6,57 oranında azalttığı belirlenmiştir (Şekil 74).



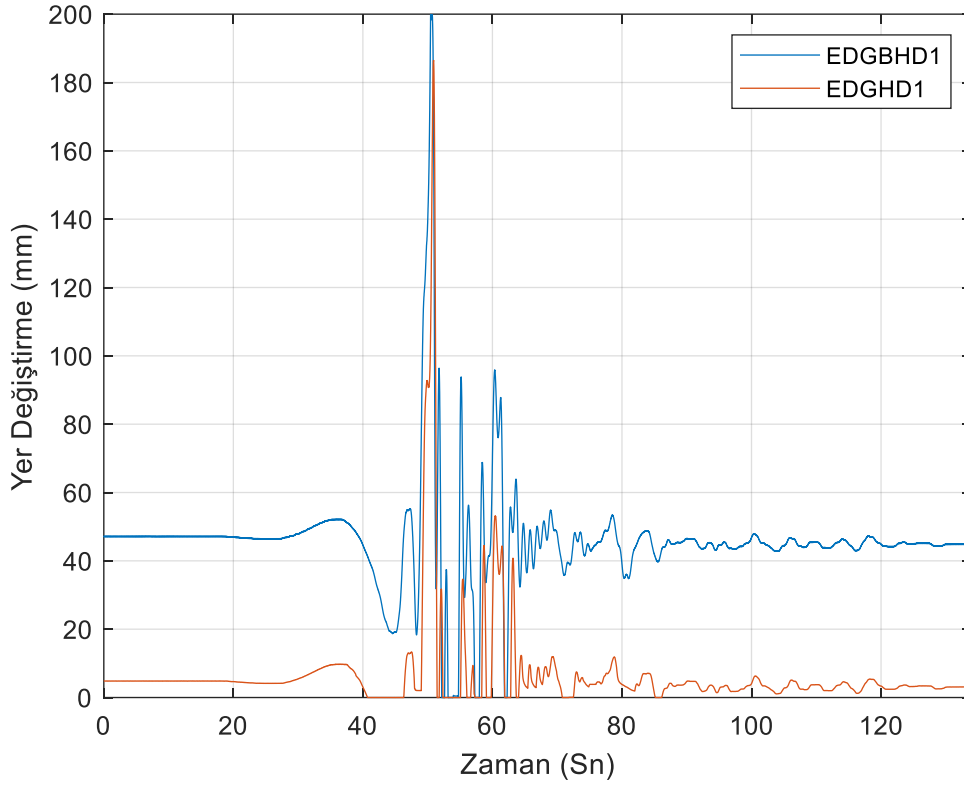
Şekil 74. Düzlem dışı ve geopolimer beton harç kullanılan çerçevede kayma çivilerinin yer değiştirmelere olan etkisi

Düzlem dışında dolgu duvarla çelik çerçeve arasında rijit birleşim yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda dinamik yer değiştirmelerin %20,89 oranında arttığı tespit edilmiştir (Şekil 75).



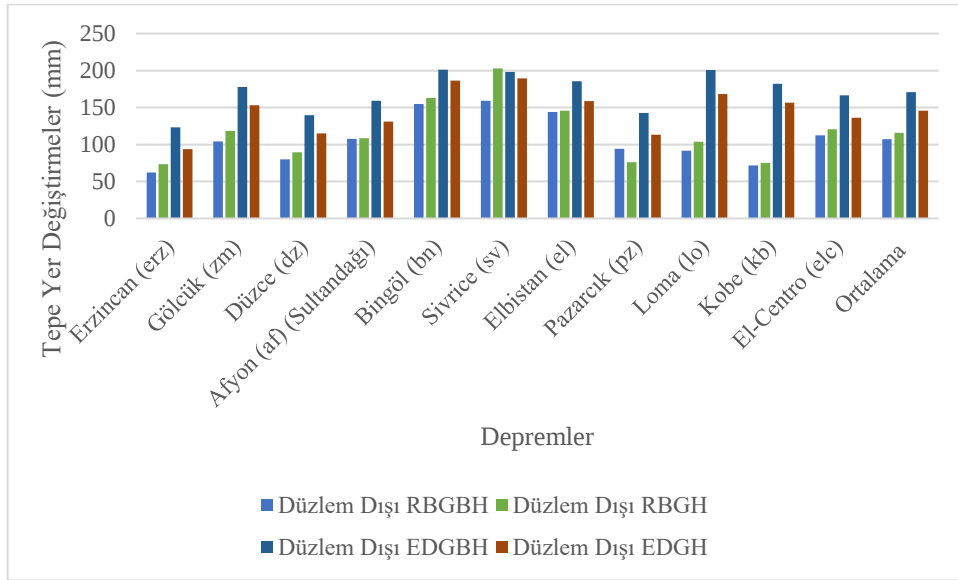
Şekil 75. Düzlem dışı ve rijit birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi

Düzlem dışında dolgu duvarla çelik çerçeve arasında esnek derz yapılan modelde geopolimer harçların duvar birleşimlerinde kullanılması sonucunda dinamik yer değiştirmelerin %7,96 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 76).



Şekil 76. Düzlem dışı ve esnek derzli birleşimde geopolimer harçların yer değiştirmeye olan etkisi

Düzlem dışında yapılan yüklemeler sonucunda ortalama olarak model çelik çerçevelerde oluşan tepe ivme değerlerinden en az olan modelin rijit birleşimli (kayma çivili) ve geleneksel beton harç birleşimli modelin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 77). Rijit bağlantılı model çelik çerçevede geopolimer harçların kullanılmasının ortalama olarak dinamik yer değiştirme değerlerinin %8,06 oranında arttırdığı belirlenmiştir. Esnek derz bağlantılı model çelik çerçevede geopolimer harçların kullanılmasının ortalama olarak dinamik yer değiştirme değerlerinin %14,66 oranında azaldığı belirlenmiştir. Rijit birleşimlerde kayma çivilerinin kullanılmasının dinamik yer değiştirme değerlerini azaltmada geleneksel beton harçlarda etkin rol oynadığı ancak geopolimer harçlarda etkisiz sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak düzlem dışı durumda kayma çivili geleneksel beton harçlı birleşimin yapılmasının dinamik yer değiştirme değerlerini azaltmada daha etkili olabileceği sonucuna varılmıştır.



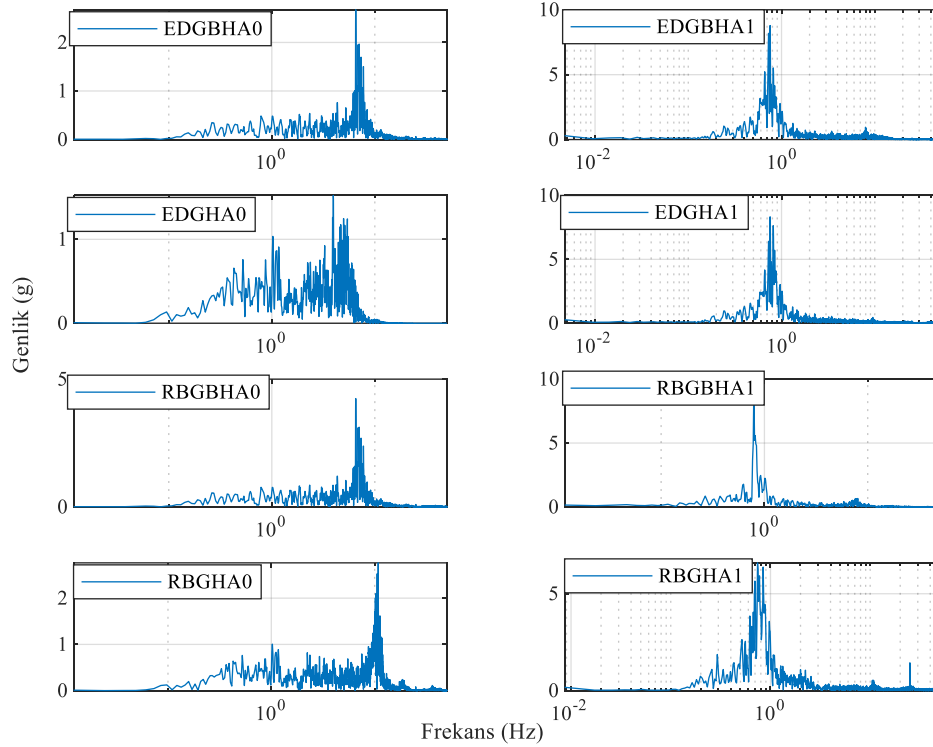
Şekil 77. Düzlem dışı durumda dinamik yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

Tez kapsamında incelenen düzlem dışı yer değiştirme değerleri doğrultusunda, rijit birleşimli geleneksel beton harçlı model (RBGBHA0) en yüksek deplasman değerlerini üretmiştir. Bu durum, rijit birleşimlerin ani kuvvet aktarımına yol açarak yapının enerji yutma kapasitesini azaltmasıyla ilişkilidir. Buna karşın, esnek derzli ve geopolimer harçlı EDGH modelinde, deplasmanlar önemli ölçüde düşmüş ve sismik performans daha kontrollü bir şekilde gelişmiştir. Bu bulgu, Sarno vd. (2021) tarafından moment aktaran çelik çerçevelerle yürütülen deneysel çalışmada da benzer şekilde raporlanmıştır; esnek birleşimlerin yer değiştirme değerlerini %40'a varan oranda düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca, Belghiat vd. (2021), dolgu duvarların hem düşey hem de yatay yük taşıma kapasitesine katkı sunduğunu ve özellikle ilk hasarı alarak ana taşıyıcı elemanları koruduğunu ifade etmiştir. Bu sonuçlar, düzlem dışı deformasyonların azaltılmasında dolgu detaylandırmasının ve harç türünün belirleyici olduğunu göstermekte; özellikle geopolimer harç ve esnek derz kombinasyonunun, sismik taleplere karşı etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Frekans Tanım Alanında Yapılan Çözümlemeler

Frekans tanım alanında 11 deprem verisi altında 4 farklı birleşimlere sahip dolgu duvarlı model çelik çerçevelerde analizler yapılmıştır. Her bir model çelik çerçevede maksimum tepe ivme değerini oluşturan deprem verisi kullanılarak zorlanmış titreşim kapsamında dinamik parametreler elde edilmiştir. Rijit birleşimli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı çelik çerçevenin düzlem içi ve düzlem dışı yüklemelerinde Gölcük depremi referans alınmıştır. Rijit birleşimli geopolimer harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevenin düzlem içi durumunda Afyon ve düzlem dışı durumunda Sivrice depremi referans alınmıştır. Esnek derzli geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı çelik çerçevenin düzlem içi durumunda Gölcük depremi ve düzlem dışı

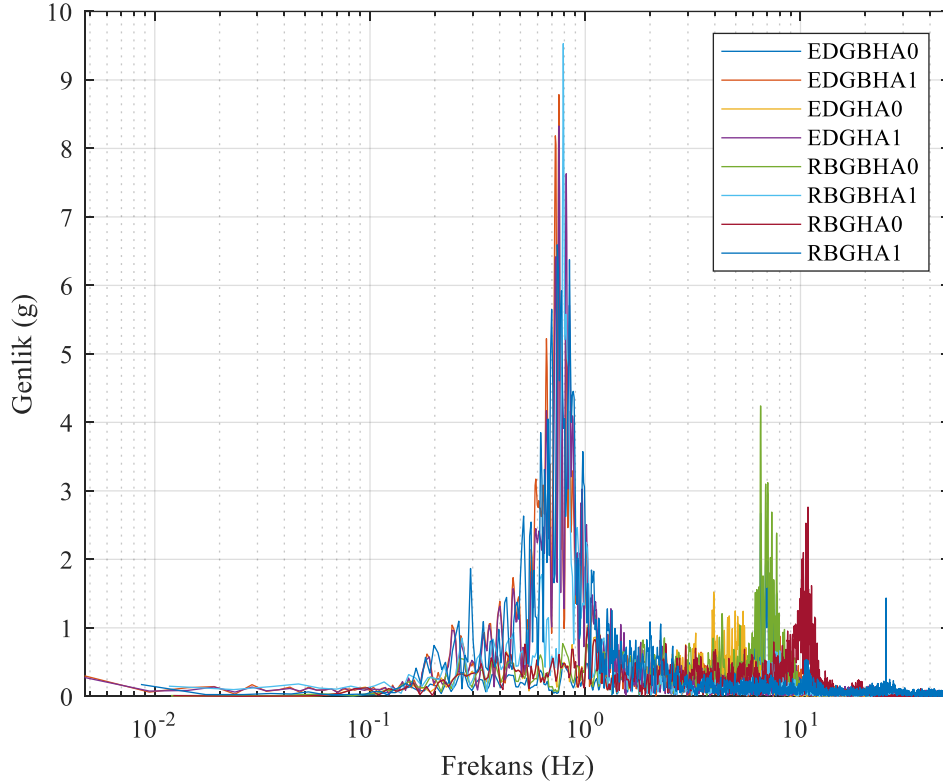
durumunda Pazarcık depremi referans alınmıştır. Esnek derzli geopolimer harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevenin düzlem içi durumunda Afyon ve düzlem dışı durumunda Pazarcık depremi referans alınmıştır. Şekil 78’de 0,1 ile 50 Hz. frekans aralıklarında genliklere bağlı olarak değişen çizimler verilmiştir. Şekil 78’e göre düzlem içi olarak RBGBH modeli 6,53 Hz, RBGH modeli 10,84 Hz, EDGBH modeli 6,53 Hz. ve EDGH modeli 3,96 Hz. frekans değerlerine ulaştığı hesaplanmıştır. Rijit birleşimde geopolimer harçların kullanılması hâkim frekans değerini %39,76 oranında arttırarak yapıyı daha rijit bir forma getirdiği tespit edilmiştir. Ancak esnek derzli birleşimde geopolimer harçların kullanılması hâkim frekans değerini %39,35 oranında azaltarak yapıyı daha esnek bir forma getirmiştir. Geleneksel beton harçları düzlem içinde her iki birleşimde frekans değerlerine etki etmemiştir. Düzlem içi durumda esnek derzli birleşimin yapılması hâkim frekans değerini %63,46 oranında azaltarak yapının daha esnek hareket edebilme imkanını arttırmıştır.



Şekil 78. Frekans tanım alanında yapılan çözümlemeler

Şekil 78’e göre düzlem dışı olarak RBGBH modeli 0,79 Hz, RBGH modeli 0,79 Hz, EDGBH modeli 0,75 Hz. ve EDGH modeli 0,75 Hz. frekans değerlerine ulaştığı hesaplanmıştır. Düzlem dışı durumda tüm çelik çerçeve durumları için belirgin bir değişikliğin olmadığı belirlenmiştir. Aynı frekans değerlerine karşılık maksimum düzlem dışı mutlak ivme değerleri RBGBH, RBGH, EDGBH ve EDGH için sırasıyla 9,53 g, 9,53 g, 8,78 g ve 8,30 g olduğu belirlenmiştir. Yaklaşık olarak aynı frekans muhteviyatında esnek derzli birleşimlerde daha

düşük düzlem dışı ivme değerlerinin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca esnek derzli birleşimde geopolimer harç kullanılması durumunda aynı frekans aralıklarında %5,47 oranında daha az düzlem dışı ivme değerlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 79’da ise düzlem içi ve düzlem dışı durumlarında tüm model çerçevelerde yapılan frekans çözümlemelerinin çizimi verilmiştir. Şekil 80’de frekans ivme değerlendirilmesi açısından en iyi performansı sergileyen çerçevenin esnek derzli geopolimer harçlı dolgu duvarlı çelik çerçevenin (EDGH) olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 79. Frekans tanım alanında yapılan çözümlemelerin birlikte çizdirilmiş hali

Frekans tanım alanında yapılan çözümlemelerde, her bir model için tepe frekans bileşenlerinin değişimi dikkat çekicidir. Özellikle geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model (RBGBHA0), daha düşük frekanslarda yoğunluk gösterirken, esnek derzli ve geopolimer harçlı model (EDGH) daha yüksek frekans aralığında enerji yayılımı sergilemiştir. Bu durum, yapının rijitliğindeki artışa ve daha homojen enerji dağılımına işaret etmektedir. Bu bağlamda, EDGH modelinin spektrumunda daha dar genlikli ve yüksek frekanslı tepkiler üretmesi, yapının enerji sönümlenme ve rijitlik açısından daha kararlı bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, frekans tanım alanındaki çözümlemeler, kullanılan dolgu tipi ve derz detaylandırmasının yapıların titreşim özelliklerini doğrudan etkilediğini doğrulamaktadır.

Sarsma Tablası Deneylerinde Oluşan Hasar Mekanizmaları

Sarsma tablası deneyleri düzlem içi ve düzlem dışı olarak geleneksel ve geopolimer harçların kullanıldığı esnek ve rijit birleşimli model çelik çerçevelere uygulanmıştır. Şekil

80’de düzlem içi yükleme de RBGBH model çerçevesinde oluşan hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Kolon ve duvar arasında olan rijit birleşimli geleneksel harçların deprem etkisiyle kısmen ayrıştığı, kirişle birleşen harçlarda ise hafif çatlakların olduğu gözlemlenmiştir. Dolgu duvarlarda ise hafif ayrışmaların ve çatlakların olduğu izlenmiştir. Ancak en yüksek tepe ivmesinin olduğu model çerçeve olmasına rağmen herhangi bir şekilde tamamen göçme oluşmamıştır. EDGH modelinde test sonrası gözlemlenen genel yapı davranışı: Deprem etkisi sonrası yapıda gözle görülür bir hasar oluşmamıştır. Dolgu duvar, çerçeve ile uyum içinde çalışmış, özellikle birleşim bölgelerinde çatlak, ezilme veya ayrılma izine rastlanmamıştır. Bu durum, geopolimer harç ve esnek derz kombinasyonunun sismik performansı iyileştirici etkisini göstermektedir. Şekil 81’de geopolimer harçlı rijit birleşimli model çelik çerçevede oluşan hasarlar görülmektedir. Kiriş birleşim bölgelerinde ki harçlarda ve dolgu duvarlarda çok hafif çatlakların olduğu izlenmiştir. Ancak Düzlem içi durumda RBGH model çerçevede herhangi bir ileri hasara uğrayan eleman ve harç tespit edilmemiştir. Düzlem içi yüklemede en büyük dinamik yer değiştirme yapmasına rağmen geleneksel beton harçlı model çerçeve de olduğu gibi bu çerçevede de herhangi bir göçme yaşanmamıştır.



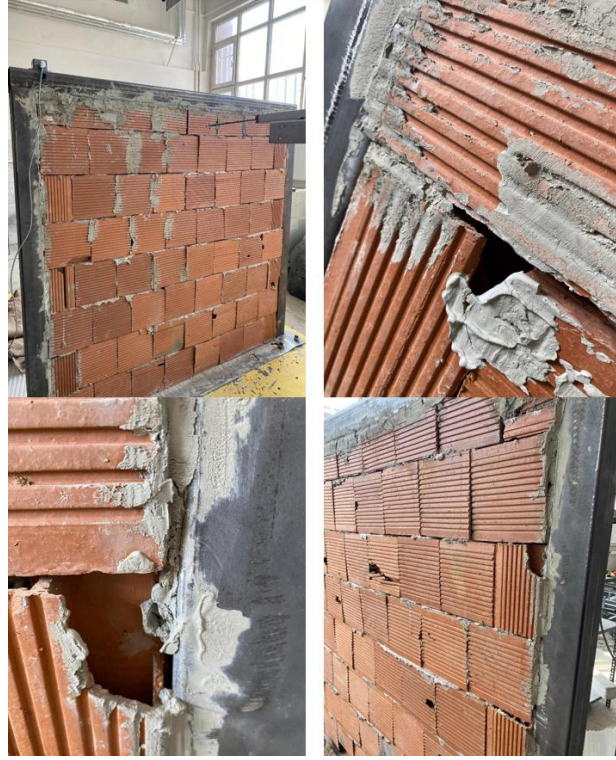
Şekil 80. Düzlem içi durumda RBGBH modelinde oluşan hasarlar



Şekil 81. Düzlem içi durumda RBGH modelinde oluşan hasarlar

Rijit birleşimli, geleneksel beton harçlı dolgu modelinde çerçevenin alt bölgesinde yoğunlaşan ezilme hasarı gözlemlenmiştir. Çatlaklar özellikle köşe bölgelerde başlamış ve yüzeyde yayılım göstermiştir. Bu, yapının sönümleme kapasitesinin düşük olduğunu ve enerjinin dolguya doğrudan aktarıldığını göstermektedir.

Şekil 82’de düzlem dışı durumda rijit birleşim geopolimer beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede oluşan hasarlar görülmektedir. Dolgu duvarları birleştiren harçlarda kısmi ayrışmaların ve dolgu duvarlarda eksen kaçıklıklarının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bazı dolgu duvarlarda da bazı kırılmaların meydana geldiği izlenmiştir. Geopolimer harçlı, rijit birleşimli sistemde çatlaklar harç yatakları boyunca uzanmış ve bazı bölgelerde çerçeve ile dolgu duvar arasında yerel ayrılmalar oluşmuştur. Hasarın derecesi orta seviyede olup, özellikle birleşim alanlarında toplanmıştır.



Şekil 82. Düzlem dışı durumda RBGH modelinde oluşan hasarlar

Şekil 83 düzlem dışı durum için rijit birleşimde geleneksel beton harçlı dolgu duvarlı model çelik çerçevede oluşan hasarları göstermektedir. Kayma çivilerinin olmadığı taban bölgesinde dolgu duvarların göçtüğü izlenmiştir. Düzlem dışı durumda ortalama olarak en küçük tepe ivme değerlerinin olduğu model çerçeve olmasına rağmen tabanda dolgu duvarların ayrışmasının kayma çivisinin olmamasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Ancak tabanda kayma çivilerinin olmadığı geopolimer beton harçlarının kullanıldığı rijit birleşimli dolgu duvarlı model çelik çerçevede düzlem dışı yüklemelerde tabanda herhangi bir ayrışma oluşmamıştır. Bu da geopolimer harçların erken mukavemetinin kazanması ile güçlendirmede kullanılabileceğini göstermektedir. Çünkü ifade edilen bu numune de hâkim frekans değerleri diğer numunelerden daha yüksek çıktığı Şekil 78’de verilmiştir. Esnek derz uygulamasına rağmen, sınırlı da olsa çatlak oluşumu gözlenmiştir. Çatlaklar dolgu yüzeyinde yatay ve çapraz yönlerde gelişmiştir. Bu durum, derz esnekliğinin enerji yayılımını belirli ölçüde sağladığını ancak tam etkili olmadığını göstermektedir.



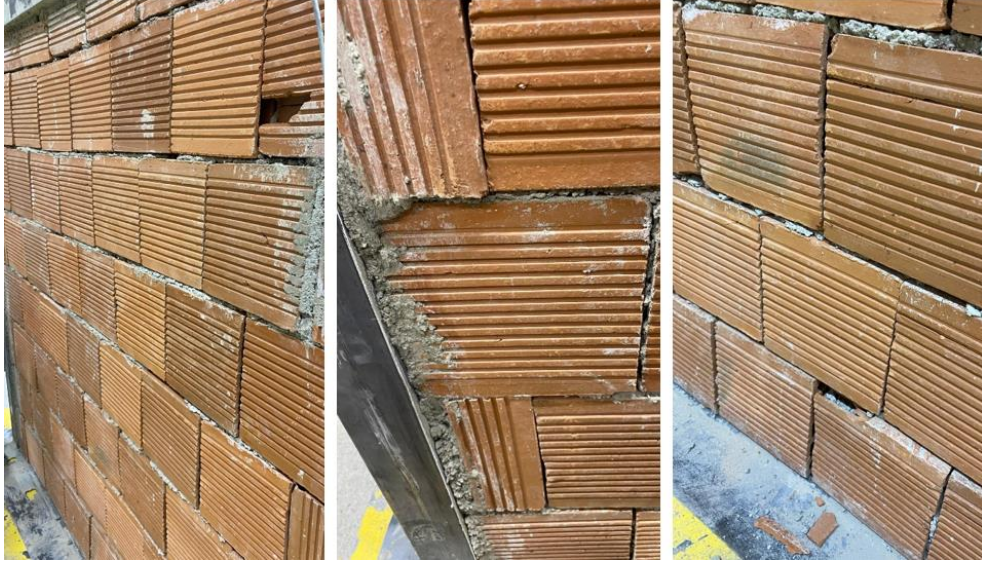
Şekil 83. Düzlem dışı durumda RBGBH modelinde oluşan hasarlar

Sarsma tablası deneyleri esnek derzli birleşime sahip dolgu duvarlı model çelik çerçevelere de uygulanmıştır. Düzlem içi durumda esnek derzli geleneksel beton harçlı modelde deprem etkisinden kaynaklı olarak kısmi ekse kaçıklıklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun dışında duvarda ve harç birleşimlerinde herhangi bir hasar meydana gelmediği izlenmiştir (Şekil 84). Test sonrasında yapı üzerinde belirgin çatlak veya ezilme oluşmamış, dolgu duvar bütünlüğünü korumuştur. Bu, hem esnek derz hem de geopolimer harç birleşiminin etkinliğini ortaya koymaktadır.



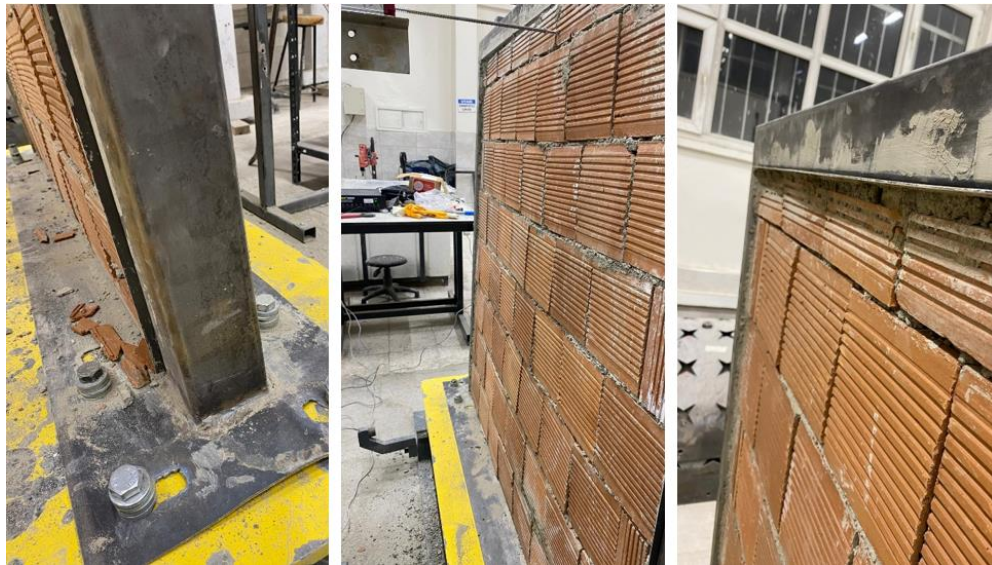
Şekil 84. Düzlem içi durumda EDGBH modelinde oluşan hasarlar

Geopolimer harçların kullanıldığı esnek derzli model çelik çerçevelerde düzlem içinde uygulanan sarsma tablası deneyleri dolgu duvarlarda eksen kaçıklıklarına ve bazı dolgu duvarlarda kırılmaların oluştuğunu göstermiştir (Şekil 85). Çerçevenin üst birleşim noktalarında gözlemlenen ezilme ve parçalanma hasarları, rijit bağın deprem enerjisini absorbe edememesi sonucu ortaya çıkmıştır. Hasarın derecesi yüksektir.



Şekil 85. Düzlem içi durumda EDGH modelinde oluşan hasarlar

Düzlem dışı durumda geleneksel beton harcın kullanıldığı esnek derzli dolgu duvarlı model çerçevede deprem etkilerinden kaynaklı olarak taban ankraj birleşimlerinde açılmaların oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca taban dolgu duvarlarında yatay ötelemelerin oluştuğu da gözlemlenmiştir (Şekil 86). Çekme etkisiyle oluşan çatlaklar, dolgu yüzeyinde belirgin şekilde yayılmıştır. Hasar, birleşim bölgelerine kıyasla orta bölgelerde daha yoğundur.



Şekil 86. Düzlem dışı durumda EDGBH modelinde oluşan hasarlar

Geopolimer harçların kullanılmasıyla taban ankrajlarında herhangi bir esnemenin oluşmadığı ancak bazı dolgu duvarlarda kısmi olarak çatlakların oluştuğu izlenmiştir (Şekil 87). Çerçeve ve dolgu sistemi test sonrasında yapısal bütünlüğünü tam olarak korumuştur. Gözle görülür hasar oluşmamış, bu da sistemin yüksek enerji yutma ve deformasyon toleransına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 87. Düzlem dışı durumda EDGH modelinde oluşan hasarlar

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez kapsamında geopolimer harçların ve kayma çivilerin dolgu duvarların sismik davranışına olan etkilerinin incelenmesi bir dizi çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmalarda rijit birleşimli (kayma çivili) ve esnek derzli dolgu duvar yerleşimleri dikkate alınarak ölçekli model çelik çerçeveler üretilmiştir. İki farklı birleşime sahip model çerçevelerde dolgu duvarlar kullanılmıştır. Dolgu duvarlar ise birbirleriyle yaklaşık olarak aynı basınç dayanımına sahip geopolimer ve geleneksel beton harçlar ile birleştirilmiştir. Toplamda rijit birleşimli geleneksel beton harca sahip dolgu duvarlı çelik çerçeve (RBGBH), rijit birleşimli geopolimer beton harca sahip dolgu duvarlı çelik çerçeve (RBGH), esnek derz birleşimli geleneksel beton harca sahip dolgu duvarlı çelik çerçeve (EDGBH) ve esnek derz birleşimli geopolimer beton harca sahip dolgu duvarlı çelik çerçeve (EDGH) olmak üzere dört tane model 1/3 ölçeğinde üretilmiştir. Tek açıklığa sahip model çerçeveler düzlem içi ve düzlem dışı olabilecek şekilde sarsma tablası üzerinde deprem testlerine tabi tutulmuşlardır. Dünyada ve ülkemizde meydana gelen 11 farklı büyük depremin ölçekli ivme verileri kullanılarak sarsma tablası deneyleri yürütülmüştür. Tezin sonunda aşağıda belirtilenler elde edilmiştir.

- Düzlem içi durumda ortalama etkiyen deprem verisine göre en düşük tepe ivmesi değeri EDGH modelinde oluşmuştur. Kayma çivileri tepe ivmesi değerlerini azaltmada etkili olamamıştır. Geopolimer harçların rijit ve esnek birleşimde kullanılması sonucunda tepe ivme değerlerini sırasıyla %4,51 ve %24,36 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Esnek derzli modellerde rijit birleşimli modellere göre daha düşük tepe ivme değerlerinin olduğu tespit edilmiştir. Ancak rijit birleşimli modellerde geopolimer harçlar bazı depremlerde tepe ivme değerlerini arttırdığı görülmüştür.
- Düzlem içi durumda ortalama etkiyen deprem verisine göre en düşük dinamik yerdeğiştirme değeri EDGBH modelinde oluşmuştur. Kayma çivileri dinamik yer değiştirme değerlerini geopolimer harçlarda %4,91 oranında azaltmasına rağmen geleneksel beton harçlarda %13,29 oranında arttırmıştır. Geopolimer harçların rijit ve esnek birleşimde kullanılması sonucunda dinamik yer değiştirme değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Esnek derzli modellerde rijit birleşimli modellere göre daha tepe ivme değerlerinin olduğu tespit edilmiştir. Ancak rijit birleşimli modellerde geopolimer harçlar bazı depremlerde daha düşük dinamik yer değiştirmelere sahip olduğu görülmüştür.

- Düzlem dışı durumda ortalama etkiyen deprem verisine göre en düşük tepe ivmesi değeri RBGBH modelinde oluşmuştur. Kayma çivileri tepe ivmesi değerlerini azaltmada etkili olduğu tespit edilmiştir. Geopolimer harçların esnek birleşimde kullanılması sonucunda tepe ivme değerlerini %3,54 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Ancak geleneksel beton harçlı modelde kayma çivileri tepe ivmeleri azaltmada etkili olamamıştır. Esnek derzli geopolimer harçlı modellerde rijit birleşimli modellere göre daha düşük tepe ivme değerlerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Ancak rijit birleşimli modellerde geleneksel beton harç kullanılmasının tepe yer değiştirme değerlerini daha etkili bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir.
- Düzlem dışı durumda ortalama etkiyen deprem verisine göre en düşük dinamik yer değiştirme değeri RBGBH modelinde oluşmuştur. Kayma çivileri dinamik yer değiştirme değerlerini azaltmada etkili olamadığı sonucuna varılmıştır. Geopolimer harçların rijit birleşimde kullanılması dinamik yer değiştirme değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Ancak esnek derzli birleşimlerde dinamik yer değiştirme değerlerini %14,67 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Esnek derzli modellerde rijit birleşimli modellere göre daha yüksek dinamik yer değiştirme değeri oluştuğu belirlenmiştir.
- Frekans tanım alanında yapılan çözümlemeler düzlem içinde hâkim frekans değerinin en yüksek olduğu modelin düzlem içinde RBGH (10,84 Hz) olduğunu göstermiştir. Düzlem dışında ise tüm modellerde yaklaşık aynı hâkim frekans değeri (0,79 Hz) oluşmuştur. Ancak aynı frekans değerinde daha düşük düzlem dışı ivme değerine sahip modelin EDGH olduğu belirlenmiştir. Bu durum geopolimer harçların rijit birleşimde kullanıldığında yapının rijitliğini daha fazla arttırdığını ve esnek derzde kullanıldığında ise tepe ivme ve dinamik yer değiştirme değerlerini azalttığını göstermiştir.
- Sarsma tablası deney sonuçlarında RBGBH modelinin düzlem dışı yüklemesinde tabana yakın dolgu duvarlarda göçmelerin oluştuğu ve EDGBH modelinde ise taban ankrajlarında açılmaların oluştuğu tespit edilmiştir. RBGBH modelinde oluşan taban göçmelerinin tabanda kayma çivilerinin olmamasından kaynaklandığı düşünülmüştür. EDBGH modelinde ise aşırı yer değiştirmelerden kaynaklı olarak ankrajlarda açılmalar meydana geldiği düşünülmüştür.

Tez çalışmasının sonucunda hem düzlem içi hem de düzlem dışı ivme ve yer değiştirmeleri azaltarak aynı zamanda hasarsız göçme mekanizması sağlayan geopolimer harçların duvar güçlendirme malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca geleneksel beton harçlarına yakın performans sergileyen geopolimer harçların sürdürülebilir bir

evre için yapı uygulamalarında beton malzemesi olarak tercih edilmesi beklenmektedir. Kayma çivilerinin dolgu duvarların sismik performansına tam anlamıyla katkıda bulunabilmesi için yapının kolon, kiriş ve taban bölümünde belirli aralıklarla düzenlenmesi gerektiğı sonucuna varılmıştır.

Tez alışması sonunda göze alınan X doğrultusunda en iyi performansı sergileyen modelin esnek derzli geopolimer harçlı dolgu duvarlı model elik çerçevenin olduğı tespit edilmiştir. Bu model çerçevenin her iki doğrultuda da yerleştirilmesi gelecekte iyi bir modüler güçlendirme sisteminin olabileceğini göstermektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen sarsma tablası deneyleri sonucunda, dolgu duvarlarda kullanılan geopolimer harçların, özellikle esnek derzli bağlantı detaylarıyla birlikte elik ereve sistemlerin sismik performansını anlamlı düzeyde artırdığı belirlenmiştir. Elde edilen veriler, geleneksel beton harçlara kıyasla geopolimer harçların tepe ivmesi, yer değıştirme ve frekans davranışları açısından daha etkin sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, esnek birleşim detaylarının enerji yayılımını düzenleyerek göçme mekanizmalarını geciktirdiğı ve yapı bütünlüğünü koruduğı gözlemlenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı ereve açıklıkları, yükseklik oranları, malzeme türleri ve çok katlı yapı sistemlerinde geopolimer harçlı dolgu duvar uygulamalarının incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, sayısal modelleme, yapı-zemin etkileşimi ve farklı yükleme protokolleri altında uzun süreli davranış analizleri yapılarak sürdürülebilir ve depreme dayanıklı yapı tasarımlarına katkı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- AISC 341-10. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, Inc; 2010.
- AISC 341-16. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, Inc; 2016.
- Akbaş, B., 2018. Çelik Yapı Tasarımı Uygulamaya Yönelik Bir Yaklaşım, 2. Basımdan Çeviri, Eylül 2018, 978-605-320-934-8.
- Alam, M.S., Nehdi, M., Amanat, K.M., 2009. Modelling and analysis of retrofitted and un retrofitted masonry-infilled RC frames under in-plane lateral loading. Struct Infrastruct Eng. <https://doi.org/10.1080/15732470600856262>
- Alcan, H.G., Bayrak, B., Öz, A., Çelebi, O., Kaplan, G., Aydın, A.C., 2024. Synergetic effect of fibers on geopolymers: Cost-effective and sustainable perspective. Construction and Building Materials 414: 135059. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135059>
- Angel, R.E., 1994. Behavior of reinforced concrete frames with masonry infill walls. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Bai, T., Song, Z.G., Wu, Y.G., Hu, X.D., Bai, H., 2018. Influence of steel slag on the mechanical properties and curing time of metakaolin geopolymer, Ceram. Int. 44 (13): 15706–15713.
- Barka, A.A., 1992. The North Anatolian Fault Zone. Ann Tectonicae
- Bayrak, B., Benli, A., Alcan, H.G., Çelebi, O., Kaplan, G., Aydın, A.C., 2023. Recycling of waste marble powder and waste colemanite in ternary-blended green geopolymer composites: Mechanical, durability and microstructural properties. Journal of Building Engineering 73: 106661. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106661>
- Bayrak, B., Çelebi, O., Öz, A., Ustabaş, İ., Kaplan, G., Aydın, A.C., 2023. Effect of aluminosilicate precursors and curing regime on physico-mechanical durability and microstructural characteristics of coral geopolymers (Cor-Geo): Cleaner production for coral islands. Construction and Building Materials 407:133596. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133596>
- Bayrak, E., Çelebi, O., Kılıç, M., Özer, Ç., Aydın, A.C., 2024. The strong ground motion and structural response analysis of 06 February 2023 Pazarcık and Elbistan earthquakes (Mw 7.7 and 7.6): a Case study for Malatya-Türkiye, Eastern Anatolia. Bulletin of Earthquake Engineering. Bulletin of Earthquake Engineering <https://doi.org/10.1007/s10518-024-02079-5>
- Bayrak, O.F., ve Bıkçe, M., 2019. Dolgu duvarın yapısal düzensizliklere ve performansa etkisinin mevcut bir yapı üzerinde incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. (24): 3, 10.17482/uumfd.477760.
- Belghiat, C., Plassiard, J.P., Messabhia, A., Ple, O., Guenfoud, M., 2021. Analytical and numerical study of double panel confined masonry walls. J Build Eng. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102322>
- Beyen, K. and Tanircan, G. 2015. Strong ground motion characteristics of the 2011 Van Earthquake of Turkey: Implications of seismological aspects on engineering parameters. Earthquake and Structures , vol.8 , 1363-1386.

- Borsaikia, A.C., Dutta, A., Deb, S.K., 2021. Evaluation of participation of masonry infill walls in the linear and nonlinear behaviour of RC buildings with open ground storey. *J Build Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103263>
- Borujeni, A.K., and Mahdi, T., 2017. Reducing the in-plane effect of infill on steel moment frame. *International Journal of Steel Structures* 17(3): 1171-1181. 10.1007/s13296-017-9024-7
- Budiwati, I.A.M., Sukrawa, M., Wahyuni, I., 2018. Numerical study on seismic behaviour of reinforced concrete structures with steel brace and infill wall. *AIP Conf. Proc.* 1977, 040027. <https://doi.org/10.1063/1.5042997>
- Cai, G., Fujinaga, T., Larbi, A.S., Wen, Y., Malla, P.B., 2023. Cyclic behavior of RCFT columns with large D/t ratio steel tubes: Effect of reinforcement arrangement. *Bulletin of Earthquake Engineering.* 21:4565–4588 <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01696-w>
- Celep, Z., 2018. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Beta Yayınları. İstanbul, Türkiye.
- Choudhury, A.S., and Laskar, A.I., 2023. Performance of Geopolymer Mortar and Steel Fiber Reinforced Geopolymer Mortar on Rehabilitation of Seismically Detailed Beam Column Joint. *Journal of Earthquake Engineering* 27(6): 1607-1628. <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080/13632469.2022.2086187>
- Crisafulli F. J., Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills, PhD Thesis, University of Canterbury, Department of Civil Engineering, Christchurch, 1997, 10092.
- Çelebi, O. ve Beyen, K., (2018) Betonarme binaların depreme karşı davranışında dolgu duvarların ve sönümleyici sistemlerin etkisi, *Afet ve Risk Dergisi* 1(1): 9-25.
- D'Ayala, D., Worth, J., Riddle, O., 2009. Realistic shear capacity assessment of infill frames: comparison of two numerical <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.044>
- Danish, A., Çelebi, O., Bayrak, B., Kaplan, G., Aydın, A.C., Özbakkaloğlu, T., 2024. Performance assessment of quaternary-blended geopolymers under different curing temperatures. *Journal of Building Engineering* 95:110115. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110115>
- Davidovits, J., 2020. *Geopolymer Chemistry and Applications*, fifth ed.
- Doğangün, A., 2021. *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Etli, S., and Güneyisi, E.M., 2023. Effect of using eccentric braces with different link lengths on the seismic demand of cfst column-composite beam frames subjected to near-field and far-field earthquakes. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering.* 47:1599–1627 <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00994-8>
- Eurocode 1993-1-8 : 2005 eurocode 3. design of steel structures. design of joints., (2005).
- Feng, N., Cao, P., Wu, K., Zhang, P., 2016. Experimental investigation on strengthening of infilled frame structures by profiled steel sheet shear walls. *Advances in Structural Engineering.* 19(4):703-714. 0.1177/1369433215622880
- Furtado, A., Rodrigues, H., Arêde, A., Varum, H., 2020. Experimental tests on strengthening strategies for masonry infill walls: A literature review. *Construction and Building Materials* 263: 20520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120520>

- Haris, I., Hortobágyi, Z.S., 2007. Modelling cast-in-situ reinforced concrete frame Stiffened by Masonry Wall Using FEM Software, Central European Congress on Concrete Engineering Visegrád, Hungary.
- <https://tadas.afad.gov.tr/>
- Hu, Y., Jiang, L., Ye, J., Zhang, X., Jiang, L., 2021. Seismic responses and damage assessment of a mid-rise cold-formed steel building under far-fault and near-fault ground motions. *Thin-Walled Structures* 163:107690
- Huang, J., Zhu, S., Wang, S., Chen, Z.P., 2024. Shake table tests of steel moment resisting frame with self-centering SMA-based isolators. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 53:3489–3513. 10.1002/eqe.4183
- Ju, R.S., Lee, H.J., Chen, C.C., Tao, C.C., Experimental study on separating reinforced concrete infill walls from steel moment frames. *Journal of Constructional Steel Research* 71: 119–128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.004>
- Kaplan, G., Bayraktar, O.Y., Bayrak, B., Çelebi, O., Bodur, B., Öz, A., Aydın, A.C., 2023. Physico-mechanical, thermal insulation and resistance characteristics of diatomite and attapulgite based geopolymer foam concrete: Effect of different curing regimes. *Construction and Building Materials* 373:130850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130850>
- Kaplan, G., Öz, A., Bayrak, B., Alcan, H.G., Çelebi, O., Aydın, A.C., 2022. Effect of quartz powder on mid-strength fly ash geopolymers at short curing time and low curing temperature. *Constr Build Mater* 329:.. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127153>
- Kılıç, M., Alcan, H.G., Çelebi, O., Bayrak, B., Öz, A., Kaplan, G., Aydın, A.C., 2023. The behavior of cold-formed steel geopolymeric composites. *Structural Concrete*. 2023;24:7355–7377. 10.1002/suco.202200836
- Kılıç, M., Maali, M.S., Maali, M., Aydın, A.C., 2023. Experimental and numerical investigation of semi-rigid behavior top and seat T-Section connections with different triangular designed stiffener thicknesses. *Engineering Structures*. 289. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116216>
- Koçyiğit, A., Canoğlu, M.C., 2017. Neotectonics and seismicity of erzurum pull-apart basin, East Turkey, *Russian Geology and Geophysics* 58: 99-122.
- Leng, J., Peterman, K.D., Bian, G., Buonopane, S.G., Schafer, B.W., 2017. Modeling seismic response of a full-scale cold-formed steel-framed building. *Eng. Struct.* 153:146–165.
- Li, Y., Huang, L., Qu, Y., Liu, H., Lv, B., Li, S., 2024. Shaking table test on the seismic performance of ternary composite geopolymer recycled concrete frame. *Structures* 65:106664. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106664>
- Li, Y., Shen, Z., Yao, X., Ma, R., Liu, F., 2012. Experimental investigation and design method research on low-rise cold-formed thin-walled steel framing buildings. *J. Struct. Eng.* 139 (5): 818–836.
- Liu, J., Xu, L., Xie, X., 2022. Seismic design and performance of a steel frame-shear plate shear wall with self-centering energy dissipation braces structure. *Journal of Building Engineering*. 51:104336. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104336>
- Magenes, G., Pampanin, S., 2004. Seismic Response of Gravity-Load Design Frames with Masonry Infills, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver B.C., Canada.

- Maranhao, F.D.S., Junior, F.G.D.S., Soares, P., Alcan, H.G., Çelebi, O., Bayrak, B., Kaplan, G., Aydın, A.C., 2023. Physico-mechanical and microstructural properties of waste geopolymer powder and lime-added semi-lightweight geopolymer concrete: Efficient machine learning models. *Journal of Building Engineering* 72:106629. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106629>
- Maraş, M.M., 2021. Experimental behavior of injected geopolymer grout using styrene-butadiene latex for the repair and strengthening of masonry walls. *Advances in Structural Engineering* 24(11): 2484-2499. 1 0.1177/13694332211001513
- Maraş, M.M., and Köse, M.M., 2021. Structural behavior of masonry panels strengthened using geopolymer composites in compression tests. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 45:767–777 <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00433-6>
- Medri, V., Papa, E., Lizion, J., Landi, E., 2020. Metakaolin-based geopolymer beads: Production methods and characterization, *J. Clean. Prod.* 244: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118844>.
- Memari, A.M., and Aliari, M., 2018. Finite Element Modeling of Masonry Infill Walls Equipped with Structural Fuse. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77307>
- Nodehi, M., and Taghvaei, V.M., 2022. Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy. *Circular Economy and Sustainability* (2022) 2:165–196. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00029-w>.
- Nodehi, M., Ozbakkaloglu, T., Gholampour, A., Mohammed, T., Shi, X., 2022. The effect of curing regimes on physico-mechanical, microstructural and durability properties of alkali-activated materials: A review, *Constr. Build. Mater.* 321:126335, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126335>.
- Ozer, C., Ozyazıcıoğlu, M., Gök, E., Polat, O., 2019. Imaging the crustal structure throughout the east anatolian fault zone, turkey, by local earthquake tomography. *Pure Appl. Geophys.* 176 (2019), 2235–2261 2018 Springer Nature Switzerland AG <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2076-6>.
- Öz, A., Bayrak, B., Kavaz, E., Kaplan, G., Çelebi, O., Alcan, H.G., Aydın, A.C., 2022. The radiation shielding and microstructure properties of quartzic and metakaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials* 342:127923. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127923>
- Öztürk, H., Çelebi, E., Kaya, C., 2024. Experimental Study on Seismic Performance Evaluation of a Multi-Story Steel Building Model with Rolling-Type Seismic Base Isolation. *Buildings*. 14, 3268. <https://doi.org/10.3390/buildings14103268>
- Posi, P., Lertnimooolchai, S., Sata, V., Chindaprasirt, P., 2013. Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate, *Constr. Build. Mater.* 47: 896–901, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094>.
- Pourkeramat, P., Ghiasi, V., Mohebi, B., 2021. The effect of post-earthquake fire on the performance of steel moment frames subjected to different ground motion intensities. *International Journal of Steel Structures*. 21(4):1197–1209 <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00496-9>
- Provis, J.L., Lukey, G.C., Van Deventer, J.S.J., 2005. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? a reexamination of existing results, *Chem. Mater.* 17: 3075–3085, <https://doi.org/10.1021/cm050230i>.

- Sakr, M., El-khoriby, S.R., Seleemah, A.A., Darwish, E.A., 2017. FE Modeling of CFRP-Retrofitted RC Frames with Masonry Infill Walls. *Civ Eng J.* <https://doi.org/10.28991/cej-2017 00000090>
- Sarkar, M., and Dana, K., 2021. Partial replacement of metakaolin with red ceramic waste in geopolymer, *Ceram. Int.* 47. 3473–3483, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.191>.
- Sarma, K.C., and Hojjat, A., 2005. Comparative study of optimum designs of steel high-rise building structures using allowable stress design and load and resistance factor design codes. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* (February 2005): 12-17.
- Sarno, L.D., Freddi, F., Aniello, M.D., Kwon, O.S., Wu, J.R., Urzua, F.G., Landolfo, R., Park, J., Palios, X., Strepelias, E., 2021. Assessment of existing steel frames: Numerical study, pseudo-dynamic testing and influence of masonry infills. *Journal of Constructional Steel Research* 185: 106873. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106873>
- Saroglu, F., Emre, O., Kuscu, I., 1992. The East Anatolian Fault Zone of Turkey. *Ann Tectonicae*.
- Senkardesler, O., Goler, G., Soyoz, S., 2017. Dynamic and cyclic response of a full-scale 2 storey cold-formed steel structure with and without infill materials. *Bull. Earthq. Eng.* 15 (8): 3207–3226.
- Shakeri, K., Akrami, V., Moradpour, S., Khedmati, S., 2024. Post-earthquake Behavior of Steel Moment Resisting Frames with Connections Modified by Introducing Reduced Beam Section (RBS). *International Journal of Steel Structures*. 24(3):462–476 <https://doi.org/10.1007/s13296-024-00828-5>
- Shan, S., Li, S., Xu, S., Xie, L., 2016. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls. *Eng Struct.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.010>
- Shen, J., Seker, O., Faytarouni, M., Akbas, B., Zhang, H., Li, P., Evaluation of New Seismic provisions for special concentrically braced frames in AISC 341-22. *Structures* 63: 106453. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106453>
- Shing, P.B., Mehrabi, A.B., 2002. Behaviour and analysis of masonry-infilled frames. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 4, DOI 10.1002/pse.122.
- Si, R., Dai, Q., Guo, S., Wang, J., 2020. Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. *J. Clean. Prod.* 242: 118502.
- Stocker, T., 2013. IPCC Summary for Policymakers in Climate Change 2013, The Physical Science Basis.
- Sucuoğlu, H., and Erberik, A., 1997. Performance evaluation of a three-storey unreinforced masonry building during the 1992 Erzincan earthquake. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.L., 2013. Strength development in clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*. 40:566-574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.015>
- Sun, Q., Li, J., Wang, J., 2011. Effect of borate concentration on solidification of radioactive wastes by different cements, *Nucl. Eng. Des.* 241. 4341–4345, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.08.040>.
- TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Acil ve Afet Yönetim Durumu Başkanlığı, Ankara, Türkiye.

- TÇY 2016, Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliği, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- TS 12390-7, Türk Standardı. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini. 2010.
- TS EN 12350-6, Türk Standardı. Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi. 2019.
- Turner, L.K., and Collins, F.G., 2013. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, *Constr. Build. Mater.* 43: 125–130, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.01.023>.
- UBC-88, Uniform Building Code, 1988 Edition, International Conference of Building Officials, Whittier, California 90601, 1988.
- Wetzel A, Middendorf B (2019) Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high performance concrete based on alkali-activated slag. *Cem Concr Compos* 100:53–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.023>
- Woo, J., Haroon, M., Lee, J., Shin, K., Lee, H., 2024. Shaking table tests and numerical simulations on RC frames retrofitted with friction-damped brace. *Journal of Building Engineering*. 82: 108277. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108277>
- Yalçın, H., Gülen, L., Utkucu, M., 2013. Active fault data base and assesment of earthquake hazard for Turkey and surrounding regions. *Yerbilim Earth Sci* 34:133–160
- Yardımcı, N., 2009. Çelik Yapıların Tasarım ve Boyutlandırma Esasları, İstanbul.
- Ye, J.H., 2016. An introduction of mid-rise thin-walled steel structures: Research progress on cold-formed steel-framed composite shear wall systems, *J. Harbin Inst. Technol.* 48 (6): 1–9 (in Chinese).
- Yu, Q.Q., Wu, J.Y., Gu, X.L., Wang, L., 2023. Seismic behavior of hinged steel frames with masonry infill walls. *Journal of Building Engineering* 77: 107536. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107536>
- Zhang, C., Wongso, S., Wang, H., Huang, W., Shi, F., Deng, X., Liang, Z., 2023. Seismic responses of infill walls with sliding joints and openings in semi-rigid steel frame. *Journal of Building Engineering* 63: 105457. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105457>
- Zhou, X., Zeng, Y., Chen, P., Jiao, Z., Zheng, W., 2021. Mechanical properties of basalt and polypropylene fibre-reinforced alkali-activated slag concrete, *Constr. Build. Mater.* 269: 121284.
- Zhu, X., Li, W., Du, Z., Zhou, S., Zhang, Y., Li, F., 2021. Recycling and utilization assessment of steel slag in metakaolin based geopolymer from steel slag by-product to green geopolymer, *Constr. Build. Mater.* 305: 24654.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammet Mücahit DEMİR
Uyruğu:	
Eğitim	
Lise:	Oltu Andolu Lisesi (2010)
Lisans:	Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2016)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2025)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisleri Odası	
Eserler	
SCI İNDEKSİNE GİREN DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER	
-	
HAKEMLİ KONGRE / SEMPOZYUM BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR	
Çelebi, O., Demir, M. M., & Aydın, A. C., (2024). <i>Investigation of Earthquake Behavior of Reinforced Concrete Frame System with Hollow Block Slab System in Frequency Domain</i> . 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENTIFIC AND ACADEMIC RESEARCH December 23-24, 2024 : Konya : Turkey (pp.312-330). Konya, Turkey	