KAFES SİSTEM ANALOJİSİNE SAHİP HAFİF ÇELİK TONOZ YAPILARIN ÖKSETİK TASARIMI VE DEPREM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Oğuzhan AKARSU

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

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

KAFES SİSTEM ANALOJİSİNE SAHİP HAFİF ÇELİK TONOZ YAPILARIN ÖKSETİK TASARIMI VE DEPREM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

(Investigation of The Auxetic Design and Earthquake Performance of Lightweight Steel Vault Structures with Truss System Analogy)

DOKTORA TEZİ

Oğuzhan AKARSU

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Erzurum

Temmuz, 2025

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

KAFES SİSTEM ANALOJİSİNE SAHİP HAFİF ÇELİK TONOZ YAPILARIN ÖKSETİK TASARIMI VE DEPREM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN danışmanlığında, Oğuzhan AKARSU tarafından hazırlanan bu çalışma, 30/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** / ~~oy çokluğu~~ (5../5..) ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Murat Tolga YILMAZ *Atatürk Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN *Atatürk Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahmut KILIÇ *Atatürk Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahyar MAALİ *Erzurum Teknik Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr .Öğr. Üyesi: Barış BAYRAK *Kafkas Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır

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

Aslı ıslak imzalıdır
Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2024-13847

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN* danışmanlığında sunulan "Kafes Sistem Analojisine Sahip Hafif Çelik Tonoz Yapıların Öksetik Tasarımı ve Deprem Performanslarının Araştırılması" 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	*1*	**30**
Materyal ve Metot	*2*	**35**
Araştırma Bulguları ve Tartışma	*1*	**20**
Sonuçlar	*0*	**20**
Tezin Geneli	*1*	**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.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	**Tez Danışmanı**
Oğuzhan AKARSU	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
30.7.2025	**30.7.2025**
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tez süreci, yalnızca akademik bir yolculuk değil; aynı zamanda emek, sabır ve çok yönlü destekle şekillenen kişisel ve bilimsel bir gelişim sürecidir. Bu süreçte yanımda olan, bilgi ve katkılarıyla çalışmama değer katan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimi sunarım.

Başta, bilimsel rehberliği, sabrı ve ilham verici yaklaşımıyla tezimin her aşamasında yol gösteren, akademik bakış açımı geliştirmemde büyük katkı sağlayan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN'a en içten şükranlarımı sunarım.

Doktora eğitimim süresince araştırmalarımın yürütülmesine olanak sağlayan altyapı desteği için Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi'ne; maddi ve manevi destekleriyle akademik yolculuğumu güçlendiren TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB)'e ve Türk Eğitim Vakfı (TEV)'e gönülden teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların yürütülmesi ve analiz süreçlerinde bilgi ve emekleriyle katkı sunan değerli ekip arkadaşlarıma da içtenlikle teşekkür ederim.

Ve elbette, her koşulda yanımda olan, desteği ve sevgisiyle bana güç veren aileme; gösterdikleri sabır, anlayış ve koşulsuz destekleri için minnettarım. Onların varlığı, bu sürecin en değerli ve vazgeçilmez parçası olmuştur.

Tüm katkı sunan kişi ve kurumlara bir kez daha teşekkür eder; bu çalışmanın bilime ve mühendislik alanına anlamlı katkılar sağlamasını temenni ederim.

Oğuzhan AKARSU

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KAFES SİSTEM ANALOJİSİNE SAHİP HAFİF ÇELİK TONOZ YAPILARIN ÖKSETİK TASARIMI VE DEPREM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Oğuzhan AKARSU

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Amaç: Bu çalışmanın temel amacı, hafif çelik malzeme kullanılarak tasarlanmış farklı geometrik özelliklere sahip tonoz kabuklar ile delikli plaka yapıların, statik ve dinamik performans açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Özellikle öksetik (negatif Poisson oranlı) boşluk geometrilerinin yapı elemanlarının sismik davranışına etkisi analiz edilerek, yapısal optimizasyonun sağlanabileceği parametrik stratejiler ortaya konmuştur.

Yöntem: Araştırma kapsamında hem delikli plakalar hem de yarı silindirik tonoz kabuklar, çeşitli geometrik konfigürasyonlarla modellenmiştir. Sarsma tablası deneyleri ile ivme, hız ve deplasman verileri elde edilmiş; bu veriler wavelet spektrum analizi, spektral ivme değerlendirmesi ve modal analiz gibi yöntemlerle detaylandırılmıştır. Delik çapı, delik düzeni, yıldız formundaki boşluk açıları ve kabuk eğrilikleri parametrik olarak değiştirilmiş ve tüm modeller statik yükler ve 11 farklı gerçek deprem kaydı altında test edilmiştir.

Bulgular: Elde edilen bulgular, delikli plakaların ve kabukların dinamik davranışlarının belirgin biçimde farklılaştığını göstermiştir. Öksetik boşlukların bulunduğu plaka sistemlerinde yerel deformasyonun çevresine yayılması ve titreşim enerjisinin daha geniş bir alana dağıtılması gözlenmiştir. Kabuk sistemlerde ise formun eğriliği ve H/B oranı, doğal frekansları ve modal kütle oranlarını doğrudan etkilemiştir. Wavelet analizi, plakaların yüksek frekanslı modlara daha duyarlı olduğunu, kabukların ise düşük frekanslı spektrumlarda yoğun enerji birikimi gösterdiğini ortaya koymuştur.

Sonuç: Plaka ve kabuk sistemlerinin her biri kendine özgü avantajlar sunmakta olup, yapısal verimlilik açısından her iki sistemde de öksetik geometri kullanımı performansı artırmaktadır. Öksetik boşlukların dikkatli biçimde yerleştirildiği delikli plakalar, hem ağırlık azaltımı hem de sönüm kapasitesi açısından optimize edilmiş çözümler sunmaktadır. Tonoz kabuklar ise geometrik form avantajı ile titreşim davranışında üstünlük sağlamaktadır. Çalışma, farklı geometri ve taşıyıcı davranış tiplerine sahip sistemlerin, parametrik olarak karşılaştırılması açısından literatüre özgün katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: öksetik yapılar, yapısal titreşim, tonoz yapılar, delikli plakalar.

Temmuz 2025, 471 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF THE AUXETIC DESIGN AND EARTHQUAKE PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT STEEL VAULT STRUCTURES WITH TRUSS SYSTEM ANALOGY

Oğuzhan AKARSU

Supervisor: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Purpose: The main objective of this study is to comparatively evaluate the static and dynamic performance of vault shells and perforated plate structures with different geometric properties, designed using lightweight steel. In particular, by analyzing the effects of auxetic (negative Poisson's ratio) void geometries on the seismic behavior of structural elements, this research proposes parametric strategies for achieving structural optimization.

Method: Within the scope of the research, both perforated plates and semi-cylindrical vault shells were modeled with various geometric configurations. Acceleration, velocity, and displacement data were obtained through shake table experiments; this data was subsequently analyzed using methods such as wavelet spectrum analysis, spectral acceleration evaluation, and modal analysis. The angles of star-shaped openings, the arrangement of voids, and shell curvatures were parametrically varied, and all models were tested under static loads and 11 different real earthquake records.

Findings: The findings indicate that the dynamic behaviors of perforated plates and shells differ significantly. In plate systems with auxetic voids, it was observed that local deformation spreads to the surrounding area and that vibrational energy is distributed over a wider region. In shell systems, however, the curvature of the form and the H/B ratio directly affected the natural frequencies and modal mass ratios. Wavelet analysis revealed that plates are more sensitive to high-frequency modes, while shells exhibit intense energy accumulation in low-frequency spectra.

Conclusion: Both plate and shell systems offer unique advantages, and the use of auxetic geometry in both systems enhances performance in terms of structural efficiency. Perforated plates with carefully positioned auxetic voids provide optimized solutions for both weight reduction and damping capacity. Vaulted shells, on the other hand, offer superior vibration behavior due to their geometric form. This study makes an original contribution to the literature by parametrically comparing systems with different geometries and load-bearing behaviors.

Keywords: auxetic structures, structural vibration, vaulted structures, perforated plates.

July 2025, 471 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ xvi
GİRİŞ 1
KURAMSAL TEMELLER 2
Yapısal Sistemlerin Bileşenleri 2
Plaka Yapıları 7
Kabuk Yapılar 16
Tonoz Yapılar ve Tarihsel Gelişimi 29
Kafes Sistem Anolojisi ve Uygulama Alanları 33
Öksetik Malzemeler ve Yapılar: Tanım, Özellikler ve Kullanım Alanları 37
Depremler ve Özellikleri 44
Deprem Mühendisliğinde Yapı Davranışı 46
MATERYAL VE METOT 50
Modellerin Tasarımı 50
Deney Düzeneği 52
Deney Koşulları ve Deprem Kayıtları 56
Veri İşleme ve Analiz Yöntemleri 57
ARAŞTIRMA BULGULARI 60
Malzeme Deneyleri 60
PL-20-A Modeli 61
PL-20-B Modeli 62
PL-20-C Modeli 64
PL-30-A Modeli 65
PL-30-B Modeli 67
PL-30-C Modeli 68
PL-40-A Modeli 70
PL-40-B Modeli 71
PL-40-C Modeli 72

Plaka Modellerin Karşılaştırılması 74
ST-1 Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 78
ST-1-20-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 85
ST-1-20-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 92
ST-1-20-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 99
ST-1-30-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 106
ST-1-30-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 113
ST-1-30-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 120
ST-1-40-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 127
ST-1-40-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 135
ST-1-40-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 142
ST-2 Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 150
ST-2-20-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 156
ST-2-20-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 163
ST-2-20-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 171
ST-2-30-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 178
ST-2-30-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 185
ST-2-30-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 192
ST-2-40-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 200
ST-2-40-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 207
ST-2-40-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi 214
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 222
Plaka Yapılar 222
Tonoz Yapılar 222
KAYNAKLAR 225
EKLER 232
EK-1. Model Grafikleri 232
ÖZGEÇMİŞ 452

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Farklı Öksetik Yapıların Mekanik Özellikleri 42
Tablo 2. Plaka Modellerin Geometrik Özellikleri 50
Tablo 3. Tonoz Modellerin Geometrik Özellikleri 51
Tablo 4. Deprem Yer Hareketleri 56
Tablo 5. Malzeme Özellikleri 60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Yapısal sistemler oluşturmak için kullanılabilecek temel eleman türleri ve formları ..3
Şekil 2. Yapısal elemanların geometrik hiyerarşisi....4
Şekil 3. Tasarım ilkeleri 6
Şekil 4. Plakalar için çeşitli sınır koşulları. 7
Şekil 5. Plakaların mühendisliğin çeşitli alanlarında kullanımı 9
Şekil 6. Pozitif gerilme bileşenleri 11
Şekil 7. Plakaların düşey yük, eğilme ve burulma etkisi altındaki şekil değiştirme şeması 12
Şekil 8. Delikli plaka çalışma örnekleri 15
Şekil 9. 2010 Haiti depreminde Haiti Ulusal Sarayı 17
Şekil 10. Bazı kabuk formları: Küresel kabuk, konik kabuk, silindirik kabuk, hiperboloid....17
Şekil 11. Geleneksel yapısal tasarım ve form bulma yaklaşımlarının farkı. 19
Şekil 12. Deitingen Servis İstasyonu....21
Şekil 13. St. Paul Katedrali 22
Şekil 14. Park Güell'deki tonozlu yapılar....23
Şekil 15. Candela'nın hiperbolik paraboloid kabuğu, Restoran, Xochimilco 24
Şekil 16. Membran teorisinin geçerliliğini etkileyen faktörler ve sınırlamalar 27
Şekil 17. Silindirik kabuk üzerindeki diferansiyel elemanın konumu 28
Şekil 18. Diferansiyel eleman üzerindeki membran gerilmeleri....29
Şekil 19. Çekme ve basınç etkisindeki davranış, a) Öksetik olmayan malzeme, b) Öksetik malzeme 38
Şekil 20. Magnox nükleer santrali reaktör çekirdeği 39
Şekil 21. (1) Yeniden girintili (re-entrant) yapılar: (a) Öksetik altıgen petek yapısı, (b) çift ok başlı girintili yapı ve (c) STAR-3, STAR-4 ve STAR-6 sistemleri, (2) Kiral petek yapılar: (a) hekzakiral, (b) trikiral, (c) anti-trikiral, (d) tetrakiral, (e) anti-tetrakiral, (3) Döner rijit yapılar: (a) döner kare, (b) döner üçgen, (c) döner dikdörtgen, (d) döner eşkenar dörtgen ve (e) döner paralelkenar, (4) Origami tabanlı Miura-ori 40
Şekil 22. a) Deforme olmamış, b) Deforme olmuş yeniden girintili yapı....43
Şekil 23. a) Deforme olmamış, b) Deforme olmuş dönen dikdörtgen yapılar....43
Şekil 24. a) Deforme olmamış, b) Deforme olmuş kiral yapılar....44
Şekil 25. Türkiye'deki fay hatları ve sismik bölgeler....45
Şekil 26. Plakaların tasarım parametreleri 51
Şekil 27. Kabuğun geometrik tanımı için kullanılan parametreler 52

Şekil 28. Deney düzeneği 53
Şekil 29. Sarsma tablası 53
Şekil 30. İvme ölçer 54
Şekil 31. Data logger 54
Şekil 32. Sümülasyon yazılımı ara yüzü 55
Şekil 33. Gerinim ölçer 55
Şekil 34. Deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri 57
Şekil 35. Kupon testi numune boyutları 60
Şekil 36. Kupon testi numuneleri 60
Şekil 37. Malzeme çekme deneyi test sonuçları 61
Şekil 38. PL-20-A numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 62
Şekil 39. PL-20-A deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 62
Şekil 40. PL-20-B numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 63
Şekil 41. PL-20-B deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 64
Şekil 42. PL-20-C numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 65
Şekil 43. PL-20-C deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 65
Şekil 44. PL-30-A numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 66
Şekil 45. PL-30-A deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 67
Şekil 46. PL-30-B numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 68
Şekil 47. PL-30-B deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 68
Şekil 48. PL-30-C numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 69
Şekil 49. PL-30-C deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 69
Şekil 50. PL-40-A numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 70
Şekil 51. PL-40-A deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 71
Şekil 52. PL-40-B numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 72
Şekil 53. PL-40-B deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 72
Şekil 54. PL-40-C numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı 73
Şekil 55. PL-40-C deney ve FEA sonuçları karşılaştırması 74
Şekil 56. ST-1 deney modeli 79
Şekil 57. ST-1 modal deformasyon şekilleri 79
Şekil 58. ST-1 modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri 80
Şekil 59. ST-1 modeli maksimum ivme tepkileri 82
Şekil 60. ST-1 modeli spektral ivme eğrileri 83
Şekil 61. ST-1 modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi 85
Şekil 62. ST-1-20-A deney modeli 86

Şekil 63. ST-1-20-A modal deformasyon şekilleri 87
Şekil 64. ST-1-20-A ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri 88
Şekil 64. ST-1-20-A ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri 89
Şekil 65. ST-1-20-A modeli maksimum ivme tepkileri 90
Şekil 66. ST-1-20-A modeli spektral ivme eğrileri 91
Şekil 67. ST-1-20-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Kobe, Erzincan, Seferihisar) 92
Şekil 68. ST-1-20-B deney modeli 94
Şekil 69. ST-1-20-B modal deformasyon şekilleri 94
Şekil 70. ST-1-20-B ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Loma, Pazarcık, Sivrice) 95
Şekil 71. ST-1-20-B modeli maksimum ivme tepkileri 97
Şekil 72. ST-1-20-B modeli spektral ivme eğrileri 98
Şekil 73. ST-1-20-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Loma, Pazarcık, Sivrice) 99
Şekil 74. ST-1-20-C deney modeli 100
Şekil 75. ST-1-20-C modal deformasyon şekilleri 101
Şekil 76. ST-1-20-C ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Erzincan, Kobe, Seferihisar, Sivrice) 102
Şekil 77. ST-1-20-C modeli maksimum ivme tepkileri 104
Şekil 78. ST-1-20-C modeli spektral ivme eğrileri 105
Şekil 79. ST-1-20-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Erzincan, Kobe, Seferihisar, Sivrice) 106
Şekil 80. ST-1-30-A deney modeli 107
Şekil 81. ST-1-30-A modal deformasyon şekilleri 108
Şekil 82. ST-1-30-A ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) 109
Şekil 83. ST-1-30-A modeli maksimum ivme tepkileri 111
Şekil 84. ST-1-30-A modeli spektral ivme eğrileri 112
Şekil 85. ST-1-30-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) 113
Şekil 86. ST-1-30-B deney modeli 114
Şekil 87. ST-1-30-B modal deformasyon şekilleri 115
Şekil 88. ST-1-30-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Erzincan, Sivrice) 116

Şekil 89. ST-1-30-B modeli maksimum ivme tepkileri 118
Şekil 90. ST-1-30-B modeli spektral ivme eğrileri 119
Şekil 91. ST-1-30-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Erzincan, Sivrice) 120
Şekil 92. ST-1-30-C deney modeli 121
Şekil 93. ST-1-30-C modal deformasyon şekilleri 122
Şekil 94. ST-1-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Kobe, Pazarcık, Seferihisar) (devamı) 123
Şekil 94. ST-1-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Kobe, Pazarcık, Seferihisar) (devamı) 124
Şekil 95. ST-1-30-C modeli maksimum ivme tepkileri 125
Şekil 96. ST-1-30-C modeli spektral ivme eğrileri 126
Şekil 97. ST-1-30-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Kobe, Pazarcık, Seferihisar) 127
Şekil 98. ST-1-40-A deney modeli 128
Şekil 99. ST-1-40-A modal deformasyon şekilleri 129
Şekil 100. ST-1-40-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, Erzincan, Gölcük, Loma) 130
Şekil 101. ST-1-40-A modeli maksimum ivme tepkileri 132
Şekil 102. ST-1-40-A spektral ivme eğrileri 133
Şekil 103. ST-1-40-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, Erzincan, Gölcük, Loma) 135
Şekil 104. ST-1-40-B deney modeli 136
Şekil 105. ST-1-40-B modal deformasyon şekilleri 136
Şekil 106. ST-1-40-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Kobe, Seferihisar) 137
Şekil 107. ST-1-40-B modeli maksimum ivme tepkileri 139
Şekil 108. ST-1-40-B modeli spektral ivme eğrileri 140
Şekil 109. ST-1-40-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Erzincan, Kobe, Seferihisar) 142
Şekil 110. ST-1-40-C deney modeli 143
Şekil 111. ST-1-40-C modeli modal deformasyon şekilleri 143
Şekil 112. ST-1-40-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) 145
Şekil 113. ST-1-40-C modeli maksimum ivme tepkileri 147

Şekil 114. ST-1-40-C modeli spektral ivme eğrileri 148
Şekil 115. ST-1-40-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) 149
Şekil 116. ST-2 deney modeli 150
Şekil 117. ST-2 modal deformasyon şekilleri 151
Şekil 118. ST-2 modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Erzincan, Loma, Pazarcık) 152
Şekil 119. ST-2 modeli maksimum ivme tepkileri 154
Şekil 120. ST-2 modeli spektral ivme eğrileri 155
Şekil 121. ST-2 modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Erzincan, Loma, Pazarcık) 156
Şekil 122. ST-2-20-A deney modeli 157
Şekil 123. ST-2-20-A modal deformasyon şekilleri 158
Şekil 124. ST-2-20-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Erzincan, Gölcük, Kobe, Seferihisar) 159
Şekil 125. ST-2-20-A modeli maksimum ivme tepkileri 161
Şekil 126. ST-2-20-A modeli spektral ivme eğrileri 162
Şekil 127. ST-2-20-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Erzincan, Gölcük, Kobe, Seferihisar) 163
Şekil 128. ST-2-20-B deney modeli 164
Şekil 129. ST-2-20-B modal deformasyon şekilleri 165
Şekil 130. ST-2-20-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Loma, Seferihisar, Sivrice) 166
Şekil 131. ST-2-20-B modeli maksimum ivme tepkileri 168
Şekil 132. ST-2-20-B modeli spektral ivme eğrileri 169
Şekil 133. ST-2-20-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Erzincan, Kobe, Seferihisar, Sivrice) 171
Şekil 134. ST-2-20-C deney modeli 172
Şekil 135. ST-2-20-C modal deformasyon şekilleri 172
Şekil 136. ST-2-20-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Pazarcık 174
Şekil 137. ST-2-20-C modeli maksimum ivme tepkileri 176
Şekil 138. ST-2-20-C modeli spektral ivme eğrileri 177
Şekil 139. ST-2-20-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük,, Pazarcık) 178

Şekil 140. ST-2-30-A deney modeli 179
Şekil 141. ST-2-30-A modal deformasyon şekilleri 180
Şekil 142. İvme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Erzincan, Kobe, Seferihisar) 181
Şekil 143. ST-2-30-A modeli maksimum ivme tepkileri 183
Şekil 144. ST-2-30-A modeli spektral ivme eğrileri 184
Şekil 145. ST-2-30-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Erzincan, Kobe, Seferihisar) 185
Şekil 146. ST-2-30-B deney modeli 186
Şekil 147. ST-2-30-B modal deformasyon şekilleri 187
Şekil 148. ST-2-30-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar) 188
Şekil 149. ST-2-30-B modeli maksimum ivme tepkileri 190
Şekil 150. ST-2-30-B modeli spektral ivme eğrileri 191
Şekil 151. ST-2-30-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar) 192
Şekil 152. ST-2-30-C deney modeli 193
Şekil 153. ST-2-30-C modal deformasyon şekilleri 194
Şekil 154. ST-2-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Seferihisar) 195
Şekil 154. ST-2-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Seferihisar) (devamı) 196
Şekil 155. ST-2-30-C modeli maksimum ivme tepkileri 197
Şekil 156. ST-2-30-C modeli spektral ivme eğrileri 198
Şekil 157. ST-2-30-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük, Seferihisar) 199
Şekil 158. ST-2-40-A deney modeli 201
Şekil 159. ST-2-40-A modal deformasyon şekilleri 201
Şekil 160. ST-2-40-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Kobe, Pazarcık, Sivrice) 203
Şekil 161. ST-2-40-A modeli maksimum ivme tepkileri 205
Şekil 162. ST-2-40-A modeli spektral ivme eğrileri 206
Şekil 163. ST-2-40-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Kobe, Pazarcık, Sivrice) 207
Şekil 164. ST-2-40-B deney modeli 208

Şekil 165. ST-2-40-B modal deformasyon şekilleri.....209
Şekil 166. ST-2-40-B ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar) 210
Şekil 167. ST-2-40-B modeli maksimum ivme tepkileri 212
Şekil 168. ST-2-40-B modeli spektral ivme eğrileri 213
Şekil 169. ST-2-40-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar) 214
Şekil 170. ST-2-40-C deney modeli.....215
Şekil 171. ST-2-40-C modeli modal deformasyon şekilleri.....216
Şekil 172. ST-2-40-C ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, El Centro, Gölcük, Sivrice) 217
Şekil 173. ST-2-40-C modeli maksimum ivme tepkileri 219
Şekil 174. ST-2-40-C modeli spektral ivme eğrileri 220
Şekil 175. ST-2-40-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, El Centro, Gölcük, Sivrice) 221

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

FEA	**:**	Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
LVDT	**:**	Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler)
PGA	**:**	Peak Ground Acceleration (Maksimum Yer İvmesi)
Sa	**:**	Spektral ivme
SDOF	**:**	Tek serbest dereceli sistem
TBDY	**:**	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

GİRİŞ

Günümüzde yapı mühendisliği, yalnızca dayanıklı sistemler tasarlamayı değil, aynı zamanda hafif, ekonomik ve sürdürülebilir çözümler üretmeyi de hedeflemektedir. Bu doğrultuda, hafif çelik malzemelerle inşa edilen delikli plakalar ve kabuk yapı sistemleri, modern mühendislik tasarımlarında öne çıkan alternatiflerdir. Delikli plakalar, hem yapısal hem de akustik ve titreşimsel avantajlar sunarak çeşitli mühendislik uygulamalarında yaygınlaşmaktadır. Benzer şekilde, tonoz kabuk yapılar, geometrik formları sayesinde yüksek açıklıkları geçebilen ve rijitliği optimize edebilen sistemler olarak dikkat çeker.

Delik düzenine ve şekline bağlı olarak plaka davranışı önemli ölçüde değişkenlik gösterir. Özellikle öksetik boşluk geometrileri, negatif Poisson oranı ile, deformasyonu yayarak yapısal bütünlükte enerji sönümleme kapasitesini artırır. Bu durum, sadece plakalar için değil, aynı zamanda kabuk formlar için de geçerli olup; bu yapısal elemanlar dinamik yükler altında daha kontrollü titreşim tepkileri sergilemektedir. Öksetik yapıların daha önce mikro ölçekli malzeme bilimi ve biyomedikal alanlarında incelenmiş olması bu davranışın makro ölçekli yapılar için de yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmada, delikli plakalar ve yarı silindirik kabuk formlar aynı mühendislik bakış açısıyla ele alınmış; sarsma tablası deneyleriyle elde edilen veriler ışığında, dinamik tepkileri detaylı şekilde karşılaştırılmıştır. Her iki sistem için farklı geometrik parametreler sistematik olarak değiştirilerek, optimum performans göstergeleri ortaya konmuştur. Bu bağlamda çalışma, farklı yapı sistemlerinin dinamik davranışlarının deneysel olarak analiz edildiği nadir çalışmalardan biri olma özelliği taşımakta ve özellikle öksetik yapıların mühendislik ölçeğinde nasıl fayda sağladığını bilimsel olarak ortaya koymaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

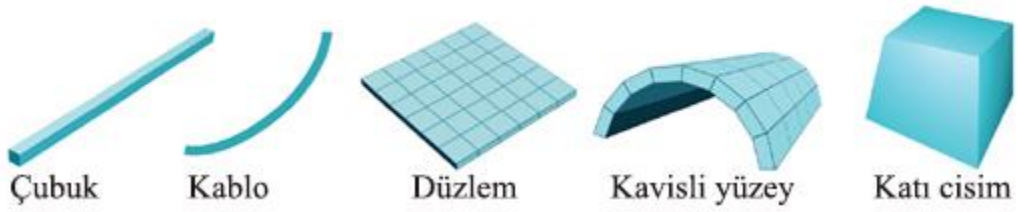
Bu bölümde, çalışmanın bilimsel zeminini oluşturan kavramsal ve yapısal teoriler detaylı biçimde ele alınmaktadır. Literatürde öksetik davranış, kafes sistemler, hafif çelik yapılar ve tonoz strüktürler gibi farklı alanlara yayılan kavramlar, bu tez kapsamında özgün bir bütünlük içinde sentezlenmektedir. Bu bağlamda öncelikle tonoz yapıların tarihsel gelişimi incelenmiş, ardından hafif çelik sistemlerin mühendislik özellikleri, öksetik geometrilerin yapısal davranışa etkisi ve kafes sistem anolojisinin taşıyıcı sistem üzerindeki rolü değerlendirilmiştir.

Yapısal Sistemlerin Bileşenleri

"Yapı" kavramı, hem isim hem de fiil olarak kullanılır; bir yandan karmaşık bir bütünün parçaları arasındaki düzeni, diğer yandan bu düzenin planlı biçimde inşa edilme sürecini ifade eder. Mimarlık ve inşaat mühendisliği bağlamında ise yapı, fiziksel bileşenlerin bir araya gelerek oluşturduğu işlevsel bir bütündür. Her bileşen, kendi içinde bir yapı niteliği taşıyabileceğinden, sistemin bütünsel karmaşıklığı artar. Yapı mühendisliği disiplini, bu bileşenlerin düzenlenmesi, boyutlandırılması ve güvenli, dayanıklı ve işlevsel bir sistem oluşturmaya yönelik tasarımını kapsar (Anwar and Ahmed, 2017).

İnşa edilmiş çevremiz, neredeyse tamamen fiziksel yapılara dayanır. Barınma, ulaşım, üretim, enerji iletimi gibi temel işlevlerin tümü, yapısal sistemler aracılığıyla sağlanır. Bu nedenle, yapı mühendisliğinin rolü yalnızca teknik değil, aynı zamanda toplumsal güvenlik ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da kritik önemdedir. Uygun şekilde tasarlanmamış yapılar ciddi can ve mal kayıplarına neden olabilirken, başarılı yapısal çözümler toplumsal refahı destekler.

Yapılar, sınırlı sayıdaki temel taşıyıcı elemanın farklı geometrilerde (doğru, eğri, yüzey, hacim) bir araya gelmesiyle çeşitlenebilir. Bu geometrik uyumluluk, form, işlev ve yapının bütüncül tasarımında belirleyici rol oynar. Yapılar genellikle iskelet tipi (çubuk, kablo), yüzey tipi (levha, kabuk) veya katı cisim tipi taşıyıcılardan oluşur; ancak çoğu yapı bu türlerin kombinasyonudur. Bu bağlamda, taşıyıcı sistemler temel olarak kablo yapılar, çubuk elemanlı iskelet sistemler, yüzey temelli uzaysal yapılar, katı kütleli sistemler ve karma yapılar olarak sınıflandırılabilir. Şekil 1'de yapısal sistemleri oluşturan temel eleman türleri ve formları gösterilmektedir.



Şekil 1. Yapısal sistemler oluşturmak için kullanılabilecek temel eleman türleri ve formları (Anwar and Ahmed, 2017)

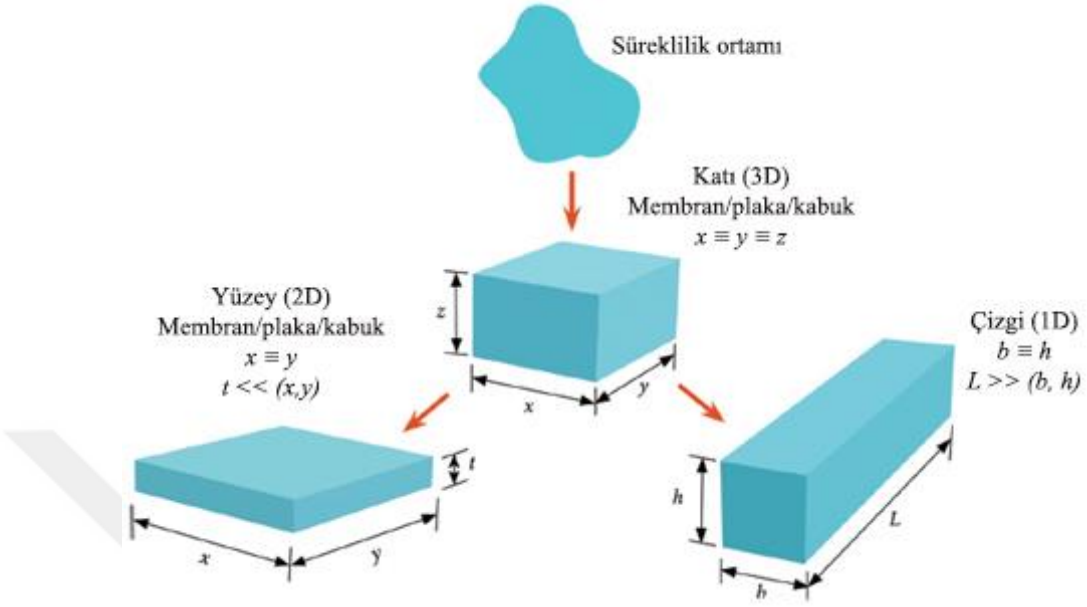
Taşıyıcı sistem türleri ve ana bileşenleri

Yapı sistemleri, taşıyıcı eleman tiplerine göre farklı kategorilere ayrılmaktadır. Kablo yapılar, yükleri esas olarak tekil kablolar ya da kablo sistemleri aracılığıyla yalnızca çekme kuvveti ile aktaran sistemlerdir. Kablonun geometrisi veya şekli, bu sistemlerin davranışını büyük ölçüde belirlemektedir. Kablo ağları ve askı sistemleri bu gruba örnek olarak verilebilir. İskelet sistemler ise, çekme, basınç, burulma, eğilme ve kesme gibi çeşitli yük bileşenlerine karşı koyabilen çubuk tipi elemanlardan oluşmaktadır. Makas sistemleri, çerçeve yapılar ve ızgara sistemleri bu kategoride yer alır. Uzaysal yapılar, kabuk, levha ya da membran tipi yüzey elemanları ile oluşturulmakta olup, yükleri eğilme, burulma ve yüzey içinde ya da dışında meydana gelen kesme kuvvetleri ile taşımaktadır. Bu tür yapıların kesitleri genellikle dikdörtgen biçimindedir. Kabuk yapılar, kubbe sistemleri, döşeme-duvar elemanları, silolar ve kutu kirişli köprüler uzaysal yapılara örnek teşkil eder. Bu yapılar aynı zamanda kablo ve çubuk elemanlarının birlikte kullanımıyla da elde edilebilir. Katı yapılar ise, yükleri tüm hacimleri boyunca ileten ve klasik anlamda kesite sahip olmayan yapı elemanlarından oluşur. Barajlar, kalın kemerler, tüneller, radye temeller ve kalın döşemeler bu grup içinde değerlendirilebilir. Gerçek hayattaki yapıların çoğu ise bu temel eleman tiplerinin bir kombinasyonu olarak karşımıza çıkar. Örneğin, bir yapı sistemi; çerçeve elemanları, duvarlar ve kabuk yüzeyleri gibi çeşitli taşıyıcı türlerinin bir araya gelmesiyle oluşturulabilir. (Abraham, 1962; Anwar and Ahmed, 2017)

Taşıyıcı elemanlar, belirli bir geometriye ve sınırlı bir malzeme hacmine sahip olan, yapıda özel bir işlevi yerine getiren bileşenlerdir. Bu elemanlar, geometrik olarak sürekli ortamlar, üç boyutlu katı elemanlar, iki boyutlu yüzey elemanları ve tek boyutlu çizgisel elemanlar olmak üzere dört gruba ayrılır. Eğer bir elemanın üç boyutu (x, y, z) birbirine yakınsa bu yapı "düzenli katı", iki boyutu diğerine kıyasla büyükse "yüzey tipi" ve yalnızca bir boyutu baskınsa "çizgisel tip" olarak tanımlanır. Yüzey tipi elemanlar; kabuk, levha ve membran sistemlerini kapsarken; çizgisel elemanlar; çubuk, kiriş ve kablo elemanlarıyla ilgilidir.

Kesit kavramı ise özellikle çizgisel taşıyıcı elemanlar için önemlidir. Bu elemanlarda uzunluk, diğer iki boyuta göre çok daha fazladır ve kesit düzlemi, elemanın boyuna eksenine dik

olan düzlem olarak tanımlanır. Bu düzlemdeki malzeme ve geometrik özellikler, elemanın davranışını büyük ölçüde belirler. Levha ve kabuk sistemleri de kesit düzlemi üzerinden analiz edilebilir. Şekil 2 yapısal elemanların geometrik hiyerarşisini sunmakadır.



Şekil 2. Yapısal elemanların geometrik hiyerarşisi (Anwar and Ahmed, 2017)

Yapı malzemeleri ve yapısal tasarım ilkeleri

Taşıyıcı sistemlerin temel bileşeni olan malzeme, yapının taşıyıcı elemanlarının davranışını belirleyen mekanik özellikleri nedeniyle yapısal analiz ve tasarımın merkezindedir . Bu bağlamda, "taşıyıcı malzeme" terimi, analizde kullanılan mukavemet değerleriyle tanımlanan yapım malzemesini ifade eder. Örneğin, beton bu bağlamda su, çimento ve agrega bileşiminden ziyade bir yapı malzemesi olarak değerlendirilir. Taşıyıcı sistemlerde yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında beton, donatılı ve öngermeli çelik, sıcak ve soğuk şekillendirilmiş yapısal çelikler, alüminyum ve diğer metaller ile ahşap yer alır. (Larsen vd., 2018)

Yapısal tasarım, uygulanan yüklerin yapının ömrü boyunca güvenli biçimde taşınmasını ve aşırı şekil değiştirmelerin önlenmesini amaçlar. Tasarım süreci, belirli malzeme, boyut ve yapım yöntemlerinin seçilerek uygun taşıyıcı sistemlerin oluşturulmasına dayanır. İlk aşamada yapılacak yapının genel tanımı, kullanılacak malzemeler ve yöntemler belirlenir; ardından bu bilgiler çizim ve hesaplarla belgelenir. İkinci aşama ise genellikle tam ölçekli testler, fiziksel modeller ya da analitik yöntemlerle elde edilen sonuçlara dayalı teknik gerekçelendirmeyi kapsar.

Tarihsel süreçte yapısal tasarım yöntemleri, izin verilen gerilme yaklaşımlarından güvenlik katsayılı sistemlere, ardından kapasite temelli ve performans odaklı tasarım yöntemlerine evrilmiştir. Günümüzde en ileri yaklaşım, risk tabanlı tasarım ile talep-

performans ilişkisini sistematik biçimde kurarak olasılık ve sonuç temelli bir güvenlik değerlendirmesi yapmayı hedefler. Bu yöntem, yalnızca teknik yeterliliği değil, aynı zamanda toplum güvenliğini de önceleyen bütüncül bir tasarım anlayışı sunar.

Yapısal tasarımın tarihsel arka planı ve felsefesi

Yapısal tasarımın temel felsefesi, malzeme, iş gücü ve çevresel etkiler gibi kaynakların verimli kullanımıyla yapının güvenliğini sağlamaktır. Tasarımın "dostane" olarak tanımlanması, sürdürülebilirlik, çevresel etki, inşa edilebilirlik ve kullanıcı dostu niteliklerin öncelikli olması anlamına gelir. Yapısal tasarım süreci, çevresel ve yapay kısıtların uygun yapısal özelliklere (malzeme, eleman boyutu, konfigürasyon vb.) dönüştürülmesini hedefler.

Yapısal tasarımın tarihçesi, estetik ve yapısal taşıma özelliklerinin birbirinden ayrıldığı modern döneme kadar çeşitli evrelerden geçmiştir. İlk mühendislerin temel amacı, yapının tüm ömrü boyunca işlevini yerine getireceğine "ikna olabilmek"ti. 15. ve 16. yüzyıllarda estetik, mekân organizasyonu ve kullanım alanları ön plandayken, 17. ve 18. yüzyılda Galileo'nun çalışmaları ile birlikte yük taşıma davranışları öncelik kazandı. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında ise estetik, malzeme ve taşıyıcı sistemden bağımsız bir tasarım değeri olarak ele alınmaya başlandı.

Bu evrimsel süreç boyunca geliştirilen yapısal sistemler çoğunlukla matematikçilerin değil, zanaatkârların, sanatçıların ve yapı ustalarının sezgisel bilgisiyle oluşturulmuştur. Özellikle hiperbolik paraboloid gibi birkaç istisna dışında, yapının taşıma prensipleri çoğunlukla deneysel ve uygulamalı bilgiyle şekillenmiştir.

Yapısal tasarım süreci

Yapısal tasarım süreci genellikle üç temel ve birbirine bağlı aşamadan oluşur: kavramsal tasarım, modelleme ve analiz, detaylandırma ve uygulama projelendirmesi. İlk aşamada, yapının temel geometrisi ve taşıyıcı sistem tipi belirlenir (Anwar and Ahmed, 2017). Yerçekimi ve yatay yükleri taşıyacak sistemler bu aşamada seçilir; bu adım, yapının genel performansını ve nihai başarısını belirleyen en kritik basamaktır. Mimari işlevsel planlar da bu aşamada şekillenir.

İkinci aşama olan modelleme ve analiz kısmında, deneme kesitleri ve idealize edilmiş bir taşıyıcı sistem modeli oluşturulur. Bu modelleme süreci, elastik sonlu eleman modellerinden karmaşık doğrusal olmayan elastoplastik modellere kadar değişebilir. Analiz yöntemi seçimi de kritik bir karar olup, çeşitli yönetmelikler ve standartlar mühendisleri yönlendirir. Bu aşamada, seçilen malzeme ve kesit özelliklerine bağlı olarak sistemin moment, kesme kuvveti ve yer değiştirme gibi tepkileri hesaplanır. Hesaplanan bu tepkiler, sistemin kapasitesiyle

karşılaştırılarak yeterlilik değerlendirmesi yapılır. Eğer yeterli değilse, kesitler revize edilir ve analiz süreci tekrarlanır.

Üçüncü aşama, analiz sonuçlarına dayanarak detayların hazırlanması ve bağlantı tasarımlarının yapılmasını içerir. Elde edilen veriler, sahada uygulanabilir hale getirilerek çizimlere ve maliyet hesaplamalarına dönüştürülür. Tüm bu süreçte, malzeme türü, eleman boyutları ve kesit özellikleri tasarımın temelini oluşturur.

Tasarım süreci çoğunlukla yüklerden başlayıp malzemenin taşıma kapasitesine kadar ilerleyen klasik yönde işlese de, ters yönde ilerleyen alternatif bir yaklaşım da vardır (Şekil 4). Bu yöntemde, önce malzemenin kapasitesi belirlenir, ardından bu kapasite ile uyumlu yük düzeyi hesaplanır. Bu ters yönlü yaklaşım, özellikle kapasite temelli ve performans odaklı tasarım süreçlerinde tercih edilir. Her iki yöntemde de eylem kümeleri, yük kombinasyonları ve sınır durumlar belirlenerek tasarım kararları desteklenir. Eksenel, eğilme, kesme ve burulma gibi etkiler arası etkileşimleri dikkate alan özel tasarım senaryoları oluşturulabilir. Kesitler, bu yük etkileri doğrultusunda boyutlandırılır ve gerekli kontroller yapılır. Günümüzde bu süreçlerin büyük bölümü yapısal analiz yazılımlarıyla yürütülmektedir. (Powell, 2010; Rossberg and Leon, 2013)

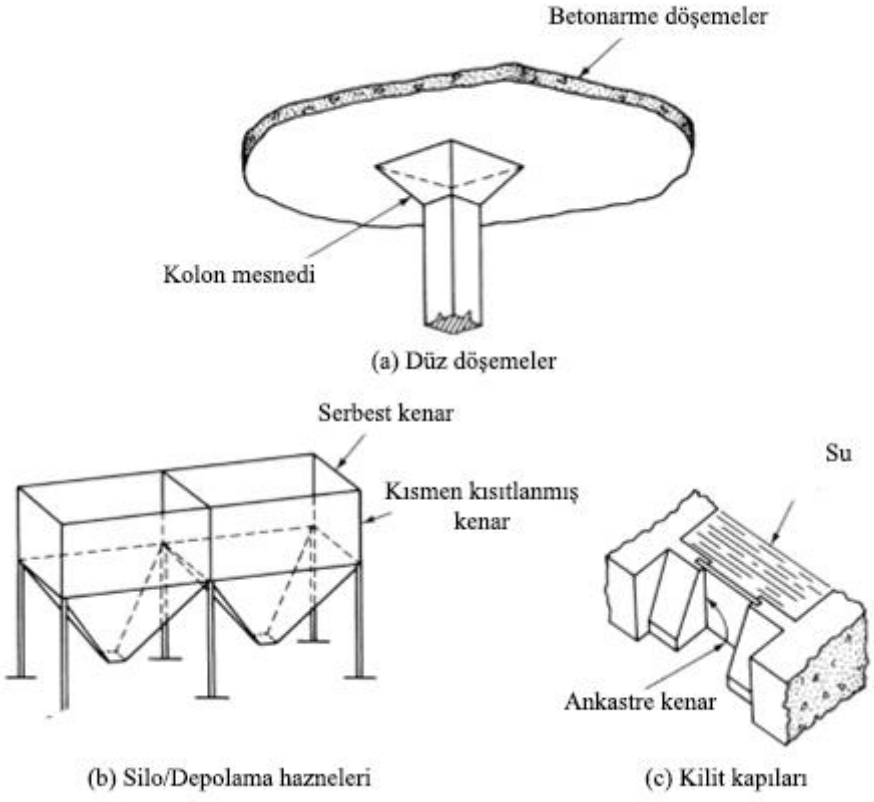


Şekil 3. Tasarım ilkeleri (Anwar and Ahmed, 2017)

Plaka Yapıları

Plakalar, havacılık, makine ve inşaat gibi birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan ince yapı elemanlarıdır. Bu elemanlar düz ve düzlemsel olup, bir boyutu yani kalınlığı (t) düzlem içi boyutlara kıyasla oldukça küçüktür (Szilard, 2004). Geometrik olarak ya düz ya da eğri hatlarla sınırlıdırlar. Kirişler gibi, plakalar yalnızca yapısal bileşenler olarak görev yapmakla kalmaz, aynı zamanda örneğin döşeme köprülerinde olduğu gibi, tüm yapıları oluşturmak için de kullanılabilir. Statik olarak plakalar serbest, basit mesnetli ya da sabit sınır koşullarına sahip olabilir; bu koşullar elastik mesnetler, elastik kısıtlamalar ya da bazı durumlarda noktasal mesnetleri içerebilir (Şekil 5) (Szilard, 2004). Plakaların taşıdığı statik ve dinamik yükler çoğunlukla plaka yüzeyine dik doğrultudadır. Bu dış yükler, içsel eğilme ve burulma momentleriyle ve enine kayma kuvvetleriyle taşınır (Abraham, 1962).

Plakaların taşıyıcı davranışı belirli ölçüde kirişlerin davranışına benzerlik gösterse de, bu nedenle plakalar kirişlerden oluşan kafes sistemlerle yaklaşık olarak modellenebilir. Ancak böyle bir yaklaşım, yapının sürekliliğini keyfi olarak bozduğundan ve çoğunlukla hatalı sonuçlara yol açtığından, gerçek iki boyutlu plaka davranışının doğru şekilde hesaba katılması gerekir (Bhaskar and Varadan, 2021). Şekil 4 plakalar için çeşitlisınır koşullarını göstermektedir.

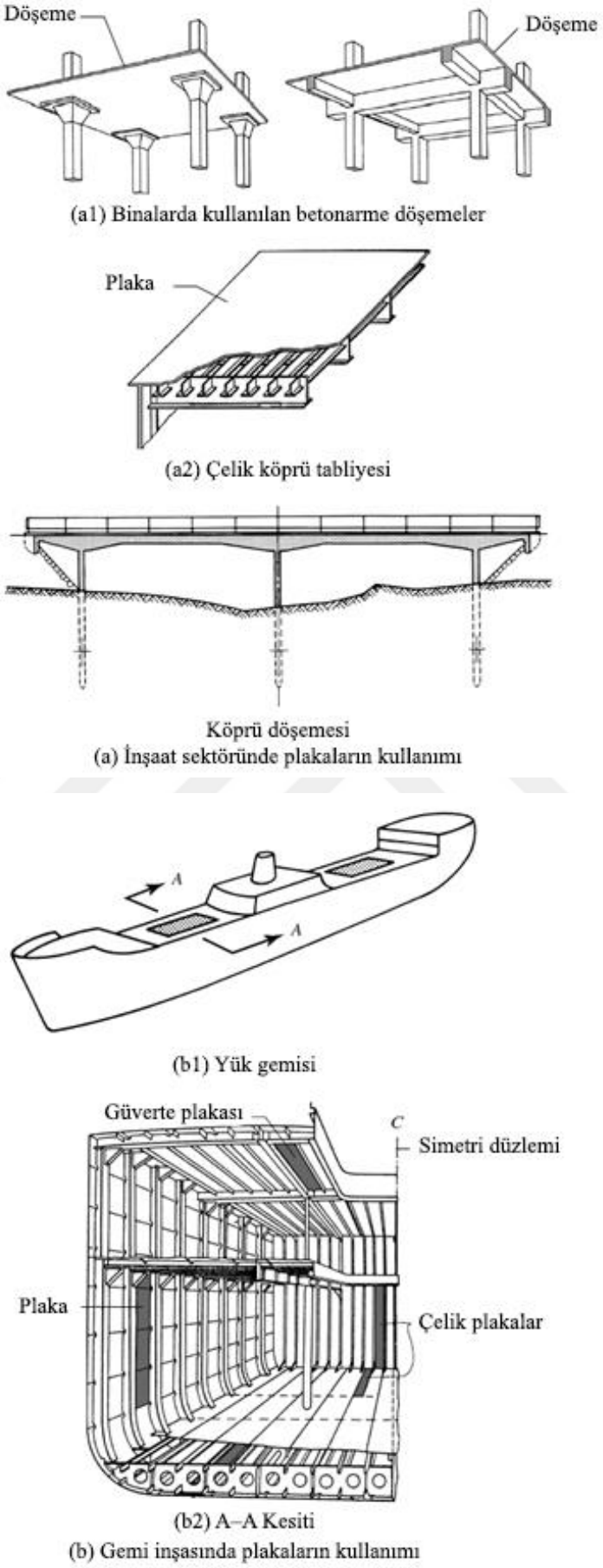


Şekil 4. Plakalar için çeşitli sınır koşulları (Szilard, 2004)

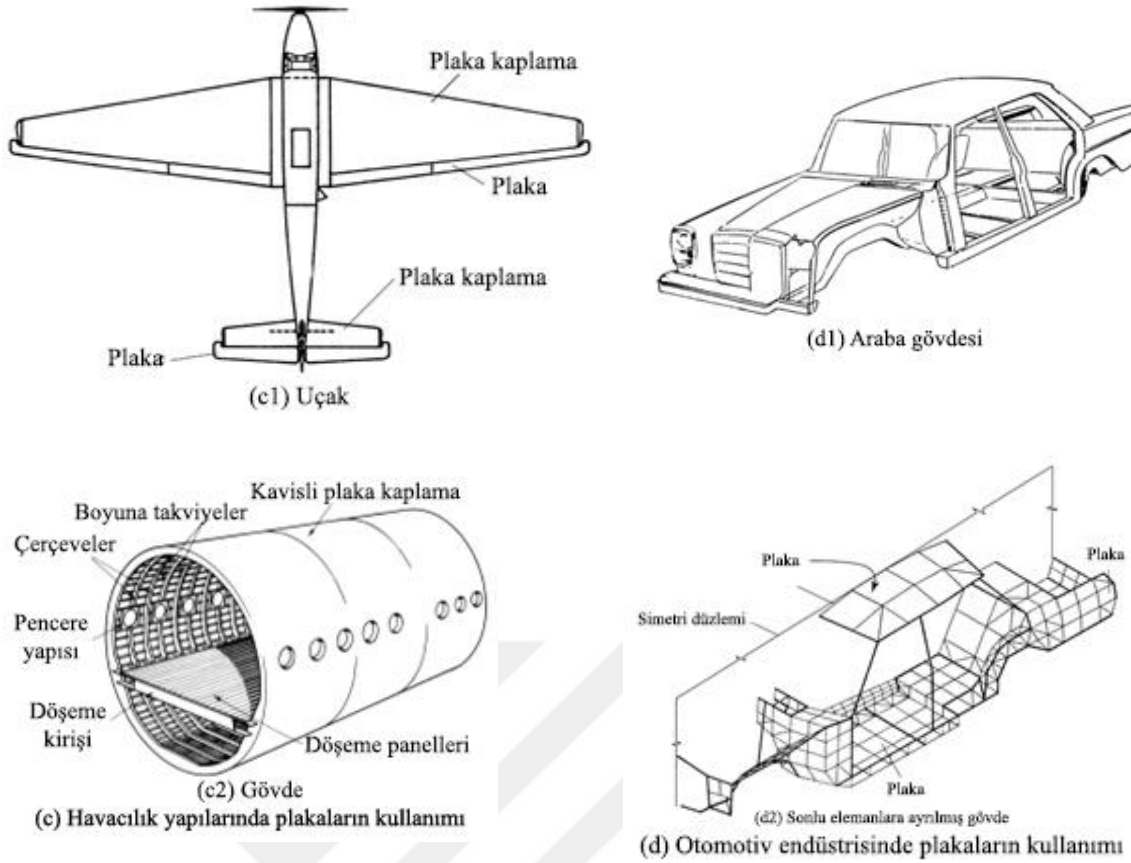
Plakaların iki boyutlu yapısal davranışı, daha hafif yapılarla sonuçlandığından ekonomik avantajlar sağlar. Ayrıca, birçok yapısal konfigürasyon, plakalar aracılığıyla kolayca elde edilebilecek kısmi veya tam kapalı hacimler gerektirir; bu durum ek kaplama elemanları gerektirmediğinden malzeme ve işçilik maliyetlerinden tasarruf sağlar. Bu nedenle plakalar ve plaka tipi yapılar, son yıllarda özel bir önem kazanmış ve mühendislik uygulamalarında önemli ölçüde artış göstermiştir. Mühendislik yapılarında bulunan çok sayıda yapısal bileşen plaka olarak sınıflandırılabilir. İnşaat mühendisliği yapılarına örnek olarak döşeme ve temel plakaları, kilit kapakları, ince istinat duvarları ve köprü döşemeleri verilebilir. Plakalar, aynı zamanda gemi inşa ve havacılık endüstrilerinde de vazgeçilmezdir. Örneğin uçak kanatları ve gövdesinin büyük kısmı, rijitleştirilmiş takviye elemanlarıyla donatılmış hafif eğrilikli bir plaka yüzeyinden oluşur. Benzer şekilde, bir geminin gövdesi, güvertesi ve üst yapısı da rijitleştirilmiş plaka yapılarına örnektir. Plakalar ayrıca çeşitli makine parçaları ve diğer mekanik aygıtların önemli bileşenleridir. Şekil 5, bu endüstriyel uygulamaların bazılarını şematik olarak göstermektedir. (Szilard, 2004; Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959; Ugural, 2017)

Yapı, tasarım yüklerine maruz kaldığında belirli sınırlar içinde kalmak şartıyla hizmet verebilir olmalıdır. Hizmet verebilirliğin bir parçası, örneğin şekil değiştirmelere uygun sınırlamalar getirilerek sağlanabilir. Plaka yapıların büyük bir kısmı, elastisite kuramının temel denklemleri uygulanarak analiz edilir. Özellikle taşıyıcı sistem tasarımında plakalar, kirişler kadar temel yapısal elemanlardır. Bu yapıların çeşitli statik ve dinamik yükler altındaki şekil değiştirme ve gerilme davranışları, rezonansa girme eğilimleri ve burkulmaya karşı hassasiyetleri dikkate alınarak, hizmet koşullarına uygun biçimde tasarlanabilmesi için davranışlarının anlaşılması zorunludur. Bu nedenle yapılacak analiz hem doğru hem de yeterince basit olmalıdır. Bu gereksinimlere yanıt verebilmek amacıyla geliştirilen en basit mühendislik kuramı, "İnce Plaka Kuramı" ya da "Klasik Plaka Kuramı" 'dır. Plaka teorileri ayrıca gerilme-gerinim ilişkilerine göre sınıflandırılabilir. Lineer elastik teoriler, gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi Hooke yasasına göre tanımlar. Lineer olmayan elastisite, plastiklik ve viskoelastiklik ise daha karmaşık ilişkileri ele alır. Bu teoriler genellikle statik ya da dinamik durumlar içindir. (Bhaskar and Varadan, 2021; Carrera vd., 2011)

Plaka teorilerine ait diferansiyel denklemlerin tam çözümleri yalnızca özel sınır ve yükleme koşulları altında elde edilebilir. Ancak çoğu durumda, çeşitli enerji yöntemleri çoğu pratik plaka problemi için oldukça uygun analitik çözümler sunabilir. Günümüzde ise, bilgisayarların yaygın kullanımıyla birlikte, çok sayıda sayısal çözüm tekniği sadece önemli ölçüde önem kazanmakla kalmamış, neredeyse tek başına hâkim hale gelmiştir.



Şekil 5. Plakaların mühendisliğin çeşitli alanlarında kullanımı (Szilard, 2004)



Şekil 5. Plakaların mühendisliğin çeşitli alanlarında kullanımı (devamı)

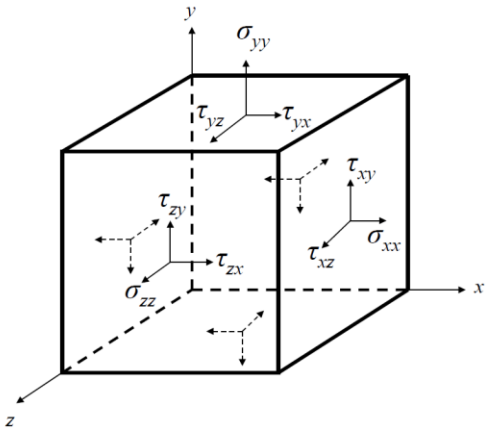
Elastisite teorisi

Elastisite teorisi ile klasik mühendislik analizlerinde kullanılan malzeme mekaniği yaklaşımları arasındaki temel fark, geometriye dair varsayımlardır. Malzeme mekaniği yaklaşımı, şekil değiştirme geometrisine ilişkin belirli varsayımlara dayanır. Örneğin, kiriş teorisi genellikle Euler–Bernoulli hipotezine dayanır; bu hipotez, şekil değiştirme sırasında düz kesitlerin düz kaldığını kabul eder. Ancak elastisite teorisine dayalı analizlerde bu tür varsayımlara ihtiyaç duyulmaz. Elastisite kuramına dayalı analitik çözümler, birçok plaka ve kiriş problemine uygulanabilir. Ancak, karmaşık geometrilere sahip birçok plaka yapısı için analitik çözümler ya bulunması zordur ya da mevcut değildir. Bu durumda, sayısal yöntemler geçerli bir alternatif oluşturur. (Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959)

Elastisite teorisi, bir yapının analizinde denge, süreklilik ve malzeme davranışına ilişkin temel ilişkilerin kullanılmasına dayanır. Bu teori, belirli yükleme ve sınır koşulları altında deplasman, şekil değiştirme ve gerilmelerin herhangi bir noktadaki dağılımını belirlemeyi amaçlar. Teorik olarak, alan denklemleri biçiminde ifade edilebilir:

- Denge denklemleri (Denk. 1),
- Şekil değiştirme–deplasman ilişkileri (Denk. 2),
- Gerilme–şekil değiştirme (Hooke) yasası (Denk. 3).

Bu bölümde verilen denklemler, Kartezyen x–y–z koordinat sistemine göre, hacimsel kuvvetlerin ihmal edildiği, küçük şekil değişimlerine sahip, doğrusal elastik ve izotropik bir cisim için tanımlanmıştır. Şekil 6'da yaygın olarak benimsenen işaretleme (pozitiflik) kuralını göstermektedir ve benzer bir işaretleme kuralı şekil değiştirmeler (strain) için de geçerlidir (Bhaskar and Varadan, 2021).



Şekil 6. Pozitif gerilme bileşenleri

$$\begin{aligned} \sigma_{x,x} + \tau_{xy,y} + \tau_{xz,z} &= 0 \\ \tau_{yx,x} + \sigma_{y,y} + \tau_{yz,z} &= 0 \\ \tau_{zx,x} + \tau_{zy,y} + \sigma_{z,z} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x = u_{,x}, \quad \gamma_{xy} &= v_{,x} + u_{,y} \\ \varepsilon_y = v_{,y}, \quad \gamma_{yz} &= w_{,y} + v_{,z} \\ \varepsilon_z = w_{,z}, \quad \gamma_{zx} &= u_{,z} + w_{,x} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\sigma_i = 2G\varepsilon_i + \lambda e \;\; \tau_{ij} = G\gamma_{ij} \; (i,j = x,y,z) \tag{3}$$

Burada, G ve λ sırasıyla Lamé sabitleri olup Denklem (4)'te verilmiştir;

- $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ hacimsel şekil değiştirmeyi temsil eder,
- Lamé sabitleri, Young modülü (E)ve Poisson oranı(μ) cinsinden:

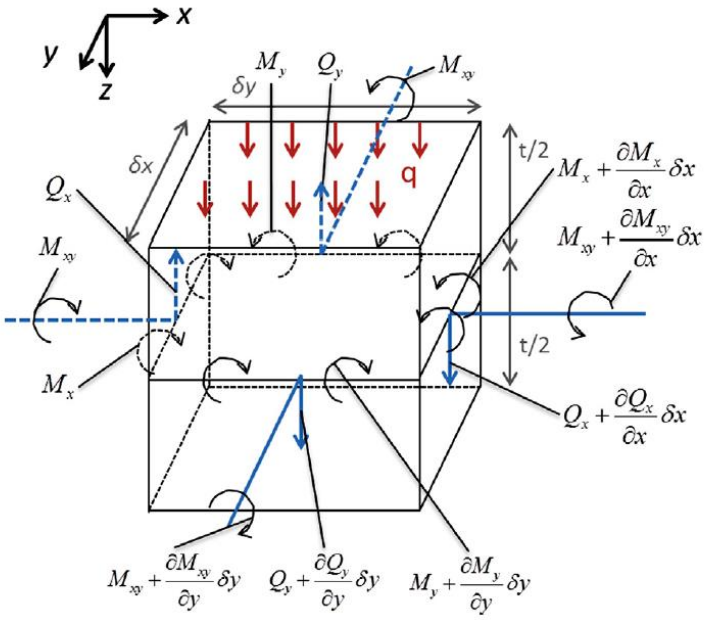
$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}, G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{4}$$

Klasik plaka teorisi

Plaka kuramı, bazı temel varsayımlar üzerine inşa edilmiştir. İlk olarak, plaka; kalınlığına oranla uzunluğu ve genişliği oldukça büyük olan yapısal bir eleman olarak tanımlanır. İkinci varsayım, Euler–Bernoulli kuramıyla benzerdir: eğilme sonrasında plakanın

nötr düzlemi konumunu korur. Bu yaklaşım, yük (q) ile eğilme miktarı (w) arasında analitik bir ilişki kurulmasını sağlar. (Bhaskar and Varadan, 2021)

Burada plaka, kalınlığın boyutlara göre çok küçük olduğu (kalınlık/uzunluk oranı < 0.1) yapılar olarak ele alınmaktadır. Bu varsayımlarla, plakanın eğilme davranışı diferansiyel denklemlerle tanımlanabilir ve sistemin üzerine gelen kesme, eğilme ve burulma yükleri analiz edilebilir. Bir plaka elemanının dengesi, düşey yükler, eğilme ve burulma etkilerine maruz kaldığında, diferansiyel denklemi takip ettiği varsayılır. Şekil 7, bir plaka elemanını ve bu yükleme koşullarının tümünü göstermektedir.



Şekil 7. Plakaların düşey yük, eğilme ve burulma etkisi altındaki şekil değiştirme şeması (Mo vd., 2018)

Plakanın birim genişlik başına uygulanan momentleri M_x, M_y ve M_{xy} (Denk. 5) ile düşey kayma kuvvetleri Q_x ve Q_y (Denk. 6), normal gerilmelerle ($\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{xx}$) ve kayma gerilmeleriyle ($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) ilişkilendirilebilir.

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xz} \cdot z dz, M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{yz} \cdot z dz, M_{xy} = -M_{yx} = -\int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} \cdot z dz \quad (5)$$

$$Q_x = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xz} dz, Q_y = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{yz} dz \quad (6)$$

Plakanın eğilme rijitliği D ile ifade edilir ve bu büyüklük; plaka kalınlığı (t), Young modülü (E) ve Poisson oranı (ν) cinsinden (Denk. 7) ile tanımlanır. Momentler ile düşey yer değiştirme (w) arasındaki ilişkiler, plakanın eğilme rijitliği ve Poisson oranı kullanılarak elde edilebilir ve bu ilişkiler Denklem (8) ile ifade edilir.

$$D = \frac{Et^3}{12(1-v^2)} \tag{7}$$

$$M_x = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) M_y and = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + v\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) M_{xy} = D(1-v)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tag{8}$$

Dağıtılmış bir q yükü için, yerel statik denge koşulu uygulanarak, x-ekseni etrafındaki moment ve xy düzlemindeki burulma için Denklem (9), ve düşey kayma kuvveti için Denklem (10) elde edilir:

$$\begin{aligned} &M_{xy}\delta y - \left(M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x}\delta x\right)\delta y - M_y \delta x + \left(M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y}\delta y\right)\delta x \\ &-\left(Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y}\delta y\right)\delta x \delta y + Q_x \delta x - \left(Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x}\delta x\right)\frac{\delta y^2}{2} - q\delta x\frac{\delta y^2}{2} = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\left(Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x}\delta x\right)\delta y - Q_x \delta y + \left(Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y}\delta y\right)\delta x - Q_y \delta x + q\delta x \delta y = 0 \tag{10}$$

İkinci dereceden terimler ihmal edilip sadeleştirme yapıldığında, Denklem (9), Denklem (11)'ye; Denklem (10) ise Denklem (12)'e dönüşür. Benzer işlemler y-ekseni için uygulandığında Denklem (13) elde edilir:

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} + Q_y = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = 0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial M_x}{\partial x} + Q_x = 0 \tag{13}$$

Denklem (13) kullanılarak Q_x, Denklem (12) ile Q_y elde edilip Denklem (11)'e yerleştirildiğinde Denklem (14) elde edilir:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - 2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -q \tag{14}$$

Denklem (14)'deki M_x, M_y ve M_{xy} Denklem (8)'e göre yerlerine yazıldığında, bu bölümde sayısal analiz teknikleriyle çözüme kavuşturulacak olan diferansiyel denklem, Denklem (15) olarak elde edilir:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \tag{15}$$

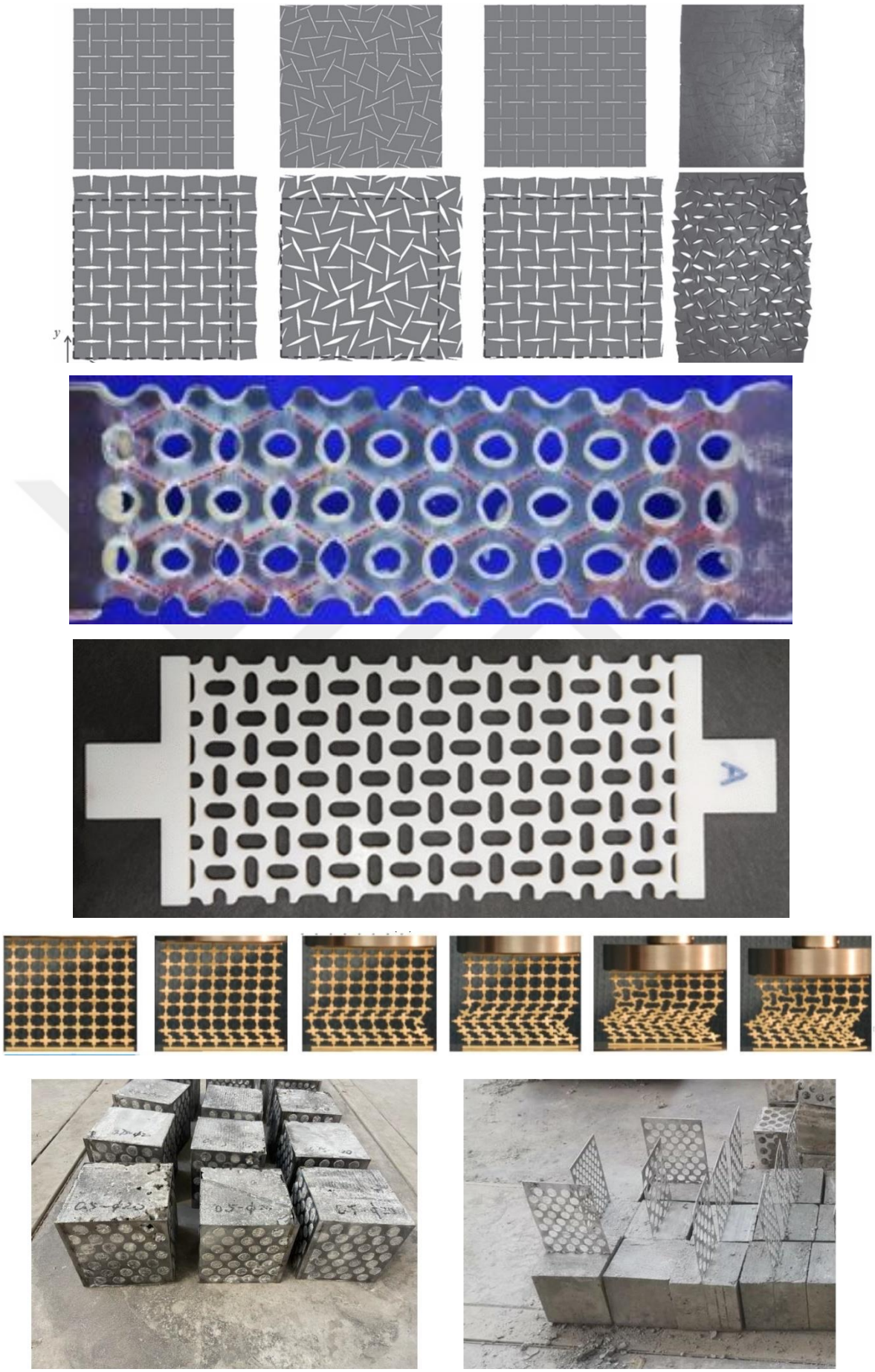
Delikli plakalar

Delikli plakalar, yüzeylerinde düzenli ya da düzensiz aralıklarla yerleştirilmiş boşluklar bulunan ve genellikle metal, plastik ya da fiber takviyeli kompozit malzemelerden üretilen yapı elemanlarıdır. Bu tür plakalar, hafiflik ile mekanik dayanım arasında dengeli bir çözüm sunmaları sayesinde pek çok mühendislik uygulamasında tercih edilmektedir. Metal, plastik ve kompozit gibi malzemeler delikli plakaların üretiminde yaygın olarak tercih edilir ve bu plakalar mühendislik alanlarında ses ve titreşim kontrolünden akışkanlar mekaniğine ve enerji sönümlemeye kadar çeşitli işlevler üstlenir.

Delikli plaka kavramı, özellikle gürültü azaltımı ve akış yönetimi gibi uygulamalarda önemlidir (Gallerand vd., 2022, 2024). Ayrıca bu plakalar, rezonans frekanslarını kontrol ederek titreşim sönümleme amacıyla da etkili bir şekilde kullanılabilir, bu da birçok mühendislik uygulaması açısından kritik öneme sahiptir (Gallerand vd., 2023).

Delikli plaka üretiminde en sık kullanılan malzemelerden biri çeliktir. Çelik; yüksek dayanım, uzun ömürlü kullanım ve ekonomik üretim maliyeti gibi avantajlarıyla öne çıkar. Bu özellikleri sayesinde çelik delikli plakalar; inşaat, otomotiv ve imalat sektörlerinde zorlu çevresel ve mekanik koşullara maruz kalan uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Malzemenin yüksek çekme dayanımı, farklı delik boyutları ve geometrileri ile yapı bütünlüğünü koruyacak şekilde tasarım yapılmasına olanak tanır. Ayrıca çeliğin şekillendirilebilir ve üretime uygun yapısı, özel tasarım ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş delikli plakaların üretimini mümkün kılar (Bumanis vd., 2023).

Yük altındaki delikli çelik plakalar, gerilme yeniden dağılımı gibi önemli mekanik avantajlar sunar. Yapılan araştırmalar, bu plakaların burkulma davranışlarının yalnızca malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda delik düzenine göre de değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Sayısal simülasyonlar, farklı delik desenlerine sahip plakaların çeşitli tepkiler verdiğini göstermiş ve bu durum, delikli tasarımların ağırlık azaltımı ve dayanımın önemli olduğu yapısal uygulamalarda değerli bir seçenek hâline geldiğini ortaya koymuştur (Da Silva vd., 2019; Helbig vd., 2016). Şekil 8'de çeşitli delikli plaka kullanım örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 8. Delikli plaka çalışma örnekleri

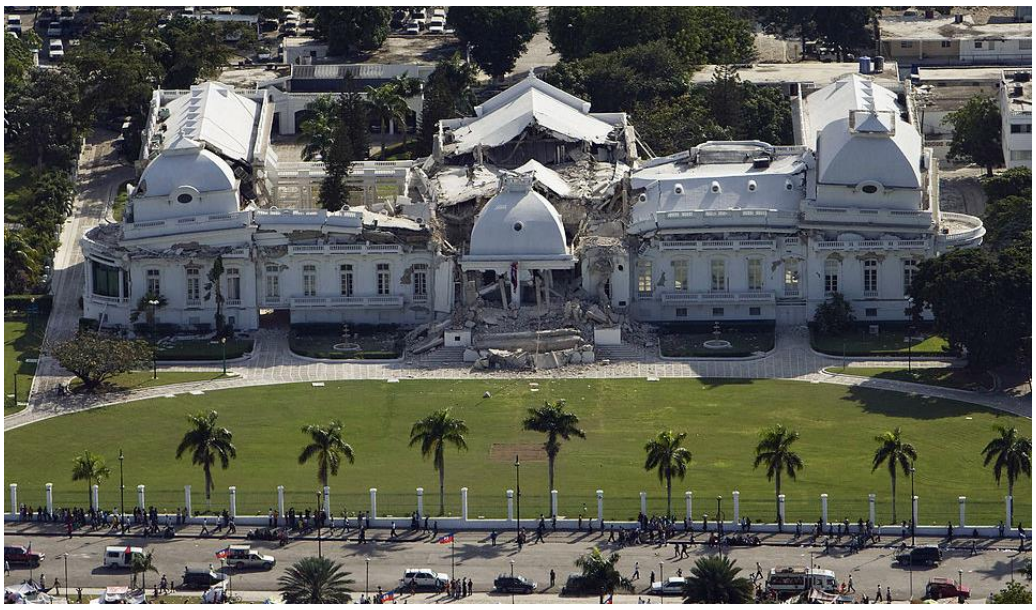
Kabuk Yapılar

Kabuk yapılar, mühendisliğin çeşitli alanlarında genellikle güçlü ve verimli yapısal çözümler olarak karşımıza çıkar. Sınırsız açıklıkları geçmeleri, minimum malzeme ile maksimum dayanım sağlamaları ve çeşitli yükler altında yük taşıma yetenekleri, bu yapıların tarih boyunca mimarlık ve mühendislikte tercih edilmesinin temel nedenlerindendir. Kabuk yapılar, geometrik formları sayesinde yükleri çoğunlukla çekme ve basınç gibi düzlemsel yönlerde taşır; bu sayede çok az malzeme kullanılarak oldukça yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilir (Heyman, 1995).

Kubbe gibi kabuk yapılar, tarihi boyunca dini ve politik yapılarda sembolik anlamlar da taşımıştır. Dairenin ve kürenin sürekliliği ve göklere doğru yükselişi simgelemesi nedeniyle, kubbeler tanrısallığı ve sonsuzluğu temsil etmiştir. Büyük İskender, Pers hükümdarları ve çeşitli imparatorluklar, yapısal gücünü ve tanrısal otoriteyi temsil etmek için kubbeleri mimarilerine dahil etmiştir (Baldwin, 1950; Gohnert, 2022).

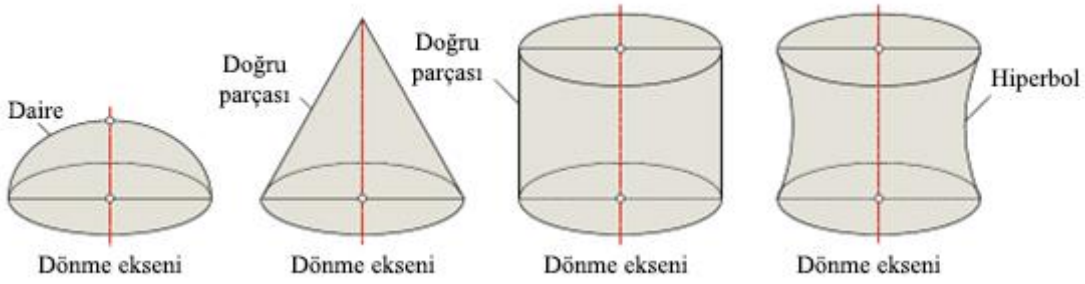
Bu sembolizm, asırlar boyu devam etmiş ve Roma'daki Pantheon (M.S. 126) ile İstanbul'daki Ayasofya (M.S. 537) gibi yapılarda vücut bulmuştur. Bu yapılar sadece tarihi anlamlarıyla değil, aynı zamanda çok sayıda depreme rağmen halen ayakta olmalarıyla da dikkat çeker. Bu da kabuk yapıların sadece estetik değil, aynı zamanda yapısal olarak da dayanıklı olduğunun göstergesidir.

Kabuk yapıların yapısal gücü, genellikle şekillerine bağlıdır. Kabuk geometrisi ile doğal yük akışının eşleşmesi, çok etkin bir yük taşıma sistemi oluşturur. Bu eşleşme neticesinde, çok az malzeme kullanılarak yüksek dayanımlı yapılar elde edilebilir. Bu nedenle doğadan esinlenilerek geliştirilen biyolojik yapılar, kabuk sistemler için önemli bir referans oluşturmaktadır (Pietraszkiewicz and Gorski, 2013). 2010 Haiti depreminde, Haiti Ulusal Sarayı yıkılmasına rağmen ön plandaki palmiye ağaçlarının zarar görmemesi bu durumun çarpıcı bir örneğidir (Şekil 9).



Şekil 9. 2010 Haiti depreminde Haiti Ulusal Sarayı (Mitchell, 2001)

Kabuk yapılar, esasen silindir, küre, koni gibi tanıdık geometrilerle tanımlanabilir (Şekil 10). Bu yapılar yük taşırken büyük ölçüde çekme veya basınç yönlü iç yüklerle çalışır. Çok az miktarda malzeme ile çok etkin gerilme dağılımları oluşturdukları için ince kabuklar olarak adlandırılırlar. Yaygın kabul gören tanıma göre, kabuğun yarıçapının kalınlığa oranı 20'den fazla ise, bu yapı "ince kabuk" olarak sınıflandırılır (Gohnert, 2022; Heyman, 1977).



Şekil 10. Bazı kabuk formları: Küresel kabuk, konik kabuk, silindirik kabuk, hiperboloid

Kabuk yapılarda taşıyıcılığın çoğu şekilden kaynaklanır. Söz gelimi, tavuk yumurtasının yapısal dayanımı bu şeklin doğal olarak membran gerilmeleri oluşturmasından kaynaklanır ve belirli bir kuvvetin altında kırılması neredeyse imkansızdır. Dolayısıyla, kabuk yapılarda şekil önemli bir tasarım kriteridir.

Gaudí gibi öncü mimarlar, doğal yük yönleri ile yapı geometrisini eşleştirmenin yapısal avantajlarını kavrayarak kabuk yapılarda zincir modellerden yararlanmıştır. Bu modellerde, zincir ters çevrildiğinde çekme çubukları basınca dönüşür ve doğal bir kubbe şekli elde edilir. Bu şekilde oluşan geometri, doğal yük akımı ile uyumlu olduğu için minimum malzeme ile maksimum dayanım sağlar (Gohnert, 2022; Huerta, 2006).

Membran kabuk yapılar

Membran kabuklar, yükleri kavisli şekilleri ve düzlem içi çekme ve basınç yoluyla taşırlar; bu tür gerilmeler genel olarak membran gerilmeleri olarak adlandırılır. Eğer bir kabuk, eğilme momentlerine karşı direnç göstermeksizin yük taşıyabiliyorsa, bu tür yapılar membran kabuk olarak adlandırılır (Calladine, 1983; Csonka, 1987). İyi tasarlanmış membran kabuklar genellikle eğilmeye dayalı karşılıklarından, örneğin döşeme gibi yapı elemanlarından daha incedir. Bu nedenle, kabuklar malzeme kullanımında verimlilik açısından etkili yapılar olarak kabul edilir. Ayrıca, bu ince kabuklar estetik açıdan da avantaj sağlar (Schlaich, 2004; Von Meiss, 2000).

Çoğu yapısal sistem, örneğin döşemeler veya kirişli köprüler, yükleri desteklere iletmek için içsel eğilme momentleri ve kayma kuvvetlerini harekete geçirir. Bu tür yapıların eğilme momentlerini iletebilmesi için belirli bir kalınlığa sahip olması gerekir. Kabuk benzeri yapılar (örneğin, taş kemerler ve tonozlar) ise kendi ağırlıklarını ve dış yükleri çok az eğilme momentiyle taşırlar. Ancak bu kabuk benzeri yapıların şekillendirilmesi, yani eğilme momentlerinin minimize edilmesi, basit bir işlem değildir. Orta Çağ taş ustaları, eğilme momentlerini azaltan yeni formları tasarlamak için deneyimsel bilgiye dayanırlardı (Addis, 2007). 17. yüzyıldan itibaren de bilim insanları ve mühendisler daha sistematik yöntemler geliştirerek eğilme momentlerinin etkilerini azaltan formlar üzerine çalışmalar yapmışlardır (Chiang, 2022; Heyman, 1977, 1995). Bu araştırma süreci günümüzde form bulma (form-finding) olarak adlandırılmaktadır.

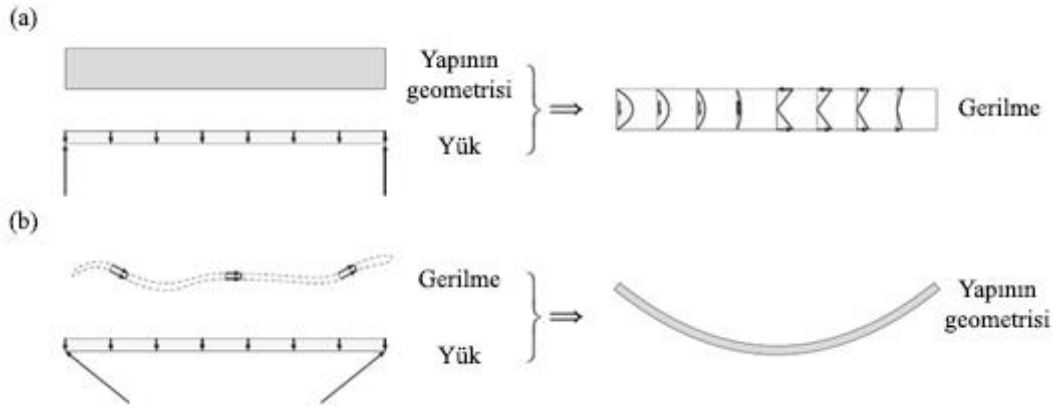
Formla bulunan şekiller her ne kadar malzeme açısından verimli yapılar olsa da, her zaman en ekonomik çözüm olmayabilirler. Betonarme kabukların malzeme kıtlığı nedeniyle 1950'lerde popülerliği artmıştır. Ancak 1970'lerde işçilik maliyetlerinin artmasıyla birlikte bu yöntem ekonomik olmaktan çıkmıştır (Meyer and Sheer, 2005). Sürdürülebilir kalkınma açısından bakıldığında, ahşap gibi malzemeler ucuz olmasına rağmen gömülü karbon emisyonları ve çevresel etkileri yüksek olabilmektedir. Bu nedenle, gömülü emisyonları azaltma ihtiyacı ve gelişen hesaplamalı tasarım teknikleri kabuk yapıların yeniden canlanmasına yol açabilir. Özellikle, kabuk yüzeyleri artık ayrık diferansiyel geometri (Pottmann vd., 2007) kullanılarak düzleştirilmiş panellere ayrıştırılabilir. Ayrıca, bilgisayar kontrollü makineler ile endüstriyel olarak üretilen düz paneller, çok az insan emeği ile kabuk formuna dönüştürülebilir (Chiang, 2022; Mitchell, 2001; Zipkin, 2001). Böylece bileşenler ekonomik olarak üretilebilir.

Form bulma, mühendislerin malzeme açısından verimli yapı formlarını keşfetmelerini sağlar. Geleneksel inşaat sektöründe yaygın olan yapısal kesit tasarımı yaklaşımı, belirli bir

yükleme durumu altında yapıdaki gerilmelerin veya yer değiştirmelerin analiz edilmesine dayanır. Gerilmeler ya da yer değiştirmeler sınır değerleri aştığında, tasarımcı genellikle elemanın boyutunu veya kalınlığını artırarak yapısal kapasiteyi düzenler. Neredeyse kaçınılmaz olarak, rastgele tasarlanmış yapılar (örneğin doğrusal kirişler) eğilmeye maruz kalır ve bu da büyük kesit derinlikleri ya da önemli miktarda donatı gerektirir.

Form bulma ise bunun tersine çalışır. Bu yaklaşımda gerilme koşulları, yükleme ve sınır şartları baştan tanımlanır; ardından bu şartları sağlayan en uygun form aktif olarak aranır. Örneğin, yalnızca eksenel kuvvet taşıyan bir halat, dikey yük altında ve uçları ankrajlı iken belirli bir denge geometrisine ulaşır. Bu şekilde yapı tasarımcısı, çok daha ince ve verimli bir kesit profiline olanak tanıyan geometrik bir şekil elde edebilir (Şekil 11).

Geçmiş dönemlere baktığımızda, Romalılar, yapısal verimlilik açısından kavisli kemerlerin düz Yunan lentolarından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Hem Romalılar hem de Orta Çağ taş ustaları, bu tür tasarımları teorik bilgiye dayanmaksızın, deneyimsel yöntemlerle geliştirmiştir (Addis, 2007). Yalnızca 17. yüzyılda, özellikle statik alanındaki bilimsel gelişmeler sayesinde yapı formları ve iç gerilmeleri sistematik olarak ele alınmaya başlanmıştır. 17. yüzyıl sonlarından 19. yüzyıla kadar 2 boyutlu eğrilerin form bulma süreçleri geliştirilmiş, 20. yüzyılda ise 3 boyutlu yüzeyler üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Günümüzde, form bulma görevini yerine getirebilmek için çeşitli hesaplamalı yöntemler geliştirilmiştir. İki boyutlu eğriler ve üç boyutlu yüzeyler için geliştirilen bu yöntemler, fiziksel temelli ya da matematiksel temelli yaklaşımlar olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir. İlk grup yalnızca kararlı denge hâllerine karşılık gelen şekilleri üretirken, ikinci grup hem kararlı hem de kararsız şekilleri elde edebilir.



Şekil 11. Geleneksel yapısal tasarım ve form bulma yaklaşımlarının farkı (Chiang, 2022)

Tarihsel süreçte membran kabuklar; ortaçağ taş tonozlarından betonarme kabuklara, 20. yüzyılın sonlarındaki hafif yapı sistemlerinden günümüz cam çatılarına kadar farklı formlarda inşa edilmiştir. Yığma yapılarda harcın çekme kapasitesi sınırlı olduğundan, açıklık geçilen

bölgelerde eğilme momentlerini minimize etmek amacıyla kemer ve tonoz gibi basınca çalışan sistemler geliştirilmiştir (Chiang, 2022; Heyman, 1977). Bu yapılar, hem ekonomik hem de malzeme açısından verimli çözümler sunmuştur. Örneğin 15. yüzyılda inşa edilen Girona Katedrali, yaklaşık 23 metrelik genişliğiyle bu ilkenin etkileyici bir örneğidir.

20. yüzyılda çelik donatılı betonun gelişmesiyle, şekillendirilebilirlik ve dayanım avantajları bir araya getirilmiş; Le Corbusier gibi öncü mimarlar bu malzeme ile serbest formlu yapılar üretmiştir. Ancak beton kabukların sadece estetik değil, aynı zamanda yapısal verimliliği de önemsenmiş ve Heinz Isler'in ince ve basınca çalışan kabuk sistemleri bu yaklaşımı zirveye taşımıştır (Chiang, 2022). Isler'in 30 metrelik açıklığı yalnızca 90 mm kalınlıkla geçmesi (Şekil 12), kabuk yapıların ne denli etkili olabileceğini göstermektedir (Billington, 1985).

Günümüzde, dijital üretim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte çelik membran kabuk yapılar da dikkat çeken bir uygulama alanı hâline gelmiştir. Çeliğin yüksek çekme dayanımı, daha ince ve hafif malzemelerle karmaşık formların elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Otto and Rasch, 1995). Lazer kesim, robotik montaj ve parametrik modelleme gibi tekniklerle üretilen bu yapılar; mimari esnekliğin yanı sıra yapısal bütünlük de sunmaktadır (Suzuki and Knippers, 2022). Özellikle geçici yapılar, sergi mekânları ve köprü kaplamaları gibi alanlarda tercih edilen bu sistemler; sökülebilirlik ve tekrar kullanılabilirlik özellikleriyle sürdürülebilir yapısal yaklaşımlar içinde önemli bir yere sahiptir.

Bu bağlamda, bu tezin özgün katkılarından biri de, kabuk yapıların yapısal verimliliğini ve çok işlevliliğini artırmaya yönelik olarak öksetik boşluklu yüzey geometrilerinin kullanımını araştırmasıdır. Öksetik yapılar, negatif Poisson oranları sayesinde, yük altında alışılmışın dışında genişleme davranışı sergileyerek yerel deformasyonları daha geniş alanlara yayabilir. Bu özellik, kabuk yapılarda uygulandığında, hem enerji sönümleme kapasitesini artırmakta hem de rijitliği azaltmaksızın hafifliğin artırılmasına olanak sağlamaktadır. Tezin temel odağı, form bulma süreçlerine öksetik geometri prensiplerini entegre ederek, hem görsel estetik hem de yapısal performans açısından optimize edilmiş kabuk formlarının elde edilmesidir. Ayrıca, öksetik boşlukların düzenli ve parametrik biçimlerde modellenebilmesi, üretim ve montaj süreçlerinde modülerliğe ve yeniden yapılandırılabilirliğe katkı sunmaktadır. Böylece, sürdürülebilirlik, estetik ve mekanik verimliliği aynı potada eriten yeni nesil kabuk yapı tasarımlarının geliştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 12. Deitingen Servis İstasyonu (Li vd., 2017)

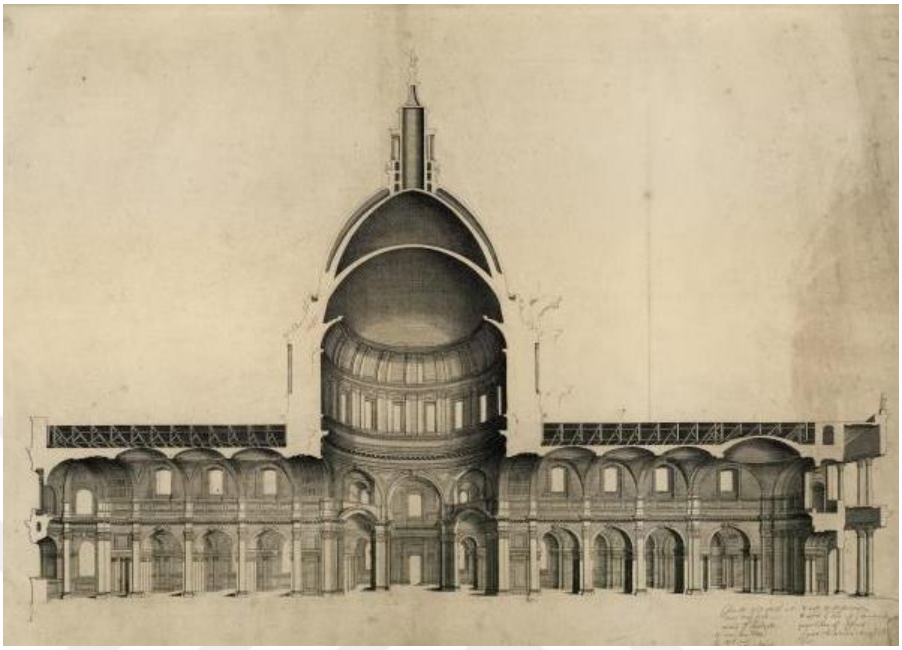
2-Boyutlu eğrisel formlar için form bulma teknikleri

Yalnızca çekme kuvveti taşıyan eğriler yapısal bağlamda genellikle funiküler olarak tanımlanır. "Funiküler" terimi Latince kökenli olup "halat veya ip benzeri" anlamına gelir. Bir halat ya da ip neredeyse hiç eğilme momenti taşıyamadığından yalnızca çekme kuvveti ile yük taşıyabilir. Dolayısıyla yapısal mühendislik bağlamında "funiküler" yalnızca çekmeye çalışan sistemleri ifade eder. Bu bağlamda en bilinen funiküler eğri, yalnızca çekmeye çalışan zincir eğrisi (catenary curve) olarak tanımlanır. Bu eğri, kendi uzunluğu boyunca düzgün dağılmış yerçekimi yükü altında asılı bir zincirin şekline göre tanımlanır. Eğri ters çevrilip yalnızca basınca çalışan bir yapı olarak inşa edildiğinde, bazı araştırmacılar bu tür sistemleri anti-funiküler olarak adlandırır (Pinto and Fonseca, 2020). Öte yandan, bazı yazarlar yalnızca basınca çalışan bu sistemleri genelleştirilmiş funiküler yapılar kapsamında ele alır (Block and Ochsendorf, 2007; Chiang, 2022).

Fiziksel yöntem

Funiküler eğrilerin formunu belirlemek için birden fazla yöntem vardır. Bunlardan en sezgisel olanı fiziksel deneylere dayanan yöntemlerdir. 17. yüzyılda bilim insanı Robert Hooke , bir kemerin şeklini belirlemeye yönelik önemli bir içgörü sunmuştur. "Asılı halat esnekse, ters çevrildiğinde rijit kemer gibi davranır" ifadesiyle, yapının davranışını açıklamıştır. Bu yaklaşım, tarihsel olarak ilk fiziksel form bulma yöntemi olarak kabul edilir. Esnek bir zincir, yalnızca kendisine etki eden yerçekimi yükünü taşıyabildiği şekle ulaştığında dengede kalabilir. Zincir ters çevrildiğinde ise bu form, yalnızca basınca çalışan ideal bir kemere dönüşür.

Christopher Wren ise bu ters çevrilmiş zincir eğrisi prensibini St. Paul Katedrali'nin kubbe tasarımına uygulamıştır. Bu yapının strüktürel formu, bir zincirin ters eğrisi ile modellenerek, merkezde yer alan fener kısmının ağırlığını taşıyacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. St. Paul Katedrali (Mitchell, 2001)

Matematiksel yöntem

Asılı bir zincirin dengesi, matematiksel olarak da tanımlanabilir. Farklı yük dağılımları ve ankraj noktaları, farklı zincir şekillerine yol açar. Örneğin, yatayda düzgün dağılmış bir dikey yük altında, eğri parabolik olur ($z = x^2$); eğik uzunluk boyunca düzgün dağılmış bir yük altında ise eğri hiperbolik kosinüs şeklindedir ($z = \cosh x$). Bu zincir eğrisi (catenary curve), 17. yüzyıl sonlarında Jakob Bernoulli ve Gottfried Leibniz gibi matematikçiler tarafından analitik olarak ifade edilmiştir (Carlson, 2021).

Eğer zincirdeki yükler belirli noktalarda yoğunlaşmışsa, zincirin şekli grafiksel olarak da belirlenebilir. Bu durumda eğri, çubuklar ve düğümlerle temsil edilen kesikli bir yapıya dönüştürülür. James Clerk Maxwell, bu tür sistemlerin dengesini analiz etmek için karşılıklı diyagramlar (reciprocal diagrams) yöntemini geliştirmiştir (El Boustani vd., 2020; Maxwell, 1864, 1866). Bu diyagramlarda iki düğüm, ortak bir kenarı paylaşan iki çokgen ile gösterilir. Bu grafiksel yaklaşım daha sonra Cremona diyagramı olarak adlandırılmıştır (Cremona, 1885). Bu yöntem, Antoni Gaudí tarafından da benimsenmiş ve Barselona'daki Park Güell'deki tonozlu yürüme yolları ve istinat duvarlarının tasarımında kullanılmıştır (Şekil 4).



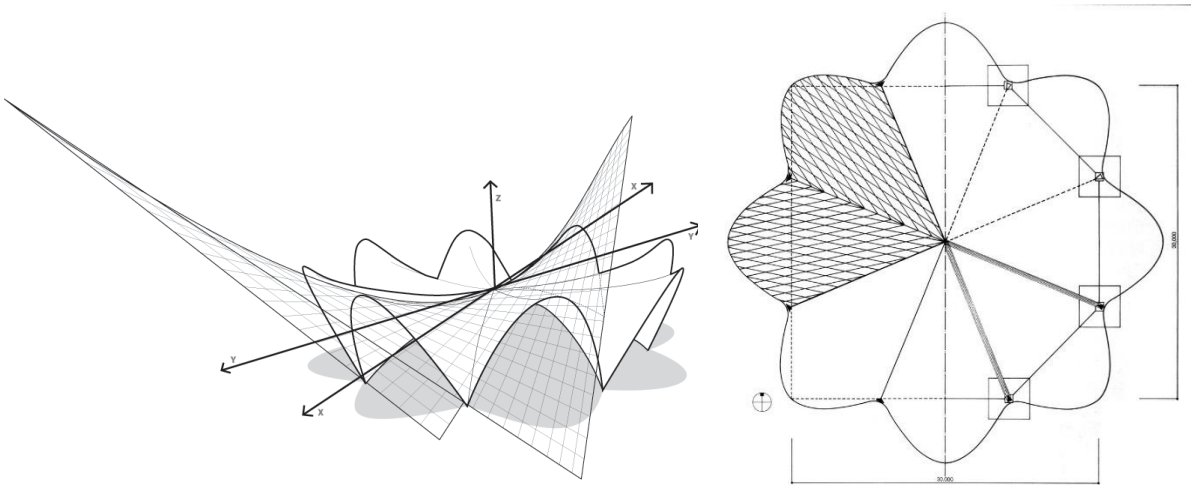
Şekil 14. Park Güell'deki tonozlu yapılar (Chiang, 2022)

Bu tezde ise, analiz edilen yarı silindirik kabuk modellerinde yükseklik/açıklık oranları 0.3 ve 0.5 olarak belirlenmiştir. Bu oranlar, kabuk geometrisinin funiküler davranışa yakınlığını değerlendirmek açısından önem arz etmektedir. Matematiksel form bulma yaklaşımlarında eğriliği artıran formlar (örneğin yüksekliği açıklığın %50'sine yakın olanlar), daha homojen iç kuvvet dağılımına ve minimum moment gelişimine olanak tanıyarak funiküler denge formlarına yaklaşır. Buna karşılık, daha yatay ve basık formlar (0.3 oranı gibi), eğilme momentlerinin artmasına neden olarak membran davranıştan sapmalara yol açabilir. Dolayısıyla seçilen bu iki oran, hem yapısal etkinlik hem de form bulma ilkeleri bakımından karşılaştırmalı bir değerlendirme yapmaya imkân tanımaktadır.

3-Boyutlu membran yüzeyler için form bulma yöntemleri

Matematiksel yöntem

19. ve 20. yüzyıllarda özellikle kalkülüs alanındaki gelişmelerle birlikte, bilim insanları ve mühendisler daha karmaşık problemlerin çözümünde kısmi diferansiyel denklemleri kullanmaya başlamıştır. Membran kabukların denge durumunu tanımlayan denklem, 1934 yılında A. Pucher tarafından geliştirilen Pucher denklemi olarak bilinir (Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959). Bu denkleme ait bazı analitik çözümler, Félix Candela tarafından hiperbolik kabuk yapılarında fiziksel yapılar hâline getirilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Candela'nın hiperbolik paraboloid kabuğu, Restoran, Xochimilco (Chiang, 2022)

Fiziksel yöntem

Analitik çözümler, yalnızca belirli sınır koşullarında ilginç formlar ortaya koyabilir. Ancak bu çözümler, kapalı form ifadelerle sınırlı olduğundan, kapsamları oldukça kısıtlıdır. Fiziksel form bulma yöntemleri bu sınırlamalara sahip değildir. Nasıl ki bir halat doğal olarak yalnızca çekmeye çalışan bir gerilme durumuna ulaşabiliyorsa, benzer şekilde kumaşlar da saf gerilme hâlinde dengeye ulaşabilir. Bu prensip, Heinz Isler tarafından 1959'daki Uluslararası Kabuk Yapılar Kongresi'nde tanıtılmıştır. Isler, serbest formlu kabukların geometrisini belirlemek amacıyla asılı kumaşlar ve lateks membranlar kullanmıştır (Chilton, 2000).

3-Boyutlu membran yüzeylerde form bulma için sayısal yöntemler

Sayısal yöntemler, form bulma problemini iki temel yaklaşımla ele alır: fiziksel olarak asılı ağların simülasyonu ve matematiksel formüllerin sayısal çözümü.

Fiziksel tabanlı yöntemler

Bu grup, fiziksel deneylerin benzetimine dayalı yöntemleri kapsar. Bunlardan en bilinenlerinden biri dinamik gevşeme (dynamic relaxation) yöntemidir. İlk olarak A. S. Day tarafından 1965 yılında tanıtılmış ve Barnes (1988) tarafından aktarılmıştır (Barnes, 1988). Bu yöntem, dış yükler uygulandığında esnek bir ağ sisteminin nasıl hareket ettiğini, şekil değiştirdiğini ve fazla kinetik enerjiyi nasıl sönümleyerek sonunda denge durumuna ulaştığını simüle eder.

Matematiksel tabanlı yöntemler

Bu gruptaki yöntemler, düğüm noktalarının konumları ve çubuklardaki kuvvetler gibi tüm sayısal değişkenleri ayarlayarak denge konfigürasyonlarının çözümlerini sunar (Veenendaal and Block, 2012). En bilinen yöntemler arasında kuvvet yoğunluğu yöntemi (force

density method) (Schek, 1974), itki ağ analizi (thrust network analysis) (Block and Ochsendorf, 2007) ve kendini taşıyan yüzeyler (self-supporting surface) yöntemi (Vouga vd., 2012) yer alır.

Bu iki yöntem grubu arasındaki temel fark; fiziksel tabanlı yöntemlerin yalnızca kararlı denge durumlarını (örneğin asılı bir halat) hesaplayabilmesi, matematiksel tabanlı yöntemlerin ise hem kararlı hem de kararsız denge durumlarını (örneğin hem asılı hem de dik duran çubuk sistemleri) modelleyebilmesidir.

Kabukların membran teorisi

Kabuk problemlerinin çözümünü basitleştirmek için, ele alınan kabuk yapısının yalnızca saf membran gerilmeleri altında yük taşıdığı ve herhangi bir eğilme etkisinin meydana gelmediği varsayıldığında önemli bir sadeleştirme elde edilir. Bu durum, yalnızca membran kuvvetleri ve planda sabit dağılan gerilmeler taşıyan disklerle karşılaştırılabilir. Bu tür bir yapı, saf membran gerilme durumu olarak adlandırılır ve bu duruma ilişkin teori membran teorisi olarak bilinir. Bu teori şu varsayımlara dayanır:

i. Düzlem gerilme bileşenleri $\sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{\vartheta\vartheta}, \tau_{\varphi\vartheta} = \tau_{\vartheta\varphi}$ yalnızca etki eden gerilmeler olmayıp, aynı zamanda kabuk kalınlığı h boyunca sabit olarak dağılmıştır ve z eksenine bağlı değildir. Dolayısıyla, genellikle meydana gelen moment miktarları $M_{\varphi\varphi}, M_{\vartheta\vartheta}, M_{\varphi\vartheta} = M_{\vartheta\varphi}$ ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu durum, kayma kuvvetlerinin Q_{ϑ} ve Q_{φ} ortadan kalkması ile birlikte gelir.
ii. Kabukların eğilme ve burulma rijitlikleri, membran rijitliklerine kıyasla ihmal edilecek kadar küçüktür. Ancak bu varsayım, tüm ifadelere kabuk kalınlığı h teriminin kuvvetleri dahil olduğunda geçerli olan ince kabuklar için geçerlidir.

Bu varsayımlar, $\frac{z}{r_1}$ ve $\frac{z}{r_2}$ terimlerinin ihmal edilebilir olduğunu öngören Kirchhoff-Love yaklaşımına eşdeğerdir. Bu durumda kalan membran kuvvetlerinin sonucu (Denklem 16) şu şekildedir:

$$N_{\varphi\varphi} = \sigma_{\varphi\varphi} h, N_{\vartheta\vartheta} = \sigma_{\vartheta\vartheta} h, N_{\varphi\vartheta} = N_{\vartheta\varphi} = \tau_{\varphi\vartheta} h \tag{16}$$

Bu teorinin uygulanabileceği denge koşulları, yalnızca meridyonal (boyuna) yön φ, halka (çevresel) yön ϑ ve kalınlık yönü z için geçerlidir. Moment dengesi ya sıfır sonuç verir (tüm moment bileşenlerinin ihmal edilmesi nedeniyle) ya da zaten düzlem kayma kuvvetlerinin denklemlerinde yer alır.

Bu üç kuvvet denge denklemi ve üç düzlem gerilme denklemi ile ele alınan membran problemi tam olarak içsel olarak belirlenmiş olur. Bu nedenle, kabuk yapılarının membran

teorisi altında çözümlenmesi yalnızca kabuk içindeki gerilmelerin belirlenmesini içerir ve herhangi bir statik belirsizlik durumu mevcut değilse dış desteklere bağlı değildir.

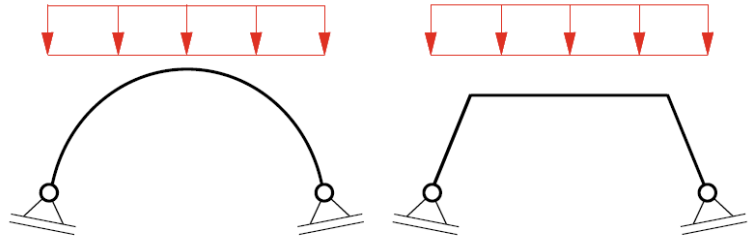
Membran teorisinin uygulanabilmesi için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir:

i. Kabuk orta yüzeyi, yolu, eğimi ve eğriliği açısından sürekli olmalıdır. Şekil 15.1 'in sol tarafında gösterilen durum, membran teorisi ile analiz edilebilirken, sağ taraftaki durum analiz edilemez. Bunun nedeni, kabuk orta yüzeyindeki eğim süreksizliği nedeniyle yerel denge yalnızca membran kuvvetleriyle sağlanamaz ve bu noktada yerel eğilme etkisi ortaya çıkar.
ii. Kabuk kalınlığı h, meridyen yönü (φ) ve halka yönü (ϑ) boyunca değişiklik gösterebilir, ancak ani bir değişim göstermemelidir (bkz. Şekil 15.2). Buna göre, Şekil 15.2'nin sol tarafındaki durum kabul edilebilirken, sağ tarafındaki durum kabul edilemez.
iii. Uygulanan yüzey yükleri sürekli dağılmalı ve yüksek değişkenlik veya aşırı dalgalanma göstermemelidir. Buna göre, konsantre yükler altındaki kabukların hesaplanması membran teorisi kapsamında mümkün değildir. Tekil kuvvetler ve yüksek değişkenlik gösteren yüzey yükleri, kabuk içinde eğilme etkisiyle ilişkilendirilen şekil değiştirmelere neden olur.
iv. Kabuk kenarlarında uygulanan kuvvetler, kabuk orta yüzeyine teğetsel olacak şekilde uygulanmalıdır. Buna göre, yalnızca boyuna ve kayma kuvvetleri (Şekil 15.3, sol) izin verilir, ancak eğilme etkisi yaratacak enine kuvvetler (Şekil 15.3, sağ) kabul edilmez. Bu durum, uygun destek tasarımıyla sağlanmalıdır.
v. Yataklarda veya diğer bileşenlerle sınır bölgelerinde oluşan şekil değişiklikleri, yalnızca bu bölgelerde oluşan kuvvetlerin teğetsel yönü değişmediği sürece sınırlandırılabilir (Şekil 15.4, sol). Aksi takdirde, bu bölgelerde yerel eğilme etkisi meydana gelir (Şekil 15.4, sağ) ve bu durumda membran teorisi kapsamında hesaplama yapılamaz.

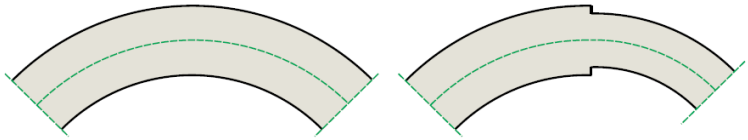
Silindirik kabuklar

Silindirik kabuk, en yaygın kullanılan kabuk tipidir ve özellikle dökme malzemeleri (örneğin; tahıl, kömür, çimento) ve sıvıları (örneğin; su) tutmak amacıyla yaygın biçimde kullanılır. Tarım ve sanayi yapılarında “silo”, su depolarında ise “dairesel rezervuar” olarak adlandırılır.

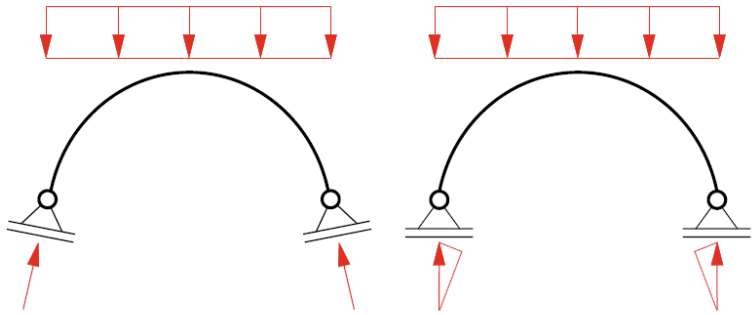
Bu tip kabuklar tasarlanırken iki ana gerilme dikkate alınır: çevresel (hoop) gerilme ve düşey gerilme. Düşey gerilme kabuğun kendi ağırlığından, çevresel gerilme ise duvarlara etkiyen yatay basınçtan kaynaklanır. Bu iki gerilme kabuk içinde düzlem içi (membran) gerilmelerdir. Eğer kabuğun üst kısmı açık ve altı serbest ise yalnızca bu iki gerilme bileşeni önemlidir. Ancak taban sabitlenmişse veya duvarlarla rijit bir şekilde bağlanmışsa sınır etkileri nedeniyle ek gerilmeler oluşur. Şekil 16 membran teorisinin uygulanabilirliğini sınırlayan faktörleri göstermektedir.



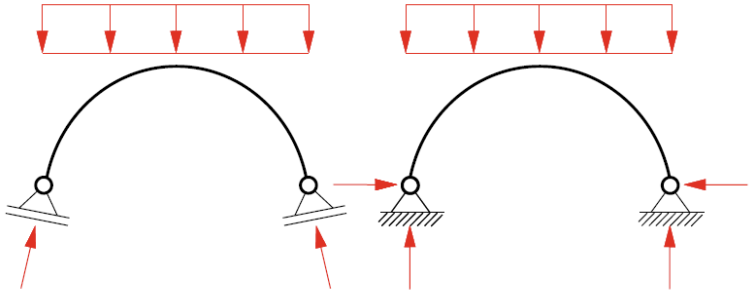
(a) Kabuk orta yüzeyinin şekline göre



(b) Kabuk kalınlığının h dağılımı hakkında



(c) Kenar kuvvet akışlarının tanıtımı

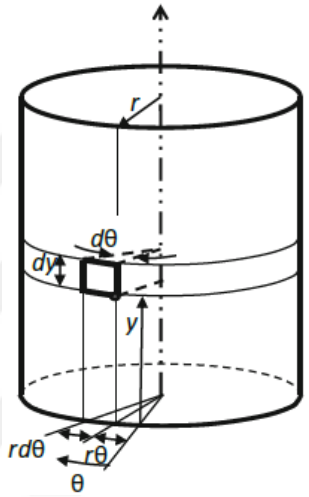


(d) Destek koşulları ve kenar yer değiştirmeleri

Şekil 16. Membran teorisinin geçerliliğini etkileyen faktörler ve sınırlamalar (Mittelstedt, 2023)

Silindirik kabukların membran teorisi

Silindirik kabuğun duvarlarında, düşey ve çevresel şeritlerin kesişiminde yer alan bir diferansiyel eleman, kabuk üzerindeki belirli bir noktayı temsil eder. Şekil 17'de gösterilen kare eleman, kabuğun boyutuna kıyasla orantılı olarak büyük görünse de, diferansiyel elemanlar gerçekte sonsuz küçük boyutlardadır. Bu elemanlar, gerilme dağılımını diferansiyel denklemler cinsinden tanımlamak için kullanılır. Diferansiyel denklemler, sürekli sistemlerdeki gerilme dağılımlarını ve sonsuz küçük değişimleri modellemede faydalıdır. Temel olarak, diferansiyel elemanlar matematiksel bir kolaylık sağlar; ancak bu, kapsamlı türev işlemleri nedeniyle çoğu zaman fark edilmeyebilir.

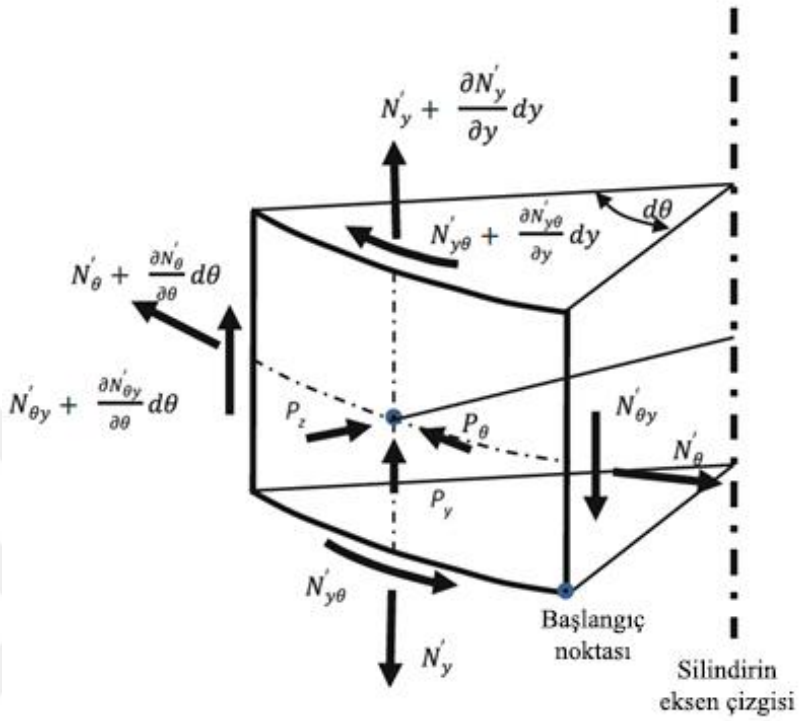


Şekil 17. Silindirik kabuk üzerindeki diferansiyel elemanın konumu

Diferansiyel elemanlar, bir kabuk içindeki gerilme dağılımını grafiksel ve matematiksel olarak göstermeye yarayan araçlardır. Kabuk kuramında, Şekil 18' de gösterildiği gibi N'_θ, N'_y ve $N'_{\theta y}$ gerilme bileşenleri, "gerilme bileşkeleri" olarak adlandırılır ve birim uzunluk başına kuvvet birimiyle ($\mathrm{kN/m}$ veya $\mathrm{kips/ft}$) ifade edilir. N'_θ, genellikle çevresel (hoop) gerilme olarak bilinir ve kabuk içinde tutulan sıvı veya dökme malzemelerin oluşturduğu yatay gerilmenin sonucudur. N'_y, kabuk duvarlarının kendi ağırlığından kaynaklanan düşey gerilmedir. Diğer iki gerilme bileşeni olan $N'_{\theta y}$ ve $N'_{y\theta}$ düzlem içi kayma gerilmeleridir ve simetrik olmayan yüklemeler söz konusu olduğunda ortaya çıkar. Burada kullanılan üst simge (') bu gerilmelerin membran kuramına dayalı olarak tanımlandığını belirtmektedir.

Membran gerilmeleri, düzlem içi (in-plane) gerilmelerdir ve membran kuramı yalnızca bu tür gerilmelerin var olduğunu varsayar; yani eğilme momentleri ve kayma kuvvetleri analizde dikkate alınmaz. Örneğin, çevresel yöndeki gerilme N'_θ elemanın yatay doğrultusunda, diğer kenarda $N'_\theta + \frac{\partial N'_\theta}{\partial \theta} d\theta$ biçimine dönüşür. Bu ifadeye eklenen ($\frac{\partial N'_\theta}{\partial \theta} d\theta$) terimi, elemanın

bir kenarından diğerine olan gerilme değişimini, çevresel yönde ifade eder. Bu terim, küçük bir açı farkı $d\theta$ ile çarpıldığında, eleman boyunca oluşan ek gerilme miktarı $\partial N'_\theta$ elde edilir (bu artış veya azalma yönünde olabilir). Böylece, diferansiyel eleman, çevresel ve düşey doğrultulardaki gerilme değişimini grafiksel ve matematiksel olarak temsil eder.



Şekil 18. Diferansiyel eleman üzerindeki membran gerilmeleri

Tonoz Yapılar ve Tarihsel Gelişimi

Tonoz, tek eğrilikli bir kabuk yapıdır ve tam bir silindirin dilimini andırır. Tonozun köşeleri genellikle kolonlarla desteklenir ve boyuna kenar kirişleri bu serbest kenarları taşıyacak şekilde kolonlar arasında uzanır. Plan düzleminde dikdörtgensel biçime sahip olan tonoz, düşey duvarlarla oluşturulmuş dikdörtgen alanlara kolaylıkla yerleştirilebilir. Bu özelliği, tonozların yaşam alanlarıyla bütünleşmesini kolaylaştırmakta ve yapısal açıdan elverişli bir çözüm sunmaktadır.

Tonoz yapılar, inşaat teknolojisindeki, yapı mühendisliğindeki ve estetik kaygılardaki ilerlemeleri yansıtarak, mimari tarih boyunca sürekli bir evrim geçirmiştir. Antik çağda, Romalılar beşik tonozların kullanımına öncülük ettiler ve verimli bir çatı stratejisi sağlayan ve duvar açıklıklarında ve mekansal tasarımda daha fazla esnekliğe izin veren yapılar geliştirdiler (Avelino vd., 2021).

Orta Çağ dönemine geçiş sırasında, tonoz yapıların evrimi, nervürlü tonozların tanıtılmasıyla belirlendi. Gotik mimaride, sivri kemerlerin çeşitli tonoz teknikleriyle birleştirilmesi, yapısal kuvvetlerin sütunlara ve payandalara yeniden dağıtılmasına izin vererek

daha uzun, daha ince ve ışıkla dolu iç mekanların yaratılmasını sağladı (Arnold, 2018). Bu evrim, geniş alanlara yayılmanın zorluklarına teknik bir yanıttı ve aynı zamanda kilise binaları içindeki hiyerarşik ve mekansal ilişkileri tanımlayan etkileyici bir mimari ifade olarak hizmet etti.

Rönesans dönemi, özellikle tuğla duvar işçiliğinde tonoz sistemlerinin yeniden değerlendirilmesine ve kataloglanmasına tanık oldu. Ayrıntılı çalışmalar, basit beşik tonozdan karmaşık birbirine geçen formlara kadar çeşitli tonoz tiplerini belgeledi ve bu dönemde tonoz yapımındaki bölgesel ve zamansal özellikleri vurguladı (Stanga, 2021). Bu dokümantasyon, yalnızca bu tonoz sistemlerinin geçirdiği yapısal dönüşümleri değil, aynı zamanda estetik etkilerini de anlamak için çok önemliydi.

Modern çağda, hesaplamalı tasarım ve dijital üretim, tonoz yapıların evrimine yeni bir boyut getirdi. Çağdaş mimarlar, tonozların geometrisini ve yapısal performansını optimize etmek için parametrik analizi ve gelişmiş dijital araçları birleştirir (Avelino vd., 2021). Örneğin, Gaudí'nin zincirli tonozları ve karmaşık çizgili yüzeyleri yenilikçi bir şekilde kullanması, mekansal dağılımı ve doğal aydınlatmayı iyileştirirken malzeme kullanımını azaltmak için matematiksel modellemeden yararlanarak yeni bir yapısal verimlilik düzeyi getirmiştir (Salas vd., 2021). Son projeler, uyarlanabilir dijitalden fiziksele montaj stratejilerinde görüldüğü gibi, geleneksel duvarcılık teknikleri ve dijital üretim yöntemleri arasındaki etkileşimi göstermektedir (Zboinska and Dumitrescu, 2020). Bu yaklaşımlar, yapısal verimliliği en üst düzeye çıkarır ve Miras Bina Bilgi Modellemesi (HBIM) aracılığıyla tarihi tonoz formlarının korunmasını sağlayarak hem koruma hem de yenilik için bir çerçeve sağlar (Brumana vd., 2019).

Tonoz yapıların tarih boyunca kullanılan malzeme türlerinin evrimi, coğrafi, kültürel ve teknolojik etkileşimlerin yanı sıra inşaat tekniklerindeki gelişmelerle paralellik göstermiştir. İlk dönemlerde tonoz sistemleri, bölgenin doğal kaynaklarına dayalı olarak esasen taş ve benzeri doğal malzemeler kullanılarak inşa edilmiştir. Erken Roma örneklerinde, büyük taş bloklar ve doğal bağlayıcı malzemeler kullanılarak oluşturulan tonozlar, yapıların mekanik stabilitesi için ideal çözümler sağlamıştır (Huerta, 2006).

Antik çağda yerel özelliklere bağlı olarak tonoz yapıların örneklendirilmesinde, yalnızca taş değil; yerel toprak ve kilden üretilen seramik kaplama elemanları da önemli rol oynamıştır. Örneğin, pişmiş topraktan yapılan kiremitler, yapıların üst kaplaması olarak kullanılmış ve bölgesel seramik motiflerle zenginleştirilmiştir. Bu durum, malzeme seçiminde yerel kaynakların ve teknik bilgi birikiminin ne denli etkili olduğuna işaret eder (Gördes and Güngör, 2022) .

İslam ve Pers mimarisinde ise tonoz sistemlerinin gelişimi, yapımda kullanılan malzemenin niteliğinde de belirgin bir dönüşüme sahne olmuştur. Ağır ve basınç mukavemetine sahip tuğla, Pers tonozlarında tercih edilen ana malzeme haline gelmiş ve geleneksel kalıpların yeniden yorumlanmasına olanak tanımıştır. Bu bağlamda, tarihi örüntüler ile modern yeniden üretim tekniklerinin harmanlanması, hem estetik hem de yapısal verimliliğin artırılmasına yönelik önemli adımlar atılmıştır (Asefi and Bahremandi-Tolou, 2021).

Öte yandan, Amerika kıtasının antik medeniyetlerinden Maya toplulukları, yerel taşları ustaca işleyerek özgün tonoz sistemleri geliştirmiştir. Bu sistemde, taşın doğal mukavemeti dikkate alınarak oluşturulan yapılan geometrik biçimi, bölgesel inşaat anlayışında farklılık göstermiştir. Böylece, bölgesel malzeme kullanımı ve yerel inşaat teknikleri arasında güçlü bir sinerji ortaya konmuştur (Gilabert-Sansalvador vd., 2020)

Geleneksel tonoz sistemleri ile modern mühendislik tonoz sistemleri arasındaki temel farklar, kullanılan malzeme ve inşaat tekniklerinin yanı sıra tasarım yöntemleri ve yapısal analiz kapasitesinde kendini göstermektedir. Geleneksel tonozlar, tarihsel süreçte özellikle taş, tuğla ve kerpiç gibi doğal malzemelerin yerel olarak temin edilebildiği dönemlerde, ustalık ve tecrübenin yönlendirdiği, deneyimsel tasarım prensiplerine dayalı olarak inşa edilmiştir. Bu yaklaşımda, geometrik formlar çoğunlukla tecrübe ve ölçme yöntemlerine dayanarak belirlenmiş, yapısal davranış esasları ise görgü ve pratik bilgiler üzerinden yorumlanmıştır. Bu sistemlerde malzeme heterojenliği ve yerel inşaat gelenekleri, tonozların estetik ve fonksiyonel bütünlüğüne katkıda bulunmuştur.

Modern mühendislik tonoz sistemlerinde ise, gelişmiş bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve sonlu elemanlar yöntemi gibi analitik ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu sayede daha karmaşık geometrik formlar, optimize edilmiş yük dağılımı ve modüler yapı davranışları elde edilebilmektedir. Örneğin, çağdaş uygulamalarda çelik gibi yüksek mukavemetli malzemeler ile oluşturulan, dijital modellere dayalı çelik ızgara kabuk sistemleri, hem yapısal performans hem de ekonomik açıdan verimi artıracak şekilde incelenmekte; değişken modül geometrilerinin yapısal davranışa olan etkisi detaylı olarak analiz edilmektedir. Modern mühendislik yaklaşımında, tasarım sürecinin erken safhalarında simülasyon ve optimizasyon tekniklerinin kullanılması, anharmonik yükler ve hizmet ömrü boyunca karşılaşılabilecek dinamik etkilerin modellenmesine olanak sağlamıştır.

Tonozlara ilişkin matematiksel türetim, tüm kabuk kuramları içerisinde belki de en karmaşık olanıdır. Membran kuramı ise çeşitli konfigürasyonlar içinde en az doğru sonuç veren yaklaşımdır. Özellikle uzun açıklıklı tonozlarda, gerçek gerilmeler membran kuramından

önemli ölçüde sapmakta ve yapı eğrilik enkesitli bir kiriş davranışına daha yakın hale gelmektedir (Billington, 1985). Kısa açıklıklı tonozlarda ise gerilme dağılımı membran kuramına daha yakın olsa da, özellikle sınır bölgelerinde belirgin sapmalar görülmektedir. Diğer kabuk geometrilerinde membran çözümü gerilme dağılımını oldukça iyi temsil edebilirken, tonozlarda bu çözüm sınır etkileri dikkate alınarak kullanılmalıdır.

Hafif çelik tonoz yapıların geleneksel tonoz sistemlerine kıyasla temel farkları, malzeme seçimi, imalat yöntemi, yapısal davranış ve montaj süreci gibi unsurlarda gözlemlenmektedir. Geleneksel tonoz sistemleri, genellikle taş, tuğla veya kerpiç gibi yerel ve doğal malzemelere dayanarak, büyük kütleleri ve sıkı inşaat teknikleriyle sağlanan sıkıştırma kuvvetlerine dayalı olarak inşa edilirken, hafif çelik tonozlar yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip soğuk şekil verilmiş çelik elemanlar kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu durum, hafif çelik sistemlerde malzemenin mekanik verimliliğini artıran özel geometrik profiller elde edilmesi (örneğin, eleman yüzeylerinde oluşturulan dişler sayesinde atalet momentinin yükseltilmesi) ile yansımakta ve böylece daha ince kesitlerde ve daha hafif yapılarda aynı taşıma kapasitesinin sağlanmasını mümkün kılmaktadır.

Ayrıca, hafif çelik tonoz yapıları, modern bilgisayar destekli tasarım ve optimizasyon tekniklerinin entegrasyonu sayesinde yapısal yük dağılımının ve dinamik davranışın detaylı analizine imkân tanırken, geleneksel tonozlarda bu tür nümerik yöntemlere dayalı optimizasyon yaklaşımları nadiren kullanılmaktadır . Bu durum, hem imalat hem de montaj sürecinde büyük farklar yaratmakta; hafif çelik tonozların fabrikasyon süreçleriyle önceden üretilip şantiyede hızlıca monte edilebilmesi, inşaat süresinin ve işçilik maliyetlerinin önemli ölçüde azalmasına olanak tanımaktadır (Eser and Hasançebi, 2024).Öte yandan, geleneksel tonoz sistemleri, yerinde işçilik, uzun kür süreleri ve ağır malzeme kullanımı gerektirdiği için, hem yapısal verimlilik hem de inşaat hızı açısından bu sistemlerden ayrışmaktadır.

Sonuç olarak, hafif çelik tonoz yapılar; kullanılan malzemenin yüksek mukavemeti, özel form verme teknikleri ve modern mühendislik analiz yöntemleri sayesinde geleneksel tonoz sistemlerine oranla daha hafif, daha hızlı inşa edilebilir ve daha optimize edilmiş yapısal performans sunarken, geleneksel sistemler tarihsel uygulama tecrübesi ve yerel malzeme özellikleriyle kendine özgü estetik ve işlevsel özellikler sergilemektedir (Eser and Hasançebi, 2024)

Tonoz sistemlerin deprem performansı, hem geleneksel yapı sistemlerine özgü tarihi inşa teknikleri hem de modern analitik yöntemlerle değerlendirilmiş ve gözlemlenmiştir. Geleneksel tonozlarda, kavisli geometri ve malzeme sürekliliği, deprem sırasında sismik enerjinin dağılımında önemli rol oynamış ve yapının genel dayanımını artırmıştır. Ancak, bu

yapılar malzemenin kırılganlık özellikleri nedeniyle deprem yüklerinin etkisi altında ani kırılmalar veya lokalde oluşan hasarlarla karşılaşabilmektedir. Bu durum, geleneksel tonozlarda sismik enerjinin absorbe edilme kapasitesinin, özellikle elastik sınırın aşılması durumunda hızla düşebileceğini göstermektedir.

Modern mühendislik yaklaşımlarıyla oluşturulan tonoz sistemlerinde, gelişmiş sayısal modelleme teknikleri ve doğrusal-düzensiz analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Sismik performansın belirlenmesinde tek serbest dereceli sistem (SDOF) modellerine uygulanan histerezis davranış analizleri, deprem altındaki maksimum yer değiştirme ve enerji sönümleme kapasitesinin ayrıntılı değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (H. Zhou vd., 2020). Ek olarak, Park-Ang hasar indeksi gibi kümülatif hasar ölçütleri, yapının deprem yükü altında geçen hasarı nicelendirerek, tonoz sistemlerinin dayanıklılık ve süneklik özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu analiz yöntemleri, özellikle betonarme yapıların ve tonoz elemanlarının sismik performansının karşılaştırmalı değerlendirilmesinde kritik rol oynamış; deprem yönetmeliklerinde öngörülen doğrusal ve doğrusal olmayan hesaplama yöntemlerinin uygulanmasıyla yapıların sismik davranışları sistematik olarak incelenmiştir (Gaetani vd., 2016).

Sonuç olarak, tonoz sistemlerin deprem performansı, kullanılan malzeme özellikleri, geometrik form ve enerji sönümleme kapasitesi gibi etmenler çerçevesinde değerlendirildiğinde; geleneksel sistemlerin uzun yıllara dayanan deneyimsel inşa yöntemleriyle elde ettiği dayanım ile modern sistemlerin ileri modelleme teknikleri ve optimize edilmiş tasarım stratejileri sayesinde sunduğu kontrol ve uyum avantajları arasında belirgin farklılıklar ortaya koymaktadır. Bu yaklaşımlar, her iki sistem tipinin de deprem yükleri altındaki davranış mekanizmalarını anlamak ve yapısal güvenliği artırmak açısından önemli veriler sağlamaktadır.

Kafes Sistem Anolojisi ve Uygulama Alanları

Temel olarak, yapı mühendisliğindeki kafes sistemler üçgenleme prensibine dayanmaktadır; bu sayede birbirine bağlı, düz elemanlardan oluşan bir çerçeve, her bir panel bir üçgen oluşturacak şekilde düzenlenmektedir. Bu konfigürasyon son derece kararlı bir sistem ortaya çıkarır çünkü üçgen birimler doğası gereği rijittir ve bileşenlerinin uzunluğunu değiştirmeden yük altında deformasyona uğramaz (Gupta, 2005; C. Liu vd., 2022). Bu tür sistemlerde, mafsallar tipik olarak pim bağlantıları olarak idealize edilir, bu da dönmeye izin verdikleri ancak ötelemeye izin vermedikleri anlamına gelir. Bu varsayım, elemanlardaki kuvvetlerin ağırlıklı olarak eksenel olmasını, yani gerilme veya sıkıştırma halinde olmasını ve büyük ölçüde eğilme momentlerinden arınmış olmasını sağlayarak analizi basitleştirmektedir.

Sonuç olarak, bir kafes kirişteki yük dağılımı, kuvvet yöntemi veya Maxwell-Cremona teoremine dayanan grafiksel teknikler gibi yöntemler kullanılarak belirlenebilir; bu yöntemler, iç kuvvet akışı hakkında fikir verir ve üye boyutlarını ve düzenlerini optimize etmeye yardımcı olur (Repin vd., 2024).

Kafes sistemlerin bir diğer temel ilkesi de malzeme verimliliğidir. Makas elemanlarının eksenel kuvvete dayalı davranışı, mühendislerin yük taşıma kapasitelerine göre minimum kesit alanına sahip elemanlar tasarlamalarına ve böylece uygun bir güç-ağırlık oranı elde etmelerine olanak tanır. Bu verimlilik, öz ağırlığın azaltılmasının genel performans ve ekonomi açısından kritik önem taşıdığı köprüler ve çatı yapıları gibi uzun açıklıklı uygulamalar için özellikle faydalıdır. Ayrıca, kafes kirişlerin klasik analizi, denge denklemlerinin tek başına iç kuvvetleri belirlemek için yeterli olduğu statik olarak belirlenmiş konfigürasyonlara dayanırken, birçok modern tasarım, gelişmiş sağlamlık için fazlalık ekleyerek bu ilkeleri genişletmektedir. Bu, geleneksel kafes sistemlerini iyileştirmek ve hem esneklik hem de minimum malzeme kullanımı sağlamak için sonlu eleman analizi ve topoloji optimizasyonu gibi gelişmiş hesaplama araçlarının kullanılmasını içerir (Larsen vd., 2018).

Ayrıca, kafes sistemlerin temel davranışı, kullanılan malzemelerin doğal özelliklerinden etkilenmektedir. İster ahşap, ister çelik, isterse kompozit malzemeler kullanılsın, temel kavram değişmez: yükleri eksenel gerilme yoluyla elemanların uzunluğu boyunca verimli bir şekilde yönlendirmek, böylece eğilme ve kesme deformasyonları gibi istenmeyen ikincil etkileri en aza indirirken malzemenin en iyi mekanik özelliklerinden yararlanmak (Gupta, 2005). Bu davranış sadece yapının statik performansı için değil, aynı zamanda yük yollarının öngörülebilirliği ve güvenilirliğinin çok önemli hale geldiği rüzgar veya sismik hareketler gibi değişken yükler altındaki dinamik tepkisi için de önemlidir.

Geleneksel kafes sistemlerin kubbe ve tonoz gibi eğri veya ortogonal olmayan geometrilere uyarlanması, klasik düzlemsel kafes sistemlere kıyasla hem geometrik konfigürasyonda hem de yapısal analiz yöntemlerinde önemli değişiklikler gerektirir. Bu uyarlanmış sistemlerde, üçgenlemenin temel ilkesi korunur; ancak mekansal düzenleme, başlangıçta düzlemsel olan ağların çift kavisli formlara dönüştürülmesi yoluyla değiştirilir.

Schmidt ve Selby (2001), kubbe benzeri uzay kafeslerinin, eşkenar dörtgen benzeri konfigürasyonlara dönüşmek için düzlemlerinde bozulmasına ve bükülmesine izin verilen basit kare ızgara modüllerinden ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Bu dönüşüm, geleneksel düzlemsel kafes kiriş elemanlarının sistematik bir şekil oluşturma yöntemiyle kavisli geometriler oluşturmak üzere nasıl yeniden yapılandırılabileceğini göstermektedir. Ortaya

çıkan yapılar kafes kirişlerin doğal stabilitesini sergilerken, yeni eğrilik üç boyutlu bir yüzey üzerinde yük dağılımı için yeni olanaklar sunmaktadır. (Schmidt and Selby, 2001)

Karbaschi ve Dehdashti (2012), uzay kafes kirişleri hem hafif kavisli kubbe şekillerine hem de keskin kavisli beşik tonozlara dönüştürmek için bir ard germe tekniği uygulayarak bu konsepti daha da geliştirmiştir. Çalışmalarında bu kavisli geometrileri oluştururken, bu tür ortogonal olmayan konfigürasyonlar altında nihai yükleri ve burkulma davranışını değerlendirmişlerdir. Çalışma, şekil oluşturma aşamasında ortaya çıkan artık gerilmelerin yükleme altındaki yapısal performansı önemli ölçüde etkilediğini ve tasarım sırasında dikkatli bir analiz gerektirdiğini vurgulamıştır (Karbaschi and Dehdashti, 2012).

Ayrıca, parametrik tasarım araçlarının dahil edilmesi, kavisli geometrilerin kafes sistemlere entegrasyonunu kolaylaştırmıştır. Sárközi ve diğerleri (2020), formex cebir metodolojisinin Grasshopper 3D gibi yazılım platformlarına uyarlanmasını tartışarak tasarımcıların kubbeleri ve tonozları planlamak için karmaşık kafes-ızgara ağlarını hızla oluşturmasını ve değiştirmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım sadece tasarım esnekliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda parametrik bir çerçeve içinde geometrik parametrelerin doğrudan manipülasyonuna izin vererek yapısal modellemenin hassasiyetini de artırmıştır (Karbaschi and Dehdashti, 2012).

Bu çalışmalar birlikte, kafes sistemlerin eğri ve ortogonal olmayan formlara evriminin geometrik dönüşüm, gelişmiş hesaplama tasarımı ve yenilikçi ard germe yöntemlerinin bir kombinasyonu ile elde edildiğini göstermektedir. Ortaya çıkan yapılar, geleneksel kafes kirişlerin avantajlı eksenel yük taşıma özelliklerini korurken, kubbe ve tonoz gibi modern mimari formların estetik ve işlevsel gereksinimlerini de karşılamaktadır.

Hafif kavisli yapılara uygulanan kafes kiriş tabanlı analojiler birkaç önemli avantaj sunar. İlk olarak, kavisli formu birbirine bağlı, üçgen elemanlar halinde ayrıştırarak, tasarımcılar yükleri eksenel kuvvetler boyunca yönlendirmede kafes sistemlerin doğal verimliliğinden faydalanabilir. Bu, yapıların yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına ulaşmasını sağlarken, sürekli kavisli kabuklarda yaygın olan eğilme gerilmelerini en aza indirir. Eklemeli olarak üretilen içi boş kafes kirişler üzerine yapılan çalışmalar, bu tür ayrık sistemlerin nispeten kırılgan temel malzemelerden türetildiğinde bile sünek davranış ve gelişmiş enerji emilimi sağlayabileceğini göstermektedir (Intrigila vd., 2022). Ayrıca, kafes tabanlı tasarımların modüler yapısı hem analiz hem de üretim süreçlerini basitleştirerek karmaşık, kavisli geometrilerin hızlı prototiplenmesini ve optimizasyonunu mümkün kılmaktadır. Bu özellik, eklemeli olarak üretilen dikme-kafes yapıların etkili mekanik özelliklerini gösteren ve bu analojilerin karmaşıklığı nasıl basitleştirdiği ve performansı nasıl artırdığı konusunda fikir

veren araştırmalarla kanıtlanmıştır (Kladovasilakis vd., 2021). Bu sistemlerin kuvvet temelli veya enerji temelli analizler gibi yerleşik yöntemler kullanılarak modellenebilmesi, düzlemsel kafes kiriş konseptlerini kavisli alanlara genişletirken kritik bir faktör olan yük yollarının ve stres konsantrasyonlarının tahmin edilmesini de kolaylaştırmaktadır.

Bununla birlikte, hafif kavisli yapılarda kafes kiriş temelli analojilerin kullanımı sınırlamalardan yoksun değildir. Önemli bir sorun, kafes kiriş modellerinde bağlantıların idealize edilmiş pimler gibi davrandığı varsayımından kaynaklanmaktadır; bu varsayım, uzamsal sürekliliğin ve bağlantı davranışının daha karmaşık olduğu kavisli sistemler için aşırı basit olabilir. Örneğin, bütünleşik olarak dokunmuş kafes benzeri kumaş yapılar, avantajlı genel özellikler sergilemekle birlikte, yerelleştirilmiş basınç veya kesme yüklerine karşı hassas olabilir ve katmanlı montaj düzgün olmayan gerilmelere maruz kaldığında potansiyel olarak delaminasyona veya yerel çökmeye yol açabilir (Vorhof vd., 2023). Buna ek olarak, kafes kiriş analojilerinin doğasında bulunan ayrıklaştırma, geometrik sertlikteki ince varyasyonlar veya imalat veya montaj sürecinden kaynaklanan artık gerilmelerden kaynaklanan gerilme yeniden dağılımları gibi sürekli eğrilik etkilerini tam olarak yakalayamayabilir. Bu durum, kafes kiriş analojilerinin kavramsal tasarım aşamasında faydalı bir ilk yaklaşım sağlarken, kafes kiriş yapıları kullanan koruyucu sistemler için optimizasyon stratejilerinde gözlemlendiği gibi, dinamik veya konsantre yükleme koşulları altında nihai kavisli yapının performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için ek sayısal analizler gerektirebileceğini göstermektedir (Procházka and Válek, 2017).

Yapılan çalışmalar

Karmaşık yapısal formlardaki kafes benzeri sistemlerin mekanik davranışı üzerine yapılan deneysel ve sayısal araştırmalar oldukça kapsamlıdır. Araştırmacılar, bu sistemlerdeki yük aktarımı, deformasyon mekanizmaları ve nihai göçme modlarını analiz etmek için sonlu elemanlar simülasyonları, laboratuvar deneyleri ve analitik yöntemler kullanmıştır.

Örneğin, Shi ve ark. (2023), cıvatalı çelik bağlantılı biyo-tabanlı lamine kafes sistemler üzerine bir çalışma yürütmüş ve deneysel testlerini üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesiyle desteklemiştir. Bu yaklaşım, bağlantı davranışının önemini ve malzeme anizotropisinin kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesi ile deformasyon kabiliyeti üzerindeki etkisini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Trentadue ve ark. (2014), kafes takviyeli çelik-beton kompozit kirişlerin eğilme rijitliği ve elastik kritik momentini değerlendirmek için deneysel ve sayısal bir çerçeve geliştirmiş, mekanik tepki ile takviye kafes geometrisi ve kompozit malzeme etkileşimi arasındaki ilişkiyi ortaya koyan tasarım araçları sunmuştur (Shi vd., 2012; Trentadue vd., 2014).

Deprem mühendisliği uygulamalarında, Deng ve ark. (2018), çelik kafes kirişli kesme duvarlarının düşük çevrimli ters yükleme altındaki yapısal davranışını incelemiştir. Analizleri, bu tür sistemlerdeki enerji sönümleme mekanizmalarını ve histeretik davranışı ortaya çıkarmış, kafes benzeri elemanlar içeren yapıların sismik dayanıklılığına yönelik önemli bilgiler sağlamıştır. Ayrıca, Wu ve ark. (2022), çevrimsel yükleme testleri ve sayısal simülasyonlar kullanarak kafesle sınırlandırılmış burkulma önleyici mesnetleri incelemiş ve dinamik yükler altında yerel burkulmayı engellemede sınırlama oranları ile göçme mekanizmalarının etkisini araştırmıştır. (Deng vd., 2022; Wu vd., 2022)

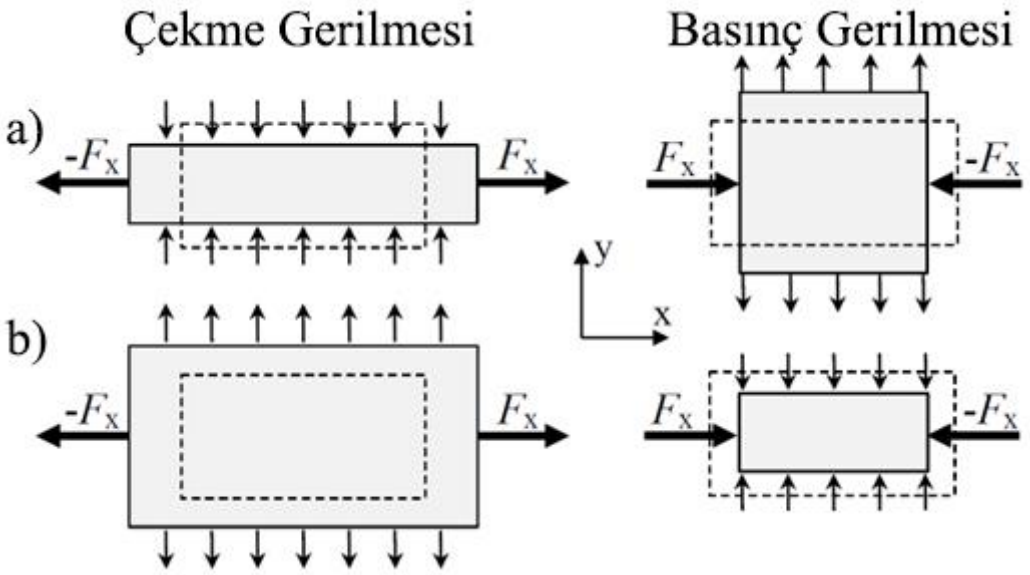
Kompozit uygulamaların ötesinde, eğrisel geometrilere uyarlanmış uzay kafes sistemleri de analiz edilmiştir. Kim ve ark. (2006), hiperbolik paraboloid (hypar) uzay kafesinin deneysel bir incelemesini sunarak, eğrisel sistemin oluşum sürecini ve nihai yük kapasitesini incelemiştir. Bu çalışma, geleneksel düzlemsel kafes kavramlarının eğrisel sistemlere dönüştürülmesinde yük dağılımı ve geometrik doğrusal olmamanın dikkatle ele alınması gerektiğini göstermiştir. İlgili bir çalışmada, Karbaschi ve Dehdashti (2012), uzay kafeslerinin öngerilmeyle şekillendirilmesini incelemiş, yük testlerini sayısal burkulma analizleriyle karşılaştırarak kalıntı gerilmelerin ve eğriliğin nihai mukavemet üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bu çalışmaları tamamlayıcı nitelikte, Ojha ve ark. (2023), uzay kafes sistemlerinde burkulma öncesi ve sonrası davranışı incelemek için adaptif arama uzayı ayrıştırma yöntemi kullanmış ve eğrisel kafes konfigürasyonlarındaki ani geçiş instabilitelerinin yol açtığı zorlukları vurgulamıştır. (Karbaschi and Dehdashti, 2012; Kim, 2024; Ojha vd., 2023)

Bu çalışmalar, deneysel testler ve sayısal modellemenin birleşimi sayesinde, karmaşık yapısal formlardaki kafes benzeri sistemlerin mekanik davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşıldığını göstermektedir. Ayrıca, malzeme özellikleri ve kafes elemanlarının geometrik konfigürasyonunun, farklı yük koşulları altında yapısal stabilite ve dayanıklılığı sağlamak üzere optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Öksetik Malzemeler ve Yapılar: Tanım, Özellikler ve Kullanım Alanları

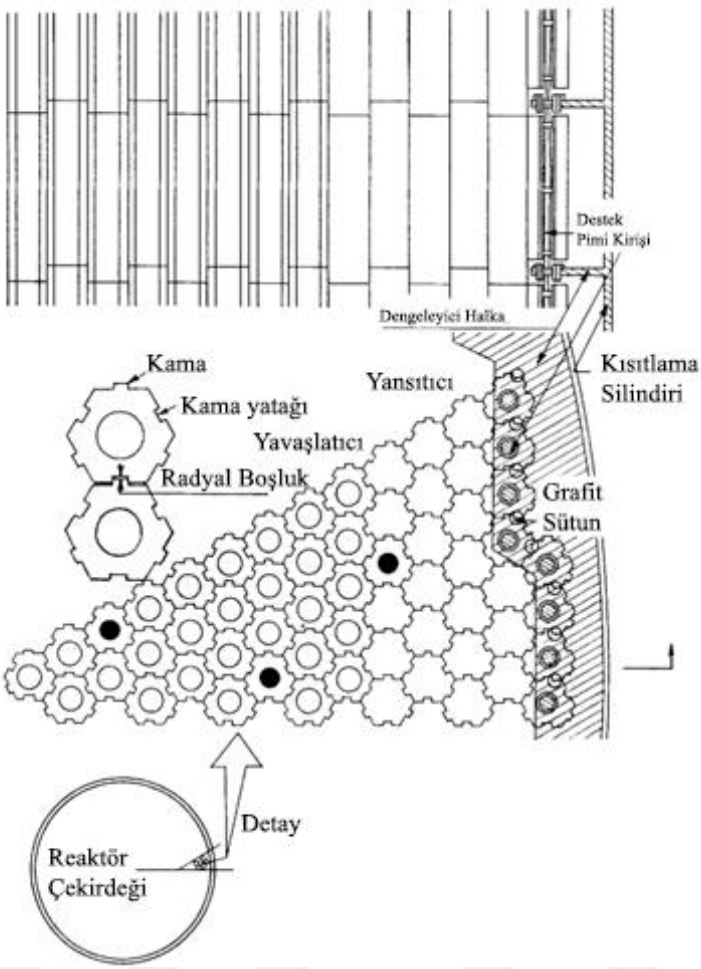
"Öksetik malzemeler" terimi ilk kez Evans ve arkadaşları tarafından 1991 yılında tanımlanmıştır (Yunanca "auxetos" kelimesinden türetilmiştir, anlamı "genişleyebilir") (Evans vd., 1991). Negatif Poisson oranına (NPR) sahip olan ve gerilme yönünde genişleyen malzemeler olarak da bilinir (Şekil 19). Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, öksetik davranışın temelinde hacim artışı yerine hacim koruma eğilimi yatar. Bu durum, hacmin sabit kalma eğiliminde olduğu tipik malzeme davranışının aksinedir. Ayrıca bu tür malzemeler enerji

sönümleme kapasitesini, darbe dayanımını ve yapısal adaptasyonu önemli ölçüde artırmaktadır. (Prawoto, 2012)



Şekil 19. Çekme ve basınç etkisindeki davranış, a) Öksetik olmayan malzeme, b) Öksetik malzeme

Literatürde, yeniden girintili hücreler, döner birim hücre yapıları ve yıldız biçimli örgüler gibi çeşitli geometrik desenlerin öksetik davranış ürettiği tespit edilmiştir. Yapay öksetik malzemelerle benzer davranış gösteren yapılar, ilk kez Magnox nükleer reaktörlerinde (Şekil 20) kullanılmıştır (Nuclear Energy Group vd., 1963). Bu yapıda, serbest duran grafit tuğla kolonlarının serbest hareketi ve gevşek bağlantıların kayması nedeniyle radyal hareketle öksetik davranış sergilediği görülmüştür. Bu yapılar, deprem sırasında oluşan yatay kuvvetlere karşı dayanacak şekilde tasarlanmış olup, aynı zamanda çekirdek boyunca grafit çekirdek ve çelik destek yapıları arasındaki ısıl hareketleri de tolere edebilecek serbest hareket kabiliyetine sahiptir. Bu yapının geliştirilmesi, pratik bir mühendislik problemini çözmek için yapılmış olup, öksetik davranış sadece bu tasarımın beklenmedik bir yan ürünü olmuştur (Novak vd., 2016). Son yıllarda, öksetik yapıların mimari ve inşaat mühendisliği uygulamalarına entegrasyonu yönünde artan sayıda çalışma dikkat çekmektedir. Ancak, büyük ölçekli strüktürel sistemlerde bu tür geometrilerin uygulanabilirliği hâlâ sınırlıdır ve mühendislik açısından çözülmesi gereken önemli zorluklar mevcuttur (Körner and Liebold-Ribeiro, 2014).

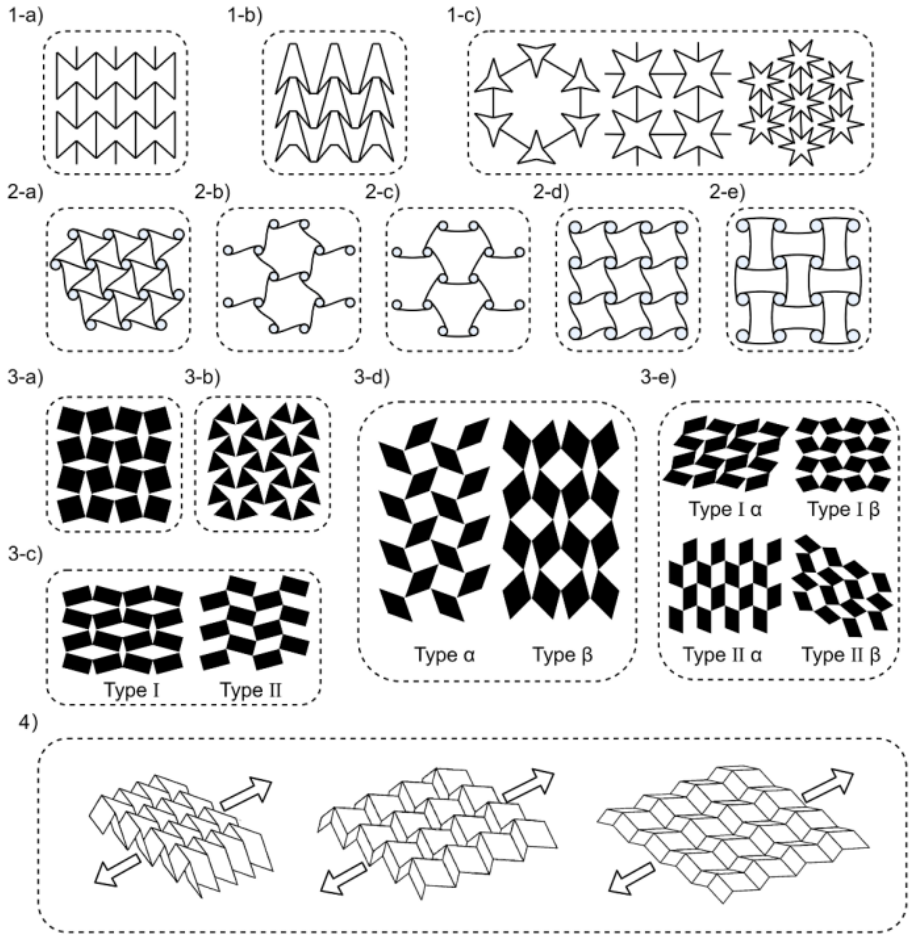


Şekil 20. Magnox nükleer santrali reaktör çekirdeği (Nuclear Energy Group vd., 1963)

Öksetik malzemelerin mekanik karakterizasyonu, hem eksenel hem de enine birim şekil değiştirmelerin ölçüldüğü çekme testleriyle yapılır; bu deneyler Poisson oranının doğrudan belirlenmesini sağlar. Paralel olarak, sayısal simülasyonlar ve homojenizasyon teknikleri, yeniden girintili petek yapılar gibi öksetik hücresel yapıların efektif elastik özelliklerini tahmin etmek için de kullanılmıştır. Bu geometrik düzenlemeler, geleneksel malzemelere kıyasla artan kesme rijitliği, yüksek darbe direnci ve gelişmiş kırılma tokluğu gibi üstün özellikler sağlar (Mukhopadhyay and Adhikari, 2016). Bu özellikler, üstün enerji sönümleme gerektiren uygulamalarda, çift eğrilikli yüzey oluşturma kabiliyetinde ve adaptif mimari tasarımlar ile koruyucu ekipmanlarda önemli avantajlar sunar (Ghaedizadeh vd., 2016).

Farklı geometrik desenler ve yapısal konfigürasyonlar (Şekil 21), elemanların düzenlenmesi ve bağlantılarının belirli şekillerde değiştirilmesi yoluyla öksetik davranışı ortaya çıkarabilir (Zhang and Zhao, 2024). En yaygın tasarımlardan biri, hücre duvarlarının veya destek elemanlarının içe doğru eğimli olduğu "re-entrant" geometrilerdir. Bu tür yapılar, çekme kuvveti uygulandığında yanal genişlemeye olanak tanır. Bu özellik, öksetik dokuma kumaşlar

gibi malzemelerde enerji absorpsiyonu ve darbe direnci gibi mekanik performansı artırabilir (Zulifqar vd., 2018) .



Şekil 21. (1) Yeniden girintili (re-entrant) yapılar: (a) Öksetik altıgen petek yapısı, (b) çift ok başlı girintili yapı ve (c) STAR-3, STAR-4 ve STAR-6 sistemleri, (2) Kiral petek yapılar: (a) hekzakiral, (b) trikiral, (c) anti-trikiral, (d) tetrakiral, (e) anti-tetrakiral, (3) Döner rijit yapılar: (a) döner kare, (b) döner üçgen, (c) döner dikdörtgen, (d) döner eşkenar dörtgen ve (e) döner paralelkenar, (4) Origami tabanlı Miura-ori (Zhang and Zhao, 2024)

Bir diğer etkili yaklaşım, origami tabanlı katlama desenlerinden yararlanmaktadır. Bu tasarımlarda, düz bir levha, belirli katlama çizgileri boyunca küçük, dönebilen ve bükülebilen birimlere ayrılarak şekillendirilebilir. Bu yapılar, hem yatay düzlemde (düzlem içi) hem de dikey düzlemde (düzlem dışı) öksetik tepkiler gösterebilir ve bu nedenle karmaşık üç boyutlu şekil değişimlerinin gerektiği uygulamalar için oldukça uygundur (Deng vd., 2022).

Ayrıca, geleneksel İslami desenlerden esinlenen geometrik motifler, yenilikçi kayma mekanizmalarının geliştirilmesine olanak tanımıştır. Örneğin, birbiriyle kenetlenen çok sayıda yıldız şekli temelinde geliştirilen bir öksetik kayma mekanizması, her bir elemanın komşularına göre serbestçe hareket etmesine izin verir. Bu tür yapılar, tek eksenli basınç altında -1'e kadar düşük Poisson oranı sergileyerek izotropik (her yönde aynı davranış gösteren) öksetik davranışlar ortaya koyabilir (Lim, 2021).

Öksetik malzemeler üzerine sistematik araştırmalar, 1985 yılında Almgren tarafından yapılan 2D geri dönüşümlü (re-entrant) öksetik yapı analizleriyle başlamıştır. Bu analizler, birkaç yıl önce konvansiyonel bal peteği yapıları için geliştirilen analitik ifadeler üzerine kurulmuştur. 1987 yılında Lakes ve çalışma arkadaşları, geleneksel açık hücreli köpüklerin dönüştürülmesi yoluyla ilk öksetik malzemeyi üretmiştir (Lakes, 1987). Polimerlerden üretilen öksetik yapılar da daha sonra geliştirilmiştir. Negatif Poisson oranı sergileyen kompozit yapıların tanıtılması, bu alandaki önemli ilerlemelerden biri olmuştur. Daha ucuz, daha karmaşık ve daha büyük öksetik yapıların üretilmesi için en umut verici yöntemlerden biri, katmanlı üretim teknolojileridir (Novak vd., 2016).

Öksetik davranışının malzeme yapısında indüklenmesi için her zaman gözenekli bir mikro yapıya (hücresel malzemelerde olduğu gibi) sahip olmak gerekmez. Mikro yapının değişimi (moleküler öksetik malzemeler) veya dönen birimlere sahip kompozit yapılar da öksetik davranış sergileyebilir.

Ancak, yukarıda bahsedilen öksetik yapıların çoğu yüksek derecede anizotropiktir ve bu nedenle çoğu durumda genel yapısal uygulamalar için uygun değildir. Bu nedenle, dünya çapında çeşitli araştırma merkezlerinde yeni 3D hücresel öksetik malzemelerin geliştirilmesi üzerine heyecan verici çalışmalar yürütülmektedir ve yakında umut verici yeni öksetik malzemelerin ortaya çıkması beklenmektedir.

Öksetik yapıların mühendislik uygulamalarındaki potansiyeli, sadece enerji absorpsiyonu değil, aynı zamanda adaptif yapısal davranışları ve yüksek dayanıklılığı da kapsar (Bagewadi and Bhagchandani, 2023). Örneğin, re-entrant hücre geometrisine dayanan öksetik sistemler, artan kırılma tokluğu ve gelişmiş kesme rijitliği gibi istenen mekanik özellikleri sağlar (Y. Liu vd., 2023). Ayrıca, hibrit malzeme sistemlerinde, öksetik köpüklerle takviye edilen kırılgan matrisler, sismik izolasyon elemanları ve patlamaya dayanıklı yapılar için kritik enerji absorpsiyon kapasitesi sunar (Dhanasekar vd., 2016; Veloso vd., 2023)

Bu yapılar, özellikle ölçeklenebilirlik, üretim maliyetleri ve malzeme entegrasyonu konularında önemli mühendislik zorlukları içermektedir (Gan vd., 2022). Geleneksel yapı malzemeleriyle uyumlu hibrit sistemlerin geliştirilmesi, öksetik davranışın mekanik özellikleriyle yapı elemanlarının uyumlu olmasını gerektirir. Öksetik tasarımlar, mikro-düzeydeki geometrik hassasiyetin büyük ölçekli yapılara taşınması ve maliyet etkin üretim tekniklerinin geliştirilmesi gibi kritik mühendislik sorunlarını aşarak gelecekte sürdürülebilir yapıların tasarımında kilit rol oynayabilir (Al-Rifaie and Sumelka, 2019; Shuaibu vd., 2024). Tablo 1' farklı öksetik yapılara ait mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 1. Farklı Öksetik Yapıların Mekanik Özellikleri (Novak vd., 2016)

Malzeme	Poisson Oranı [-]	Elastisite Modülü [MPa]
Dönüştürülmüş, konvansiyonel açık gözenekli köpük	-0,7	0,072
	-0,8	-
	-0,82	-
Yeniden girintili bakır köpük	-0,39	30
Yeniden girintili silikon kauçuk köpüğü	-0,25	26
PTFE (Politetrafloroetilen)	-12	0,15
UHMWPE (Ultra yüksek moleküler ağırlıklı PE)	-1,24	-
6-kiral yapı	–1	-
	-0,81	19,46
Anti-kiral yapı	-0,98	3,11
4-kiral yapı	-0,26	7,08
Anti 4-kiral yapı	-1,831	5,374
Kayıp kaburga (missing rib) yapısı	-0,6	-
Polipropilen film	-1,12	340
EBM ile üretilmiş yapılar	-0,4	8000
3B yazdırılmış yeniden girintili kafes yapı	-1,18	-
Boşluklu kare dizilimi	-0,73	-
Hiyerarşik petek yapı	-0,5	-
Döner kare desenli film	-0,963	-

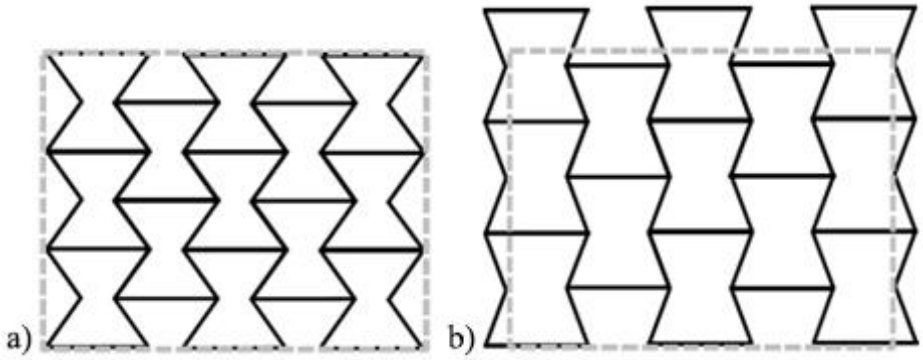
Öksetik malzemeler çoğunlukla üç ana gruba ayrılabilir: öksetik bal peteği yapıları, öksetik mikrogözenekli polimerler ve öksetik kompozitler.

Öksetik bal peteği yapıları

Konvansiyonel ve öksetik bal peteği şeklindeki 2D yapılar, son birkaç on yılda en yaygın olarak araştırılan öksetik yapı türlerindendir. Bu 2D yapılar, genellikle daha karmaşık 3D yapılara dönüştürülebilir. Yeniden girintili ve benzeri öksetik hücre konfigürasyonları, yüksek enerji absorpsiyonu ve darbe direncini sağlamak için yoğunlaşma etkisini kullanır; bu mekanizma, darbe enerjisinin daha geniş bir bölgeye dağılmasını ve lokal hasarın yayılımını engeller (Najafi vd., 2021; L. Zhou vd., 2017).

Yeniden girintili (Re-entrant) yapılar

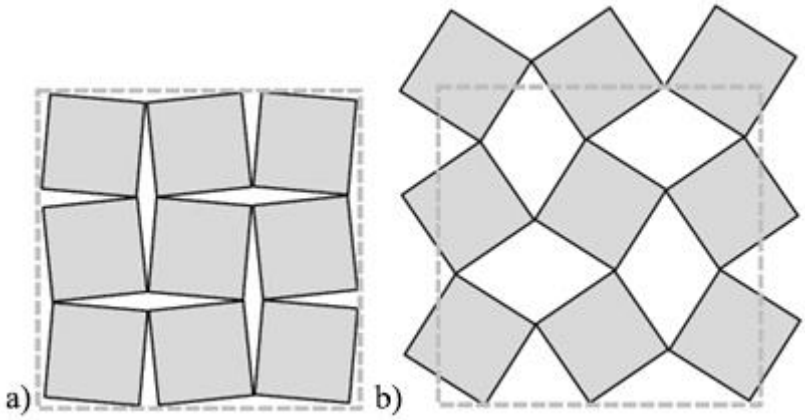
2D yeniden girintili (re-entrant) bal peteği yapıların (Şekil 22) geliştirilmesi, hücre duvarlarının bükülmesiyle ortaya çıkan çeşitli deformasyon mekanizmalarının analitik hesaplamalarıyla başlamıştır.



Şekil 22. a) Deforme olmamış, b) Deforme olmuş yeniden girintili yapı

Dönen birimler (rotating units)

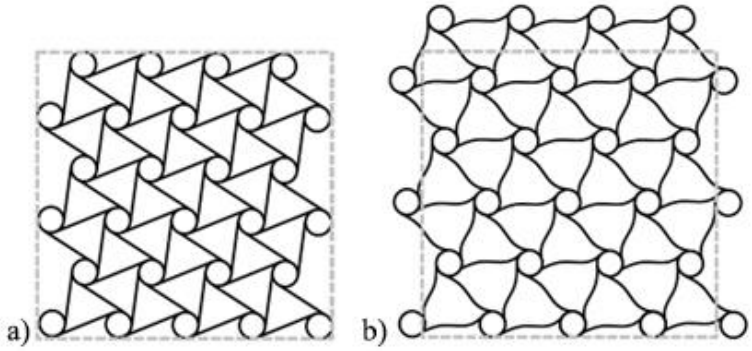
Grima ve Evans, menteşelerle belirli köşelerden birleştirilen sert dikdörtgen ve üçgen hücrelerden oluşan dönen birimli öksetik yapıları tanıtmışlardır (Şekil 23). Bu tür yapılar, Poisson oranı için analitik olarak -1 değerini verebilir. Dönen birimlerin öksetik davranışı, dönen dikdörtgenler ve üçgenler için analitik ifadeler kullanılarak analiz edilmiştir. Yarı-rijit dönen birimler de geliştirilmiştir. Eliptik boşluklu kare dizilimler gibi dönen birimlerle benzer davranış gösteren gerçek yapılar, deneysel testler ve sayısal simülasyonlarla analiz edilmiştir.



Şekil 23. a) Deforme olmamış, b) Deforme olmuş dönen dikdörtgen yapılar

Kiral Yapılar (Chiral Structures)

Kiral yapılar, doğrusal bağlantı elemanlarının (kaburgalar) merkezi düğümlere bağlanmasıyla oluşur. Bu merkezi düğümler daireler veya diğer geometrik şekiller olabilir (Şekil 24). Kiral yapıların auxetic etkisi, düğümler etrafındaki kaburgaların sarılması veya çözülmesi yoluyla elde edilir (Grima vd., 2004). Uygulanan kuvvete tepki olarak kaburgaların bu hareketi, yapının negatif Poisson oranı sergilemesine neden olur. Teorik ve deneysel araştırmalara göre kiral yapıların Poisson oranı yaklaşık -1'dir. (Novak vd., 2016)



Şekil 24. a) Deforme olmamış, b) Deforme olmuş kiral yapılar

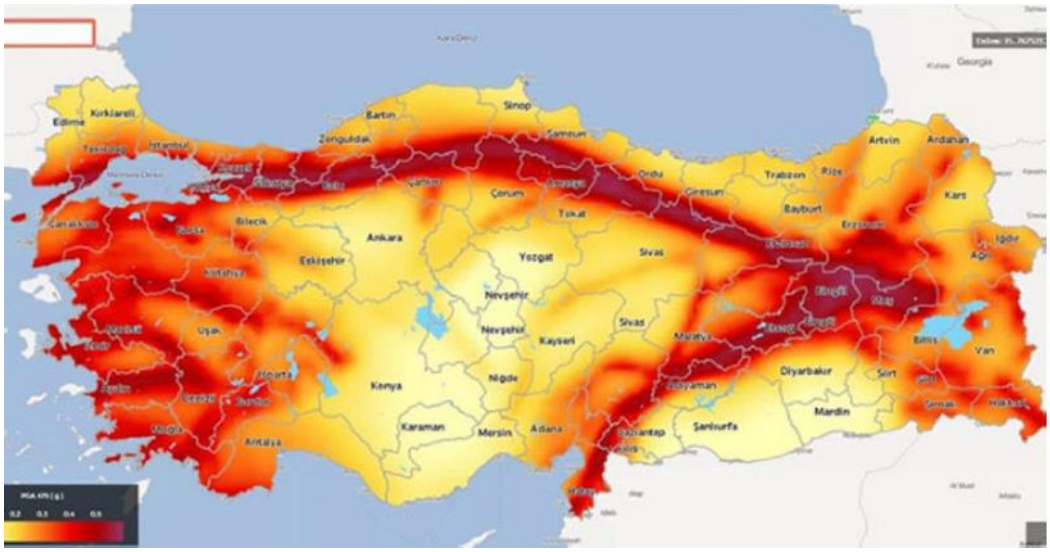
Depremler ve Özellikleri

Yer kabuğunda meydana gelen kırılmalar, plakalar arasındaki göreli hareketler nedeniyle oluşan enerjinin dalga hareketi olarak yayılması sonucu yüzeyde titreşimler meydana getirir ve bu olay deprem olarak adlandırılır. Depremler, kabuk içindeki gerilme birikimi ve ani enerji boşalmaları sonucu ortaya çıkar. Bu süreçte, enerji ani bir şekilde açığa çıkar ve sismik dalgalar olarak yayılarak yer yüzeyinde titreşimlere neden olur.

Bu tür hareketler genellikle Arap ve Avrasya plakalarının etkileşimi sonucu ortaya çıkar. Arap plakasının kuzeye doğru hareketi, Avrasya plakasının sıkışmasına ve enerji birikimine yol açar. Bu sıkışma, Türkiye'nin doğusunda bulunan Kuzey Anadolu Fayı (sağ yönlü) ve Doğu Anadolu Fayı (sol yönlü) gibi büyük fay hatlarının oluşumuna neden olmuştur. Avrasya ve Afrika plakaları arasındaki etkileşim de bu bölgede karmaşık tektonik hareketlerin meydana gelmesine yol açar. Bu hareketler sırasında, faylar boyunca kayma, sıkışma, yatay yer değiştirme ve yer kabuğunun yükselmesi gibi farklı deformasyon türleri gözlemlenir.

Özellikle Ege Çöküntü Bölgesi'nde, farklı büyüklükteki tektonik plakalar arasındaki sınırların kırık hatları boyunca karmaşık tektonik sistemler gelişmiştir. Bu fayların bazıları, deniz tabanından kara içlerine kadar uzanır ve birçok yerel tektonik yapıyla kesişir. Örneğin, Kuzey Anadolu Fayı, Karlıova'dan başlayarak Marmara Denizi'ne kadar uzanan ve Ege Denizi'ne kadar devam eden karmaşık bir fay sistemi oluşturur. Aynı şekilde, Doğu Anadolu Fayı da Karlıova'dan başlayarak Türkiye'nin güneydoğusuna uzanır ve Türk-Arap tektonik sınırında önemli bir rol oynar.

Bu fay hatları boyunca yer alan aktif kırık sistemleri, bölgedeki deprem riskini artıran önemli unsurlardır. Türkiye'deki tektonik hareketlerin hızı, yıllık ortalama 5 ila 70 mm arasında değişmekte olup, bu durum depremlerin meydana gelme olasılığını ve şiddetini belirleyen önemli bir faktördür (Celep, 2018). Türkiye'deki önemli fay hatları ve bu hatlardaki kırılma potansiyelleri, sismik tehlike haritalarında ayrıntılı olarak gösterilmektedir (AFAD, 2021).



Şekil 25. Türkiye'deki fay hatları ve sismik bölgeler (AFAD 2021)

Depremlerin frekans içerikleri

Teorik olarak, bir yapının başlangıç konumuna geri dönene kadar yaptığı hareket sayısı frekans olarak tanımlanır. Aynı zamanda, yapının başlangıç konumuna geri dönmesi için geçen süreye ise periyot denir. Yapının periyodu ve frekansı, matematiksel olarak birbirinin tersidir. Depremin hakim frekansı, en fazla enerji yayan, titreşim ve diğer etkilerin ortaya çıktığı frekans değeri olarak ifade edilir. Yapının frekansı ile depremin frekansının birbirine yakın olması, yapısal dinamik analizlerde dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Çünkü yapının doğal frekansı ile depremin hakim frekansının çakışması, rezonans riskini artırarak yapıda ciddi hasarlara yol açabilir. Bu durumda, yapının frekansı depremin frekansından büyükse dinamik çözüm, küçükse statik çözüm daha uygun olacaktır (Chopra, 1995).

Yapısal kontrol sistemlerinin tasarımı, yapının bulunduğu bölgedeki deprem frekans içeriklerinin doğru bir şekilde belirlenmesini gerektirir. Örneğin, sismik yalıtım sistemleri gibi pasif kontrol tekniklerinde, yapının periyodu uzatılarak veya frekansı düşürülerek deprem enerjisinin yapıya aktarımı sınırlandırılabilir. Ancak bazı yapılar, 1 Hz'in altındaki düşük frekanslara karşı hassas oldukları için bu tür yöntemler her zaman etkili olmayabilir. Bu nedenle, yapının hakim frekansının belirlenmesi, deprem sırasında enerji absorpsiyonunu ve yapısal stabiliteyi sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Depremlerin frekans içeriklerinin belirlenmesi, mühendislerin sismik yalıtım sistemlerini ve diğer yapısal kontrol stratejilerini tasarlarken dikkate almaları gereken önemli bir parametredir. Çünkü her yapının doğal frekansı, çevresel koşullar ve yapının geometrik özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Zaman tanım alanında kayıt edilen deprem verilerinin frekans analizleri, yapısal dinamik performansın değerlendirilmesi için kritik bir rol

oynar. Bu analizler genellikle Fourier dönüşümleri gibi matematiksel yöntemlerle gerçekleştirilir (Beyen, 2021).

Deprem kayıtlarının ölçümlenmesi ve yapıya özgü frekans içeriklerinin belirlenmesi, birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında zemin bilgisi, deprem hareketi düzeyi, enlem-boylam koordinatları ve yapının modal parametreleri (frekans, sönüm, periyot) yer alır (TBDY, 2018).

Deprem Mühendisliğinde Yapı Davranışı

Deprem mühendisliği, yapısal sistemlerin dinamik yükler altındaki davranışlarını inceleyen ve dayanıklı yapı tasarımlarını geliştirmeyi amaçlayan disiplinlerarası bir mühendislik alanıdır. Deprem sırasında yapılar; yer değiştirme, ivmelenme, süneklik, enerji tüketimi ve şekil değiştirme gibi temel parametreler üzerinden değerlendirilir. Yapıların sismik performansını belirlemek için en sık kullanılan yöntemler arasında sarsma tablası testleri, zaman tanım alanında ivme analizleri ve LVDT gibi yer değiştirme ölçüm cihazları bulunmaktadır. Literatürde, taşıyıcı sistemin geometrik özelliklerinin, malzeme türünün ve bağlantı detaylarının deprem etkilerine karşı gösterdiği direnç üzerinde doğrudan etkili olduğu vurgulanmaktadır. Son yıllarda ise, sismik dayanımı artırmaya yönelik olarak yeni yapısal sistem önerileri geliştirilmiş ve bu sistemler arasında şekil değiştirme kapasitesi yüksek, enerji sönümleme yeteneği güçlü yapılar ön plana çıkmıştır. Bu bağlamda, öksetik geometriye ve kafes sistem benzetmesine sahip özgün tonoz yapıların deprem davranışına dair yapılacak analizler, hem literatürdeki boşlukları dolduracak hem de pratik mühendisliğe yeni bir çözüm önerisi sunacaktır.

Dinamik deprem yükleri altındaki yapısal sistemler, atalet, rijitlik ve sönümlemenin etkileşimiyle ortaya çıkan karmaşık bir davranış sergiler. Bu yükler, yapının temel titreşim modlarını uyararak vibrasyon oluşturur ve sistemin genel tepkisi, doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi yapının sahip olduğu dinamik özelliklere bağlıdır (Wang vd., 2023). Sismik zemin hareketinin ilettiği enerji, yapıyı salınıma zorlayarak gerilme ve şekil değiştirmelerin yapı elemanları arasında yeniden dağılımına neden olur. Ayrıca, farklı katlar veya elemanlar arasındaki dinamik kuplaj, kütle ve rijitlik dağılımları tarafından belirlenir ve bu da enerjinin sistem boyunca nasıl iletildiğini ve dağıtıldığını etkiler. Sonuç olarak, bu etkileşimleri anlamak hem sismik güvenliği değerlendirmek hem de yapısal tasarımı iyileştirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Yapısal titreşim kontrol sistemleri

Deprem sırasında bir binanın gösterdiği temel tepkilerden biri, doğal titreşim modlarının amplifikasyonudur ve bu da yapının dinamik özelliklerine bağlı olarak deformasyon modellerinin ortaya çıkmasına yol açar. Doğal frekans, yapının rijitlik ve kütle dağılımından doğrudan etkilenen ve sismik uyarım altındaki rezonans davranışını yöneten temel bir parametredir (Wang vd., 2023). Deprem zemin hareketinin frekans içeriği binanın mod frekanslarına yaklaştığında, önemli rezonans meydana gelebilir ve bu da büyük yer değiştirme genliklerine ve potansiyel hasara yol açabilir. Ortam titreşim izleme veya zorlanmış titreşim testleri gibi tekniklerle bu modal parametrelerin belirlenmesi, sonlu eleman modellerinin kalibrasyonu ve doğrulanması için gereklidir (Beskhyroun vd., 2014). Mühendisler, bu belirlenen değerleri kullanarak yapıların sismik yükler altındaki işletme güvenliğini ve dinamik performansını değerlendirir.

Rezonans etkilerinin yanı sıra, yapısal sistemler sismik performans için kritik olan enerji dağıtım mekanizmaları yoluyla dinamik yüklere tepki verir. Titreşim enerjisinin ısı veya diğer enerji formlarına dönüştürülmesi yoluyla kinetik enerjiyi dağıtan sönümleme mekanizması, rezonans kaynaklı yer değiştirmeleri ve kuvvetleri azaltmada önemli bir rol oynar (Şahin and Çağlar, 2023). Deneysel olarak belirlenen sönüm oranı, yapısal sistemler arasında önemli ölçüde değişebilir ve etkinliği malzeme histerezisi ve bağlantılardaki sürtünmeden etkilenir. Hem malzemenin doğal sönümü hem de eklenen sönümleyici cihazlar, genel enerji dağılımına katkıda bulunarak dinamik uyarımların olumsuz etkilerini hafifletir. Bu etkileşim, deprem sırasında ve sonrasında yapısal bütünlüğün korunması için hayati öneme sahiptir.

Deprem yükleri ve zemin hareketi modelleri

Yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarını analiz edebilmek için doğru zemin hareketi modellerinin seçimi ve uygun yükleme türlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yapısal analizlerde en yaygın olarak kullanılan deprem yükü türleri arasında eşdeğer statik yük yöntemi, spektral analiz ve zaman tanım alanı (zaman geçmişi) analizleri yer almaktadır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip ve doğrusal olmayan davranışlar sergileyen yapı sistemlerinin değerlendirilmesinde zaman tanım alanı analizleri, yapı-zemin etkileşimini detaylı bir şekilde inceleyebilme avantajı sunmaktadır. Bu tür analizlerde kullanılan gerçek zemin hareketi kayıtları, genellikle farklı büyüklüklerdeki depremleri ve çeşitli fay uzaklıklarını temsil edecek şekilde seçilir ve analiz senaryolarına uygun biçimde ölçeklendirilir. Literatürde, maksimum yer ivmesi (PGA), spektral ivme (Sa), yer değiştirme, süre ve frekans içeriği gibi zemin hareketi parametrelerinin yapısal performans üzerindeki belirleyici etkisi birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Truman and Cheng, 1997). Fay yakın alan ve uzak alan deprem

kayıtlarının farklı yapısal tepkilere neden olduğu da deneysel ve sayısal çalışmalarla gösterilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan 11 farklı deprem kaydının seçimi, tonoz yapının dinamik performansını çok yönlü olarak değerlendirmeyi mümkün kılmıştır.

Deprem etkisi altındaki yapısal analizlerde, yer hareketlerinin farklı karakteristiklerini ve yapı üzerindeki etkilerini yansıtan çeşitli yük modelleri dikkate alınmaktadır. Genel olarak bu yük türleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- **Eşdeğer Statik Yükler:** Pek çok yapı yönetmeliği ve ön tasarım aşamasındaki analizlerde, deprem kuvvetleri eşdeğer statik yaklaşımlar aracılığıyla temsil edilmektedir. Bu yöntemde, yapının kütlesi, rijitliği ve birinci doğal periyodu esas alınarak hesaplanan yatay ataletsel kuvvetler, yapı üzerine statik yükler olarak uygulanır (Truman and Cheng, 1997). Bu yaklaşım, özellikle geometrik ve yapısal olarak düzenli binalar için uygundur; çünkü bu tür yapılarda dinamik tepkiler, ölü ve hareketli yükler ile birlikte değerlendirilen statik yük kombinasyonlarıyla makul düzeyde temsil edilebilir.
- **Zaman Tanım Alanında Dinamik Yükler (Time-History Yükleri):** Daha ayrıntılı bir değerlendirme için zaman tanım alanında analizler (time-history) kullanılmaktadır. Bu tür analizlerde, gerçek veya sentetik olarak üretilmiş deprem kayıtları yapısal modellere uygulanarak, geçici tepkiler, modlar arası etkileşimler ve doğrusal olmayan davranışlar detaylı biçimde yakalanabilmektedir (Rahim, 2019; Aizon vd., 2020). Bu yöntemler, deprem ivmesinin zamana bağlı değişkenliğini, frekans içeriğini ve süresini dikkate alır; kiriş-kolon birleşimleri gibi kritik elemanların doğrusal olmayan dinamik analizlerinde veya köprülerin tam ölçekli değerlendirmelerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Zaman tanım alanı yükleme teknikleri, enerji sönümleme, artık yer değiştirme ve histeretik davranış gibi parametrelerin daha doğru şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.
- **Çevrimsel Yükleme (Cyclic Loading):** Deneysel çalışmalar, deprem sırasında meydana gelen tekrarlı yük değişimlerini simüle etmek amacıyla çevrimsel yükleme protokollerinden faydalanmaktadır. Bu yöntem, özellikle donatılı beton (RC) kiriş-kolon birleşimi gibi kritik bölgelerde gözlemlenen elastik olmayan çevrimsel davranışı taklit etmek amacıyla kullanılır. Yapı elemanlarının süneklik ve enerji sönümleme kapasiteleri bu testler aracılığıyla doğrulanabilir (Rahim, 2019). Ayrıca, bu deneysel veriler, doğrusal olmayan modellerin geliştirilmesi ve kalibrasyonu için de önemli bir veri kaynağıdır.

- **Çok Yönlü ve Ölçeklenmiş Sismik Yükler:** Deprem yükleri doğası gereği yönlüdür. Bu nedenle analizlerde genellikle X ve Y doğrultularında yatay kuvvetler, bazı durumlarda ise düşey bileşen de dikkate alınır. Aynı zamanda, sismik talepler farklı şiddet seviyelerinde karakterize edilebilir. Örneğin, kablolu köprü sistemleri üzerinde yapılan çalışmalarda, düşük, orta ve yüksek şiddetli deprem senaryolarını temsil etmek amacıyla ölçeklendirilmiş PGA (Peak Ground Acceleration) değerleri kullanılmış ve bu değişkenlerin mod şekilleri ile sönümleme özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir (Aizon vd., 2020). Bu yönlülük ve şiddet derecesi dikkate alınarak yapılan analizler, özellikle düzensiz veya yüksek yapıların deprem tepkilerinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi için kritik önemdedir.

Sonuç olarak, statik eşdeğer yüklerden zaman tanım alanı analizlerine ve çevrimsel yüklemelere kadar uzanan bu farklı yükleme türleri, kapsamlı bir sismik değerlendirme için temel teşkil etmektedir. Hangi yük modelinin seçileceği; analizde istenen hassasiyet düzeyine, yapı sisteminin karmaşıklığına ve tasarım ya da güçlendirme projesinin performans hedeflerine bağlı olarak değişmektedir (Truman and Cheng, 1997; Rahim, 2019; Aizon vd., 2020).

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, yıldız biçimli öksetik boşluklara sahip çelik plakaların statik performansı ve kabuk yapıların sismik davranışlarını belirlemek amacıyla yürütülen deneysel ve sayısal çalışmalar detaylı olarak sunulmaktadır. Tasarım parametreleri, numune üretimi, deneysel kurgu, veri toplama süreçleri ve analiz yöntemleri akademik bir bütünlük içinde açıklanmıştır.

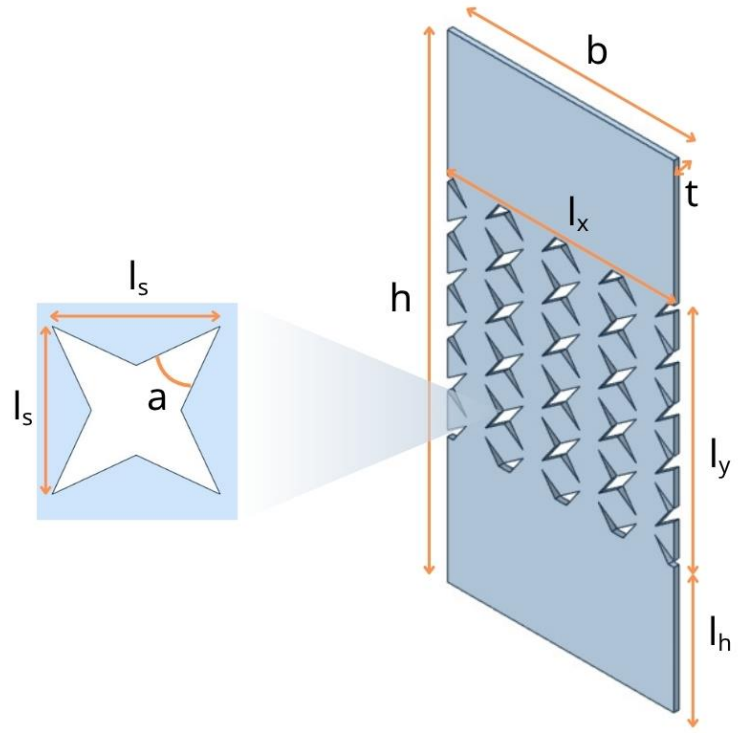
Modellerin Tasarımı

Plaka modeller

Bu çalışmada her biri yıldız boşluklu geometriye sahip dokuz öksetik yapı incelenmektedir. Test numuneleri, birim hücrelerden oluşan hücresel bir yapıya sahiptir. Üç farklı açıya sahip gruplardan oluşan delikli çelik plakalar 4, 5 ve 6 olmak üzere farklı aks sayılarına sahiptirler. Öksetik davranış, bu deliklerin şekli ve konumunun bir sonucudur. Temel hücreler tekdüzedir ve tanımlanmış bir düzende birbirini takip eder, dolayısıyla düzenli hücresel yapılara aittirler. Her numune, 90 × 190 × 2 mm ölçülerinde dikdörtgen bir muhafaza içine yerleştirilmiştir. Numunelerin üst ve alt kısımları 50 mm'lik bir kenar boşluğu ile inşa edilmiştir. Yapıların kendileri, belirgin bir birim hücre sayısına sahip 90 × 90 mm'lik blok halinde düzenlenmiştir. Test numunelerine ait konfigürasyonlar ve numune detayları Tablo 2 ve Şekil 26'da gösterilmiştir.

Tablo 2. Plaka Modellerin Geometrik Özellikleri

Numune Adı	b (mm)	h (mm)	t (mm)	l_h (mm)	lx (mm)	ly (mm)	a (derece)	l_s (mm)
PL-20-A	90	190	2	50	90	90	20	15
PL-20-B	90	190	2	50	90	90	20	15
PL-20-C	90	190	2	50	90	90	20	15
PL-30-A	90	190	2	50	90	90	30	15
PL-30-B	90	190	2	50	90	90	30	15
PL-30-C	90	190	2	50	90	90	30	15
PL-40-A	90	190	2	50	90	90	40	15
PL-40-B	90	190	2	50	90	90	40	15
PL-40-C	90	190	2	50	90	90	40	15



Şekil 26. Plakaların tasarım parametreleri

Tonoz modeller

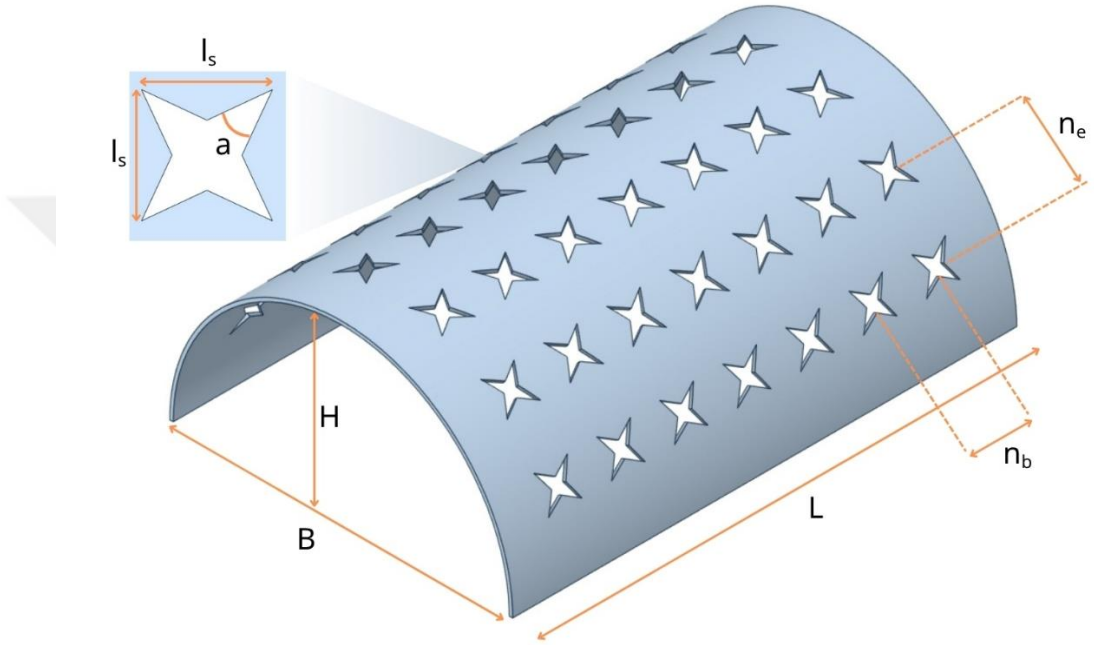
Çalışmada, tek açıklıklı ve yıldız biçimli boşluklar açılmış tonoz kabuk geometrisine sahip çelik levhalar üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Modeller, yükseklik/açıklık oranı (H/B), yıldız boşluk açısı (a) ve enine yöndeki yıldız sayısı (n_e) olmak üzere üç temel geometrik parametreye göre çeşitlendirilmiştir. Tonoz modellere ait özellikler ve konfigürasyonlar Tablo 3'te ve Şekil 27'de verilmiştir.

Tablo 3. Tonoz Modellerin Geometrik Özellikleri

Numune Adı	H (mm)	B (mm)	L (mm)	t (mm)	a (derece)	ne	nb	ls (mm)
ST-1	300	1000	1500	6	-	-	-	-
ST-1-20-A	300	1000	1500	6	20	4	7	100
ST-1-20-B	300	1000	1500	6	20	5	7	100
ST-1-20-C	300	1000	1500	6	20	6	7	100
ST-1-30-A	300	1000	1500	6	30	4	7	100
ST-1-30-B	300	1000	1500	6	30	5	7	100
ST-1-30-C	300	1000	1500	6	30	6	7	100
ST-1-40-A	300	1000	1500	6	40	4	7	100
ST-1-40-B	300	1000	1500	6	40	5	7	100
ST-1-40-C	300	1000	1500	6	40	6	7	100
ST-2	500	1000	1500	6	-	-	-	-
ST-2-20-A	500	1000	1500	6	20	4	7	100
ST-2-20-B	500	1000	1500	6	20	5	7	100

Tablo 3. (Devamı)

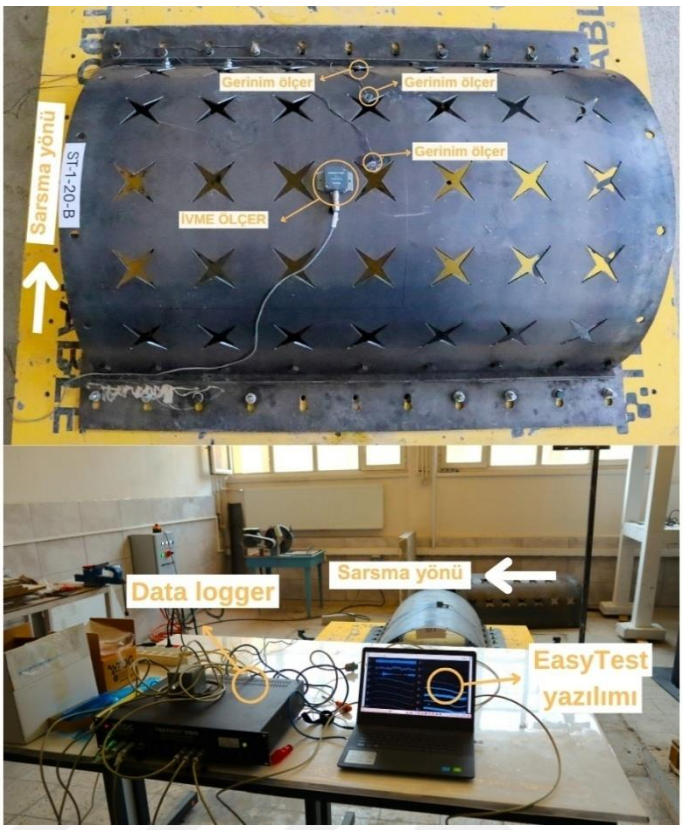
ST-2-20-C	500	1000	1500	6	20	6	7	100
ST-2-30-A	500	1000	1500	6	30	4	7	100
ST-2-30-B	500	1000	1500	6	30	5	7	100
ST-2-30-C	500	1000	1500	6	30	6	7	100
ST-2-40-A	500	1000	1500	6	40	4	7	100
ST-2-40-B	500	1000	1500	6	40	5	7	100
ST-2-40-C	500	1000	1500	6	40	6	7	100



Şekil 27. Kabuğun geometrik tanımı için kullanılan parametreler

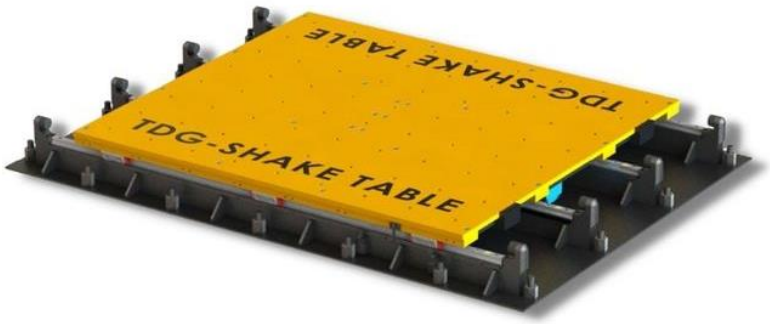
Deney Düzeneği

Deneylerde, yapıların deprem etkisi altındaki dinamik tepkilerini analiz etmek amacıyla, yüksek hassasiyetli sarsma tablaları, ivme sensörleri, veri toplama sistemleri, gerinim ölçerler ve gelişmiş simülasyon yazılımları entegre edilmiştir.



Şekil 28. Deney düzeneği

Deney düzeneğinin ana bileşenlerinden biri, TDG tarafından geliştirilen TDG-Shake Table (Şekil 28) 5 ton model elektro-mekanik sarsma tablasıdır. Bu sistem, 2 m x 2 m boyutlarında bir üst tabla ve ±200 mm hareket mesafesine sahiptir. ±1 g ivme altında 5 tonluk yük kapasitesiyle çalışabilmektedir.



Şekil 29. Sarsma tablası

Deney düzeneğinde kullanılan ivme sensörleri (Şekil 30), TDG'nin SENSEBOX7002 model ivmeölçerlerinden oluşmaktadır. Bu sensörler, ileri düzey MEMS (Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler) teknolojisi ile üretilmiş olup, düşük gürültü seviyesi ve yüksek hassasiyetli iki eksenli ölçüm kapasitesine sahiptir. Yapı sağlığı izleme, modal analiz, zorlanmış titreşim testleri ve sarsma tablası deneylerinde güvenilir veri sağlamak için tasarlanmıştır. Sensörlerin

analog çıkış sinyalleri, yüksek çözünürlüklü (24-bit) veri toplama sistemleri tarafından sayısallaştırılmakta ve bu sayede veri kaybı olmadan hassas ölçümler yapılabilmektedir.



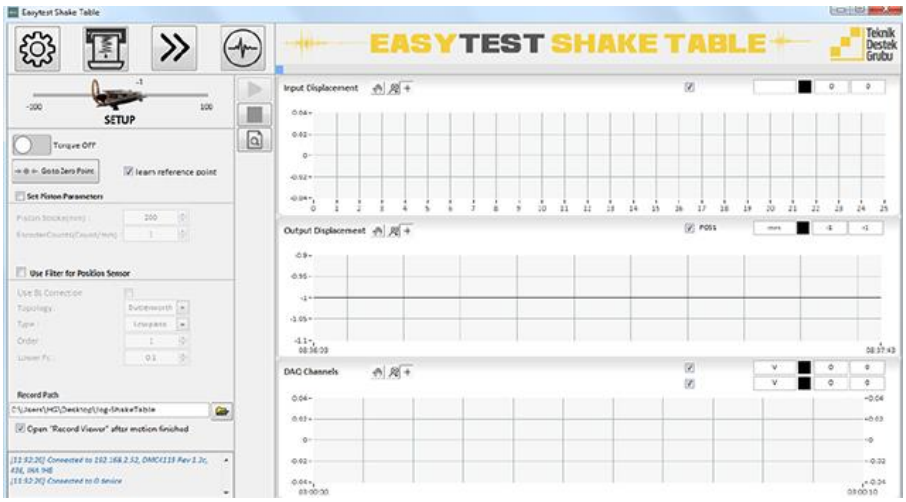
Şekil 30. İvme ölçer

Deneylerde veri toplama ve sayısallaştırma işlemleri (Şekil 31), Testbox2010-Rack model veri toplama ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, 24-bit çözünürlükte çok kanallı bir sayısallaştırıcı olup, kanal başına saniyede 2000 örnekleme hızına kadar veri toplayabilmektedir. Entegre GPS modülü sayesinde mikro-saniye düzeyinde zaman senkronizasyonu sağlamakta ve farklı lokasyonlardaki sensörlerden elde edilen verilerin eş zamanlı olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, cihazın dahili veri tamponlama özelliği sayesinde, veri kayıplarının önüne geçilmekte ve yüksek doğrulukla veri elde edilmektedir.



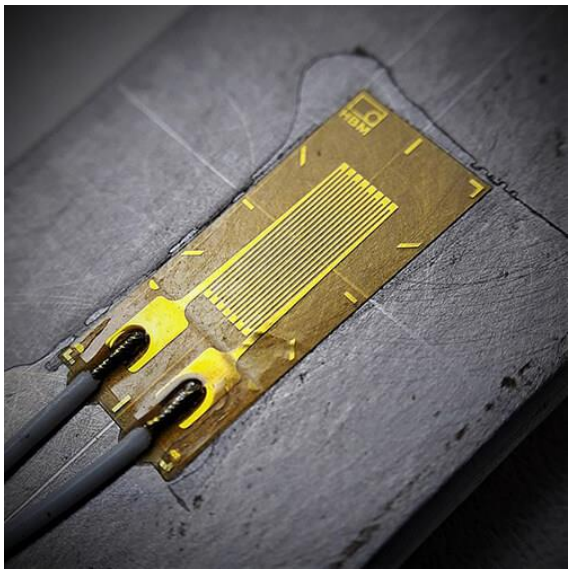
Şekil 31. Data logger

Veri toplama ve deney kontrol süreçleri, TDG'nin EASYTEST SHAKE TABLE adlı simülasyon yazılımı (Şekil 32) ile yönetilmiştir. Bu yazılım, gerçek deprem verilerinin yüklenmesine, ivme, hız ve deplasman profillerinin görüntülenmesine, ölçekleme ve filtreleme işlemlerine olanak tanımaktadır. Ayrıca, verilen ve alınan sinyallerin karşılaştırılması gibi işlemler de doğal bir akış içerisinde gerçekleştirilebilmektedir. EASYTEST SHAKE TABLE, sarsma tablasının kontrolü ve veri toplama işlemlerini tek bir arayüz üzerinden entegre bir şekilde yönetmeyi mümkün kılmakta ve deneylerin verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 32. Sümülasyon yazılımı ara yüzü

Ayrıca, yapı elemanlarındaki gerinimlerin doğru ve güvenilir bir şekilde ölçülmesi için YEF serisi gerinim ölçerler (Şekil 33) kullanılmıştır. Bu sensörler, Tokyo Measuring Instruments Laboratory (TML) tarafından geliştirilmiş olup, %10 ila %15 aralığında büyük gerinim ölçümleri için tasarlanmıştır. Tek eksenli (YEFLAB), 0°/90° iki eksenli (YEFCAB) ve 0°/45°/90° üç eksenli (YEFRAB) düzlem tipi rozet konfigürasyonları ile sunulan bu strain gauge'ler, farklı yönlerdeki gerinimlerin hassas ölçümü için idealdir. YEF serisi strain gauge'ler, -30°C ile +80°C arasında çalışabilmekte ve CN veya CN-Y tipi yapıştırıcılarla kullanılmaktadır. CE işaretli olup RoHS2 Direktifi'ne uygun olarak üretilen bu sensörler, özellikle büyük deformasyonların ölçülmesi gereken deneylerde güvenilir sonuçlar sağlamaktadır.



Şekil 33. Gerinim ölçer

Deney Koşulları ve Deprem Kayıtları

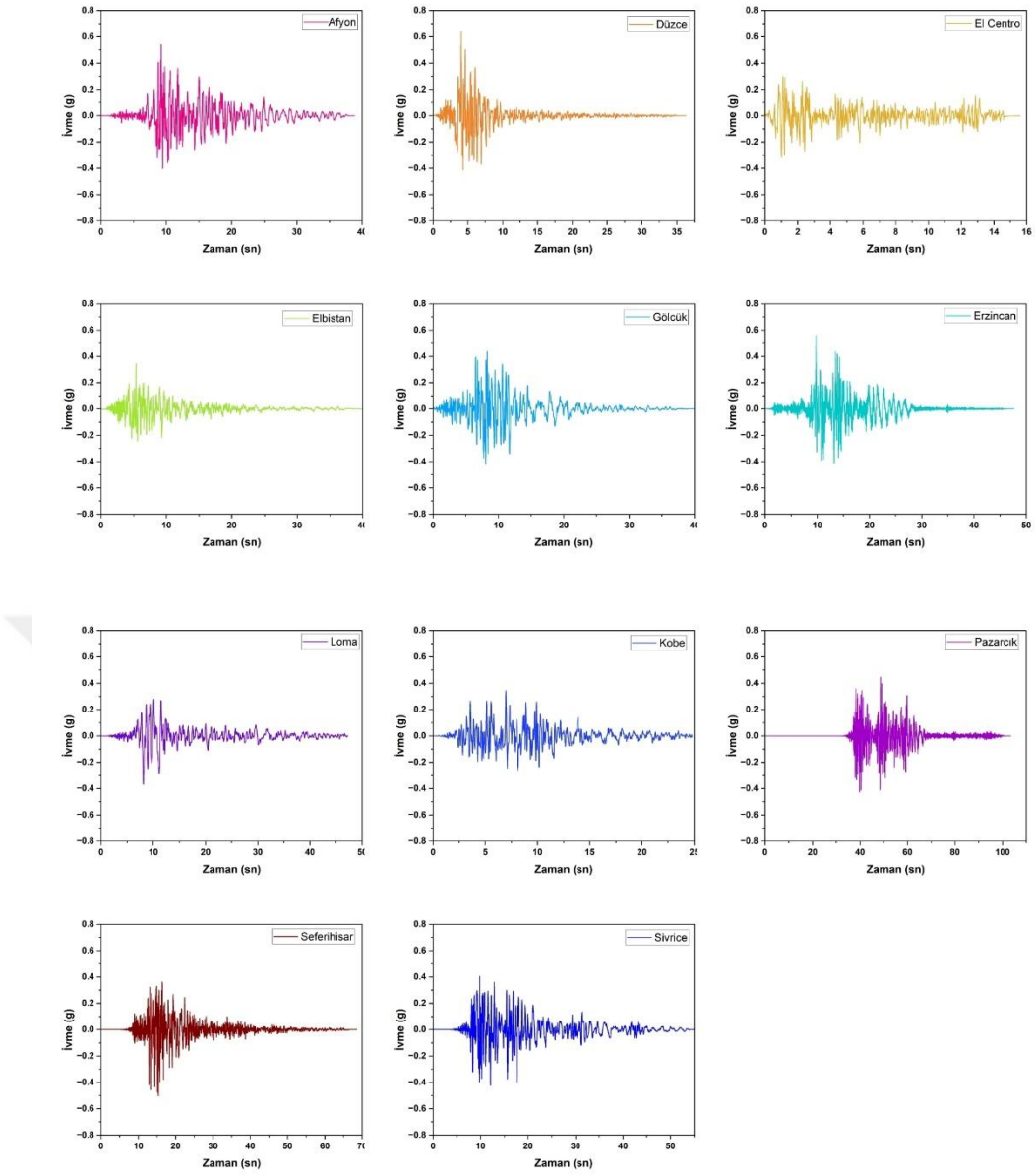
Bu tez çalışmasında, ülkemizde ve dünyada meydana gelmiş büyük depremlerin ivme verileri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Afyon (2002), Düzce (1999), El Centro (1940), Elbistan (2023), Erzincan (1992), Gölcük (1999), Kobe (1995), Loma (1989), Pazarcık (2023), Seferihisar (2020) ve Sivrice (2020) depremlerine ait kayıtlar değerlendirmeye alınmıştır. Bu depremlere ilişkin istasyon verileri, enlem-boylam bilgileri, tepe yer ivmesi (PGA) ve moment büyüklüğü (Mw) gibi temel parametreler Tablo 4 ve Şekil 34'te verilmiştir.

TBDY 2018 esaslarına göre, zaman tanım alanında yapılacak analizlerde en az 11 farklı deprem yer hareketi kaydının kullanılması önerilmektedir. Bu doğrultuda, her bir deprem için yalnızca bir istasyon verisi tercih edilmiştir. Aynı depreme ait birden fazla istasyon kaydının kullanılmasından kaçınılmış ve farklı istasyonlardan elde edilen 11 farklı deprem kaydıyla analizler yapılmıştır.

TBDY 2018 kapsamında, deprem yer hareketi kayıtlarının seçiminde, spektral eşdeğerliğe dayalı ölçeklendirme yöntemleri benimsenmiştir. Bu yöntemlerde, kayıtlar önce spektral içeriğe uygun hale getirilecek ve ardından belirli periyot aralıklarında (0.2Tp – 1.5Tp) hedef tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiştir.

Tablo 4. Deprem Yer Hareketleri

Deprem	Tarih	İstasyon	Enlem	Boylam	PGA (g)	Büyüklük (Mw)	Derinlik (km)
Afyon	3.02.2002	Afyon Merkez	38.75	30.53	0,488	6,6	7,6
Düzce	12.11.1999	Bolu Merkez	40.73	31.61	0,819	7,1	17
El Centro	18.05.1940	Kaliforniya	32.73	-115.53	0,348	6,9	16
Elbistan	6.02.2023	Göksun	37.99	36.48	0,648	7,6	7
Erzincan	13.03.1992	Erzincan	39.75	39.49	0,3276	6,8	23
Gölcük	17.08.1999	Yarımca Petkim	40.77	29.87	0,235	7,6	17
Kobe	17.01.1995	Kobe	34.69	135.19	0,828	7,2	14,3
Loma	17.10.1989	Kaliforniya	37.04	-121.88	0,637	6,9	18
Pazarcık	6.02.2023	Pazarcık	37.48	36.57	2,07	7,7	8,6
Seferihisar	30.10.2020	Kuşadası	37.86	27.27	0,274	6,6	16,54
Sivrice	24.01.2020	Sivrice	38.49	39.31	0,319	6,8	8



Şekil 34. Deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri

Veri İşleme ve Analiz Yöntemleri

Zaman tanım alanında ivme analizi

Sarsma tablası deneyleri sonucunda elde edilen ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman verileri, yapıların doğrudan zamana bağlı dinamik yanıtlarını ortaya koymak amacıyla analiz edilmiştir. Her model için her bir deprem kaydına karşılık:

- Maksimum ve minimum değerler belirlenmiş,
- Mutlak tepe (peak) değerler hesaplanmış,
- Yanıt eğrileri üzerinden enerji yoğunlukları ve frekans bileşenlerinin zaman içindeki etkileri irdelenmiştir.

Spektral ivme analizi (response spectrum analysis)

Her bir deprem girdisi için ivme-zaman serileri, farklı doğal periyotlara sahip teorik tek serbestlik dereceli (TSD) sistemlerin maksimum ivme tepkilerini temsil edecek şekilde, spektral ivme (Sa) eğrilerine dönüştürülmüştür. Bu analizle:

- Yapıların rezonans potansiyeli olan periyot aralıkları tespit edilmiş,
- ST-1 ve ST-2 grubu modellerin kısa, orta ve uzun periyotlu bileşenlere karşı duyarlılığı karşılaştırılmıştır.
- Spektrum üzerindeki tepe noktaları, modal analizden elde edilen doğal frekanslarla ilişkilendirilerek dinamik rezonans eğilimleri yorumlanmıştır.

Hesaplamalarda 5% sönüm oranı esas alınmış ve elastik spektrum kavramı üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Wavelet spektrum analizi (time-frequency analysis)

Zamana bağlı frekans çözümlemesi, her modelin zamansal enerji dağılımını ve frekans duyarlılığını ortaya koymak amacıyla sürekli dalgacık dönüşümü (Continuous Wavelet Transform, CWT) ile gerçekleştirilmiştir. Morlet tipi ana dalgacık kullanılarak:

- Deprem girdilerine karşı model tepkilerinin hangi zaman aralıklarında hangi frekans bileşenleriyle baskınlaştığı belirlenmiştir.
- Genlik yoğunlukları görsel spektrogramlar aracılığıyla analiz edilmiş, bu bölgeler rezonans olarak tanımlanmıştır.
- Her spektrumda genlik >1.0 olan bölgeler yüksek enerjili rezonans zonları olarak kabul edilmiştir.

Bu analizler sayesinde, klasik frekans alanı çözümlerinin aksine, geçici (transient) ve lokal frekans etkileri ayrı ayrı incelenmiş; yapıların sadece hangi frekanslara değil, aynı zamanda ne zaman ve ne süreyle bu frekanslara duyarlı olduğu belirlenmiştir.

Sonlu eleman analizi (FEA) ve simülasyon teknikleri

Yapıların doğal titreşim modlarının, rijitlik dağılımlarının ve frekans tepkilerinin belirlenmesi amacıyla sonlu eleman tabanlı modal analiz gerçekleştirilmiştir. ANSYS Workbench platformunda:

- Her model için geometrik birebir dijital replikalar oluşturulmuş,
- Mesh yoğunluğu artırılarak hassasiyet sağlanmış,
- Malzeme tanımları detaylı şekilde girilmiştir.

Simülasyon kapsamında:

- İlk 6 doğal frekans ve mod şekli elde edilmiş,
- Etkin kütle oranları hesaplanarak hangi modun hangi doğrultuda baskın olduğu belirlenmiştir,
- Analitik sonuçlar, wavelet ve spektral analiz bulgularıyla karşılaştırılarak doğrulama sağlanmıştır.

Bu sayede hem deneysel hem de sayısal modelleme yöntemleri bütüncül olarak değerlendirilmiş; yapının fiziksel davranışı ile sayısal temsil biçimi arasında anlamlı bir korelasyon kurulmuştur.

Veri filtreleme ve gürültü azaltma yöntemleri

Deneysel verilerin sağlıklı biçimde analiz edilebilmesi için sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. Kullanılan analiz teknikleri, ivme-zaman verilerinin filtrelenmesi, tepe ivme değerlerinin belirlenmesi, frekans özelliklerinin çıkarılması ve kayıtların eşlenmesi gibi çok yönlü süreçleri kapsamaktadır. Bu amaçla özellikle SeismoSignal ve SeismoMatch yazılımları kullanılmıştır. Gürültü içeren veya düşük genlikli sinyallerin etkisini azaltmak amacıyla:

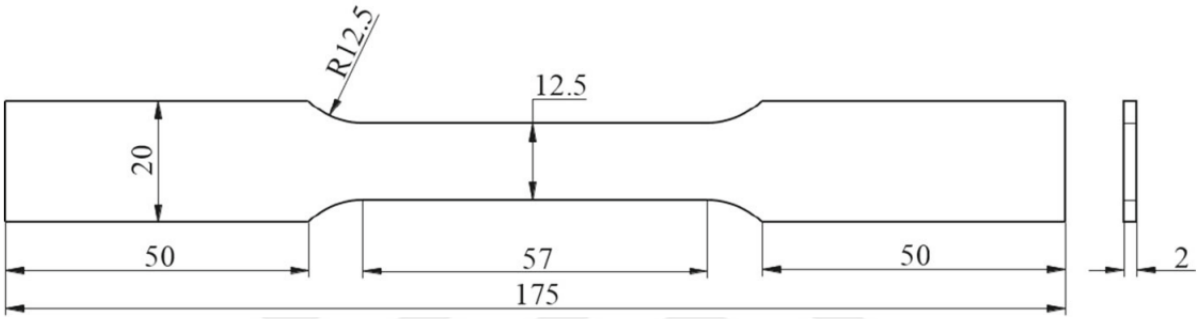
- Butterworth tipi alçak geçiren filtre (Low-Pass, 4. derece, 50 Hz cutoff)
- Zero-phase forward-backward filtering yöntemi
- DC bias giderimi için mean subtraction (ortalama merkezleme)

gibi teknikler kullanılmıştır. Bu işlemler sayesinde sinyalin yapıya ait gerçek dinamik karakteristiklerini temsil etmesi sağlanmış, sensör kaynaklı gürültü ve taban titreşimi hataları ortadan kaldırılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Malzeme Deneyleri

Bu çalışmada, plakalar için ST-37 çelik malzemesi, tonozlar için ise ST-52 çelik malzemesi kullanılmıştır. Her bir malzeme grubundan üçer adet numune alınarak kupon testleri uygulanmış ve malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kupon numune detayları ve test görselleri Şekil 35 ve Şekil 36'da gösterilmiştir. Sayısal model için kullanılacak malzeme özellikleri ve çıktılar Tablo 5 ve Şekil 37'de özetlenmiştir.



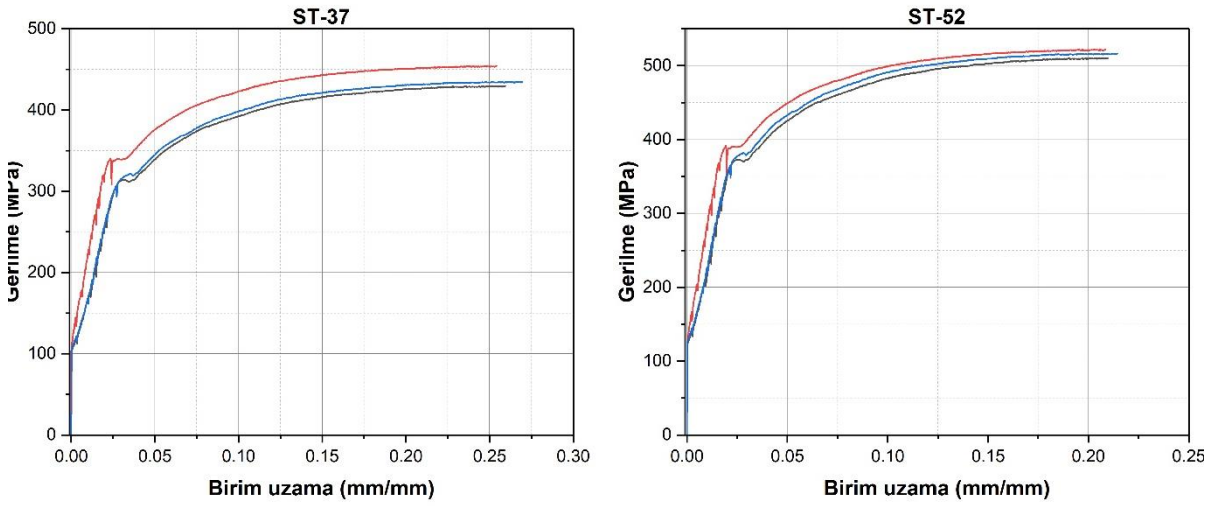
Şekil 35. Kupon testi numune boyutları



Şekil 36. Kupon testi numuneleri

Tablo 5. Malzeme Özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (Mpa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Poisson Oranı	Uzama (%)
St-37	$200*10^3$	324,85	439,6	0,3	26
St-52	$200*10^3$	381,2	520,3	0,3	21



Şekil 37. Malzeme çekme deneyi test sonuçları

PL-20-A Modeli

PL-20-A modeli, 20° yıldızlar arası açıya ve 4 akslı öksetik boşluk geometrisine sahiptir. Bu yapı konfigürasyonu, özellikle daha düşük aks yoğunluğu ve dar açısal geometriyle birlikte yük altında sünek deformasyon karakteristiği sergilemektedir. Modelin davranışı; deneysel numune gözlemleri, sonlu elemanlar analizleri (FEA) ve yük-uzama verileri bir arada değerlendirilerek analiz edilmiştir.

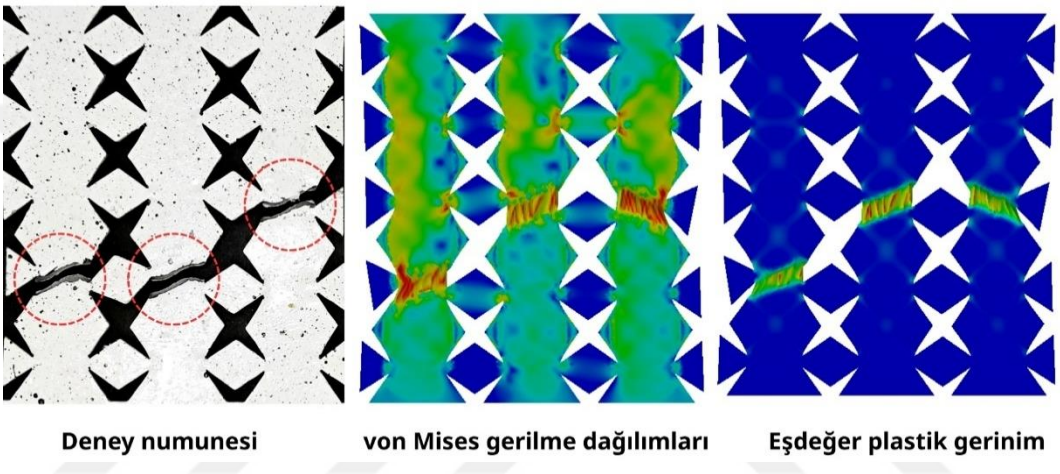
Deney numunesinde gözlemlenen kırılma çizgileri, yıldız boşluklarının uç noktalarını birbirine bağlayan diyagonal eksen boyunca ilerlemiştir. Kırmızı dairelerle işaretlenen çatlak bölgeleri, yük aktarımının yönlendiği ve yapısal süreksizliklerin yoğunlaştığı kesitleri göstermektedir. Bu çatlakların süreklilik göstermesi, yapının belirli bir kırılma moduna girdiğini ve deformasyonun belirli doğrultularda lokalize olduğunu ortaya koymaktadır.

Von Mises gerilme dağılımı analizine göre, maksimum gerilme yıldız boşlukları arasındaki dar geçiş noktalarında toplanmıştır. Gerilme yığılmaları, yapı boyunca simetrik olarak dağılsa da, özellikle yükün aktarıldığı diyagonal doğrultularda kırmızı renk tonları ile temsil edilen kritik bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bu bölgeler, aynı zamanda deneysel çatlak hatlarıyla büyük ölçüde çakışmaktadır.

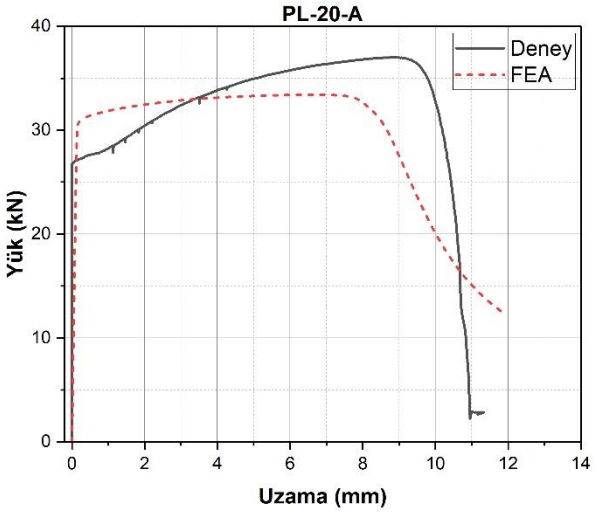
Eşdeğer plastik gerinim dağılımı, yapının bu kritik hatlar boyunca belirgin plastik deformasyona uğradığını göstermektedir. Plastikleşme alanları, yıldız uçlarını bağlayan diyagonal şeritler şeklinde gelişmiş ve yüklemenin ilerlemesiyle birlikte bu bölgelerde gerinim

birikimi artmıştır. Bu durum, sünek davranışın baskın olduğunu ve yapının kırılmadan önce geniş bir deformasyon kabiliyeti sergilediğini göstermektedir.

Yük-uzama eğrisi karşılaştırmasında, deneysel eğri yaklaşık 38 kN'lik bir maksimum yük taşıma kapasitesine ve 12 mm civarında bir uzama yeteneğine sahiptir. FEA sonucu ise benzer bir yük artışı eğilimi göstermekte, ancak maksimum yükü yaklaşık 34 kN civarında tahmin etmekte ve uzama kapasitesini 14 mm'ye kadar öngörmektedir. FEA eğrisindeki daha yayılı ve yumuşak iniş eğilimi, sayısal modellemede kırılmanın ani değil kademeli temsil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Buna rağmen, iki eğri arasındaki genel form ve eğilimler büyük oranda uyumludur.



Şekil 38. PL-20-A numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 39. PL-20-A deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-20-B Modeli

PL-20-B modeli, 20° yıldızlar arası açıya ve 5 akslı öksetik geometriye sahip bir yapı örneğidir. Bu model üzerinde yapılan sonlu elemanlar analizinde (FEA) elde edilen gerilme ve

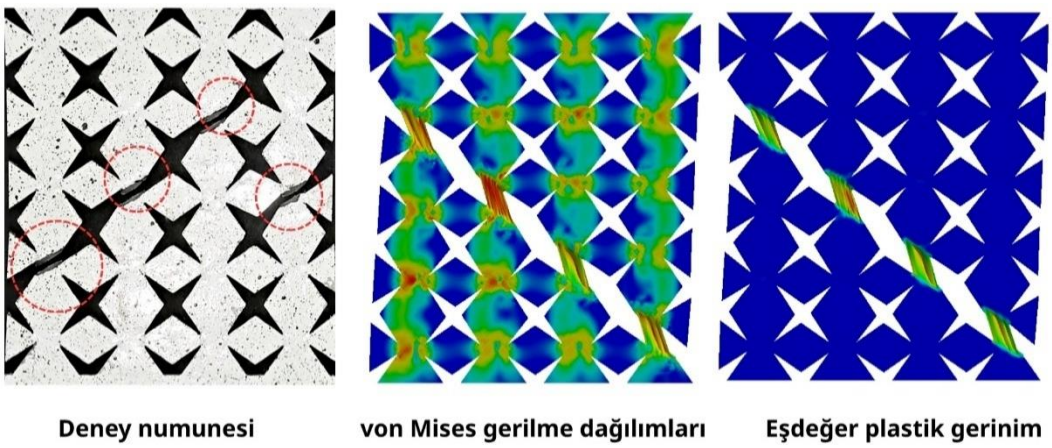
gerinim dağılımları, fiziksel deney numunesinden elde edilen deformasyon görüntüleri ve yük-uzama eğrisi ile karşılaştırılarak kapsamlı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

Deney numunesine ait görüntüde, özellikle çapraz bağlantı bölgelerinde yoğunlaşan yırtılmalar net bir şekilde tespit edilmiştir. Kırmızı dairelerle işaretlenmiş bu bölgeler, yapının en zayıf noktaları olarak öne çıkmakta ve yapısal deformasyonun lokal olarak bu alanlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Bu gözlem, sayısal analiz sonuçlarıyla yüksek tutarlılık göstermektedir.

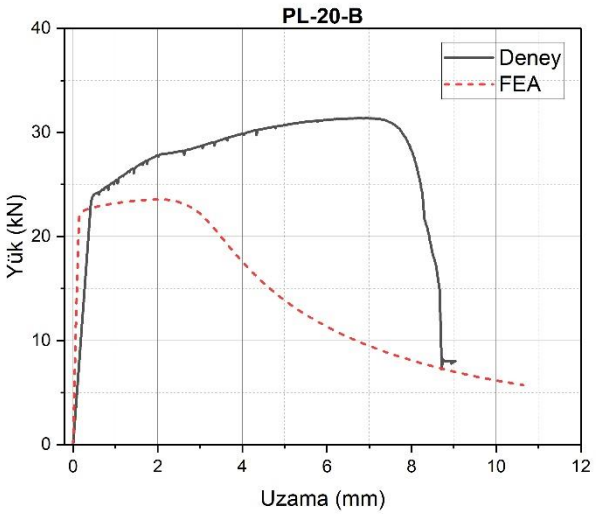
Von Mises gerilme dağılımı incelendiğinde, maksimum gerilme değerlerinin yine yıldız boşlukları arasındaki dar kesitlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Gerilme yığılmaları özellikle orta bölgelerde belirginleşmiş ve yapı genelinde simetrik olarak dağılmıştır. Bu durum, yapının yük altındaki davranışının geometrik süreksizliklerden güçlü biçimde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Eşdeğer plastik gerinim dağılımı ise yapının plastik deformasyonunun, von Mises gerilme ile paralel olarak geliştiğini göstermektedir. Plastikleşme, özellikle iç aks bölgelerinde meydana gelen dönme ve kayma etkileriyle birlikte belirli yönlerde yayılmış ve yapı boyunca süreksiz deformasyon alanları oluşturmuştur. Bu bölgelerdeki plastik deformasyon, yapının yük taşıma kapasitesini sınırlayan temel etkendir.

Deneysel ve sayısal yük-uzama grafikleri karşılaştırıldığında, her iki eğri de benzer genel eğilim sergilemekle birlikte, FEA modelinin hem maksimum yük hem de uzama kapasitesi açısından deneysel verilerin altında kaldığı gözlenmiştir. Deneysel eğride yaklaşık 31 kN'ye kadar yükselen yük, FEA simülasyonunda 23–24 kN civarında kalmaktadır. Benzer şekilde, deneysel uzama yaklaşık 9 mm iken, FEA analizinde bu değer daha düşüktür.



Şekil 40. PL-20-B numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 41. PL-20-B deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-20-C Modeli

PL-20-C modeli, 20° yıldızlar arası açıya ve 6 akslı öksetik yapı geometrisine sahip olup, daha yoğun iç yapısı ile dikkat çeker. Bu model üzerinde yürütülen sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme ve plastik gerinim dağılımları, deneysel test bulgularıyla birlikte incelenmiştir.

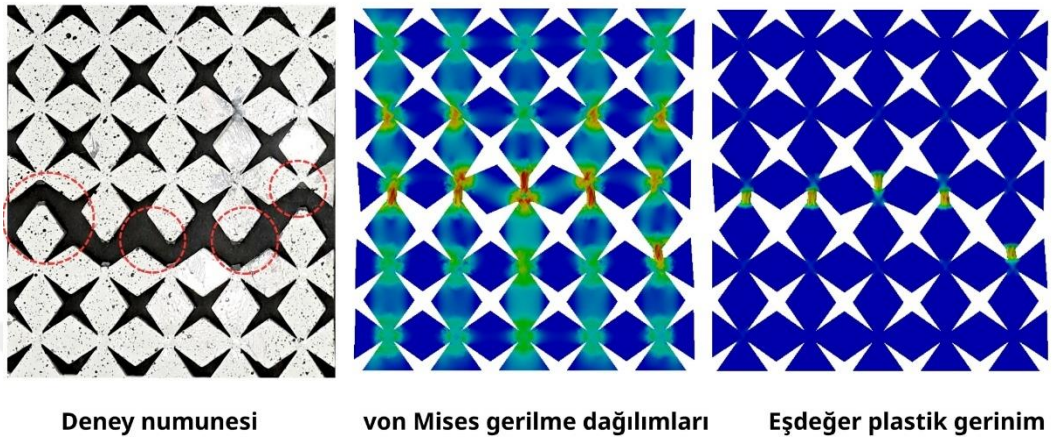
Deney numunesi görüntüsünde, kırmızı dairelerle belirtilmiş bölgelerde açıkça gözlenen hasar ve yırtılmalar, yıldız boşluklarının kısa kenarlarına yakın, sıkışma ve çekme etkisinin yoğunlaştığı alanlarda meydana gelmiştir. Bu lokal hasarların özellikle belirli yönlerde hizalanmış olması, yapının yük altındaki deformasyonunun belirli akslara yönlendiğini göstermektedir. Bu durum, sayısal analiz verileriyle uyum içerisindedir.

Von Mises gerilme dağılımında, en yüksek gerilme yoğunluklarının yıldız boşluklarının merkez noktalarına ve kenar birleşimlerine yakın bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Gerilme yığılmalarının simetrik ve tekrarlı bir desen izlediği görülmekte olup, bu dağılım yapının geometrik tekrarlılığı ile doğrudan ilişkilidir. Gerilme seviyeleri diğer modellere kıyasla daha düşük aralıkta seyretmiş ve yapısal taşıma kapasitesinin sınırlandığı anlaşılmıştır.

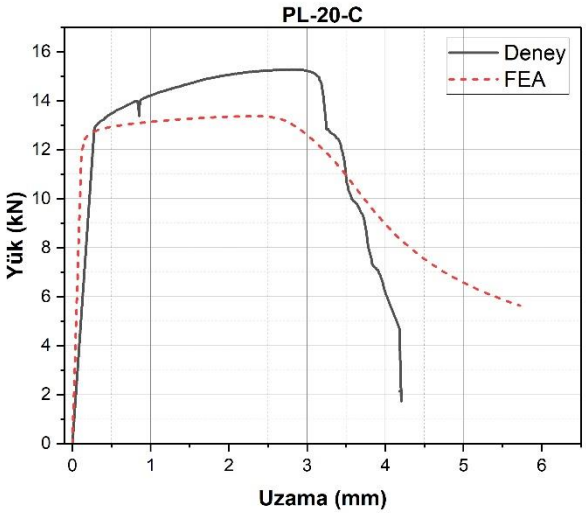
Eşdeğer plastik gerinim dağılımı, plastikleşmenin yalnızca birkaç dar kesitli bölgeyle sınırlı kaldığını ve yapının genelinde yaygın bir plastik deformasyon gelişmediğini ortaya koymaktadır. Bu, PL-20-C modelinin daha rijit bir davranış sergilediğini ve erken lokal hasar oluşumuna rağmen geniş çaplı deformasyona izin vermediğini göstermektedir.

Yük-uzama grafiği karşılaştırıldığında, deneysel verilerde yaklaşık 14,5 kN civarında maksimum yük değeri elde edilmiş olup bu değere ~1,5 mm uzama ile ulaşılmıştır. FEA sonuçları ise yük kapasitesini 13,5 kN seviyesinde tahmin etmiş, ancak deneysel eğriye göre

daha uzamaya dayanıklı bir davranış sergilemiştir. Sayısal model, sünek davranışı olduğundan fazla yansıtmış olabilir. Bununla birlikte, hem pik nokta hem de düşüş eğilimi açısından deneysel ve sayısal sonuçların genel olarak örtüştüğü söylenebilir. Ancak deney numunesinde ani kopma davranışı gözlenirken, FEA modelinde bu durum daha yayılı biçimde gerçekleşmiştir.



Şekil 42. PL-20-C numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 43. PL-20-C deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-30-A Modeli

PL-30-A modeli, 30° yıldızlar arası açıya ve 4 akslı öksetik geometriye sahip olup, PL-20 serisine göre daha açılı bir iç yapıya sahiptir. Bu modelin değerlendirilmesinde, FEA sonuçları, fiziksel deney bulguları ve yük-uzama grafikleri birlikte ele alınmıştır.

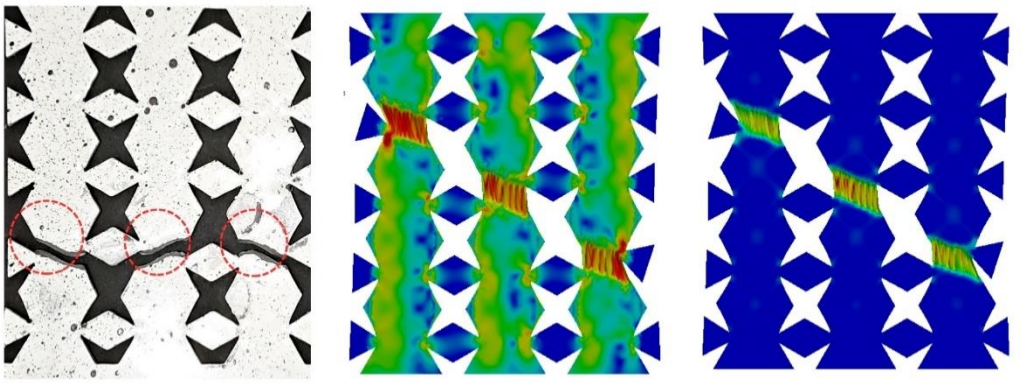
Deney numunesinde gözlemlenen hasar bölgeleri, daha önceki modellerde olduğu gibi yıldız boşlukları arasındaki dar kesitlerde yoğunlaşmış ve belirli bir hat boyunca hizalanmıştır.

Bu çatlaklar, yapıdaki süreksizliklerin yük transferini sınırladığı ve kırılmaların bu bölgelerde meydana geldiğini göstermektedir.

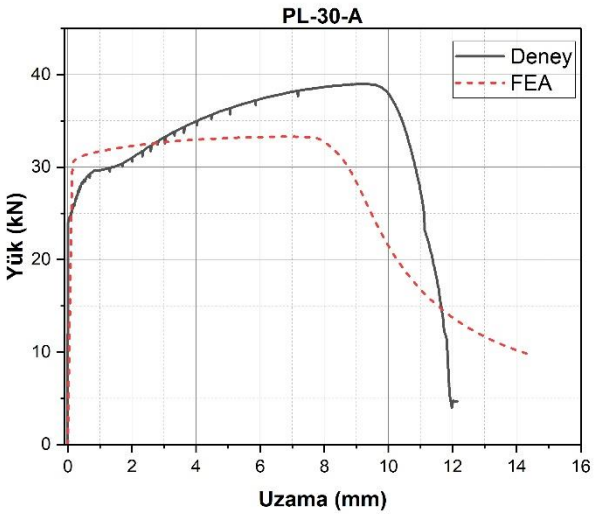
Von Mises gerilme dağılımı, yıldız boşluklarının çapraz bağlantı hatlarında belirgin gerilme yığılmaları olduğunu göstermektedir. Bu bölgelerdeki gerilme değerleri oldukça yüksektir ve yapı boyunca süreklilik arz eden bir deformasyon hattı meydana gelmiştir. Gerilme dağılımının simetrik olması, yükleme eksenine dik yöndeki yapısal tekrarlılıkla ilişkilidir. Özellikle yıldızların uç bölgeleri ve onların birbirine bakan kenarları arasında gerilme yoğunluğu oldukça yüksektir.

Eşdeğer plastik gerinim sonuçlarına bakıldığında, plastik deformasyonun yoğunlaştığı alanların yine gerilme birikimi ile örtüştüğü ve kırılma hattı boyunca uzandığı görülmektedir. Plastikleşmenin, yapının belirli bölgelerinde yaygınlaştığı ve hasar oluşumunun bu alanlardan başladığı anlaşılmaktadır. Bu plastik deformasyon alanları, yapının yük altındaki şekil değiştirme kapasitesini tanımlayan temel unsurlardan biridir.

Yük-uzama grafiği karşılaştırmasında, deneysel eğri yaklaşık 38,5 kN seviyesinde bir tepe noktası göstermekte ve 12 mm civarındaki uzama ile son bulmaktadır. FEA sonuçları ise yaklaşık 34 kN seviyesinde bir maksimum yük tahmini sunmakta, ancak uzama kapasitesini deneyden daha yüksek olarak öngörmektedir (14 mm'ye yakın). Bu durum, sayısal modelde kullanılan malzeme parametrelerinin deneysel gerçeklikten bir miktar sapabileceğini ya da malzemenin sünek davranışının daha yumuşak biçimde temsil edildiğini düşündürmektedir. Yine de genel eğrilerin uyumu, modellemenin doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 44. PL-30-A numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 45. PL-30-A deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-30-B Modeli

PL-30-B modeli, 30° yıldızlar arası açıya ve 5 akslı öksetik yapı geometrisine sahiptir. Bu yapı formu, artan açısal konfigürasyonun malzeme üzerindeki gerilme ve deformasyon yayılımına etkisini anlamak açısından önemlidir. Bu bağlamda FEA sonuçları, fiziksel deney bulguları ve yük-uzama verileri birlikte analiz edilmiştir.

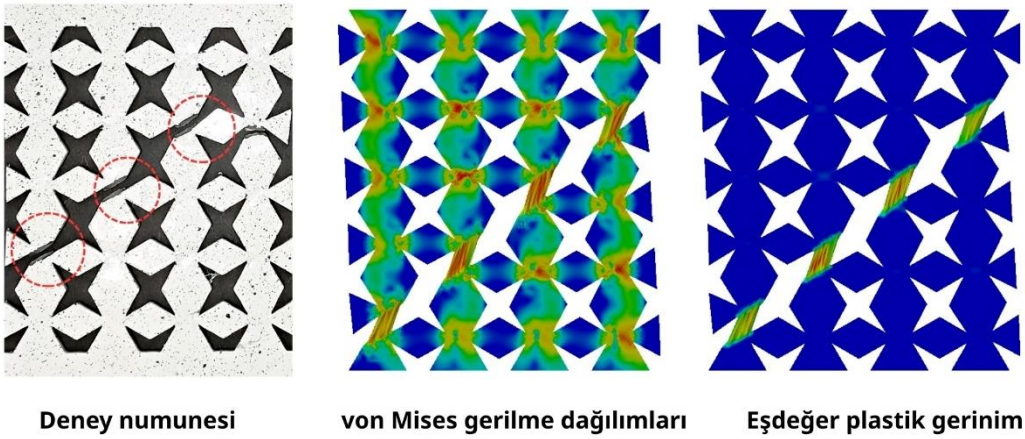
Deney numunesinde, yapının özellikle yıldız boşluklarının bağlantı noktalarında belirgin çatlaklar ve yırtılmalar gelişmiştir. Kırmızı daireler içinde vurgulanan hasar alanları, yük aktarımının yönlendiği dar kesitlerde yoğunlaşmış ve doğrusal bir kırılma hattı boyunca ilerlemiştir. Bu durum, yapısal süreksizliklerin kırılmayı yönlendirdiğini açıkça göstermektedir.

Von Mises gerilme dağılımları, yıldızlar arası bağlantı hatlarında yüksek gerilme birikimlerinin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Gerilme alanları simetrik olarak yayılmış olup, dar geçiş noktalarında kırmızı tonlarla temsil edilen maksimum gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Bu bulgular, modelin yük taşıma sırasında stresin belirli bölgelerde yığıldığını ve bu bölgelerin hasar riski taşıdığını göstermektedir.

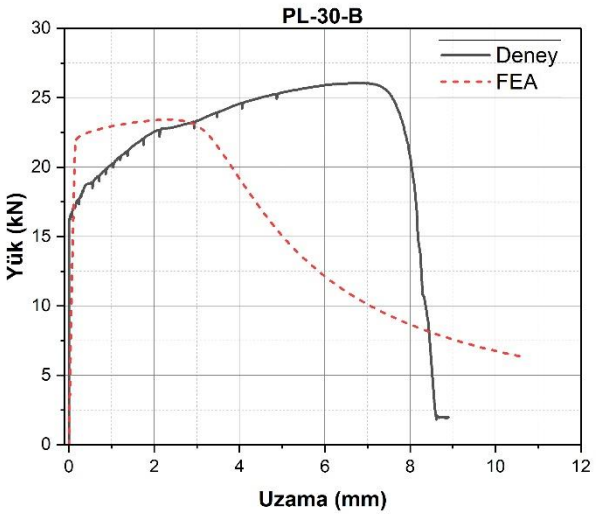
Eşdeğer plastik gerinim dağılımı ise plastikleşmenin yalnızca belirli geçiş bölgelerinde meydana geldiğini, diğer alanların elastik sınırlar içinde kaldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, yapının sünek davranış göstermesine karşın, deformasyonun tüm yapıya yayılmadığını ve lokal bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir.

Yük-uzama grafiği karşılaştırıldığında, deneysel eğrinin 26 kN seviyesinde pik yaparak yaklaşık 8,5 mm uzamaya kadar sünek bir şekilde ilerlediği gözlenmektedir. FEA grafiği ise maksimum yükü yaklaşık 23 kN olarak tahmin etmiş, uzama değerini ise daha fazla öngörmüştür (~11 mm). Bu fark, sayısal modelin malzeme davranışını daha yayılı bir deformasyonla temsil

etmesinden kaynaklanabilir. Bununla birlikte iki eğri genel form açısından paralellik göstermekte, bu da modelin doğrulama açısından yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 46. PL-30-B numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 47. PL-30-B deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-30-C Modeli

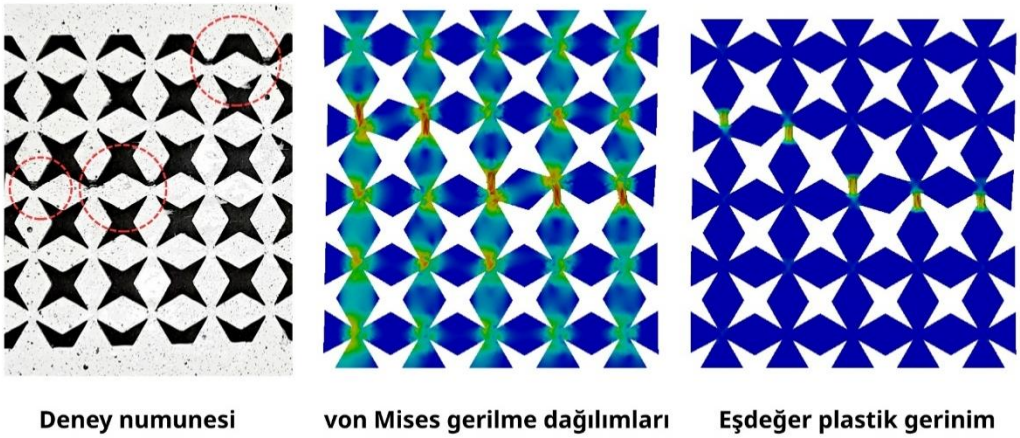
PL-30-C modeli, 30° yıldızlar arası açıya ve 6 akslı öksetik yapıya sahiptir. Bu modelin hem deneysel hem de sayısal analiz sonuçları, yüksek aks yoğunluğunun yapının deformasyon karakteristiklerine ve yük taşıma kapasitesine etkisini değerlendirmek amacıyla birlikte analiz edilmiştir.

Deney numunesi üzerinde gözlenen hasar dağılımı, yıldız boşluklarının uç kısımlarındaki dar geçiş bölgelerinde yoğunlaşmış ve kırmızı dairelerle vurgulanan alanlarda çatlaklar ve yerel deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu hasarların dağılımı, yıldız boşluklarının sıkılığı nedeniyle yükün daha kısa mesafelerde aktarılması ve lokal gerilme birikimlerinin daha belirgin hale gelmesiyle açıklanabilir.

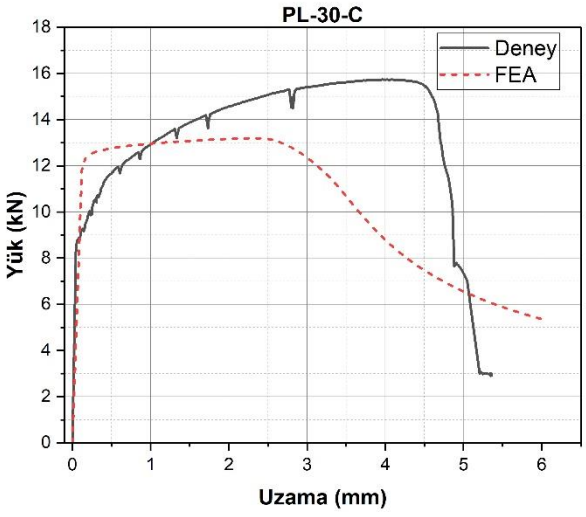
Von Mises gerilme dağılımı, yüksek gerilme bölgelerinin yıldız uçlarının kesişim alanlarında oluştuğunu ve simetrik bir şekilde yapı boyunca tekrarlandığını göstermektedir. Bu durum, yük aktarımının yapı içindeki aks hizasında toplandığını ve gerilmenin belirli geçiş noktalarında yoğunlaştığını göstermektedir. Yine de gerilme düzeyi, daha açık geometrili modellere kıyasla düşüktür.

Eşdeğer plastik gerinim dağılımı, sınırlı sayıda bölgenin plastik deformasyona maruz kaldığını ve genel olarak yapının çoğunluğunun elastik sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Plastikleşme, yıldız kenarlarının birleşim noktalarında lokalize olmuştur. Bu durum, yüksek aks sayısının yapısal rijitliği artırarak deformasyon yayılımını sınırladığını göstermektedir.

Yük-uzama eğrisi karşılaştırması, deneysel veride 16 kN seviyesine kadar yükselen bir yük kapasitesine ulaşıldığını ve yaklaşık 5 mm'lik bir uzama sonrası ani kopma gerçekleştiğini göstermektedir. FEA sonuçları ise maksimum yükü yaklaşık 13 kN olarak tahmin etmiş ve daha yayılı bir deformasyonla uzama değerini 6 mm civarında öngörmüştür.



Şekil 48. PL-30-C numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 49. PL-30-C deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-40-A Modeli

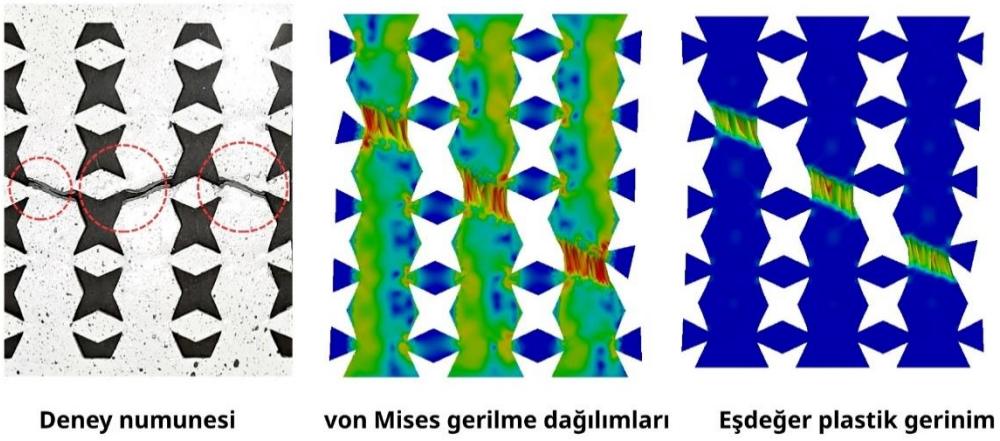
PL-40-A modeli, 40° yıldızlar arası açıya ve 4 akslı öksetik boşluk geometrisine sahiptir. Bu geniş açılı konfigürasyonun, yapının deformasyon davranışı ve yük taşıma performansı üzerindeki etkisi hem deneysel hem de sayısal analizler üzerinden detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Deney numunesi üzerinde gözlenen kırılmalar, yıldız boşluklarının uç bölgelerini birleştiren yatay hat boyunca ilerlemiş ve kırmızı dairelerle gösterilen alanlarda yoğun çatlak oluşumları meydana gelmiştir. Bu durum, yapısal süreksizliklerin hizalanmasıyla oluşan zayıf bölgelerin yük altında kolayca hasar gördüğünü ve kırılma eğilimlerinin belirginleştiğini göstermektedir.

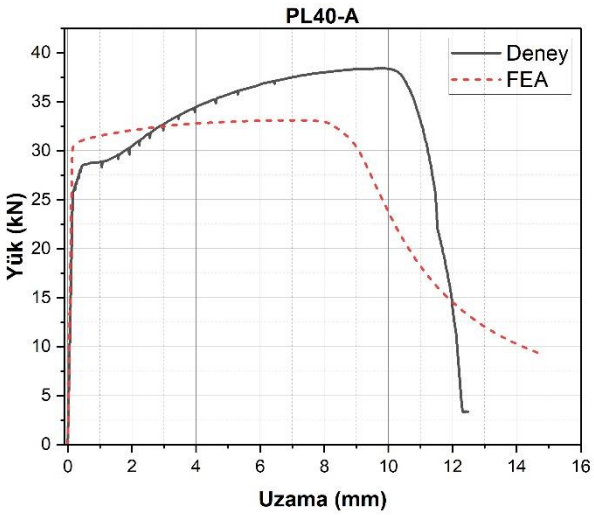
Von Mises gerilme dağılımı, yıldız boşlukları arasındaki ince geçiş noktalarında belirgin gerilme yığılmaları oluşturmuştur. Gerilme maksimumlarının bu bölgelerde toplanması, çatlak oluşumlarının neden bu hatlarda meydana geldiğini doğrulamaktadır. Gerilme dağılımı yapısal simetriyi yansıtmakla birlikte, yıldız uçlarındaki gerilme birikimi belirgin şekilde yoğunlaşmıştır.

Eşdeğer plastik gerinim dağılımı, deformasyonun özellikle kırılma hattı üzerinde yoğunlaştığını ve yapının geri kalanının elastik sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Plastikleşme, yapının belirli bölgelerinde yoğun şekilde gelişmiş ve bu bölgeler, deneyde gözlenen çatlaklarla büyük oranda çakışmıştır. Bu da sayısal modelin, deneysel hasar davranışını başarılı şekilde yansıttığını göstermektedir.

Yük-uzama eğrisi karşılaştırmasında, deneysel veride yapı yaklaşık 38 kN seviyesine kadar yük taşımış ve yaklaşık 12 mm uzama göstermiştir. FEA simülasyonu ise maksimum yükü 33 kN civarında tahmin etmiş ve uzama kapasitesini deneysel sonuçlara yakın olarak öngörmüştür (~14 mm). FEA eğrisi deneysel eğriyle genel olarak paralel seyretmekte olup, yük taşıma ve deformasyon davranışında anlamlı bir uyum sergilemektedir. Özellikle yükte ani düşüş eğilimi, her iki grafikte de benzer şekilde temsil edilmiştir.



Şekil 50. PL-40-A numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 51. PL-40-A deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-40-B Modeli

PL-40-B modeli, 40° yıldızlar arası açıya ve 5 akslı öksetik boşluk geometrisine sahip bir yapıdır. Bu modelin analizinde, artan aks sayısının ve genişleyen açının mekanik dayanım ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

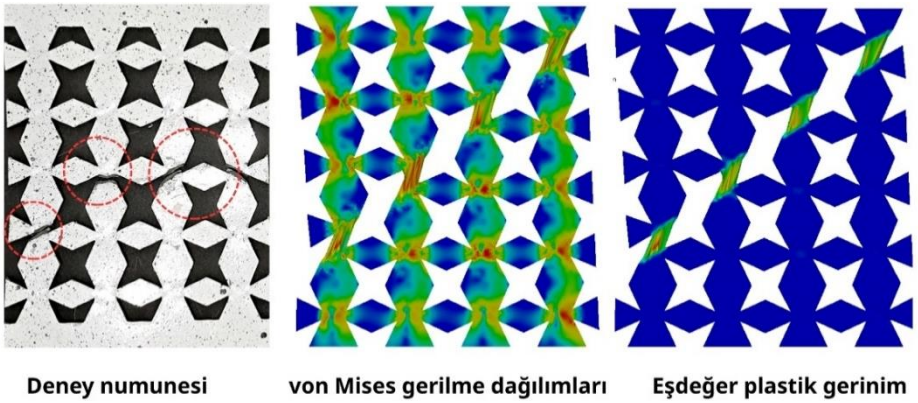
Deney numunesinde gözlemlenen hasar bölgeleri, yıldız boşluklarının bağlantı kollarında odaklanmış ve kırmızı daireler ile işaretlenen alanlarda yoğun çatlak oluşumu gerçekleşmiştir. Bu çatlaklar, yıldızların uç noktaları arasındaki dar kesitlerde ilerleyerek, yapının zayıf bölgelerini belirgin hale getirmiştir. Kırılma hattı boyunca hizalanmış deformasyon, yük aktarımının düzenli bir yol izlediğini göstermektedir.

Von Mises gerilme dağılımı, bu gözlemleri destekleyecek biçimde yıldız boşluklarının birleşim bölgelerinde gerilme yığılmaları göstermektedir. Özellikle yıldız uçlarını birleştiren diyagonal geçişlerde kırmızı tonlarla temsil edilen yüksek gerilme alanları mevcuttur. Bu dağılım, yapıdaki kırılma mekanizmasının geometrik süreksizliklerle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

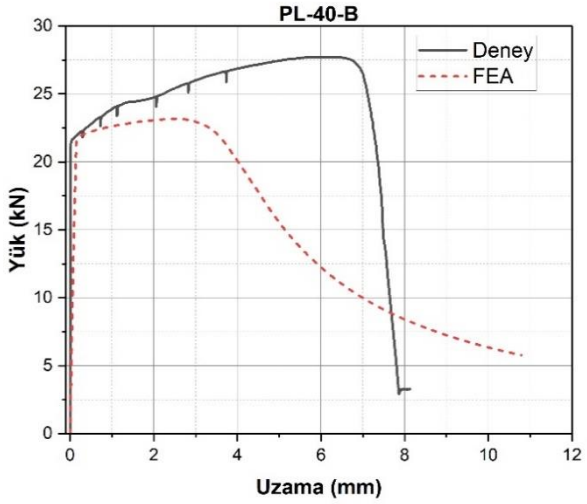
Eşdeğer plastik gerinim sonuçları, gerinim birikiminin yine bu geçiş bölgelerinde yoğunlaştığını ve yapı genelinde yaygın bir plastikleşme oluşmadığını göstermektedir. Bu durum, PL-40-B modelinin, lokalize deformasyona sahip ancak tüm yapıya yayılmayan bir plastik davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.

Yük-uzama grafiği karşılaştırması, deneysel eğrinin yaklaşık 27,5 kN yük kapasitesine ulaştığını ve 8 mm civarında bir uzama ile kopma meydana geldiğini göstermektedir. FEA eğrisi ise daha düşük bir maksimum yük değeri (~23 kN) tahmin etmiş, deformasyon sürecini

ise daha uzun ve daha yumuşak biçimde temsil etmiştir (~11 mm). Her iki eğri de genel biçim ve eğilim açısından benzerlik göstermekte olup, FEA modellemesinin doğruluğu kabul edilebilir düzeydedir. Özellikle düşey kırılma sonrasındaki ani yük kaybı her iki eğride de paralel şekilde görülmektedir.



Şekil 52. PL-40-B numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 53. PL-40-B deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

PL-40-C Modeli

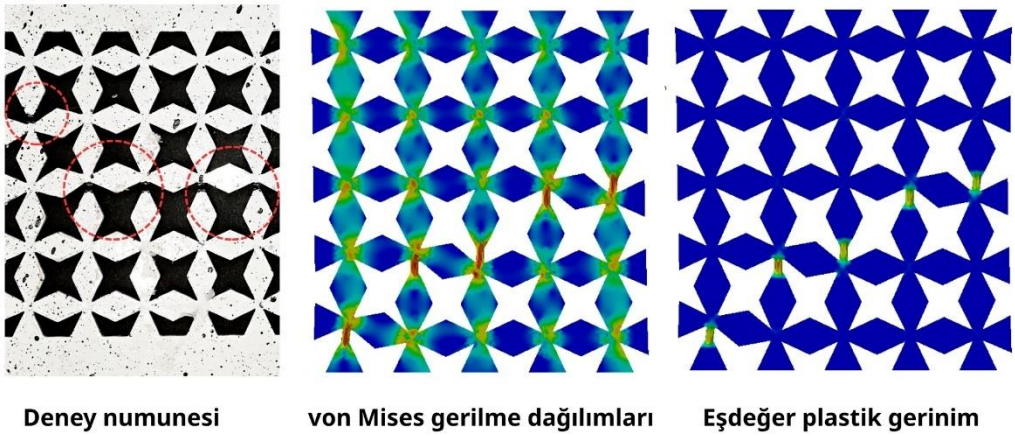
PL-40-C modeli, 40° yıldızlar arası açıya ve 6 akslı öksetik boşluk geometrisine sahiptir. Bu modelin yapısal davranışı, yüksek aks sayısının getirdiği yoğun bağlantı ağı ve geniş açılı geometri ile belirlenmektedir. Bu bağlamda deneysel ve sayısal veriler birlikte analiz edilmiştir.

Deney numunesi üzerinde gözlemlenen çatlaklar, yıldız boşluklarının merkezine yakın kenar noktalarında toplanmış ve kırmızı dairelerle işaretlenen bölgelerde lokal hasarlar meydana gelmiştir. Yapının genelinde yaygın bir kırılma hattı oluşmamış; aksine hasar, yapı boyunca dağılmış küçük bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bu durum, yapının rijitliğinin artmasıyla birlikte deformasyonun lokalize hale geldiğini ve genel bir sünek deformasyon yerine erken gevrek kırılmaların geliştiğini göstermektedir.

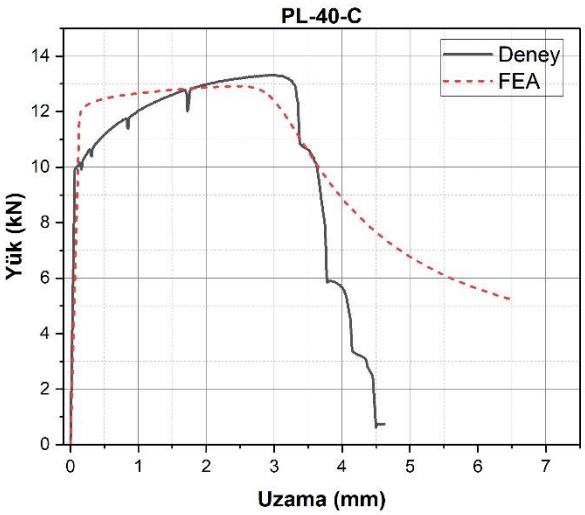
Von Mises gerilme dağılımı, yıldız boşluklarının uç noktaları ve birleşim bölgelerinde belirgin gerilme yığılmaları olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu bölgelerdeki maksimum gerilme değerleri, diğer modellere göre daha düşüktür. Gerilmenin tüm yapıya yayılması yerine küçük bölgelerde yoğunlaşması, bu modelin yükü daha az homojen dağıttığını göstermektedir.

Eşdeğer plastik gerinim dağılımı, yapıda yalnızca birkaç küçük bölgede plastikleşme meydana geldiğini göstermektedir. Bu, PL-40-C modelinin yüksek rijitlik nedeniyle elastik sınırlarda kaldığını ve plastik deformasyon kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Sayısal modelleme, deneyde gözlenen lokal kırılmaları başarılı şekilde yansıtmaktadır.

Yük-uzama grafiği karşılaştırıldığında, deneysel eğride yaklaşık 13 kN seviyesinde maksimum yük taşındığı ve bu değerden sonra ani bir düşüşle kırılma gerçekleştiği görülmektedir. Uzama kapasitesi yaklaşık 4,5 mm civarındadır. FEA eğrisi ise maksimum yükü 12,5 kN civarında öngörmekte ve uzama kapasitesini 6 mm civarında tahmin etmektedir. İlginç biçimde, sayısal ve deneysel eğriler bu modelde diğer modellere göre daha iyi örtüşmüş, grafikler arasında yüksek uyum sağlanmıştır.



Şekil 54. PL-40-C numunesi deformasyon analizi ve gerilme dağılımı



Şekil 55. PL-40-C deney ve FEA sonuçları karşılaştırması

Plaka Modellerin Karşılaştırılması

PL serisi numuneler, yıldız şekilli öksetik boşlukların açısı (20°, 30°, 40°) ve her açıya karşılık gelen farklı aks sayıları (4, 5 ve 6) ile yapılandırılmıştır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, hem açı hem de aks sayısı parametrelerinin mekanik performans üzerinde belirleyici etkiler yarattığı görülmektedir.

20^0 modellerinin karşılaştırmalı analizi

PL-20 serisi numunelerde aks sayısının artırılmasıyla birlikte mekanik performansta belirgin bir azalma gözlenmiştir. Dört aksa sahip PL-20-A modeli, yaklaşık 36,5 kN'luk en yüksek taşıma kapasitesi ve 11,5 mm'lik uzama kapasitesiyle serideki en dayanıklı yapı olarak öne çıkmıştır. Beş akslı PL-20-B modeli, taşıma kapasitesinde yaklaşık 31,5 kN ile daha düşük bir performans sergilemiş, uzama kapasitesi ise 8,5 mm seviyesinde kalmıştır. Altı akslı PL-20-C modeli ise yaklaşık 15 kN maksimum yük ve yalnızca 4 mm uzama ile serinin en zayıf mekanik dayanımına sahip numunesi olmuştur.

Deneysel kırılma gözlemleri incelendiğinde, her üç modelde de çatlaklar yıldız uçlarının birbirine en yakın olduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. PL-20-A modelinde çatlaklar daha yayılmış bir şekilde orta bölgeden geçerken, PL-20-C modelinde kırılma daha erken aşamada ve sınırlı deformasyonla gerçekleşmiştir. Bu durum, aks sayısındaki artışın yapının esneklik kapasitesini düşürdüğünü göstermektedir. Sayısal analizlerde elde edilen von Mises gerilme dağılımları ve eşdeğer plastik gerinim konturları, deneysel kırılma bölgeleriyle yüksek oranda çakışmaktadır. Bu da kullanılan FEA modellemesinin özellikle plastikleşme bölgelerinin tahmininde başarılı olduğunu göstermektedir.

Özellikle PL-20-A ve PL-20-B modellerinde, FEA sonuçları deneysel verilerle kısmen örtüşmekle birlikte, taşıma kapasitesinin altında kalmaktadır. PL-20-C modelinde ise FEA eğrisi deneysel değerlerle daha iyi uyum sergilemiş, elastik bölgedeki çakışma belirginleşmiştir. Bu fark, özellikle plastikleşme sonrası çatlama ve kopma davranışlarının sonlu eleman analizlerinde tam anlamıyla modellenememesinden kaynaklanabilir.

Sonuç olarak, aks sayısı arttıkça hem taşıma kapasitesi hem de süneklik özelliklerinde azalma meydana gelmiş, bu durum hem deneysel hem sayısal olarak doğrulanmıştır. PL-20-A modeli, optimum aks sayısıyla mekanik performans açısından en başarılı yapı olarak öne çıkarken, PL-20-C modeli ise kırılgan davranışıyla dikkat çekmektedir. Tasarımsal açıdan değerlendirildiğinde, daha az aks sayısına sahip geometrilerin yapısal dayanım açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir.

30^0 modellerinin karşılaştırmalı analizi

PL-30 serisi numunelerde aks sayısının artırılmasıyla birlikte mekanik performansta belirgin bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Dört aksa sahip PL-30-A modeli, yaklaşık 38,5 kN maksimum taşıma kapasitesi ve 12 mm civarındaki uzama kapasitesiyle serideki en dayanıklı yapı olarak öne çıkmıştır. Beş akslı PL-30-B modeli, taşıma kapasitesinde yaklaşık 25,5 kN ile daha düşük bir performans sergilemiş, uzama kapasitesi ise 8,5 mm seviyesine kadar düşmüştür. Altı aksa sahip PL-30-C modeli ise yalnızca 15,8 kN maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşabilmiş ve 5 mm civarında sınırlı bir uzama ile serinin en düşük mekanik dayanımını sergilemiştir.

Deneysel kırılma gözlemleri incelendiğinde, her üç modelde de çatlakların yıldız boşluklarının uç noktalarına yakın konumlandığı ve yük iletim hattı üzerindeki zayıf bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. PL-30-A modelinde çatlaklar görece daha geniş bir yayılımla orta bölgeden ilerlemiş, yapı nispeten daha sünek bir davranış sergilemiştir. PL-30-C modelinde ise kırılma daha erken deformasyon aşamasında başlamış, plastikleşme sınırlı kalmış ve kopma daha net ve ani şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum, aks sayısındaki artışın yapının şekil değiştirme kapasitesini azaltarak sünekliği düşürdüğünü göstermektedir.

Sayısal analizlerden elde edilen von Mises gerilme dağılımları ve eşdeğer plastik gerinim konturları, deneysel kırılma bölgeleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir. Özellikle PL-30-A modelinde plastikleşmenin daha geniş alanlara yayıldığı ve gerilme birikimlerinin daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. PL-30-B modelinde plastikleşme daha dar şeritlerde lokalize olurken, PL-30-C modelinde ise eşdeğer plastik deformasyon yalnızca yıldız uçlarına sınırlı şekilde yansımış, yapının kırılgan karakteri vurgulanmıştır.

FEA (Sonlu Elemanlar Analizi) ile elde edilen yük-uzama eğrileri, deneysel sonuçlarla özellikle elastik bölgede oldukça yakın sonuçlar sunmuştur. PL-30-A modelinde, deneysel eğri ile FEA eğrisi hem taşıma kapasitesi hem de uzama açısından kısmen örtüşmekte, ancak FEA eğrisi deneysel verinin altında seyretmektedir. PL-30-B ve PL-30-C modellerinde ise bu fark daha da belirginleşmiş, özellikle plastik bölge sonrası davranışlarda FEA eğrilerinin deneysel veriden sapma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu farklar, çatlak oluşumu ve kopma gibi fiziksel olayların sonlu eleman analizlerinde tam olarak modellenememesinden kaynaklanabilir.

Sonuç olarak, PL-30 serisi numunelerde aks sayısının artmasıyla birlikte hem taşıma kapasitesinde hem de süneklik düzeyinde kayda değer azalmalar meydana gelmiştir. PL-30-A modeli, optimum aks sayısıyla mekanik performans açısından seride en üstün davranışı sergilerken, PL-30-C modeli ise düşük taşıma kapasitesi ve sınırlı deformasyon kabiliyeti ile kırılgan bir yapı profili çizmiştir. Tasarımsal olarak değerlendirildiğinde, daha az aks sayısına sahip yapıların 30° yıldız açıklığı altında daha avantajlı mekanik performans sunduğu ve bu durumun hem deneysel hem de sayısal analizlerle doğrulandığı sonucuna varılmıştır.

40^0 modellerinin karşılaştırmalı analizi

PL-40 serisi numunelerde aks sayısındaki artış, önceki serilerde olduğu gibi mekanik performans üzerinde belirgin bir etki oluşturmuştur. PL-40-A modeli, yaklaşık 37,5 kN'luk maksimum taşıma kapasitesi ve 12 mm civarındaki uzama değeriyle seride en yüksek dayanımı gösteren numune olmuştur. Beş aksa sahip PL-40-B modeli ise yaklaşık 27,5 kN'luk yük taşıma kapasitesine ve 8 mm'lik uzama kapasitesine sahiptir. PL-40-C modeli ise 13 kN seviyelerinde maksimum yük taşıyabilmiş ve yalnızca 4 mm uzama ile test sonlandırılmıştır. Bu sonuçlar, aks sayısının artırılmasıyla birlikte yapının hem taşıma kapasitesinin hem de sünekliğinin azaldığını göstermektedir.

Kırılma gözlemleri ve deformasyon modları incelendiğinde, üç modelde de çatlak oluşumlarının yıldız boşluklarının uç noktalarında yoğunlaştığı ve kırılma hatlarının genellikle bu bölgeler üzerinden ilerlediği görülmüştür. PL-40-A modelinde kırılmalar daha yayılmış ve orta bölgelerden geçen bir çatlama şekli sergilerken, PL-40-C modelinde kırılma daha erken aşamada ve minimum deformasyonla gerçekleşmiştir. Özellikle PL-40-C numunesinde kırılma, yapının rijitliğinin artışı nedeniyle daha kırılgan bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Sayısal analiz sonuçları ile deneysel bulgular büyük ölçüde örtüşmektedir. Von Mises gerilme dağılımları, çatlama öncesinde yüksek gerilme yoğunlaşmasının yıldız uçlarının birbirine en yakın olduğu bölgelerde toplandığını ortaya koyarken; eşdeğer plastik gerinim

konturları da bu bölgelerde plastikleşmenin başladığını açıkça göstermektedir. Bu durum, FEA modelinin özellikle plastikleşme davranışlarının lokalizasyonunu başarılı bir şekilde yakalayabildiğini göstermektedir.

PL-40-A ve PL-40-B modellerinde, FEA tarafından öngörülen taşıma kapasitesi deneysel eğrilerin altında kalmasına rağmen, genel yük-uzama eğilimi benzerlik göstermektedir. PL-40-C modelinde ise deneysel ve FEA eğrileri elastik bölgede iyi bir uyum göstermiş, plastikleşme sonrası farklılıklar daha belirginleşmiştir. Bu farklılıklar, özellikle çatlama sonrası ani kapasite kayıplarının FEA ile tam olarak modellenememesinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, PL-40 serisinde aks sayısının artırılması, yapının sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde düşürmüştür. Dört akslı PL-40-A modeli en yüksek mekanik performansı gösterirken, altı akslı PL-40-C modeli ise daha erken kırılma ve düşük deformasyon kapasitesi ile en zayıf numune olmuştur. Bu bulgular, daha düşük aks sayısına sahip yapıların, 40°'lik yıldız geometrisinde de mekanik açıdan daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Yıldız açılarının etkisi

Yıldız açısı arttıkça (20° → 40°), taşıma kapasitesinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Örneğin, 4 akslı modeller karşılaştırıldığında PL-20-A yaklaşık 36,5 kN, PL-30-A yaklaşık 38,5 kN, PL-40-A ise yaklaşık 37,5 kN seviyelerinde yük taşımış olsa da, PL-30-A istisnai olarak en yüksek kapasiteye ulaşmıştır. Ancak genel olarak 30° ve 40° açılar, artan rijitlik nedeniyle sünekliği azaltmıştır. Yıldız açıları daraldıkça (20°), daha esnek bir deformasyon davranışı oluşmakta ve plastikleşme yayılımı daha dengeli olmaktadır. Bu durum, özellikle PL-20 modellerinde çatlama hattının geniş bir alana yayılması ile desteklenmiştir.

Kırılma modları ve gerinim yayılımı

Her seride çatlamalar, yıldız uçlarının en yakın olduğu zayıf bölgelerde yoğunlaşmış ve kırılma bu doğrultuda ilerlemiştir. Özellikle yüksek aks sayısına sahip modellerde çatlaklar daha hızlı ve daha belirgin şekilde oluşmuştur. Sayısal analizlerde elde edilen von Mises gerilme dağılımları ve eşdeğer plastik gerinim konturları, deneysel kırılma bölgeleriyle yüksek çakışma göstermiştir. Bu, FEA analizlerinin özellikle plastikleşme başlangıcının öngörülmesinde başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

ST-1 Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-1 tonoz modeli (Şekil 56) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Analizde tonozun kenar bölgeleri sabit mesnet koşullarıyla modellenmiş ve yapının doğal titreşim frekansları ile mod şekilleri elde edilmiştir. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 49,93 Hz, 100,09 Hz, 102,28 Hz, 158,1 Hz, 182,46 Hz ve 258,79 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 49,93 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

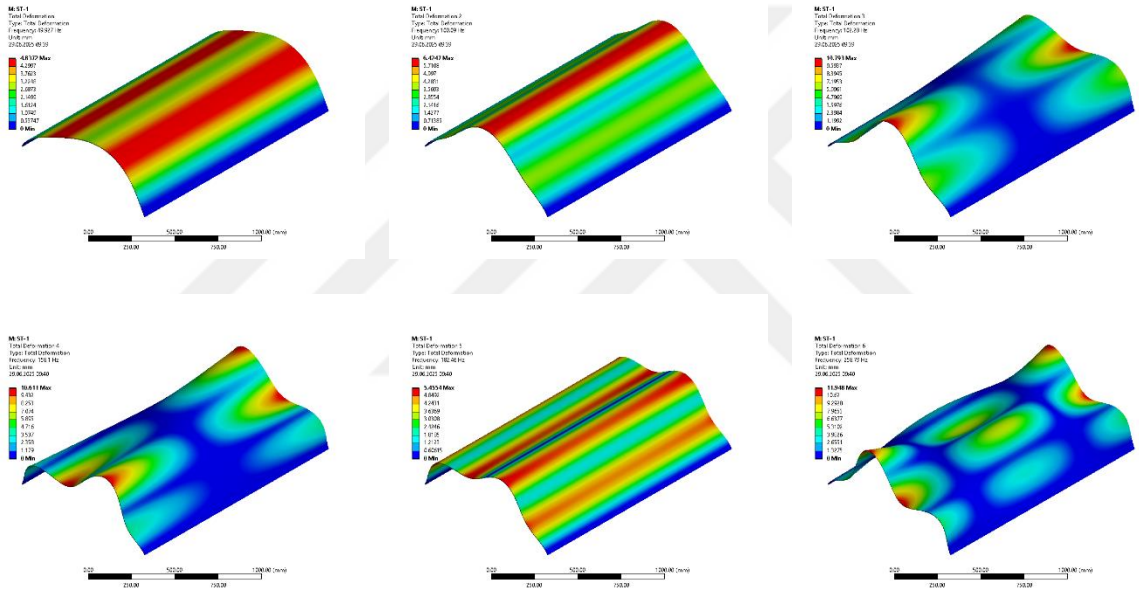
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 57), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 4,84 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 2,19 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve altıncı modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 11,95 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,04 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %46,72 gibi oldukça yüksek bir katılım sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, X doğrultusundaki dinamik yüklemeler altında temel modun kritik öneme sahip olduğunu ve dinamik analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun tüm doğrultularda %99,996 ila %100 arasında değişen oranlarda kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır. Sonuç olarak, ST-1 tonoz modelinin modal analiz sonuçları yapının dinamik karakteristiklerinin başarılı bir şekilde belirlenmesini sağlamış ve gelecekteki dinamik yükleme analizleri için temel veri tabanını oluşturmuştur.



Şekil 56. ST-1 deney modeli

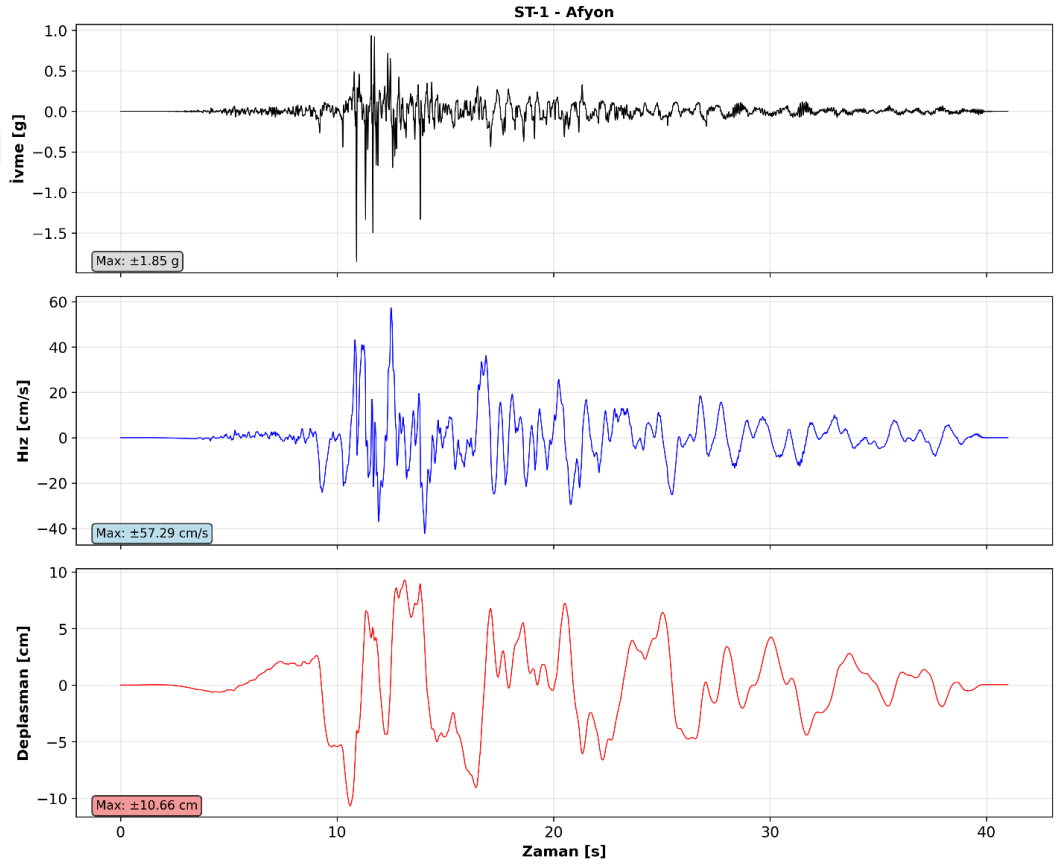


Şekil 57. ST-1 modal deformasyon şekilleri

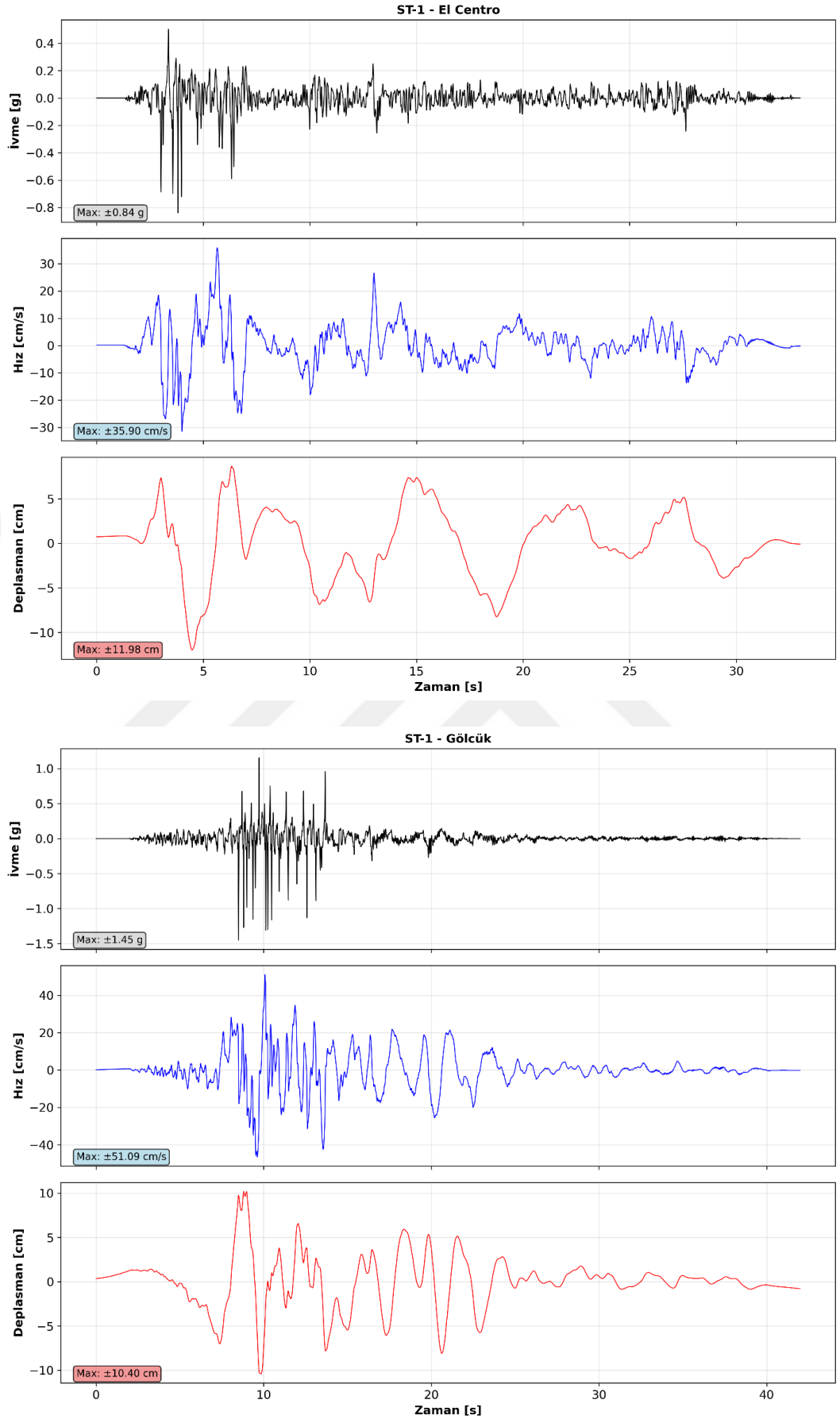
Dinamik tepki değerlendirmesi

ST-1 modeline ait dinamik tepki değerlendirmesi, 11 farklı deprem yer hareketine karşı oluşan tepkilerin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. İvme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Şekil 58 ve Şekil 59) üzerinden yapılan incelemede, modelin maksimum ivme tepkisi Afyon depreminde 1,85 g ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bunu sırasıyla Kobe (1,55 g), Gölcük (1,45 g) ve Seferihisar (1,42 g) depremleri takip etmiştir. Buna karşın en düşük maksimum ivme Elbistan (0,44 g) ve Loma (0,75 g) depremlerinde gözlenmiştir. İvme radar grafiği de bu dağılımı açık biçimde ortaya koymakta, modelin belirli depremlere karşı daha yüksek dinamik uyarılara maruz kaldığını göstermektedir.

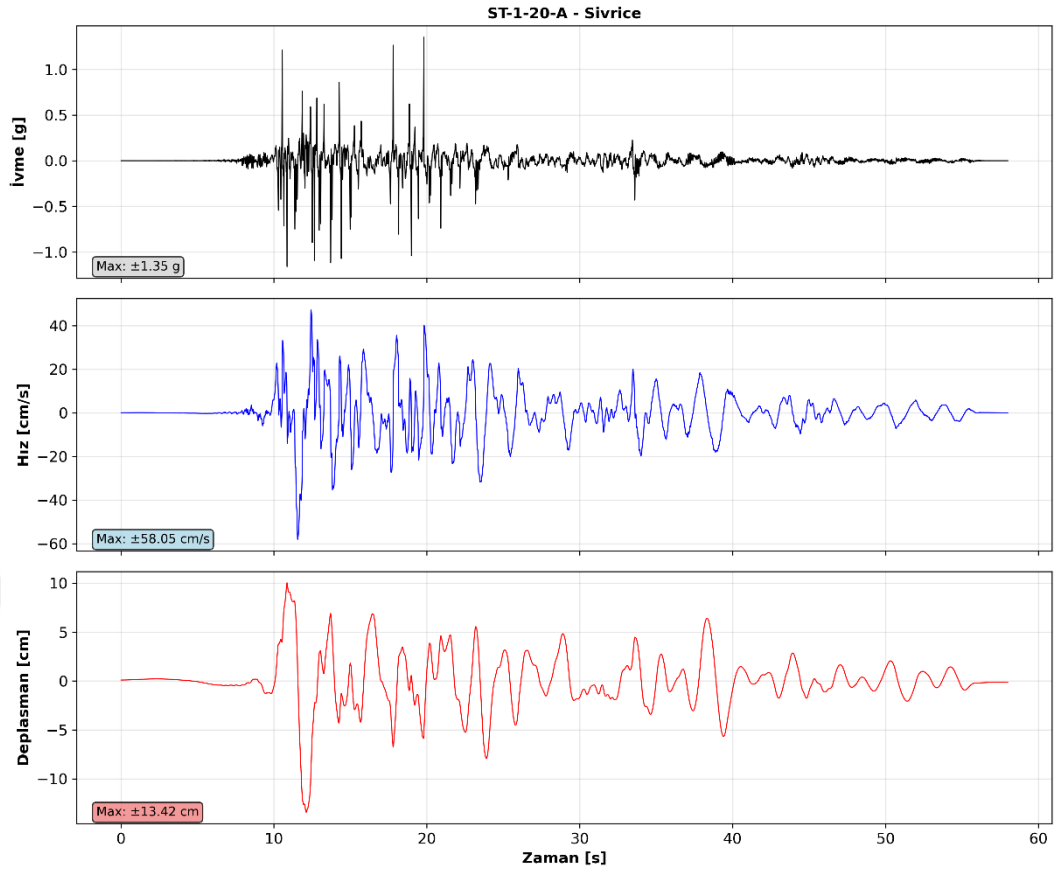
Hız ve deplasman analizleri de modelin dinamik davranışı açısından önemli bulgular sunmaktadır. En yüksek hız tepkisi 62,72 cm/s ile Düzce depreminde, onu 57,29 cm/s ile Afyon ve 57,15 cm/s ile Sivrice depremleri izlemiştir. Deplasman açısından ise en büyük yer değiştirme Elbistan (14,03 cm), Sivrice (13,34 cm) ve Düzce (12,24 cm) depremlerinde kaydedilmiştir. Bu durum, bazı depremlerde ivme küçük olmasına rağmen, frekans içeriğinin modele etkili şekilde enerji aktarabildiğini ve büyük deplasmanlara yol açabildiğini göstermektedir. Sonuç olarak ST-1 modelinin dinamik performansı, deprem spektrumuna duyarlı olarak farklılık göstermektedir ve bu, modelin belirli frekans içeriklerine karşı daha hassas olduğunu ortaya koymaktadır.



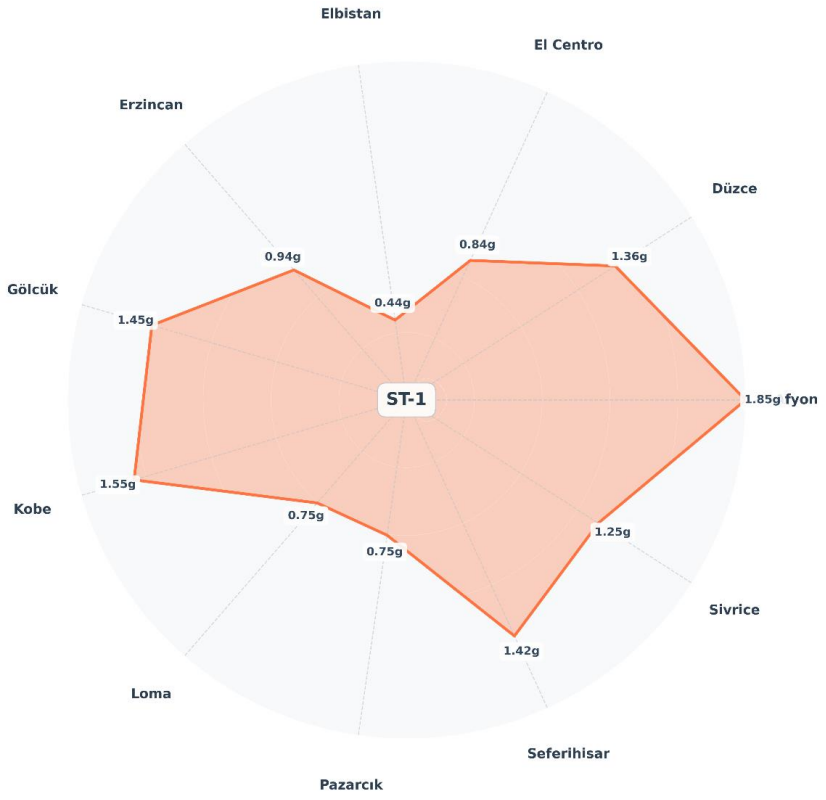
Şekil 58. ST-1 modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice)



Şekil 58. ST-1 modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) (devamı)



Şekil 58. ST-1 modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) (devamı)

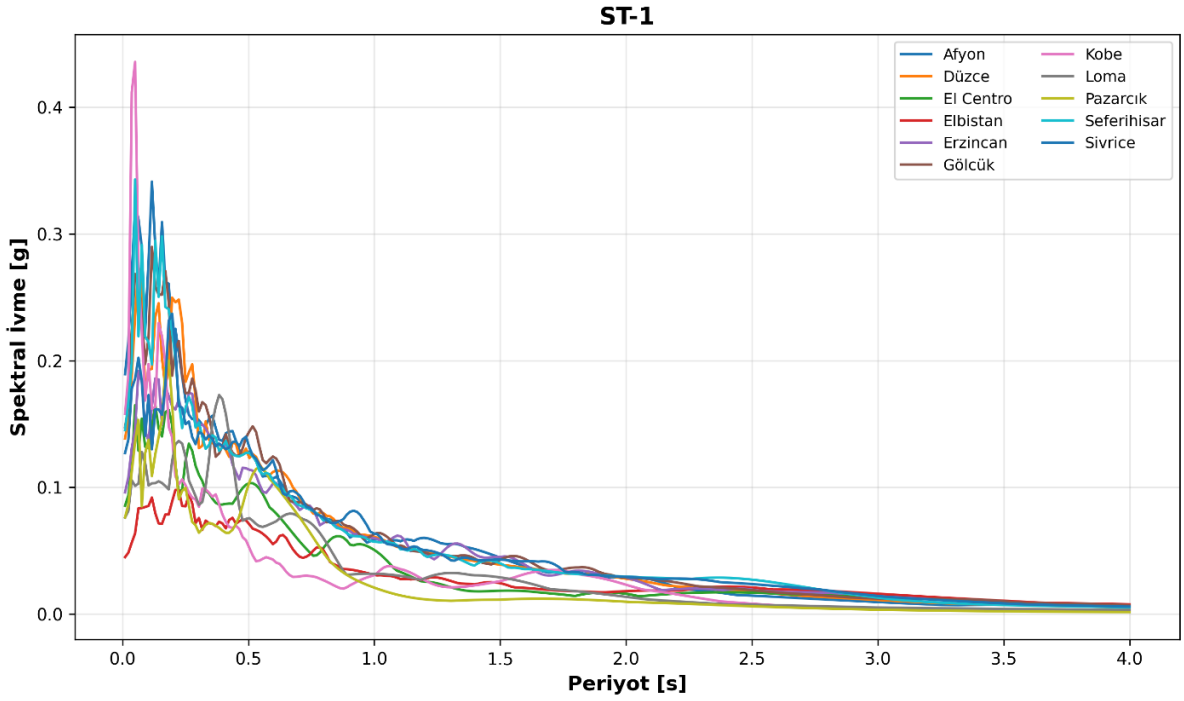


Şekil 59. ST-1 modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1 modeline ait 11 farklı deprem kaydına karşılık elde edilen spektral ivme grafiği (Şekil 60), yapı modelinin periyot-frekans aralığında gösterdiği dinamik tepkileri ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, özellikle kısa periyot aralığında (0.0–0,5 s) belirgin tepe değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, ST-1 modelinin daha çok kısa periyotlu (yüksek frekanslı) titreşim bileşenlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. En yüksek spektral ivme, yaklaşık 0,1 s periyot civarında Kobe depreminde 0,45 g düzeyinde gözlenmiştir. Bunu sırasıyla Seferihisar (~0,37 g), Düzce (~0,34 g) ve Afyon (~0,32 g) depremleri takip etmektedir. Bu sonuçlar, bu depremlerin yapı üzerinde daha yüksek titreşimli etkiler oluşturduğunu ve dolayısıyla yatay kuvvet taleplerinin arttığını göstermektedir.

Orta ve uzun periyot aralığında (1,0 s sonrası), tüm deprem kayıtlarına ait spektral ivme değerlerinin belirgin şekilde azaldığı, 0,05–0,10 g seviyelerine kadar düştüğü izlenmektedir. Bu durum, modelin daha düşük frekanstaki (uzun periyotlu) bileşenlere karşı sınırlı dinamik tepki verdiğini ve enerji birikiminin büyük ölçüde kısa periyotlu davranışla sınırlı kaldığını göstermektedir. Elbistan ve Pazarcık gibi bazı depremlerde ise başlangıçtaki spektral ivme düzeyleri diğerlerine göre daha düşük kalmıştır. Genel olarak, bu spektral değerlendirme ST-1 modelinin rijit yapısal davranış özelliklerini yansıtmakta ve tasarım/performance tabanlı mühendislik analizleri açısından kısa periyotlara karşı optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



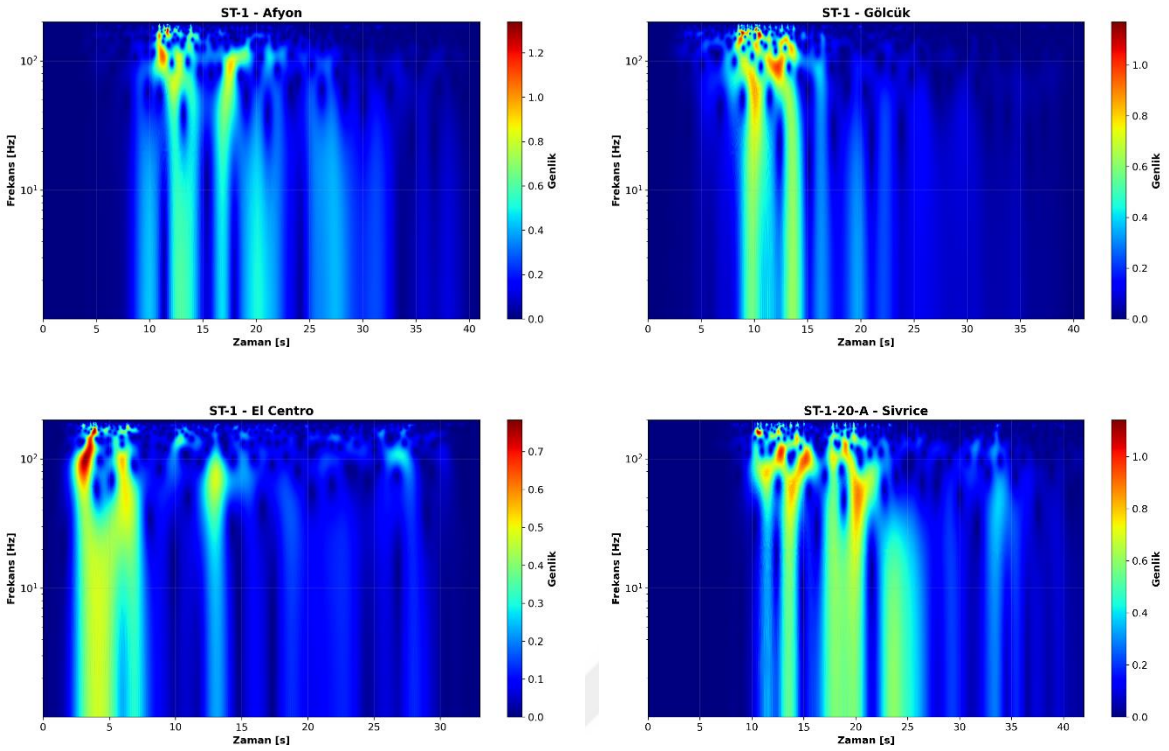
Şekil 60. ST-1 modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1 modeline ait wavelet spektrogram analizleri (Şekil 61), yapının farklı deprem kayıtlarına verdiği zamana bağlı frekans tepkilerini ayrıntılı olarak ortaya koymaktadır. Analiz edilen 11 deprem verisinin tamamında, baskın frekans bileşenlerinin 10 Hz ile 120 Hz aralığında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Afyon, Sivrice ve Seferihisar kayıtlarında 1,0'in üzerinde genliklere ulaşan geniş bantlı ve sürekliliği olan rezonans bölgeleri mevcuttur. Bu durum, modelin yüksek frekanslı bileşenlere duyarlılığını ve rijit yapısını yansıtmaktadır. Özellikle Sivrice depreminde 10–35 saniye aralığında yoğun bir frekans aktivitesi görülmüş, bu da modelin belirgin bir şekilde rezonansa girerek yüksek enerji absorbe ettiğini göstermektedir.

Öte yandan, Düzce, El Centro ve Erzincan gibi depremlerde kısa sürede meydana gelen ani frekans patlamaları, yapının ani yüklemelere verdiği hızlı ve dinamik tepkileri göstermektedir. Loma ve Kobe kayıtlarında ise daha dar bantlı frekans bileşenleri ve sınırlı rezonans süresi tespit edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, ST-1 modelinin frekans-zaman düzleminde farklı deprem spektrumlarına uyum sağlayarak geniş bir rezonans aralığında tepkiler verebildiği, özellikle 20–100 Hz arasındaki frekanslara karşı oldukça hassas olduğu ortaya çıkmaktadır.

ST-1 modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analiz sonuçları değerlendirildiğinde, zamana bağlı frekans cevabının her deprem için farklı yoğunluklarda ancak belirli bantlarda tekrarlayan bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Afyon, Seferihisar, Sivrice ve Düzce kayıtlarında, genliğin yüksek olduğu bölgeler genellikle 50–120 Hz aralığında yoğunlaşmıştır. Bu aralık, modal analizden elde edilen ilk üç doğal frekansla (49,93 Hz, 100,09 Hz ve 102,28 Hz) önemli düzeyde çakışmaktadır. Daha ileri modlara ait frekanslar (158,1 Hz ve üzeri) ise wavelet spektrogramlarında nadiren baskın hale gelmiştir. Bu durum, yüksek frekanslı modların titreşim enerjisi açısından daha az katkı sağladığını ve yapının esas dinamik davranışının ilk üç mod etrafında şekillendiğini göstermektedir. Sonuç olarak, wavelet analizlerinin sunduğu zaman-frekans çözünürlüğü ile modal frekansların uyumlu olduğu ve ilk modların yapı davranışında belirleyici rol oynadığı görülmektedir. Bu bulgular, yapının dinamik karakteristiğinin hem deneysel verilerle hem de analitik modelle tutarlı şekilde belirlendiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 61. ST-1 modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi: (Afyon, Gölcük, El Centro, Sivrice)

ST-1-20-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-1-20-A tonoz modeli (Şekil 62) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristikleri detaylı olarak incelenmiş ve serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Model üzerinde uygulanan yirmi adet nokta yükünün varlığı, yapının dinamik davranışında önemli değişikliklere neden olmuştur. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 46,85 Hz, 90,3 Hz, 95,05 Hz, 139,53 Hz, 159,08 Hz ve 212,57 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel modun 46,85 Hz değerinde gerçekleşmesi, yüklü durumda yapının doğal frekansının düştüğünü göstermekte ve bu durum eklenen kütlelerin yapının rijitlik/kütle oranını değiştirdiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen mod şekilleri (Şekil 63), nokta yüklerin varlığının tonoz yapının deformasyon karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Birinci mod düzenli eğilme karakteristiği sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 4,97 mm), ikinci modda daha belirgin asimetrik deformasyon paterni gözlenmiştir (6,39 mm). Üçüncü modda karmaşık üç boyutlu deformasyon şekilleri ortaya çıkmış (10,87 mm) ve nokta yüklerin bulunduğu bölgelerde lokal deformasyon konsantrasyonları oluşmuştur. Dördüncü ve beşinci modlarda sırasıyla 10,38 mm ve 7,24 mm maksimum deformasyon değerleri elde edilirken, altıncı modda 11,50 mm'ye ulaşan en yüksek deformasyon değeri hesaplanmıştır. Nokta yüklerin mod

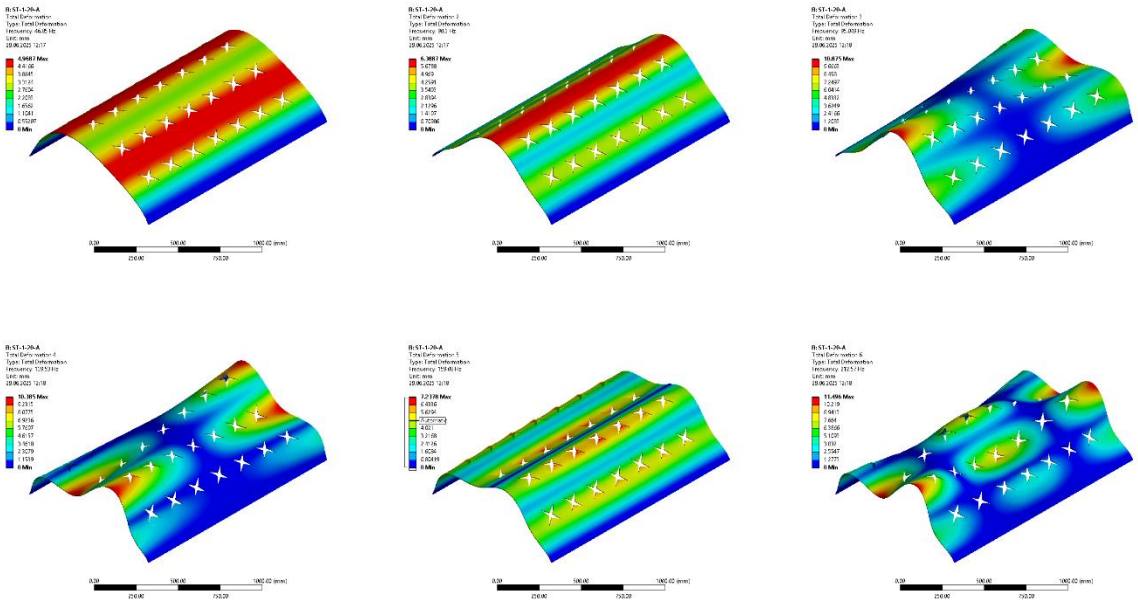
şekilleri üzerindeki etkisi, özellikle yükleme noktalarında oluşan deformasyon konsantrasyonları şeklinde kendini göstermiştir.

Efektif kütle analizi sonuçları, yüklü durumda yapının farklı doğrultulardaki dinamik tepkisinin değiştiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,04 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın hala temel mod tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,003 ton değeri ile en yüksek efektif kütleye sahip olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin ikinci mod tarafından yönetildiğini işaret etmektedir. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,001 ton değeri ile dominant olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, nokta yüklerin varlığının yapının doğrultusal dinamik davranışını farklılaştırdığını göstermektedir.

Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %45,01 gibi yüksek bir katılım sergilediği, ancak bu değerin yüksüz duruma kıyasla azaldığı görülmektedir. Y doğrultusunda ikinci modun %3,19, Z doğrultusunda ise üçüncü modun %1,47 oranında katılım gösterdiği tespit edilmiştir. Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun X doğrultusunda %100, Y ve Z doğrultularında da %100 oranında kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, nokta yüklerin varlığına rağmen ilk altı modun yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 62. ST-1-20-A deney modeli



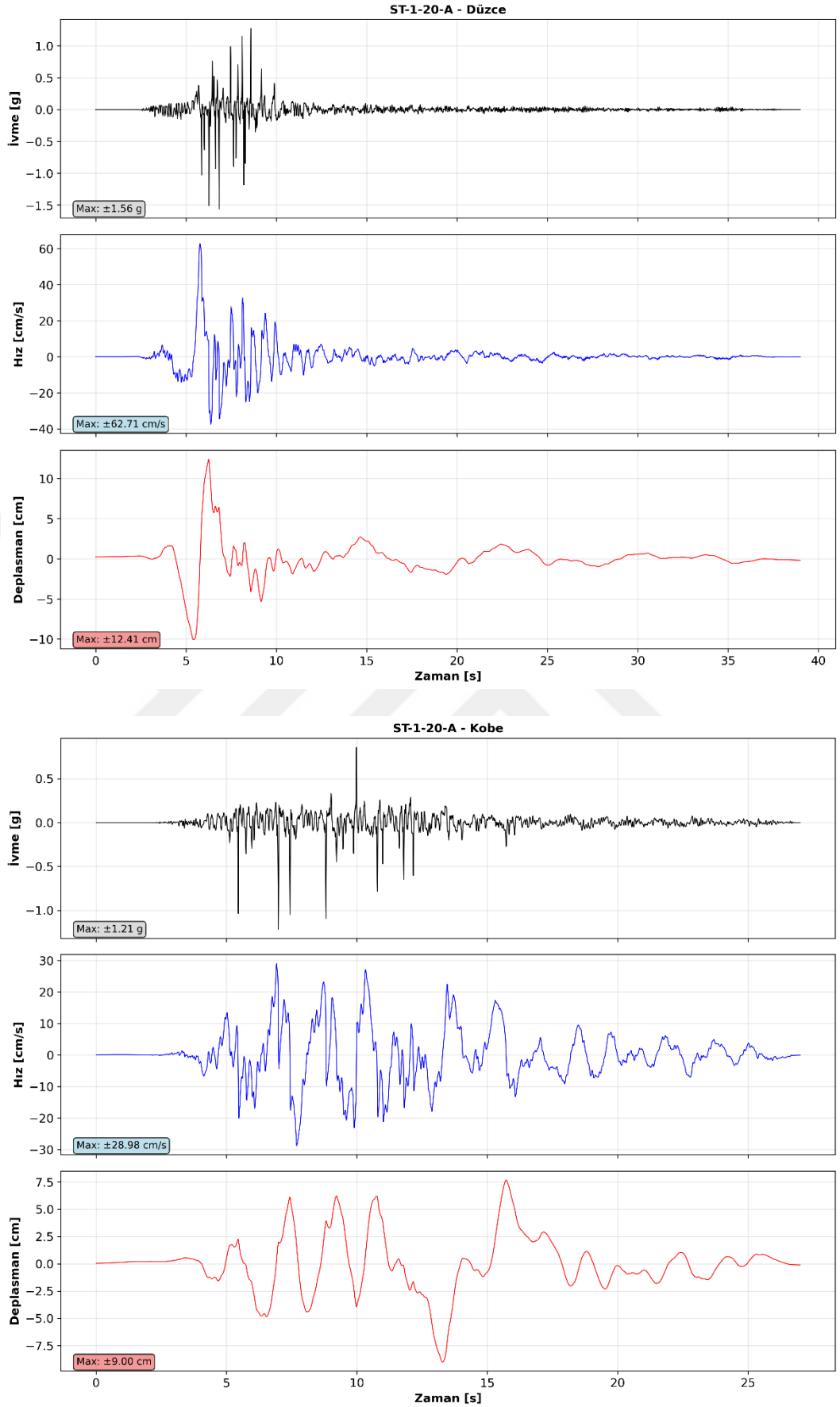
Şekil 63. ST-1-20-A modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

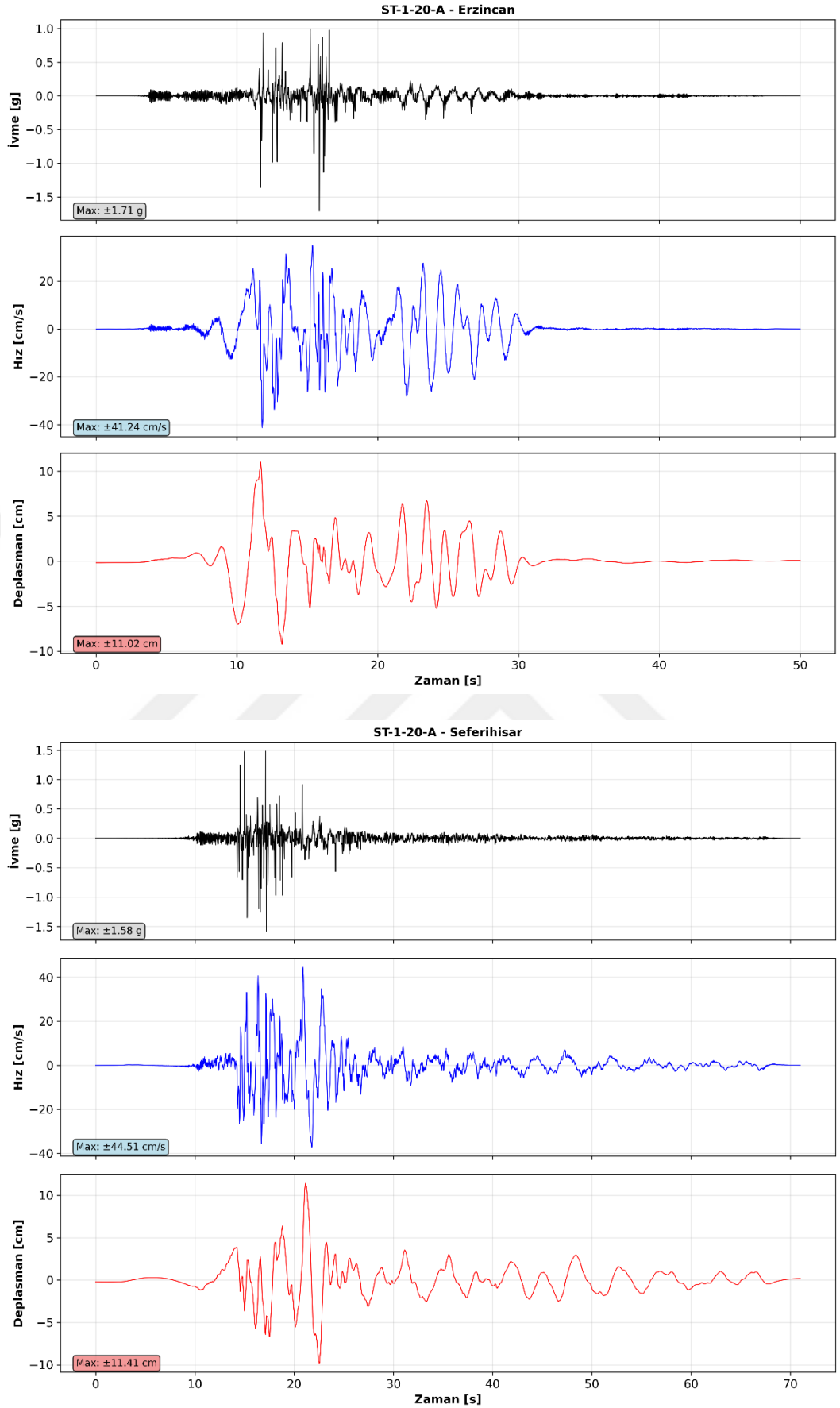
ST-1-20-A modelinin ivme yanıtları (Şekil 64 ve Şekil 65) incelendiğinde, en yüksek tepki Afyon depremi altında 2,04 g ile ölçülmüş; bunu Erzincan (1,71 g), Gölcük (1,65 g), Seferihisar (1,58 g), Düzce (1,56 g) ve Sivrice (1,35 g) depremleri takip etmiştir. En düşük ivme cevabı ise 0,72 g ile Elbistan depreminde gözlemlenmiştir.

Hız yanıtı açısından en yüksek mutlak değer 62,71 cm/s ile Düzce depremi altında elde edilmiştir. Bunu Sivrice (58,05 cm/s), Afyon (57,62 cm/s) ve Gölcük (53,17 cm/s) depremleri takip ederken, Kobe (28,98 cm/s) ve Loma (35,33 cm/s) en düşük hız tepkilerinin gözlendiği depremler olmuştur. Bu farklılıklar, sismik kayıtların enerjisel içerikleri ile yapının frekans spektrumu arasındaki rezonans ilişkisi bağlamında değerlendirildiğinde anlam kazanmaktadır.

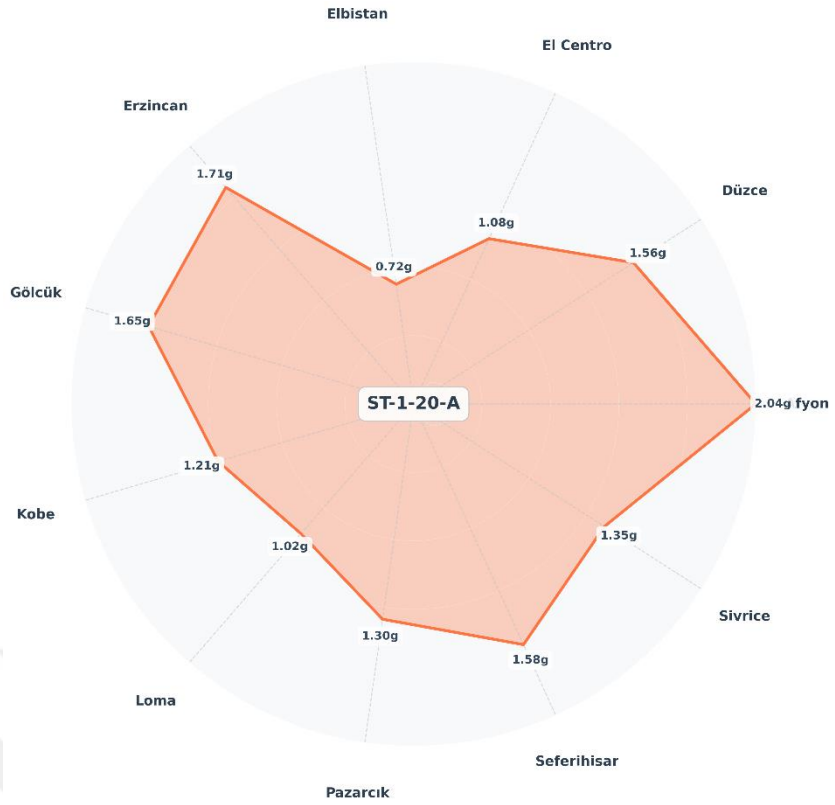
Deplasman yanıtları değerlendirildiğinde, en büyük yer değiştirme 14,28 cm ile Elbistan depremi sırasında kaydedilmiş, bu durumu Sivrice (13,42 cm), Düzce (12,41 cm), El Centro (11,87 cm), Seferihisar (11,41 cm) ve Erzincan (11,02 cm) depremleri takip etmiştir. Bu sonuçlar, özellikle uzun süreli ve düşük frekans içeriğine sahip yer hareketlerinin yapıda daha yüksek genlikli salınımlara neden olduğunu göstermektedir. Göreli olarak düşük deplasman tepkileri Loma (7,03 cm) ve Kobe (9,00 cm) depremlerinde gözlenmiştir.



Şekil 64. ST-1-20-A ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Kobe, Erzincan, Seferihisar)



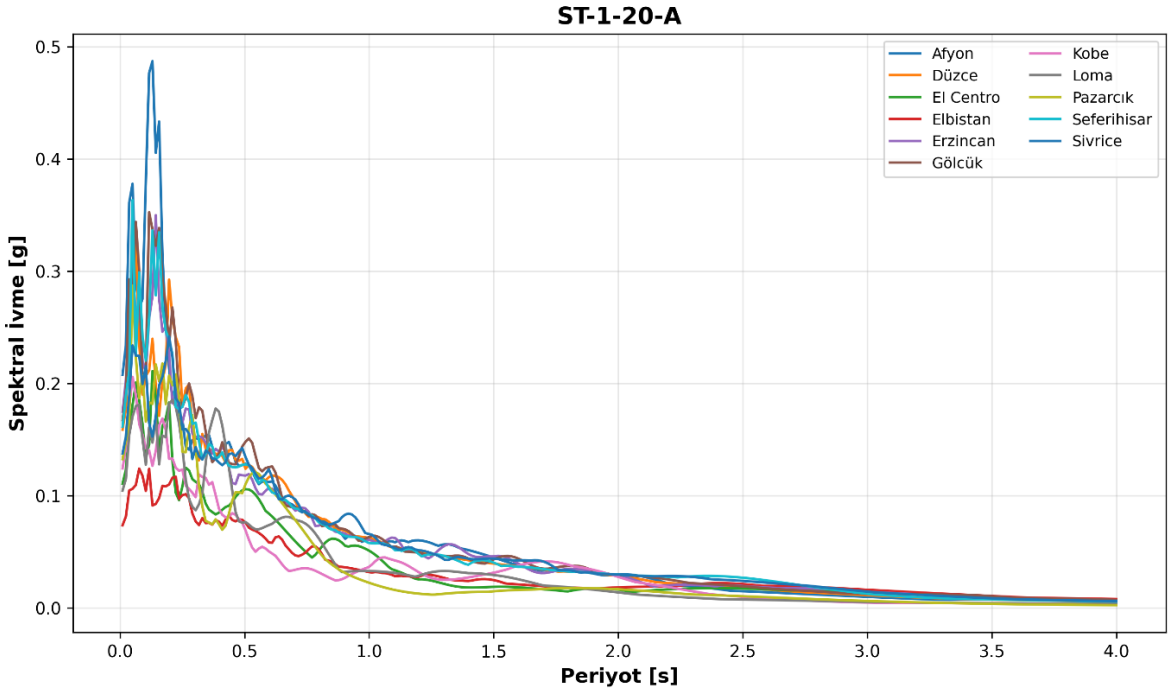
Şekil 65. ST-1-20-A ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Kobe, Erzincan, Seferihisar) (devamı)



Şekil 66. ST-1-20-A modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-20-A modelinin spektral ivme sonuçları (Şekil 66), modelin tüm periyot aralığında (0,0-4,0 s) oldukça dengeli bir dağılım sergilediğini göstermektedir. En yüksek ivme değerleri 0,30-0,35g aralığında gözlemlenmiş olup, bu değerler belirli bir periyot aralığında yoğunlaşmadan tüm spektruma yayılmıştır. Ayon ve Düzce depremlerinde kısa periyotlarda (0-0,5 s) 0,30-0,35g civarında tepkiler gözlemlenirken, El Centro ve Seferihisar depremlerinde tüm periyotlarda daha düşük ivme değerleri (0,15-0,25g) kaydedilmiştir. Modelin en önemli özelliği, herhangi bir periyot aralığında aşırı yüksek tepkiler göstermemesi ve geniş bir frekans bandında tutarlı davranış sergilemesidir. Bu durum, modelin çeşitli deprem türlerine karşı uyumlu bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 67. ST-1-20-A modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-20-A modeli için gerçekleştirilen wavelet spektrum analizleri (Şekil 67), yapının deprem etkisi altındaki frekans-zaman davranışını yüksek çözünürlükte ve detaylı bir biçimde ortaya koymaktadır. 11 farklı deprem kaydı üzerinden yapılan değerlendirmede, yapının baskın frekans cevabının genel olarak 10 Hz ile 130 Hz aralığında yoğunlaştığı, bu frekans bandında farklı depremlerin değişen zaman pencerelerinde yüksek genlikli ve süreklilik arz eden frekans kümelenmeleri oluşturduğu tespit edilmiştir. Modelin frekans tepkileri çoğunlukla 5 ila 30. saniyeler arasında yoğunlaşmış, bazı kayıtlarda ise geç zamanlı uyarılar da etkili olmuştur.

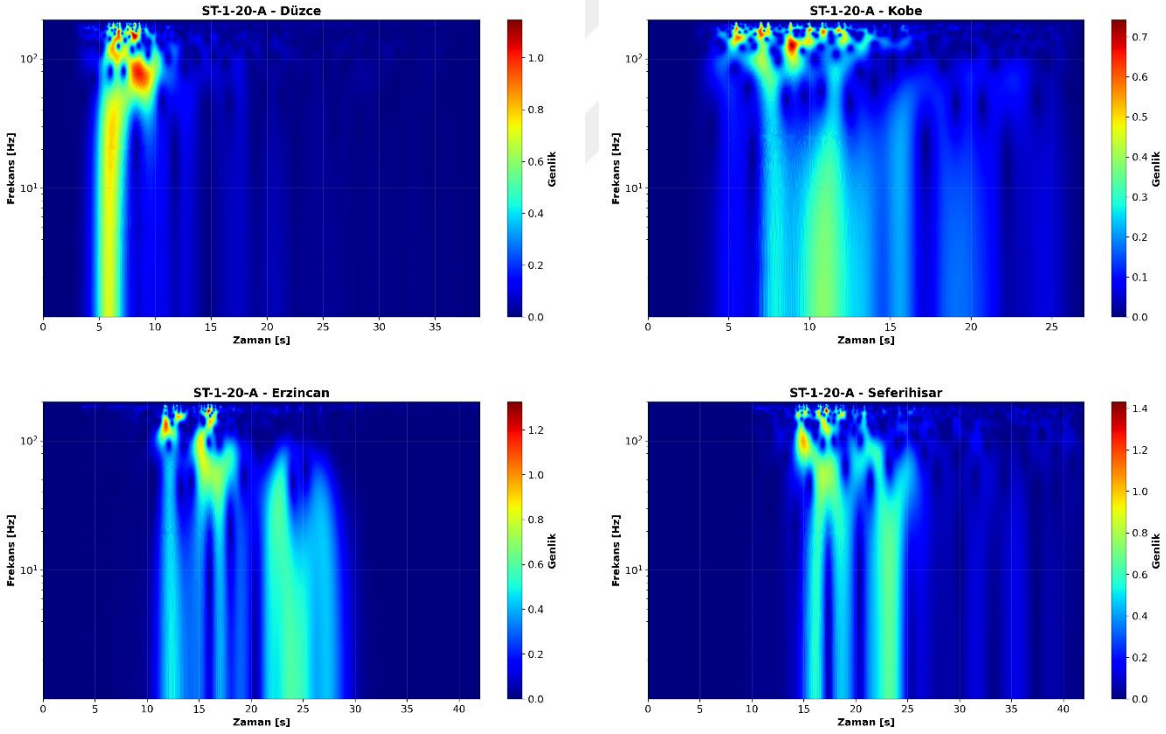
Afyon, Sivrice ve Seferihisar kayıtlarında, frekans cevabının 10–25 saniye aralığına yayıldığı ve yüksek frekans bileşenlerinin (yaklaşık 80–120 Hz) belirginleştiği görülmektedir. Özellikle Afyon depreminde 2,0'ın üzerinde genliklere ulaşılması, bu frekans bandında yapının rezonans davranışı sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Sivrice spektrumunda, genliği 1,0 seviyelerine kadar ulaşan frekans kümelenmeleri yapının uzun süreli ve istikrarlı enerji aktarımıyla karşılaştığını göstermektedir. Seferihisar kaydında ise 15–25 saniyelik süre boyunca gözlemlenen yüksek frekans kümelenmeleri (~100 Hz civarı), 1,4 genlik seviyelerine ulaşarak modelin bu deprem girdisine karşı kararlı ve güçlü bir dinamik cevap verdiğini işaret etmektedir.

El Centro, Gölcük ve Erzincan depremleri, zamana yayılan ve art arda aktive olan frekans bileşenleri ile karakterize edilmiştir. El Centro kaydında 5–20 saniye arasında belirginleşen ardışık frekans kümelenmeleri (~30–100 Hz) yapının orta-yüksek genlikli bir titreşim davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır. Gölcük ve Erzincan kayıtlarında da benzer şekilde 10–25

saniyelik zaman aralıklarında frekans kümelenmeleri sürmekte olup, genlikler çoğunlukla 0,5–0,8 arasında seyretmektedir. Bu kayıtlar, yapının sürekli ama rezonansa girmeyen, kontrollü bir modal tepki ürettiğini göstermektedir.

Elbistan ve Kobe depremleri ise görece daha düşük genlikli ve sınırlı spektral dağılıma sahip kayıtlar olarak değerlendirilmiştir. Elbistan kaydında 10–60 Hz aralığında orta frekans bileşenleri yoğunlaşmış, genlikler genellikle 0,4–0,6 seviyelerinde kalmıştır. Kobe spektrumu ise yaklaşık 90–120 Hz arasında kısa süreli aktivite göstermekte, ancak genlikler düşük düzeyde seyretmektedir. Bu durum, bu kayıtların yapı üzerinde sınırlı düzeyde modal aktivasyon yarattığını göstermektedir.

Düzce ve Loma depremleri, kısa süreli fakat yüksek frekans bileşenlerinin etkili olduğu örneklerdir. Düzce kaydında ilk 8 saniyede 90–130 Hz aralığında dar bantta fakat yüksek genlikli (~1,0) frekans kümelenmeleri görülmektedir. Loma kaydında da benzer şekilde 4–7 saniyelik zaman dilimi içerisinde yüksek frekans aktivasyonu (~100 Hz) izlenmiş, bu da modelin ani ve şok etkili yüklemelere karşı yüksek frekanslı ama kısa süreli bir cevabı etkin biçimde verdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 68. ST-1-20-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Kobe, Erzincan, Seferihisar)

ST-1-20-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

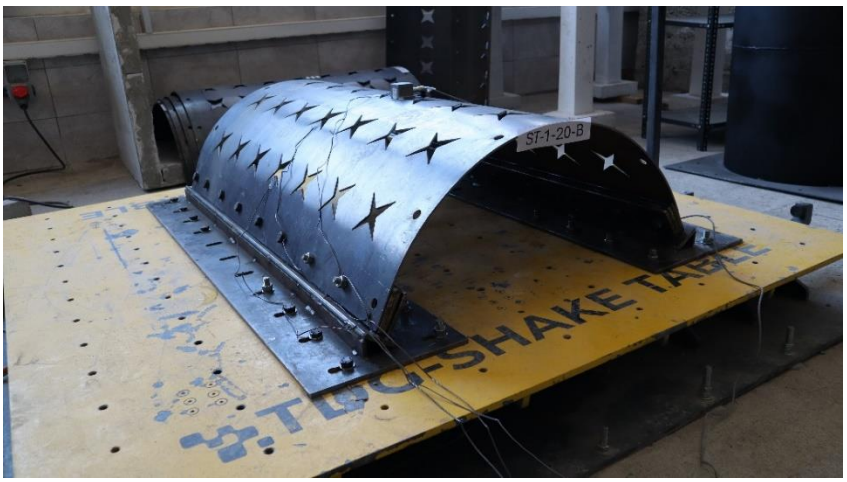
ST-1-20-B tonoz modeli (Şekil 68) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür.

Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 46,18 Hz, 89,62 Hz, 94,4 Hz, 136,9 Hz, 160,49 Hz ve 207,14 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 46,18 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

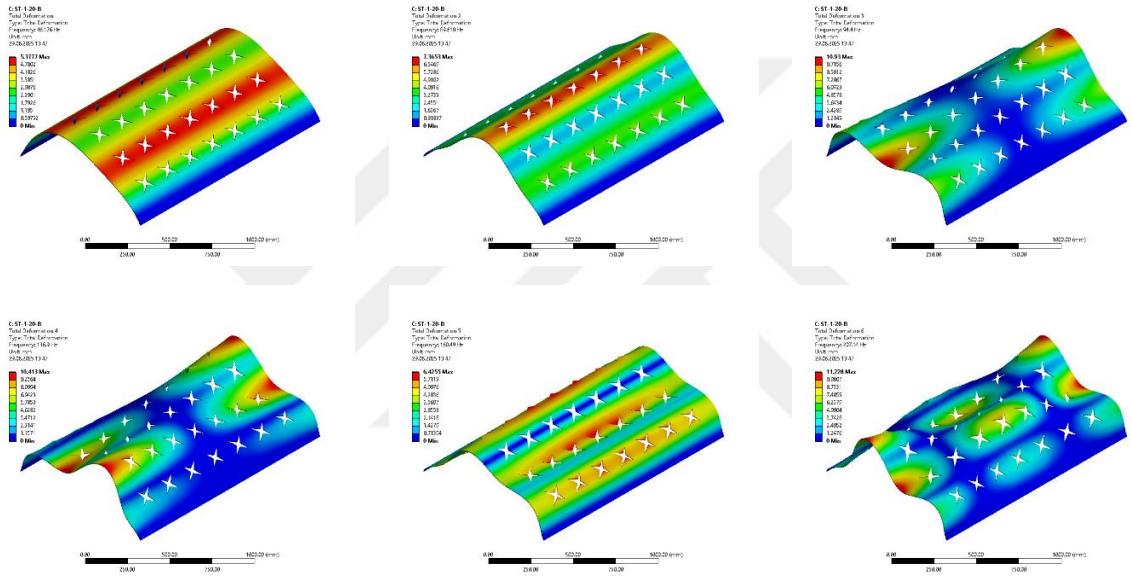
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 69), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 5,38 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 4,78 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve altıncı modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 11,23 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,036 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %44,29 gibi oldukça yüksek bir katılım sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, X doğrultusundaki dinamik yüklemeler altında temel modun kritik öneme sahip olduğunu ve dinamik analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun tüm doğrultularda %99,85 ila %100 arasında değişen oranlarda kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır. Sonuç olarak, ST-1-20-B tonoz modelinin modal analiz sonuçları yapının dinamik karakteristiklerinin başarılı bir şekilde belirlenmesini sağlamış ve gelecekteki dinamik yükleme analizleri için temel veri tabanını oluşturmuştur.



Şekil 69. ST-1-20-B deney modeli



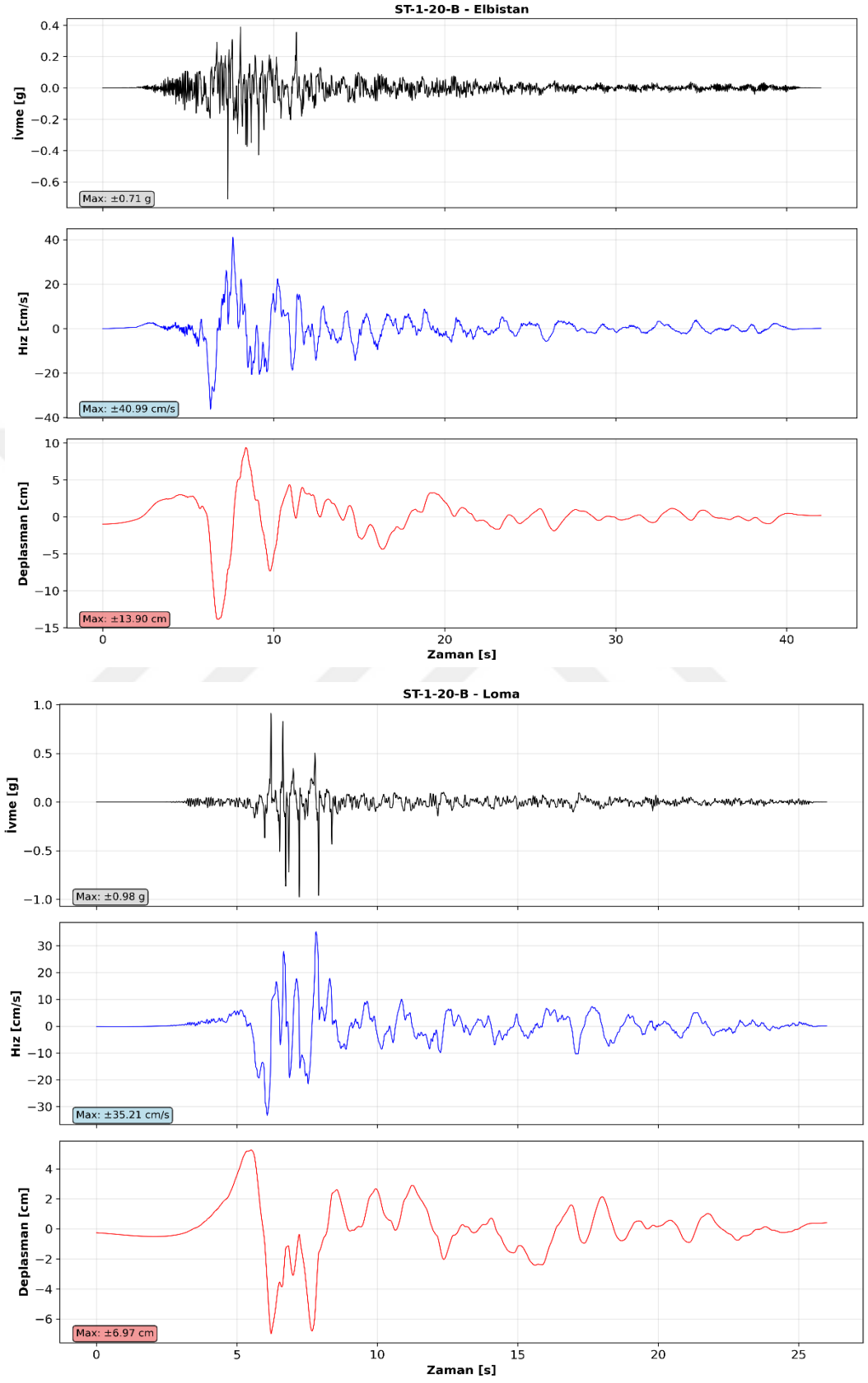
Şekil 70. ST-1-20-B modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

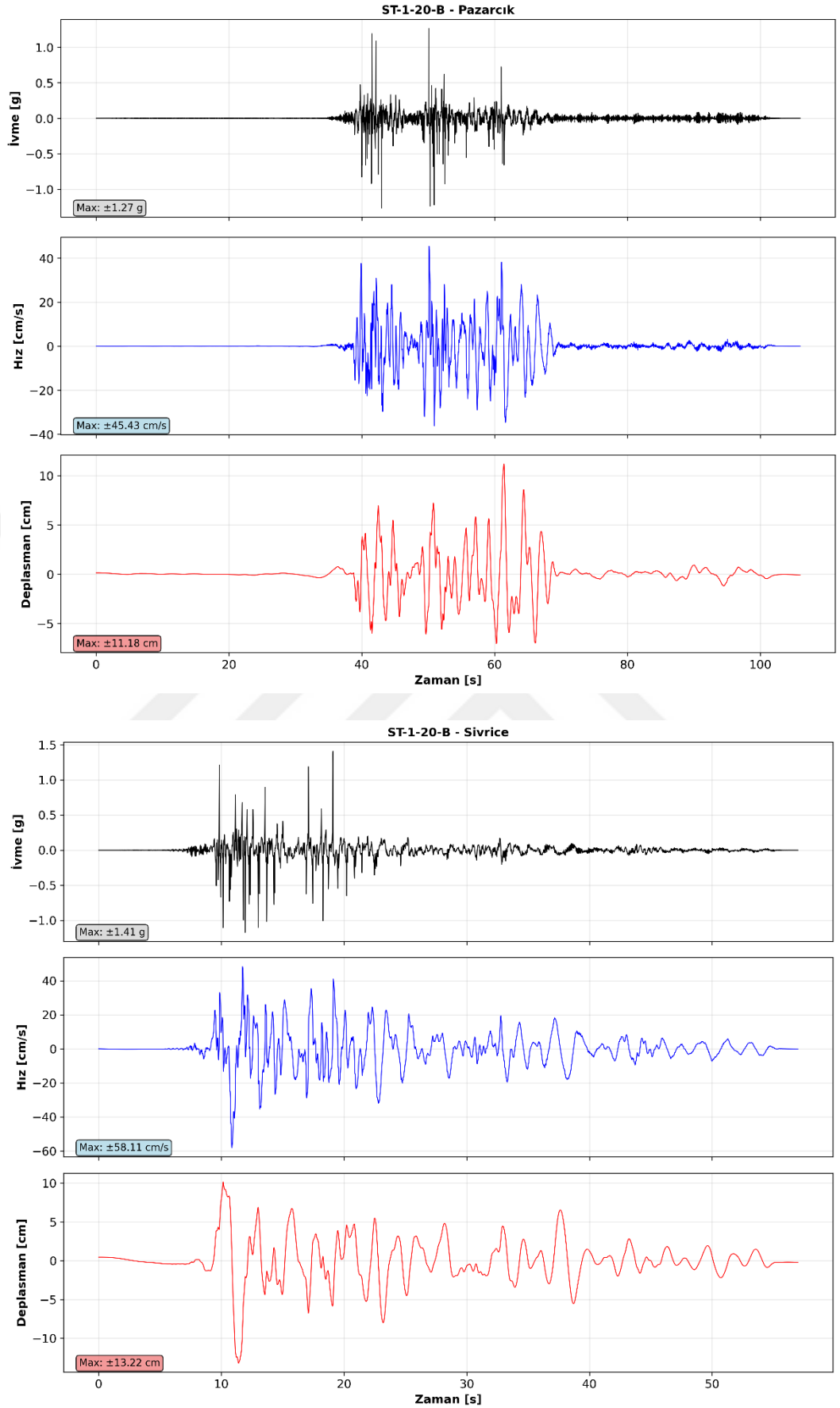
ST-1-20-B modeline ait ivme, hız ve yer değiştirme zaman serileri (Şekil 70 ve Şekil 71), yapı modelinin farklı deprem yer hareketlerine verdiği dinamik tepkileri kapsamlı bir biçimde ortaya koymaktadır. Afyon depreminde 1,90 g ile en yüksek ivme tepkisi gözlemlenmiş, bunu sırasıyla Gölcük (1,63 g), Erzincan (1,65 g) ve Seferihisar (1,60 g) depremleri takip etmiştir.

Hız grafiklerinde maksimum değer Düzce depreminde 64,50 cm/s olarak kaydedilmiş, ardından Sivrice (58,11 cm/s), Afyon (56,66 cm/s) ve Gölcük (53,08 cm/s) depremleri gelmiştir. Bu hız tepkileri, söz konusu depremlerin yapı üzerinde ani ve kuvvetli enerji transferi yarattığını ve modele büyük kinetik enerji aktardığını göstermektedir. Düzce depreminde kısa süreli fakat ani tepe hız değerleri görülmüş, bu da yüksek frekanslı enerji bileşenlerinin modele hızlı bir şekilde etki ettiğini düşündürmektedir.

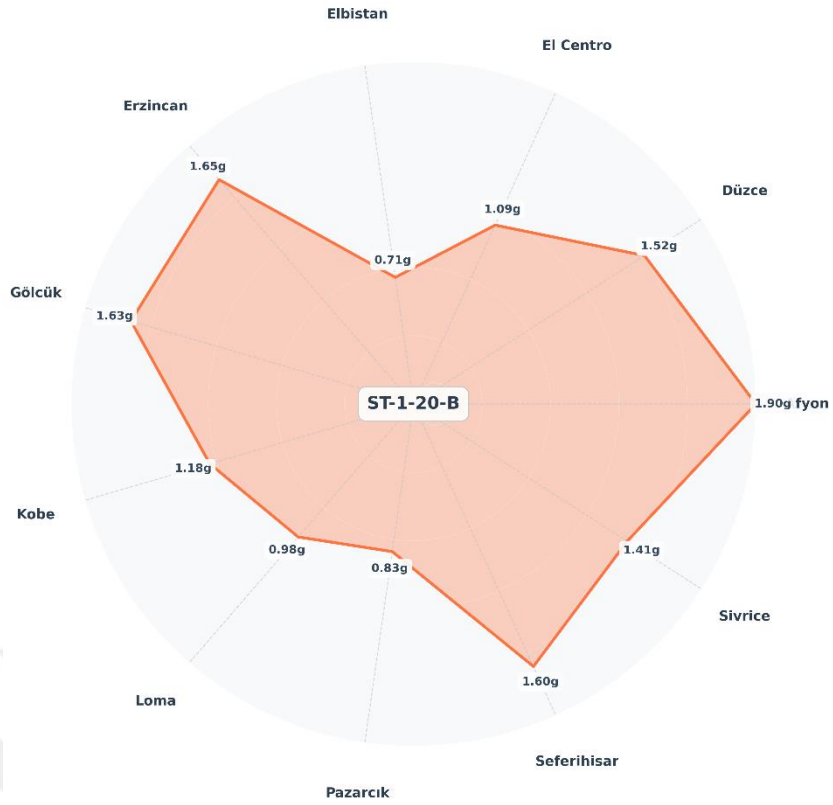
Deplasman tepkileri açısından bakıldığında en büyük yer değiştirme Elbistan (13,90 cm), Sivrice (13,22 cm) ve Düzce (12,81 cm) depremlerinde meydana gelmiştir.



Şekil 71. ST-1-20-B ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Loma, Pazarcık, Sivrice)



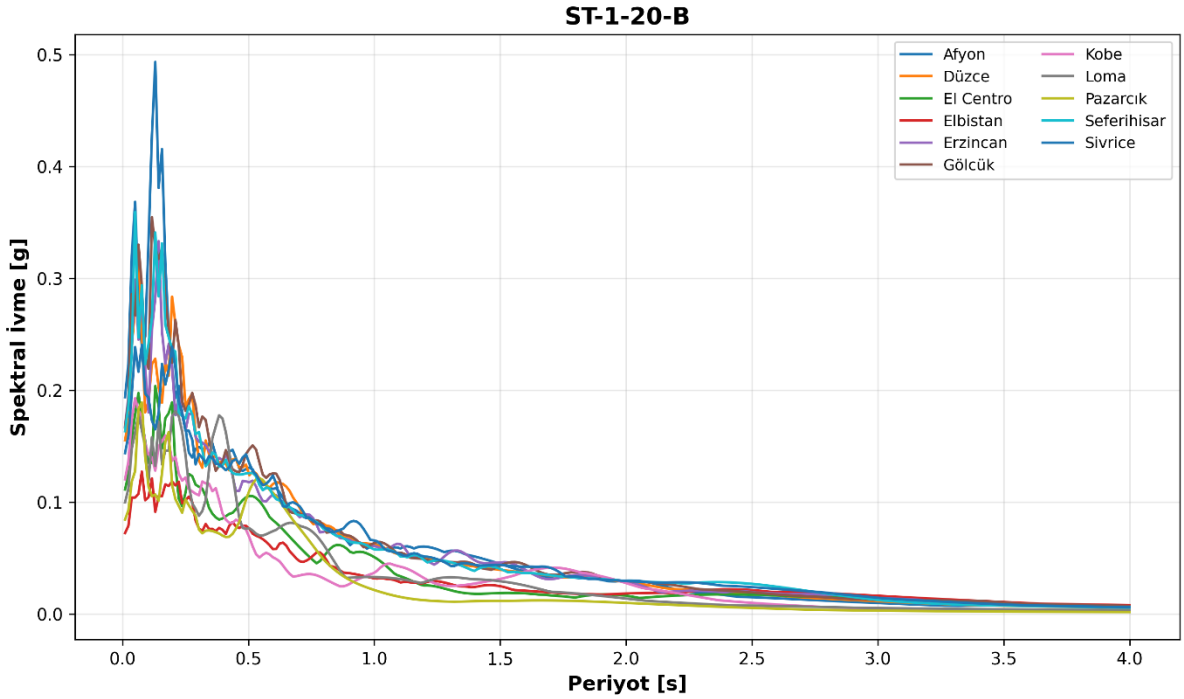
Şekil 70. ST-1-20-B ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Loma, Pazarcık, Sivrice) (devamı)



Şekil 72. ST-1-20-B modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-20-B modelinin performans analizleri (Şekil 72), modelin 1,0-2,5 saniye orta periyot aralığında kritik davranışlar sergilediğini ortaya koymaktadır. Erzincan ve Pazarcık depremlerinde bu aralıkta 0,35-0,40g seviyelerinde ölçülen pik ivmeler, modelin orta periyotlu deprem dalgalarına karşı yüksek duyarlılık gösterdiğini göstermektedir. Kısa periyotlarda (0-0,5 s) ivmelerin 0,25-0,30g aralığında kalması, modelin ST-1-20-C'ye kıyasla bu bölgede daha az duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Uzun periyotlarda (3,0-4,0 s) ivme değerlerinin 0,10-0,15g aralığında seyretmesi ise modelin bu frekans aralığında dengeli bir performans sergilediğini işaret etmektedir. Özellikle Sivrice ve Kobe depremlerinde orta periyotlarda gözlemlenen yüksek tepkiler, modelin bu deprem türlerine karşı özel olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



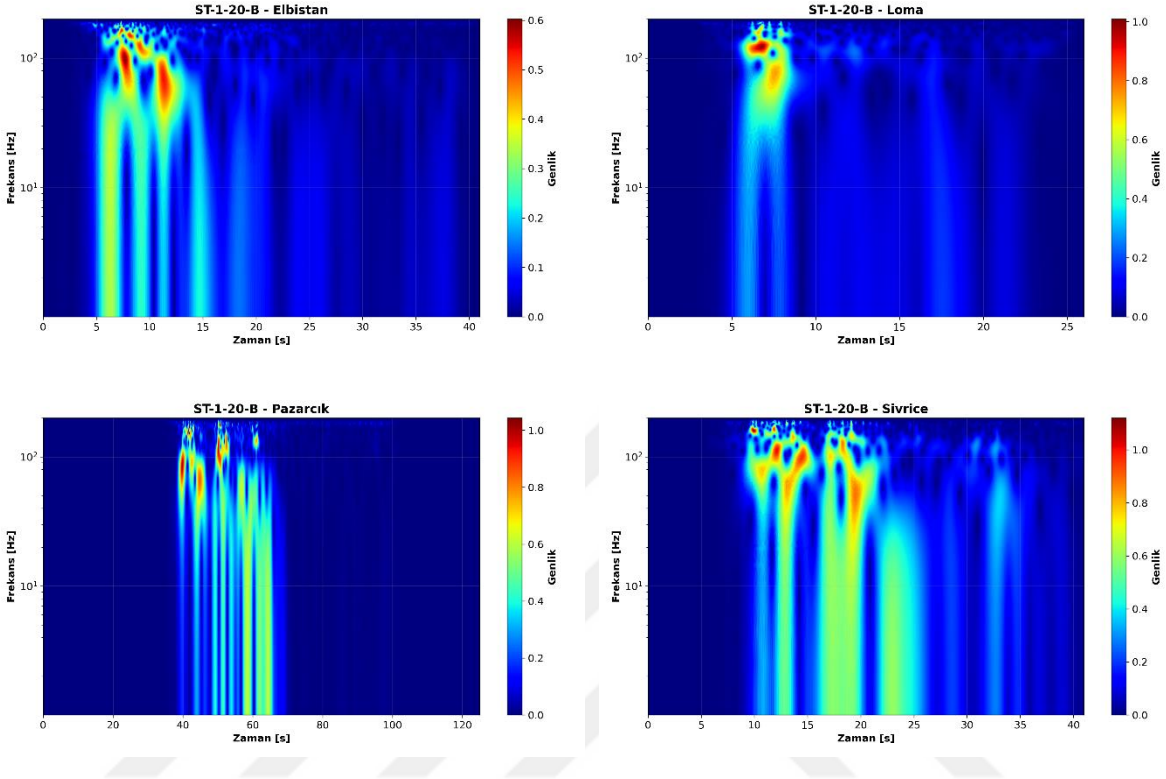
Şekil 73. ST-1-20-B modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-20-B modeli için gerçekleştirilen wavelet spektrum analizleri (Şekil 73), yapının zaman-frekans düzlemindeki titreşim karakteristiğini detaylı biçimde ortaya koymuştur. İncelenen 11 farklı deprem kaydında modelin baskın frekans cevabının 10 Hz ile 130 Hz aralığında yoğunlaştığı, bu frekans bandında belirli zaman dilimlerinde yüksek genlikli (~1,0 ve üzeri) spektral yığılmalar oluştuğu görülmüştür. Afyon, Gölcük ve Sivrice kayıtlarında bu genliklerin daha geniş zaman aralıklarına yayıldığı ve sistemin uzun süreli yüksek frekanslı uyarımlara maruz kaldığı tespit edilmiştir. Bu kayıtlar özelinde, yapının frekans bileşenleri zamana yayılmış ardışık yapılar göstererek hem rezonans etkisini hem de sönüm yetersizliğini işaret etmiştir.

Düzce ve Loma kayıtları, kısa süreli fakat yoğun spektral enerji ile ön plana çıkmış, özellikle Düzce'de ilk 8 saniyede 80–120 Hz bandında genliğin 1,0'ın üzerine çıktığı ve sonrasında hızla sönümlendiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının ani darbe benzeri yüklemelere karşı kuvvetli ama geçici tepkiler verdiğini ortaya koymaktadır. El Centro ve Erzincan depremleri ise daha uzun zaman dilimlerine yayılan orta-yüksek frekans cevabı ile sistemin birden fazla moda eş zamanlı olarak tepki verdiği kayıtlar arasında yer almıştır. Bu durum, yapının modal geçişlerinin ve enerji aktarım yollarının dinamik olarak değiştiğini göstermektedir.

Kobe ve Seferihisar kayıtlarında, yüksek frekans bileşenlerinde kısa süreli fakat tekrarlayan genlik kümeleri dikkat çekmiş, özellikle Kobe depreminde yüksek frekans cevabının sınırlı fakat segmentli olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, yapının bu tür kayıtlar altında bölgesel ve mod-seçici davranış sergilediğine işaret etmektedir.



Şekil 74. ST-1-20-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Loma, Pazarcık, Sivrice)

ST-1-20-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-1-20-C tonoz modeli (Şekil 74) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 45,43 Hz, 88,58 Hz, 93,57 Hz, 133,3 Hz, 158,9 Hz ve 200,28 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 45,43 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

Elde edilen mod şekilleri (Şekil 75), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 5,38 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 4,99 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini

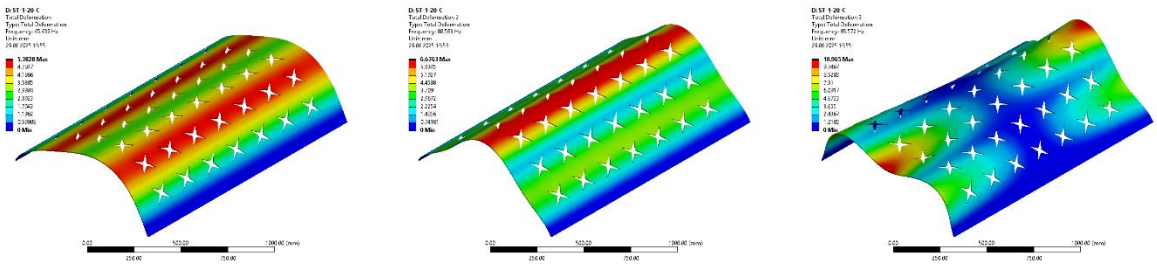
göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve altıncı modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 11,13 mm'ye ulaşılmıştır.

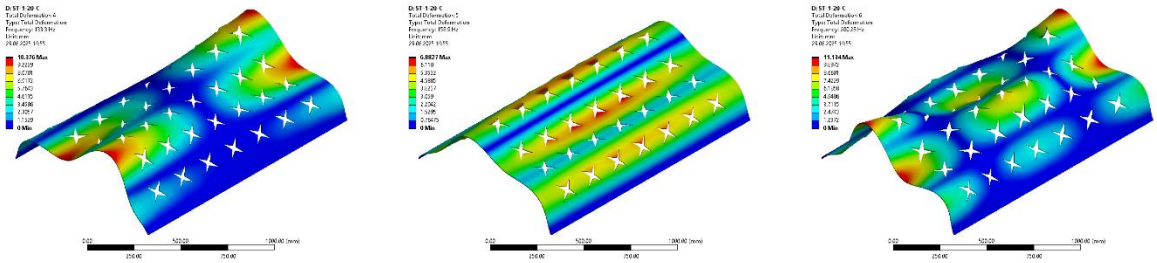
Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,04 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %43,88 gibi oldukça yüksek bir katılım sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, X doğrultusundaki dinamik yüklemeler altında temel modun kritik öneme sahip olduğunu ve dinamik analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun tüm doğrultularda %99,76 ila %100 arasında değişen oranlarda kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 75. ST-1-20-C deney modeli





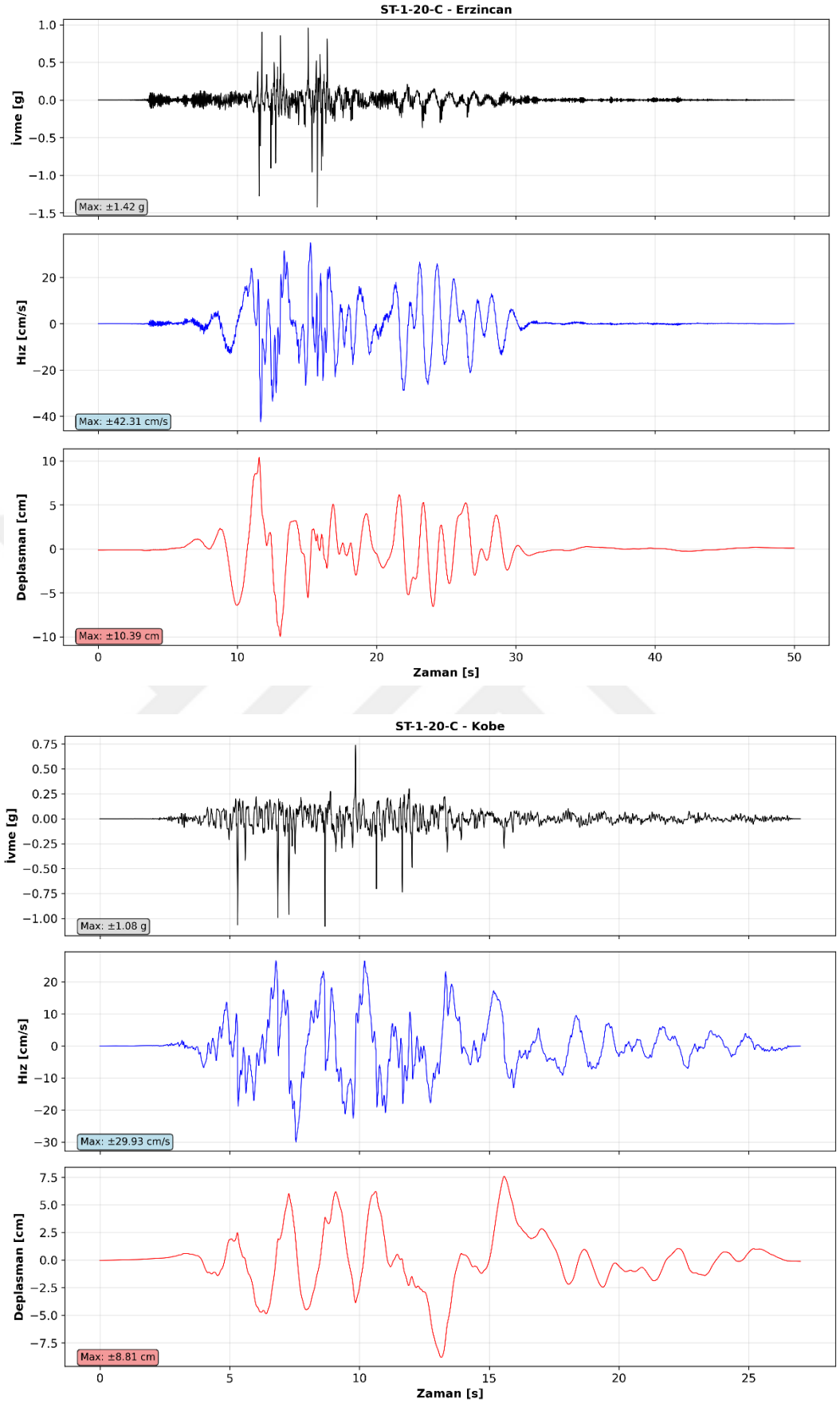
Şekil 76. ST-1-20-C modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

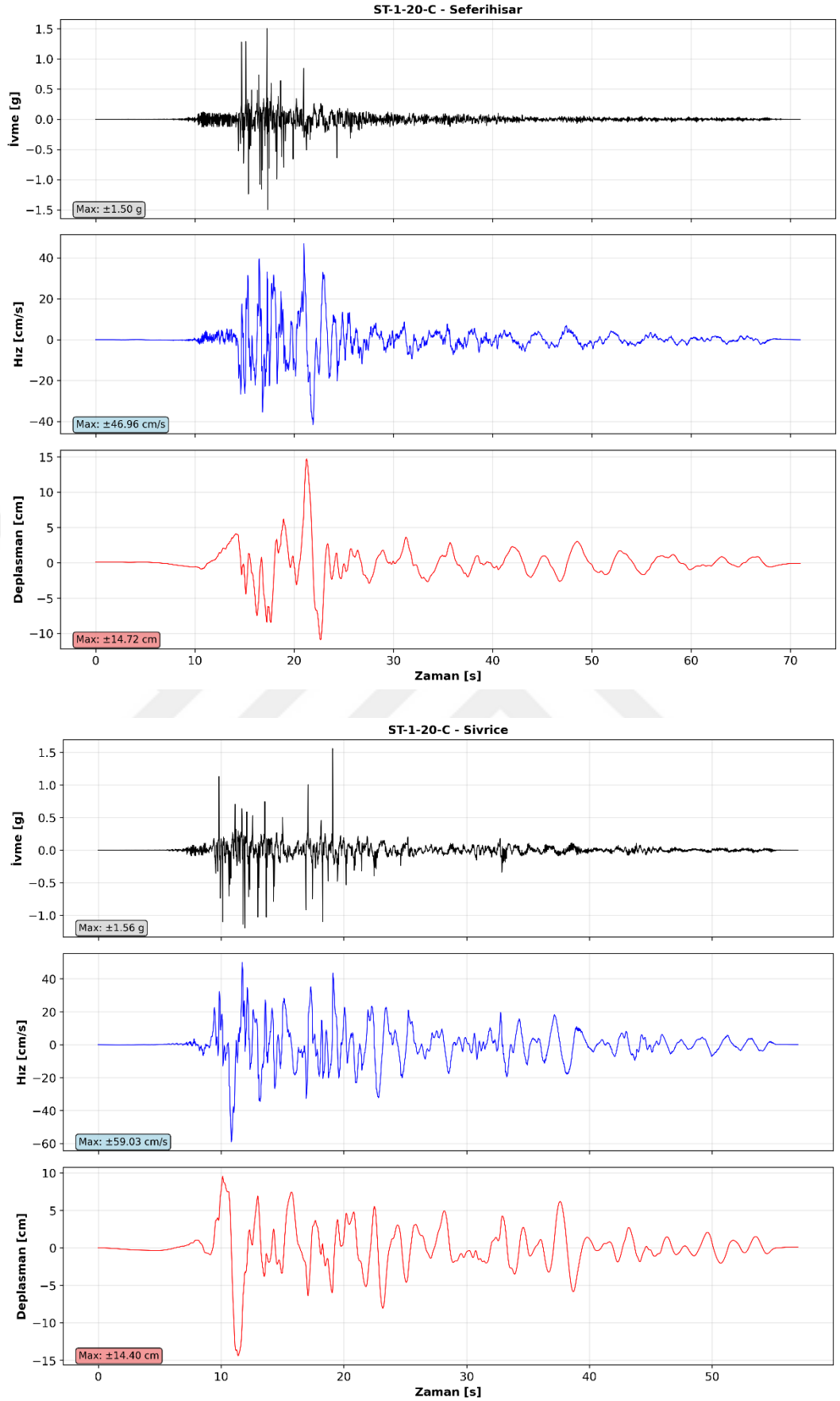
ST-1-20-C modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri (Şekil 76 ve Şekil 77) incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (1,85 g), Gölcük (1,64 g) ve Düzce (1,61 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,45 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir. Bu sonuçlar, yapının yüksek frekanslı ve kısa süreli enerji içeriği yoğun depremlere karşı daha büyük ivme tepkileri sergilediğini göstermektedir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 64,17 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Sivrice (59,03 cm/s) ve Afyon (58,93 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Pazarcık (46,59 cm/s) ve Seferihisar (46,96 cm/s) depremleri ise orta düzeyde hız tepkileri üretmiştir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

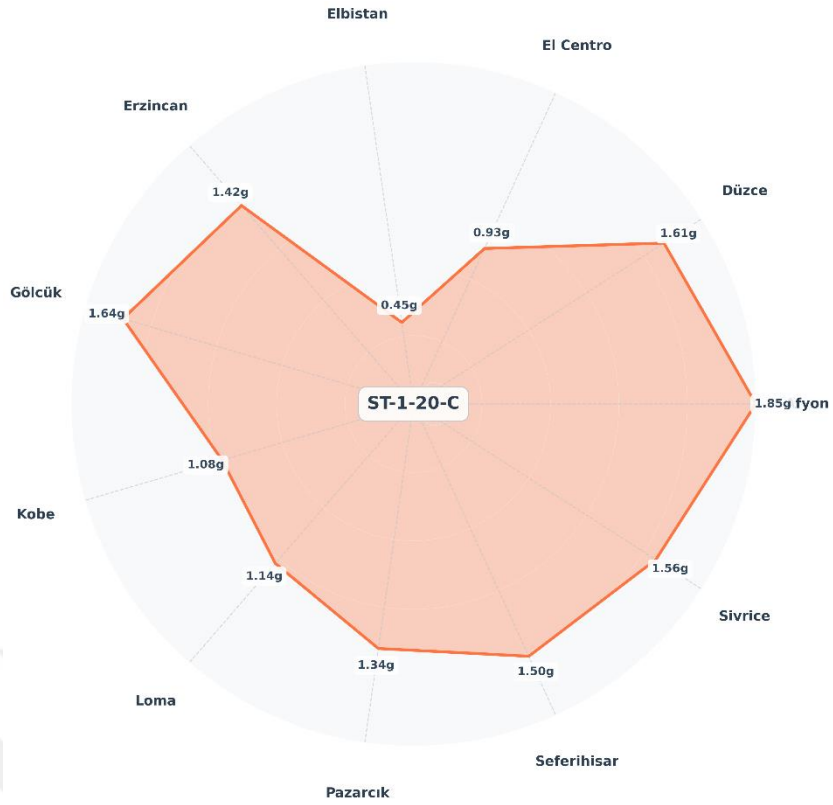
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (15,03 cm), Seferihisar (14,72 cm) ve Sivrice (14,40 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,15 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 77. ST-1-20-C ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Erzincan, Kobe, Seferihisar, Sivrice)



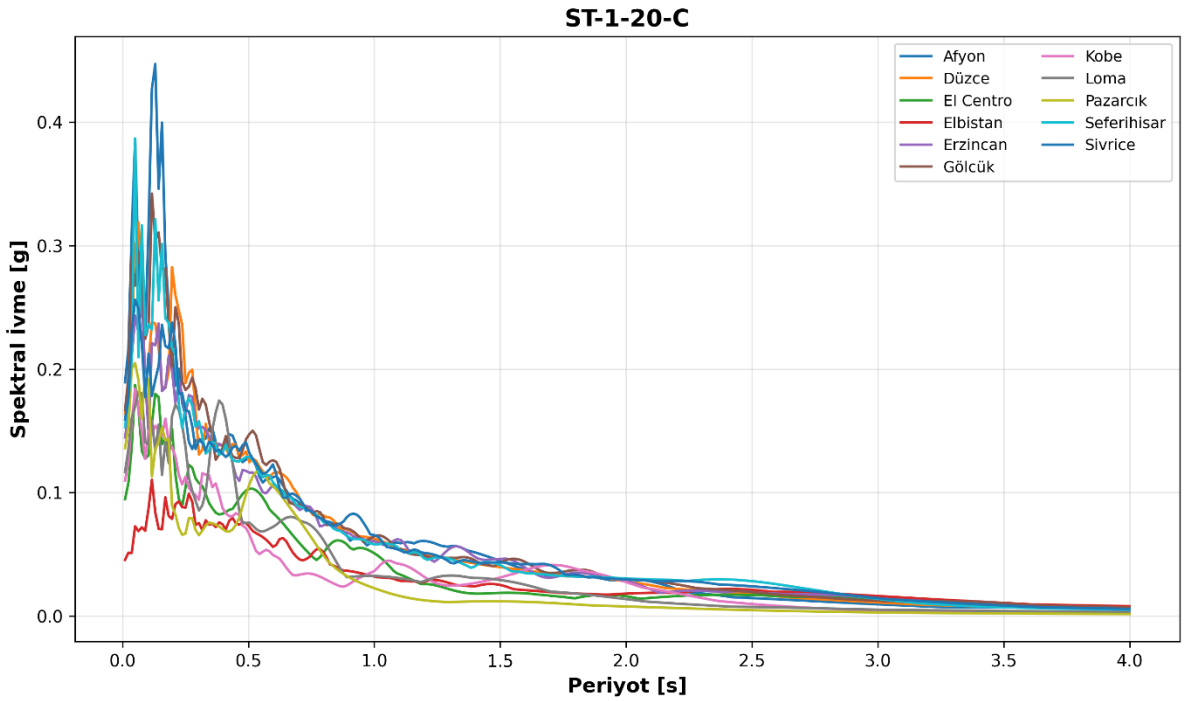
Şekil 76. ST-1-20-C ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Erzincan, Kobe, Seferihisar, Sivrice) (devamı)



Şekil 78. ST-1-20-C modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-20-C modelinin spektral ivme analizleri (Şekil 78), modelin 0-1,0 saniye periyot aralığında belirgin şekilde yüksek tepkiler verdiğini göstermektedir. Özellikle Düzce ve Gölcük deprem kayıtlarında 0-0,5 saniye aralığında 0,45-0,50g seviyelerine ulaşan pik ivme değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum modelin kısa periyotlu deprem dalgalarına karşı son derece duyarlı olduğunu ve rijit yapı karakteristiği sergilediğini ortaya koymaktadır. Periyot arttıkça ivme değerlerinin hızla azalması (1,5 saniyede ~0,25g, 3,0 saniyede ~0,12g) modelin orta ve uzun periyotlarda daha kontrollü davrandığını göstermektedir. Deprem türlerine göre performans farklılıkları incelendiğinde, Düzce ve Gölcük kayıtlarının en yüksek tepkileri oluşturduğu, El Centro ve Loma depremlerinin ise daha düşük ivme değerlerine (0,25-0,30g) yol açtığı tespit edilmiştir.



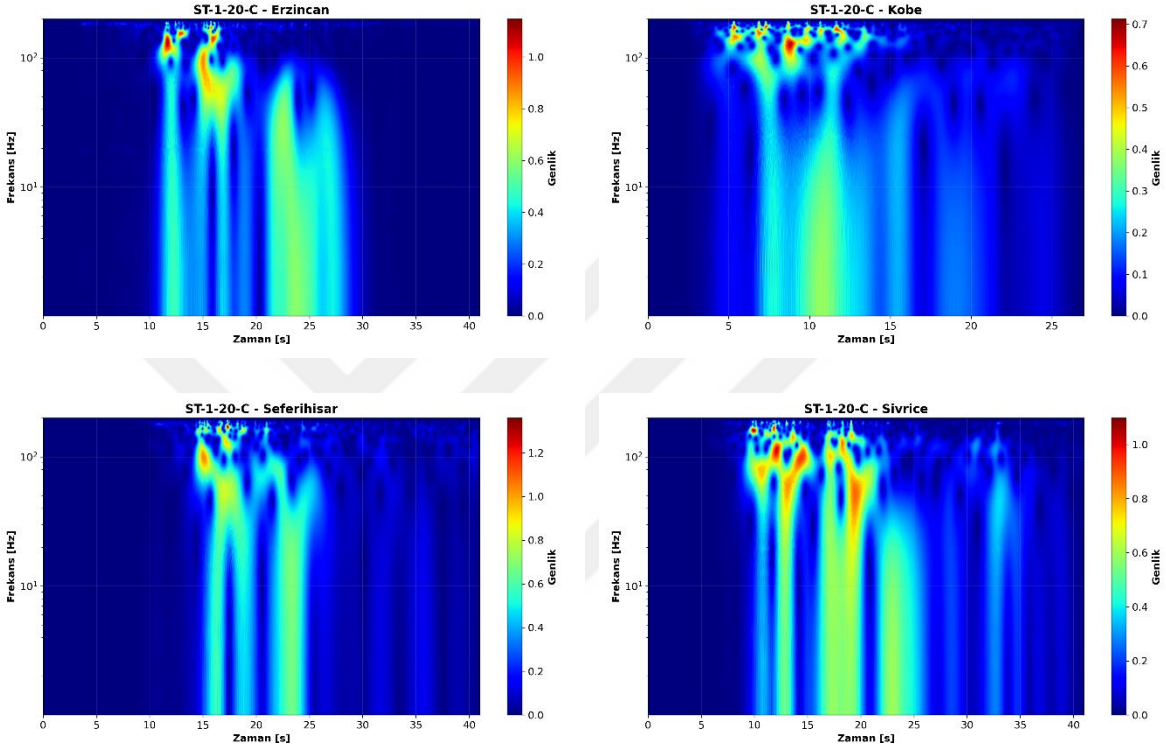
Şekil 79. ST-1-20-C modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-20-C modeli için gerçekleştirilen wavelet spektrum analizleri (Şekil 79), yapı sisteminin zaman-frekans düzlemindeki tepkisini ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur. 11 farklı deprem kaydı altında modelin baskın frekans cevabının 10 Hz ile 120 Hz arasında yoğunlaştığı görülmüş; bu bantta zamanla sınırlı ancak yüksek genlikli (~1,0 ve üzeri) spektral kümelenmeler oluşmuştur. Özellikle Afyon, Elbistan ve Sivrice kayıtlarında genliğin hem yüksek hem de zamansal olarak geniş alanlara yayıldığı gözlemlenmiş, bu durum yapının uzun süreli yüksek frekans uyarımlarına karşı belirgin bir rezonans eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu kayıtlar altında enerji transferinin ardışık dalga yapıları şeklinde sürmesi, sistemin sönüm kapasitesinin sınırlı kaldığını ve titreşim enerjisinin zaman içinde yayılım gösterdiğini düşündürmektedir.

Düzce, Loma ve El Centro depremleri kısa süreli fakat yüksek yoğunluklu spektral yanıtlar ile öne çıkmış; örneğin Düzce kaydında ilk 6–8 saniye içerisinde 80–110 Hz bandında ani genlik yükselmeleri izlenmiştir. Bu kayıtlar, yapının ani darbe benzeri yüksek frekanslı yüklemelere karşı kısa süreli fakat yüksek tepkiler verdiğini göstermektedir. Öte yandan, Erzincan ve Gölcük kayıtlarında frekans cevabı hem zamansal hem de spektral olarak daha yaygın bir yapıya sahip olmuş; bu durum modelin birden fazla moda eş zamanlı yanıt verdiğini ve enerji aktarım yollarının deprem karakterine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Kobe ve Seferihisar kayıtlarında ise yüksek frekans bileşenlerinde kısa süreli, tekrarlayan ve sınırlı spektral kümelenmeler dikkat çekmiş; özellikle Kobe kaydında enerji dağılımının segmentli yapısı, yapının mod-seçici ve lokalize bir dinamik davranış sergilediğini düşündürmektedir. Pazarcık depremi, diğer kayıtlardan farklı olarak spektrumun 40-60 saniye aralığında izole bir enerji artışı üretmiştir. Sonuç olarak, ST-1-20-C modeli yüksek frekanslı uyarıcılara karşı belirgin rezonans davranışları sergileyen, spektral enerjiye zamansal duyarlılığı olan ve mod geçişlerinde değişkenlik gösteren bir titreşim karakteristiğine sahiptir.



Şekil 80. ST-1-20-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Erzincan, Kobe, Seferihisar, Sivrice)

ST-1-30-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

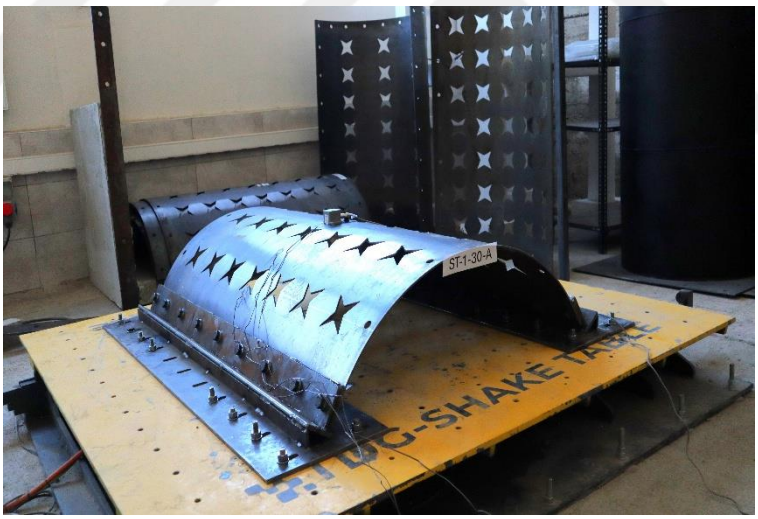
ST-1-30-A tonoz modeli (Şekil 80) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 47,28 Hz, 91,10 Hz, 95,70 Hz, 140,61 Hz, 161,23 Hz ve 214,73 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 47,28 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

Elde edilen mod şekilleri (Şekil 81), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 5,04 mm), ikinci ve

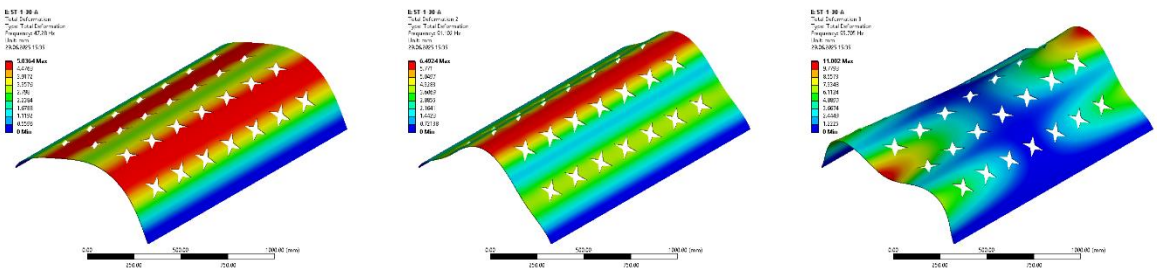
üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 4,60 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve altıncı modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 11,64 mm'ye ulaşılmıştır.

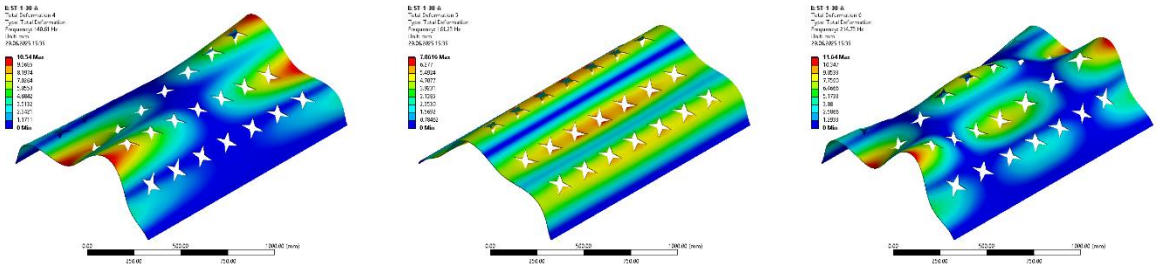
Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,04 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %44,77 gibi oldukça yüksek bir katılım sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, X doğrultusundaki dinamik yüklemeler altında temel modun kritik öneme sahip olduğunu ve dinamik analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun tüm doğrultularda %99,87 ila %100 arasında değişen oranlarda kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 81. ST-1-30-A deney modeli





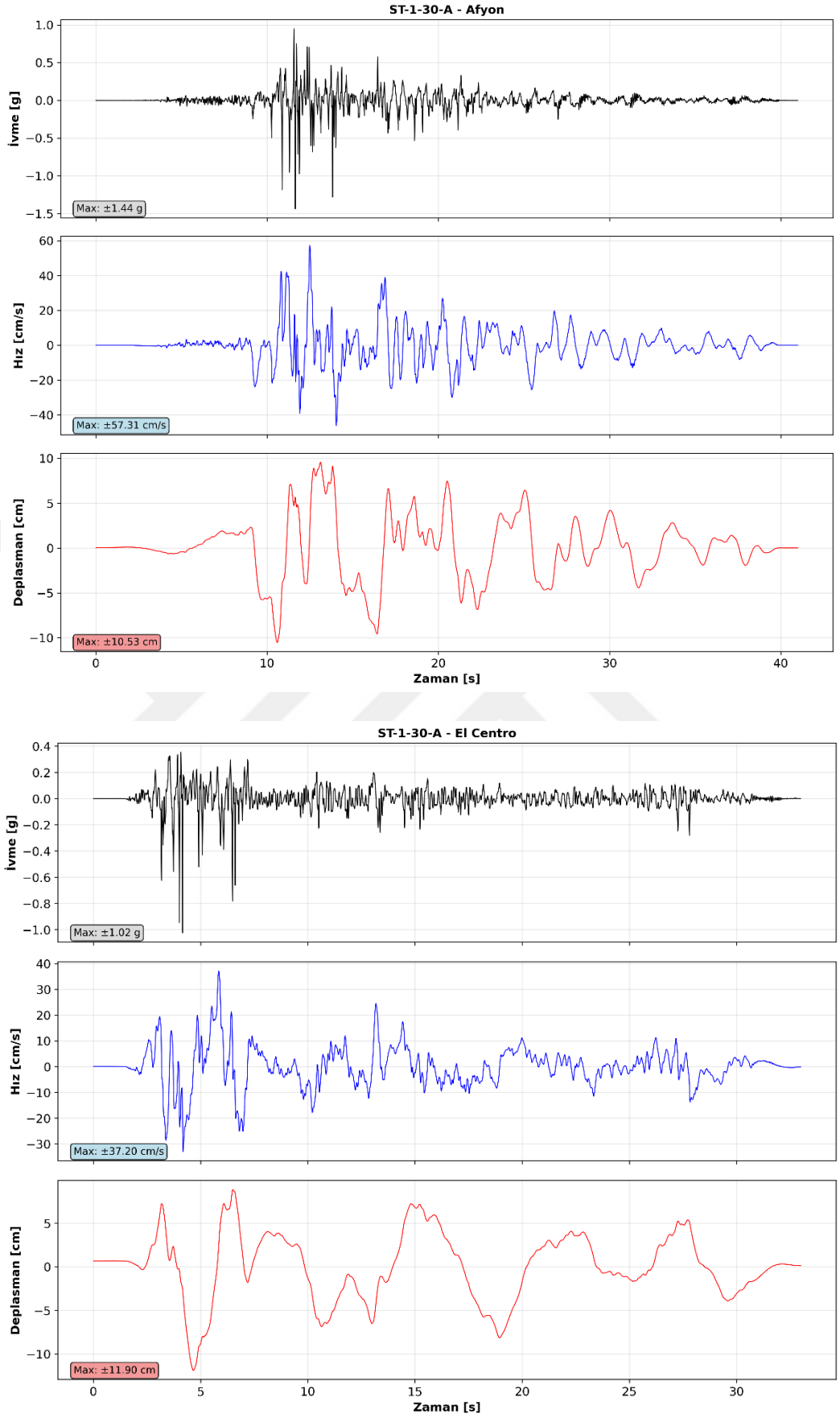
Şekil 82. ST-1-30-A modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

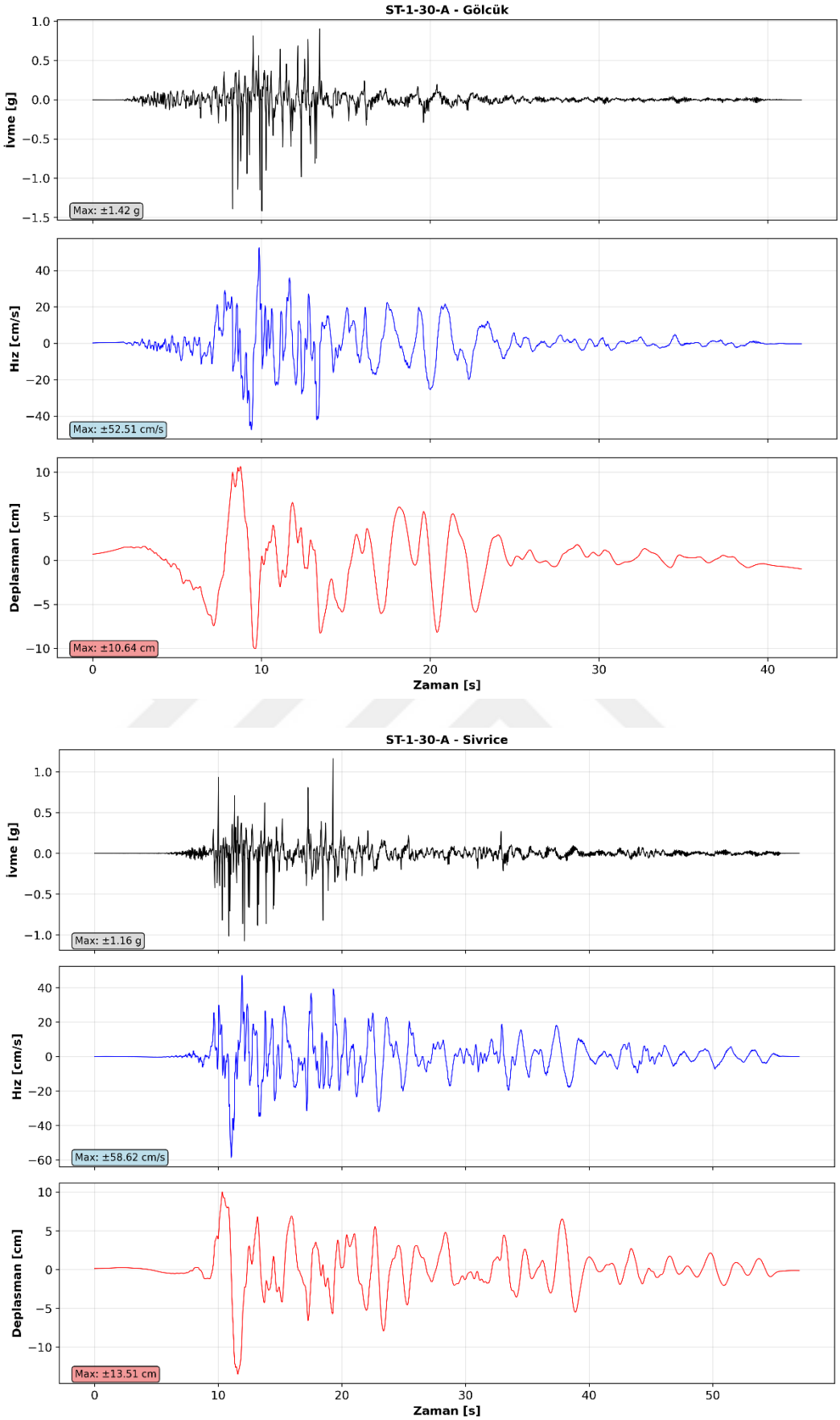
ST-1-30-A modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 82 ve Şekil 83) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (1,44 g), Gölcük (1,42 g) ve Düzce (1,38 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,39 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 63,79 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Sivrice (58,62 cm/s) ve Afyon (57,31 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

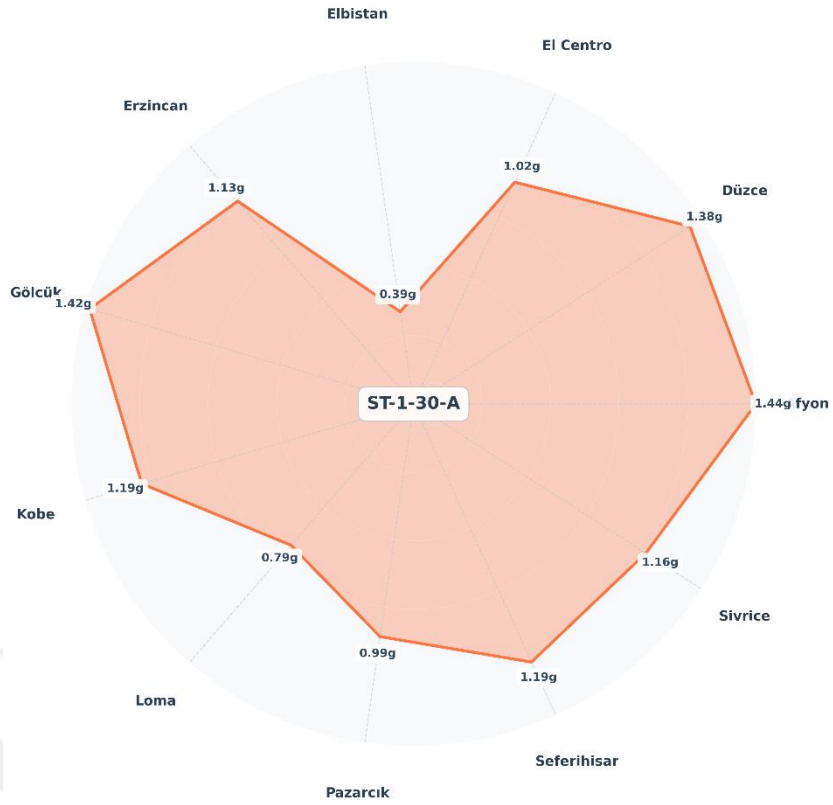
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,09 cm), Sivrice (13,51 cm) ve Düzce (12,97 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,04 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 83. ST-1-30-A ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice)



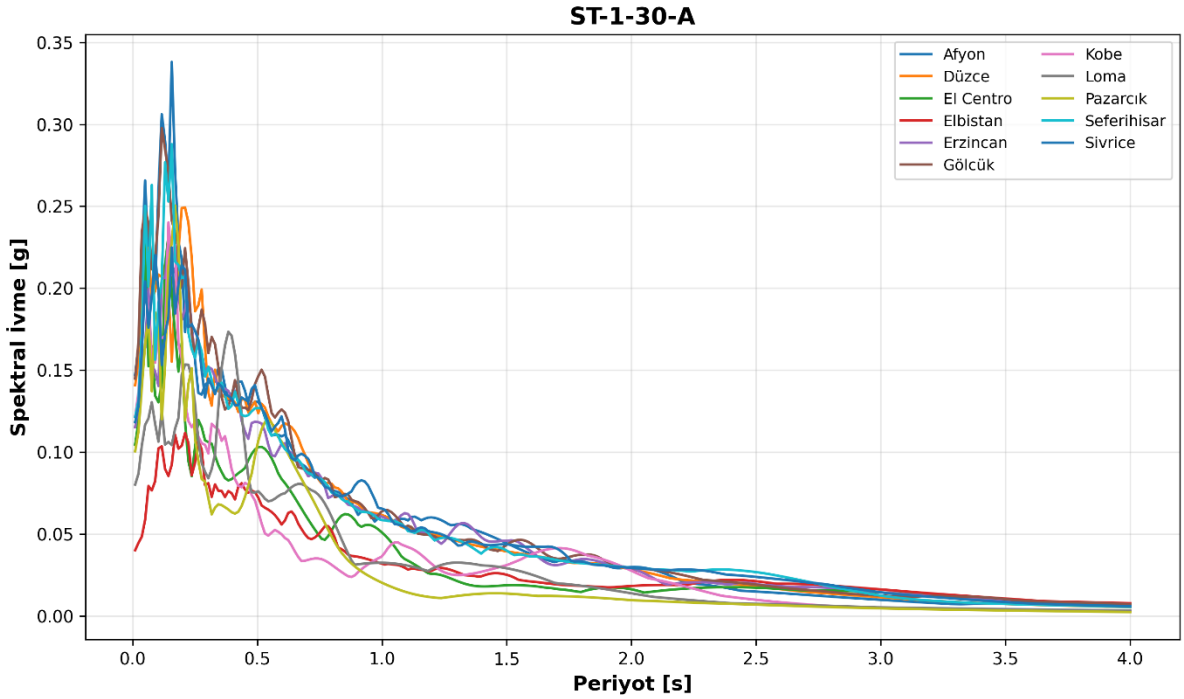
Şekil 82. ST-1-30-A ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) (devamı)



Şekil 84. ST-1-30-A modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-30-A modelinin spektral ivme sonuçları (Şekil 84), modelin tüm periyot aralığında (0-4,0 s) dengeli bir dağılım sergilediğini göstermektedir. En yüksek ivme değerleri 0,30-0,35g aralığında gözlemlenmiş olup, bu değerler belirli bir periyot aralığında yoğunlaşmadan tüm aralığa yayılmıştır. Afyon ve Düzce depremlerinde kısa periyotlarda (0-0,5 s) 0,30g civarında tepkiler gözlemlenirken, El Centro ve Loma depremlerinde tüm periyotlarda daha düşük ivme değerleri (0,15-0,25g) kaydedilmiştir. Modelin en dikkat çekici özelliği, herhangi bir periyot aralığında aşırı yüksek tepkiler göstermemesi ve tüm frekans aralığında dengeli bir davranış sergilemesidir. Bu durum, modelin geniş bir deprem spektrumuna karşı uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 85. ST-1-30-A modeli spektral ivme eğrileri

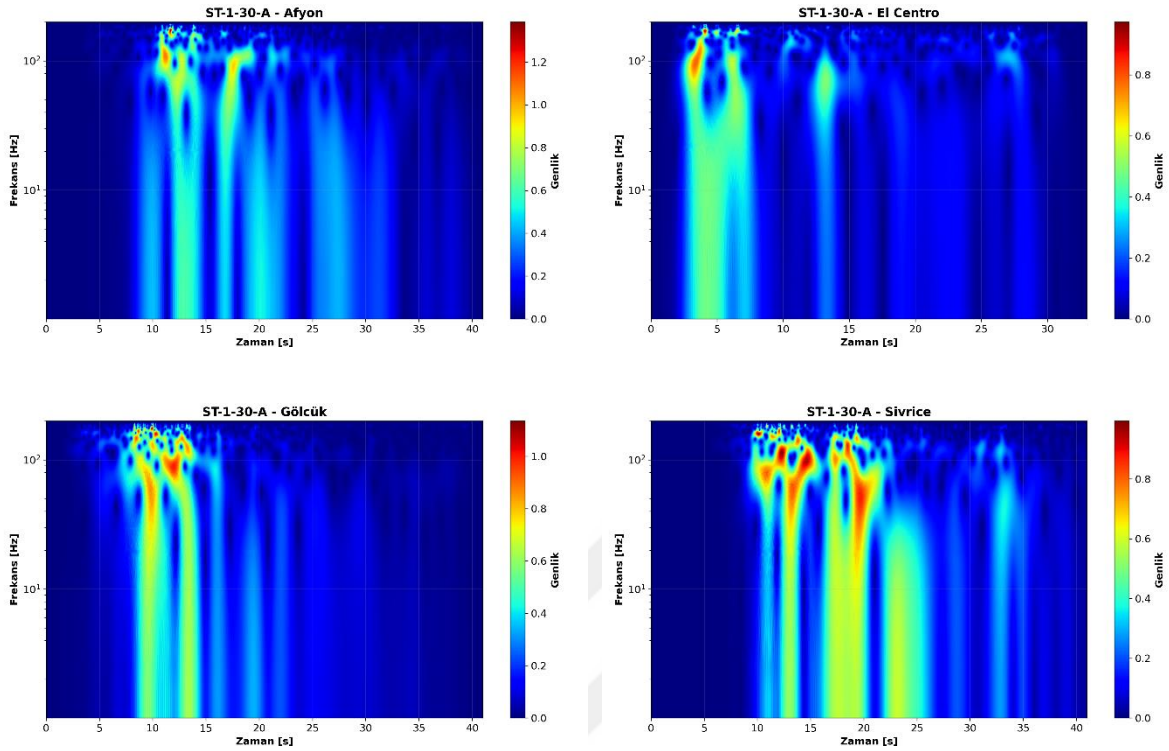
Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-30-A modeli için gerçekleştirilen wavelet spektrum analizleri (Şekil 85), yapının zamana bağlı frekans yanıtını yüksek çözünürlükte ortaya koyarak sistemin dinamik davranışları hakkında önemli ipuçları sunmuştur. Sivrice depremi ile birlikte toplamda on bir farklı yer hareketi incelenmiş olup, modelin baskın frekans cevabının 10 Hz ile 130 Hz aralığında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu frekans aralığında, özellikle 80–120 Hz bandında belirli zaman dilimlerinde genliği 1,0'a yaklaşan veya aşan spektral yığılmalar tespit edilmiştir. Bu durum, modelin yüksek frekanslı uyarımlara karşı duyarlı olduğunu ve belirli modlarda rezonans etkisiyle yoğun enerji birikimi yaşandığını göstermektedir.

Sivrice, Gölcük ve Elbistan kayıtlarında bu genlik artışlarının zamana yayılarak uzun süreli sürdüğü, yapının bu tip kayıtlarda sönüm kapasitesinin sınırlandığı ve sistemin rezonansa açık bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Düzce ve Loma kayıtlarında ise kısa süreli ancak yüksek frekans içeriği yoğun bölgelere rastlanmış, özellikle Düzce kaydında ilk 6 saniyede 90–120 Hz arasında genliğin 1,0'ın üzerine çıktığı kaydedilmiştir. Bu durum, yapının ani ve impulsif yüklemelere karşı ani fakat kısa süreli tepkiler verdiğini göstermektedir.

Erzincan ve El Centro depremleri, orta-genlikli fakat geniş zaman aralıklarına yayılan spektral yoğunluklarla dikkat çekmiş, bu da yapının farklı modlarını eş zamanlı olarak aktive ettiğini ve sistemde modal geçişlerin belirgin şekilde yaşandığını ortaya koymuştur. Kobe ve Seferihisar kayıtlarında görülen kısa süreli ancak tekrarlayan yüksek frekans kümeleri, yapının

bazı frekans bantlarında mod-seçici yanıtlar verdiğini ve bu yanıtların zaman içerisinde segmentli bir yapı oluşturduğunu işaret etmektedir.



Şekil 86. ST-1-30-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice)

ST-1-30-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

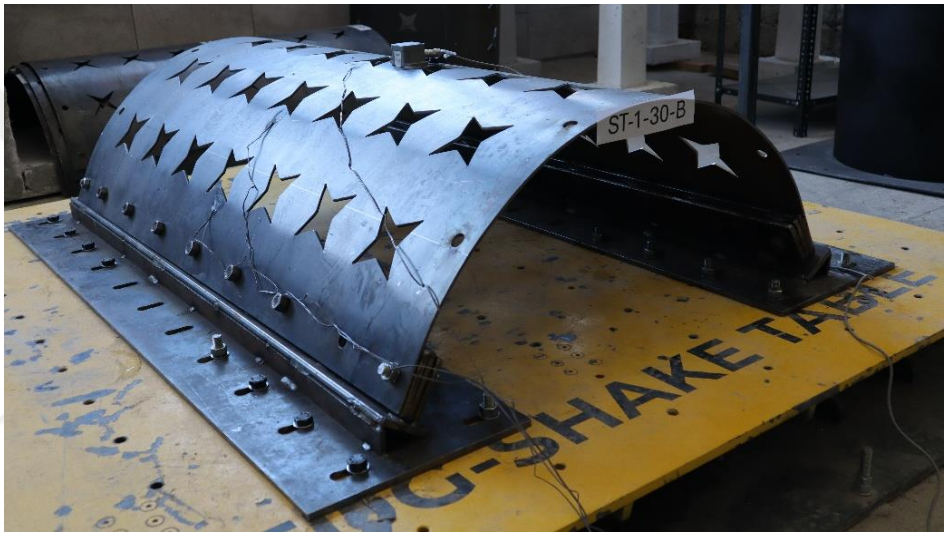
Modal analiz bulguları

ST-1-30-B tonoz modeli (Şekil 86) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 46,68 Hz, 90,58 Hz, 95,18 Hz, 138,09 Hz, 162,51 Hz ve 209,07 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 46,68 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

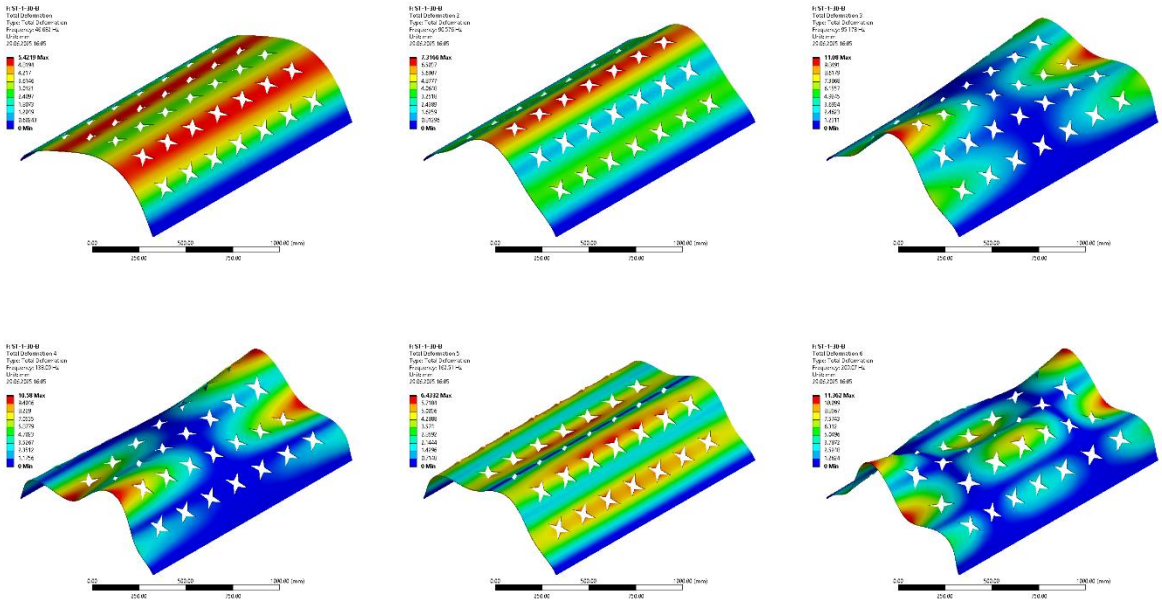
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 87), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 5,42 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 4,60 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve altıncı modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 11,36 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,04 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %44,01 gibi oldukça yüksek bir katılım sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, X doğrultusundaki dinamik yüklemeler altında temel modun kritik öneme sahip olduğunu ve dinamik analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun tüm doğrultularda %99,87 ila %100 arasında değişen oranlarda kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 87. ST-1-30-B deney modeli



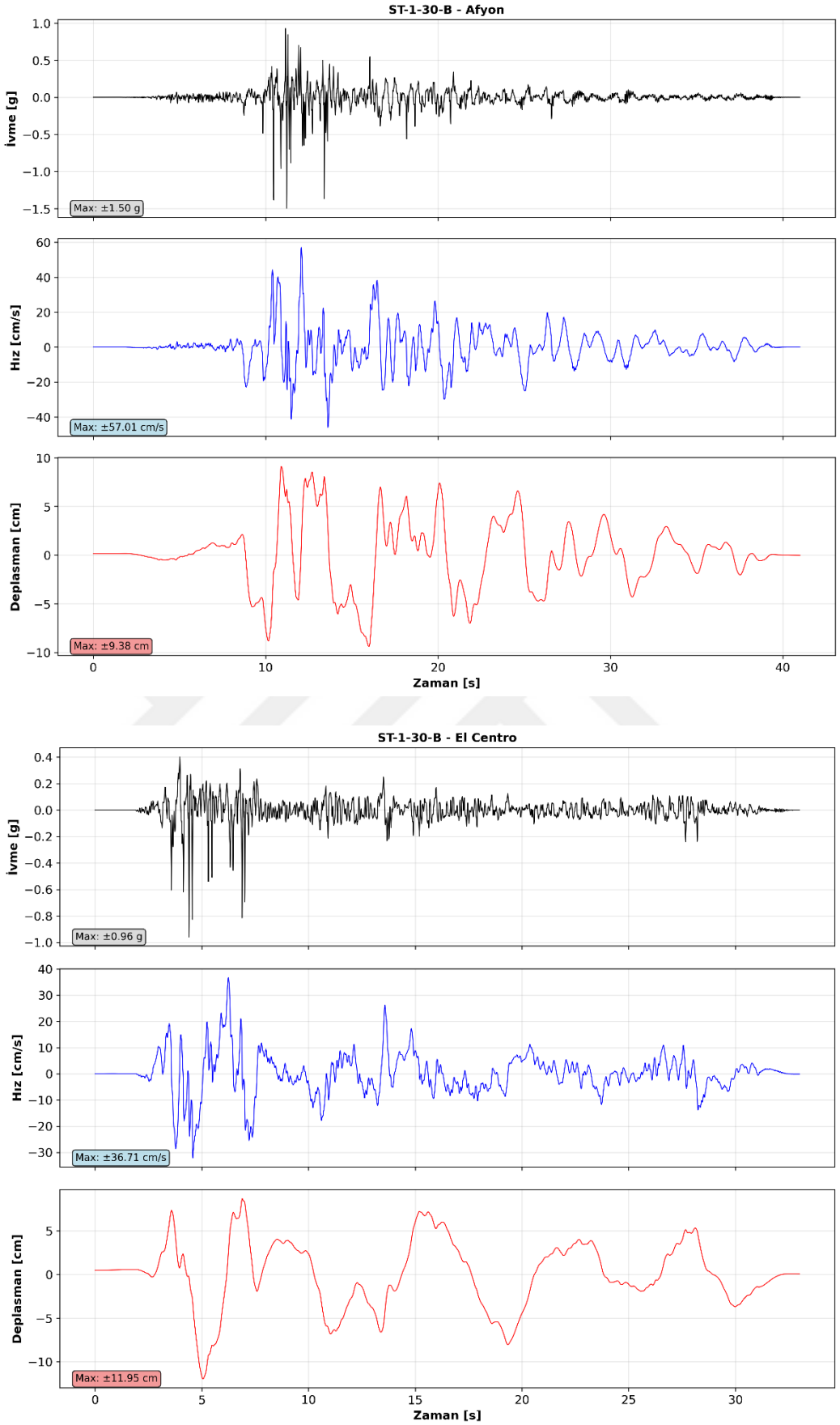
Şekil 88. ST-1-30-B modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

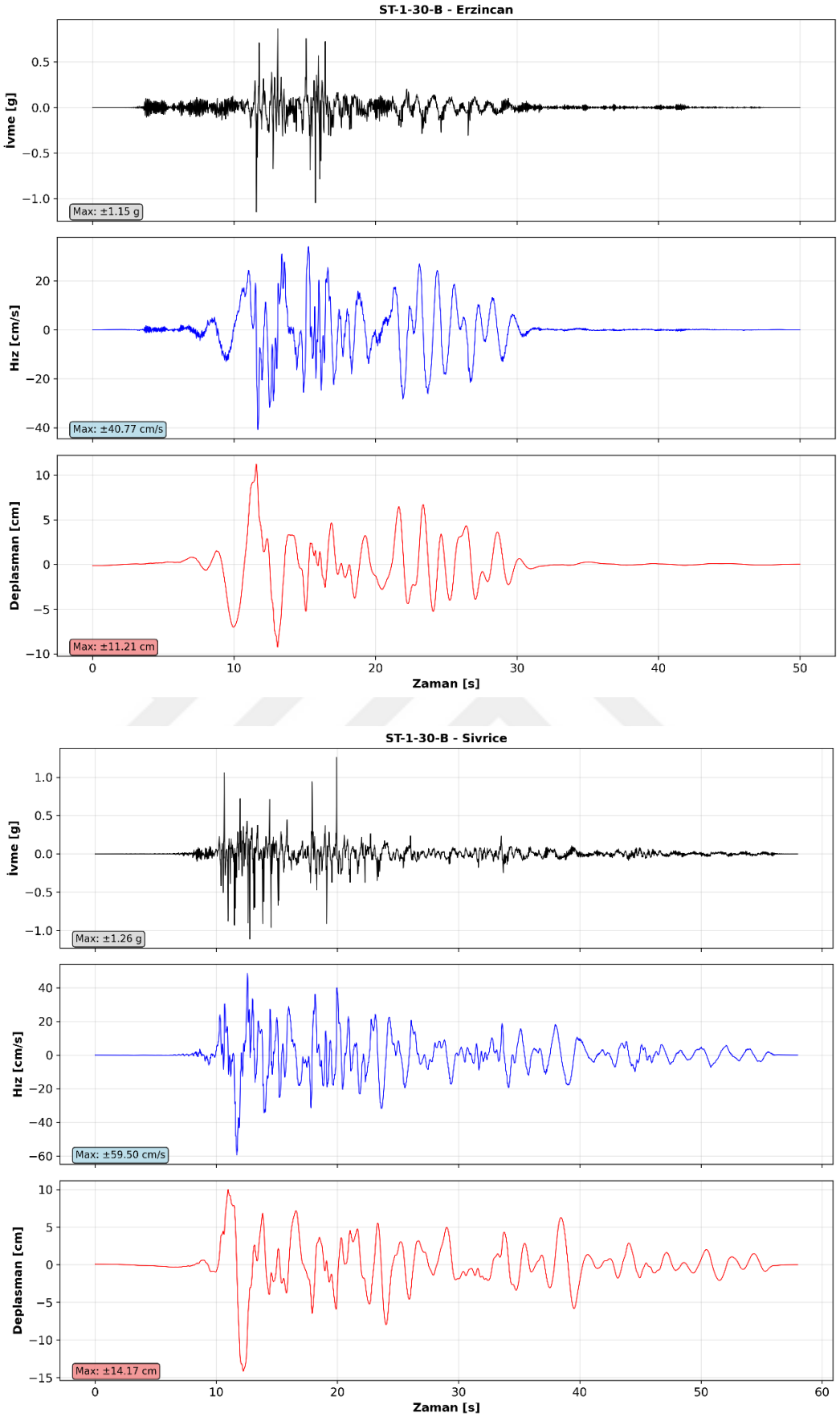
ST-1-30-B modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 88 ve Şekil 89) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (1,50 g), Gölcük (1,45 g) ve Düzce (1,35 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,36 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 63,53 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Sivrice (59,50 cm/s) ve Afyon (57,01 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

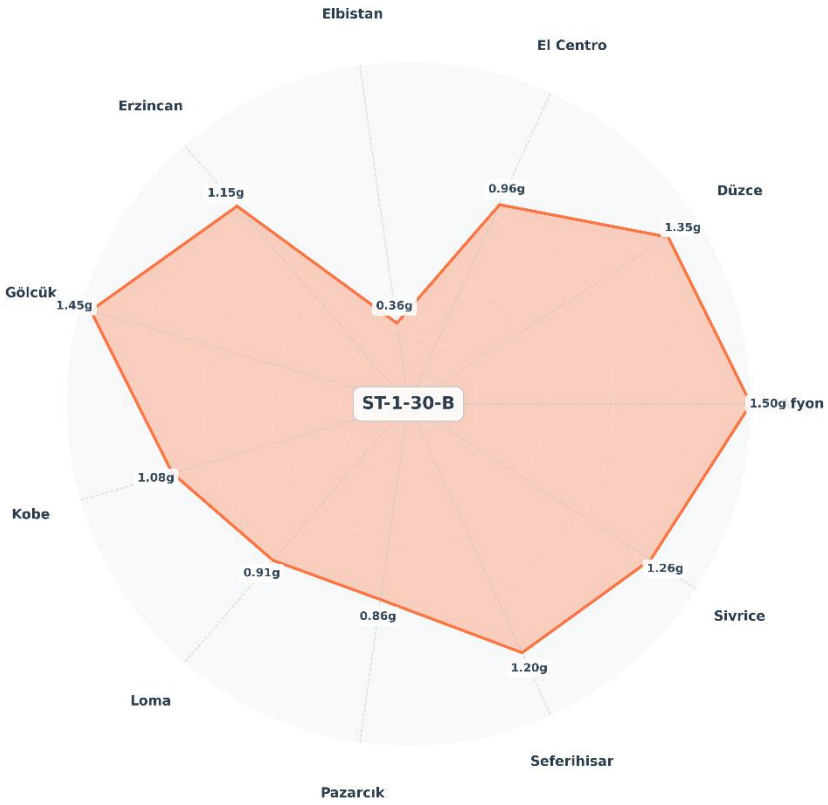
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,43 cm), Sivrice (14,17 cm) ve Düzce (12,39 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,09 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 89. ST-1-30-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Erzincan, Sivrice)



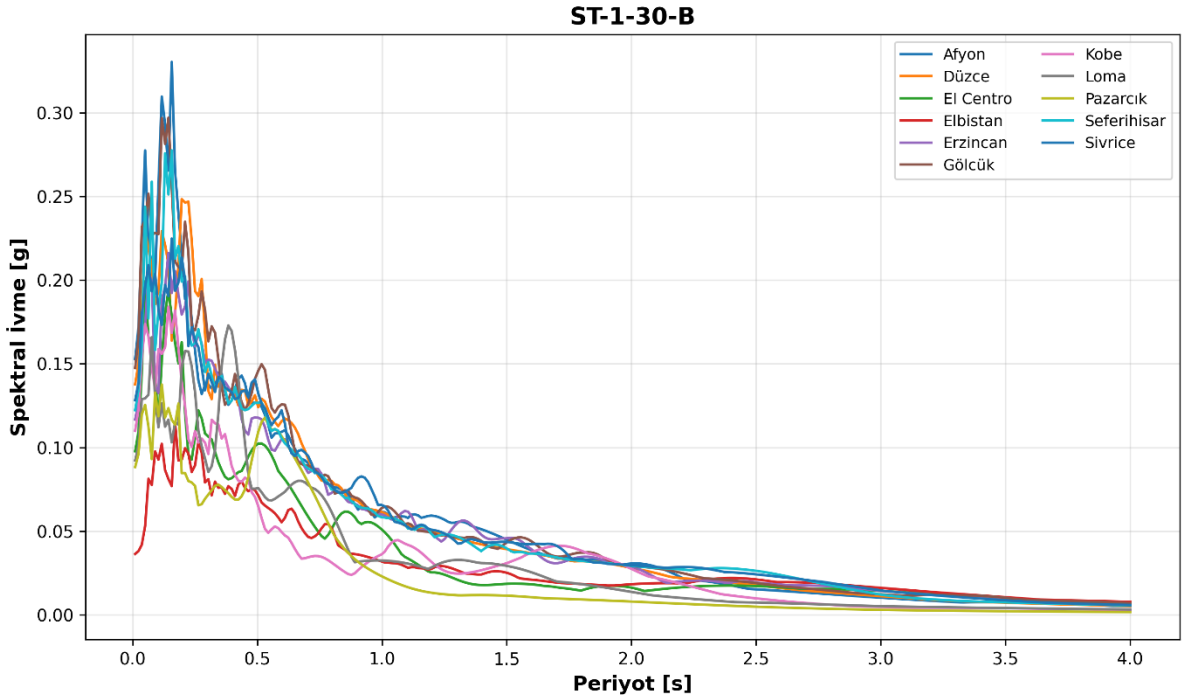
Şekil 88. ST-1-30-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Erzincan, Sivrice) (devamı)



Şekil 90. ST-1-30-B modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-30-B modelinin performans analizleri (Şekil 90), modelin 1,0-2,0 saniye orta periyot aralığında kritik davranışlar sergilediğini ortaya koymaktadır. Pazarcık ve Sivrice depremlerinde bu aralıkta 0,35-0,38g seviyelerinde ölçülen pik ivmeler, modelin bu periyotlara karşı yüksek duyarlılık gösterdiğini göstermektedir. Kısa periyotlarda (0,5 saniye) ivmelerin 0,25-0,30g aralığında kalması, bu bölgede daha az duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Uzun periyotlarda (3,0-4,0 s) ivme değerlerinin 0,10-0,15g aralığında seyretmesi ise modelin bu frekans aralığında dengeli bir performans sergilediğini işaret etmektedir. Özellikle Erzincan ve Kobe depremlerinde orta periyotlarda gözlemlenen yüksek tepkiler, modelin bu deprem türlerine karşı özel olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



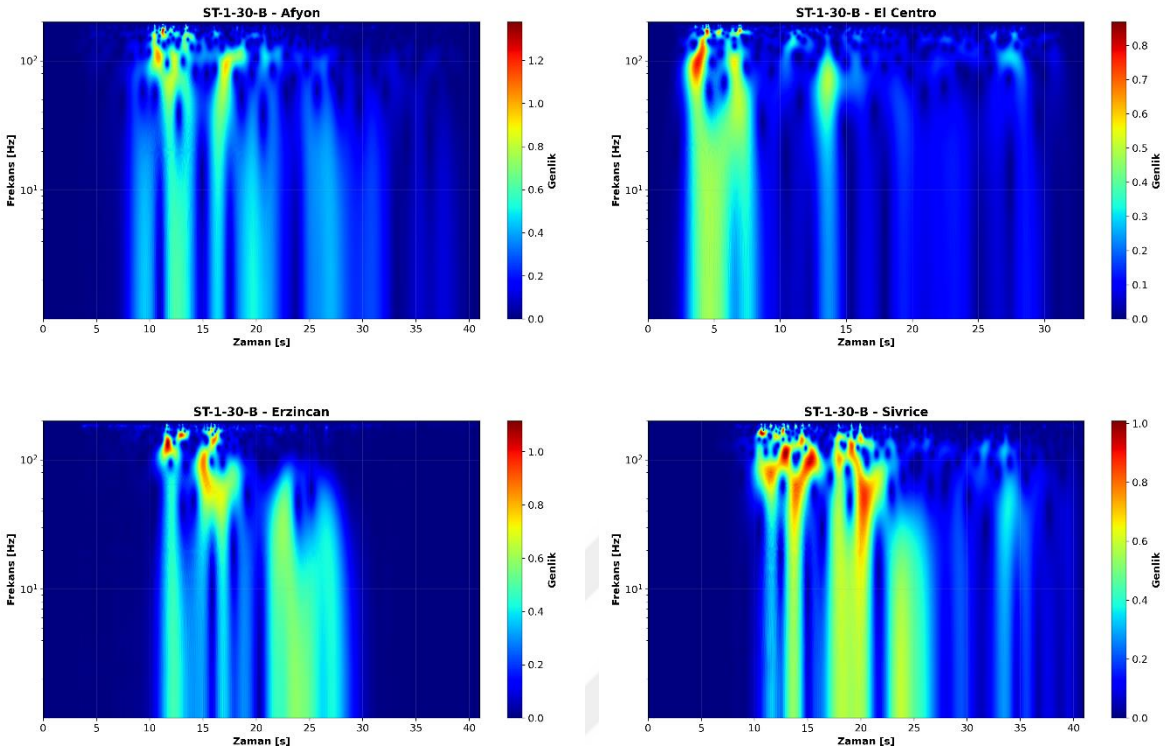
Şekil 91. ST-1-30-B modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-30-B modeli için gerçekleştirilen wavelet spektrum analizleri (Şekil 91), modelin zamana bağlı frekans cevabını detaylı biçimde ortaya koyarak dinamik davranışın spektral karakteristiğini inceleme olanağı sunmuştur. Analiz edilen 11 farklı deprem kaydı genelinde, modelin baskın frekans cevabının 10 Hz ile 130 Hz arasında yoğunlaştığı, bu aralıkta farklı zaman dilimlerinde değişen genlikte enerji yığılmaları oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle Afyon ve Gölcük kayıtlarında bu yığılmaların daha uzun süreli ve yüksek frekans bileşenleriyle ilişkili olduğu, dolayısıyla yapının bu kayıtlar altında zamana yayılmış rezonans etkilerine maruz kaldığı tespit edilmiştir. Düzce ve Loma depremleri ise daha kısa süreli, ancak yüksek genlikli (~1,0 üzeri) darbe tipi tepkilerle öne çıkmıştır. Bu durum, modelin ani enerji girişlerine karşı kısa sürede yoğun spektral yanıt ürettiğini ve sonrasında hızlı sönüm sergilediğini göstermektedir.

El Centro ve Erzincan kayıtlarında orta-yüksek frekans bandında (~10–80 Hz) çok modlu ve zaman içinde dağılmış genlik yapıları belirlenmiş, bu durum yapının birden fazla doğal frekansa eş zamanlı olarak cevap verdiğini ortaya koymuştur. Bu tip spektral davranışlar, sistemin modal geçişlerinin aktif olduğunu ve enerjinin birden çok yol üzerinden dağıldığını işaret etmektedir. Elbistan ve Kobe kayıtlarında, yüksek frekans cevabının daha sınırlı olduğu ancak tekrarlayan düşük genlikli (0,4–0,6 arası) yapıların varlığı tespit edilmiş, bu durum yapının mod-seçici ve bölgesel tepki verdiğini düşündürmektedir. Seferihisar ve Sivrice kayıtlarında ise zaman ekseni boyunca uzanan geniş frekans bantlarında ısrarlı genlik

kümelenmeleri dikkat çekmiş; bu örneklerde yapının yüksek enerjiye uzun süreli maruziyeti nedeniyle dinamik cevaplarının daha geniş zamana yayıldığı görülmüştür.



Şekil 92. ST-1-30-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Erzincan, Sivrice)

ST-1-30-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-1-30-C tonoz modeli (Şekil 92) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini ortaya koymak amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 46,01 Hz, 89,71 Hz, 94,48 Hz, 134,67 Hz, 161,16 Hz ve 202,31 Hz olarak hesaplanmıştır. Özellikle birinci modda elde edilen 46,01 Hz değeri, yapının temel titreşim modunu temsil etmekte olup, bu frekans aralığında dış dinamik etkilerin rezonans oluşturma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

Elde edilen mod şekilleri (Şekil 93), tonozun farklı frekanslardaki titreşimlere verdiği tepkiyi ve deformasyon paternlerini ortaya koymuştur. Birinci modda yapı boyunca düzenli bir sinüzoidal deformasyon deseni gözlenmiş ve maksimum deformasyon değeri 5,44 mm olarak hesaplanmıştır. İkinci ve üçüncü modlarda ise deformasyon geometrisinin daha karmaşık hale geldiği ve lokal genlik farklılıklarının oluştuğu görülmektedir. Bu iki modun birbirine yakın frekanslarda gerçekleşmesi (Δf = 4,78 Hz), modların yakınlığına ve dolayısıyla bu frekans aralığında modlar arası etkileşim olasılığına işaret etmektedir. Üçüncü modda elde edilen

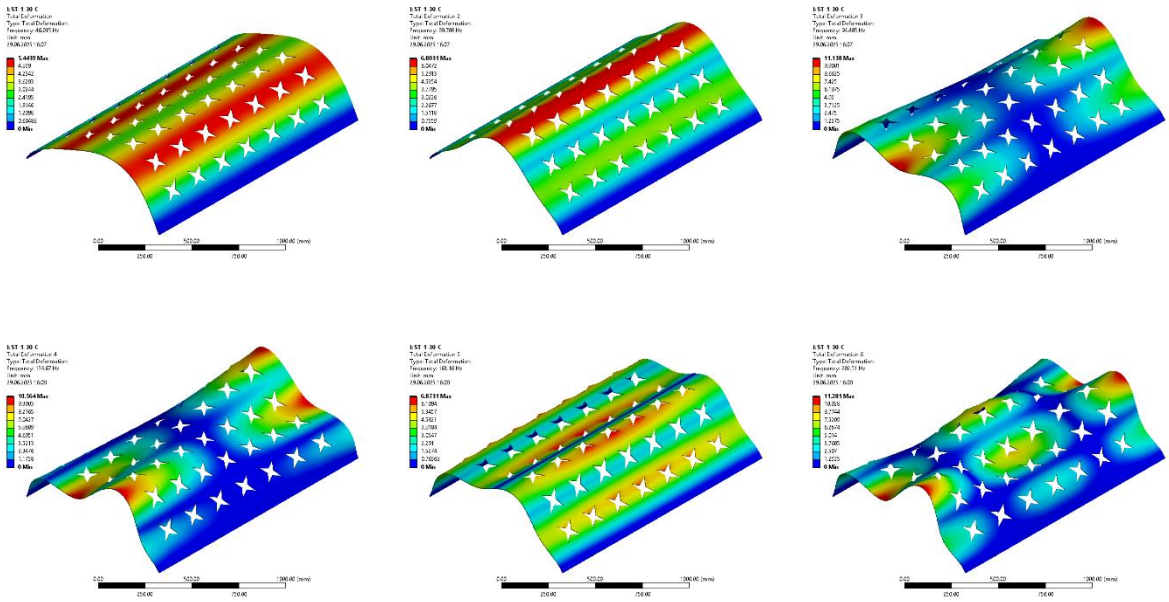
maksimum deformasyon 11,14 mm ile dikkat çekici seviyeye ulaşmış, bu da yapının belirli bölgelerinde yoğun titreşim enerjisi toplandığını göstermektedir. Beşinci ve altıncı modlarda deformasyon paternleri daha yayvan ve karmaşık hale gelmiş, altıncı modda ise maksimum deformasyon değeri 11,28 mm olarak tespit edilmiştir.

Efektif kütle analizine göre, X doğrultusunda birinci modun 0,18 ton değerindeki efektif kütle ile dominant olduğu belirlenmiştir. Bu durum, X doğrultusundaki dinamik davranışın büyük ölçüde temel mod tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır. İkinci modda Y doğrultusundaki katılımın 0,05 ton ile öne çıkması, bu doğrultuda da ikinci modun etkinliğini vurgulamaktadır. Üçüncü modda ise Z doğrultusunda 0,03 ton değerindeki katılım, Z ekseninde belirgin bir titreşim karakteri olduğunu göstermektedir.

Kümülatif efektif kütle oranları da incelendiğinde, ST-1-30-C modelinde ilk altı modun farklı yönlerde geniş bir kütlesel katılımı kapsadığı ve bu doğrultuda yapının dinamik davranışının çok modlu bir karakter taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, dinamik analizlerde özellikle birinci ve üçüncü modların dikkate alınması, rezonans riskine karşı yapısal tasarım ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik önemdedir.



Şekil 93. ST-1-30-C deney modeli



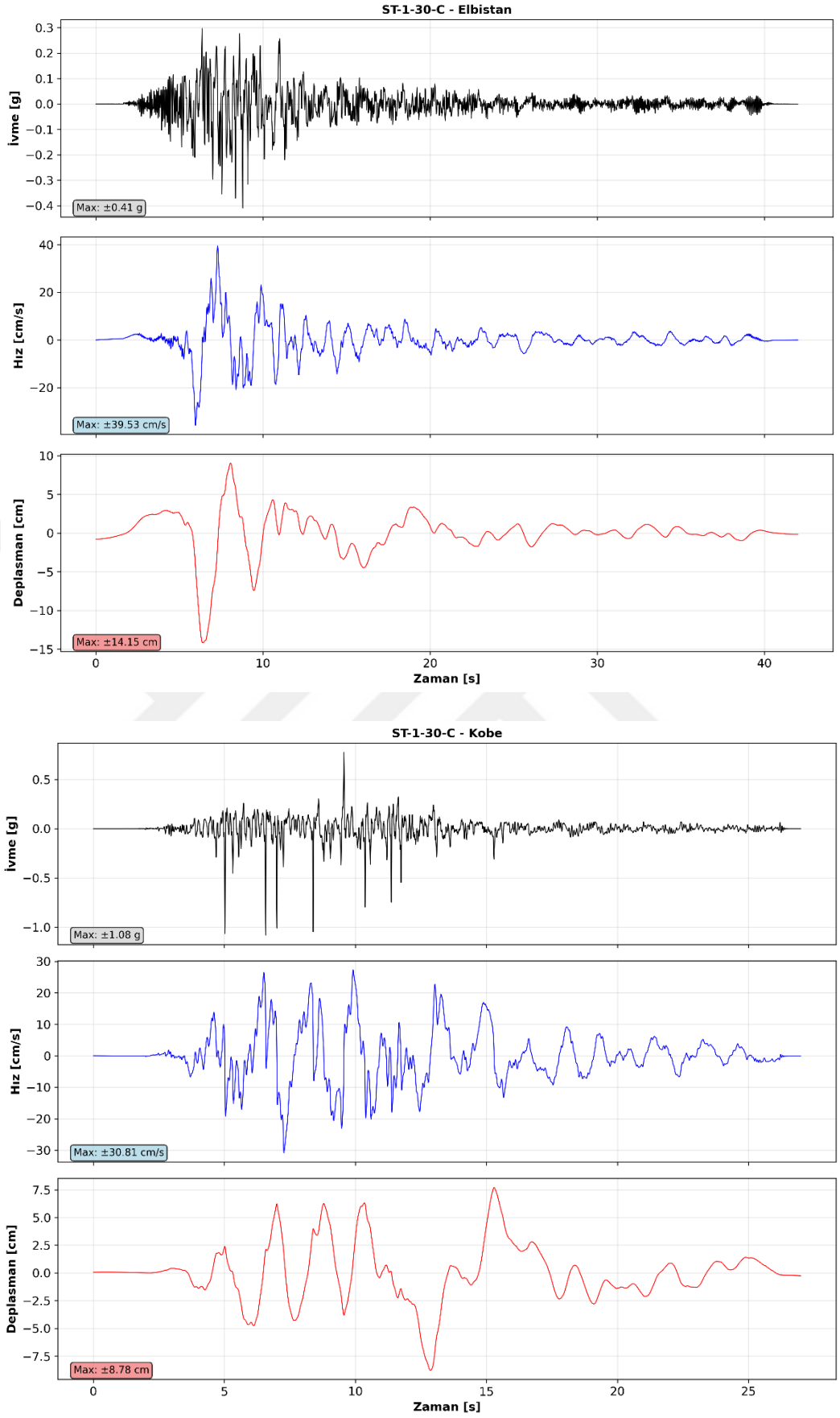
Şekil 94. ST-1-30-C modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

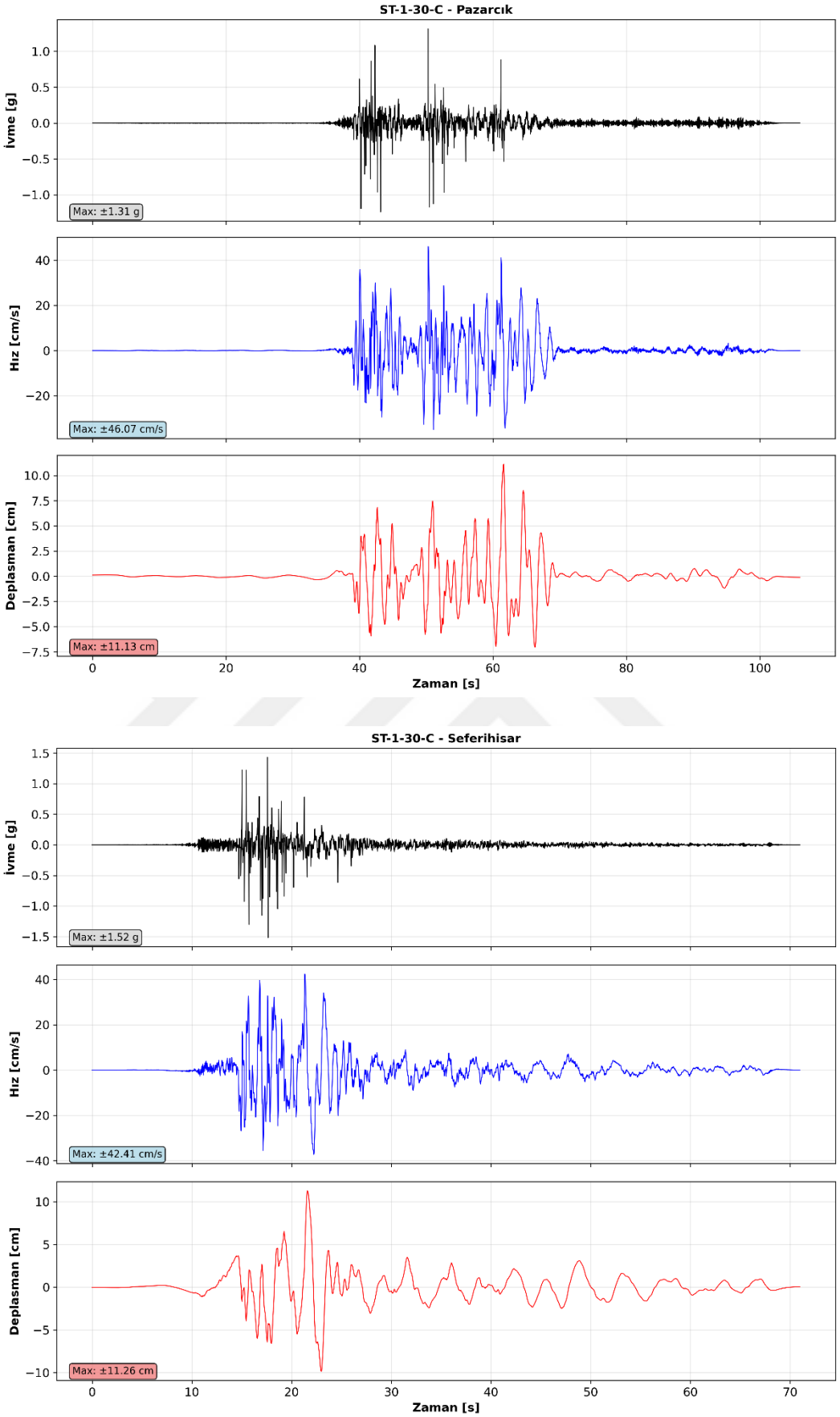
ST-1-30-C modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 94 ve Şekil 95) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (1,92 g), Gölcük (1,74 g) ve Düzce (1,52 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,41 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 64,87 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Sivrice (59,00 cm/s) ve Afyon (56,03 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

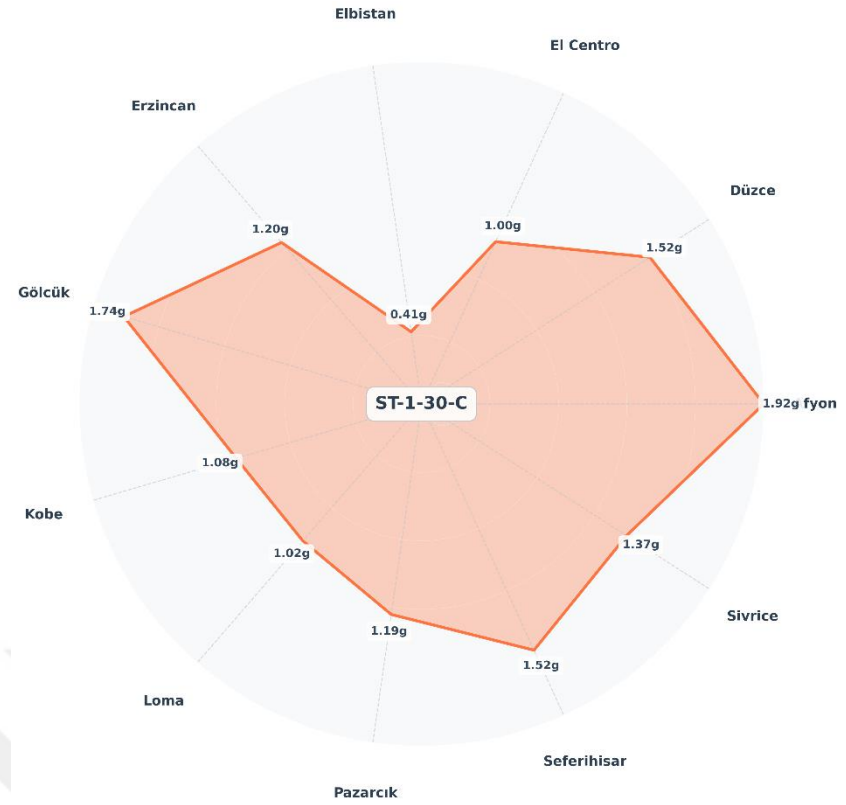
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,15 cm), Sivrice (13,73 cm) ve Düzce (12,81 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,01 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 95. ST-1-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Kobe, Pazarcık, Seferihisar) (devamı)



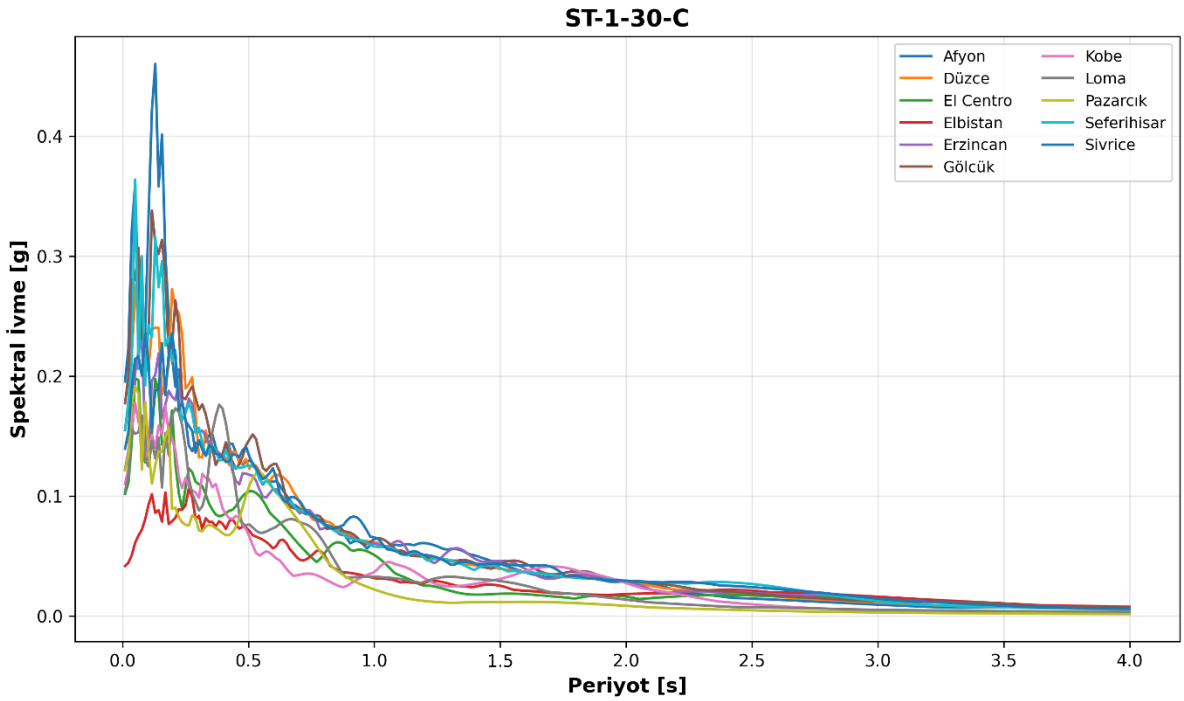
Şekil 96. ST-1-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Kobe, Pazarcık, Seferihisar) (devamı)



Şekil 97. ST-1-30-C modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-30-C modelinin spektral ivme analizleri (Şekil 96), modelin 0-0,5 saniye kısa periyot aralığında belirgin şekilde yüksek tepkiler verdiğini göstermektedir. Özellikle Düzce ve Gölcük deprem kayıtlarında 0,4-0,45g seviyelerine ulaşan pik ivme değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum modelin rijit yapı karakteristiği sergilediğini ve kısa periyotlu deprem dalgalarına karşı önemli bir rezonans riski taşıdığını ortaya koymaktadır. Periyot arttıkça ivme değerlerinin hızla düşmesi (1,0 saniyede ~0,25g, 2,0 saniyede ~0,15g) modelin orta ve uzun periyotlarda daha kontrollü davrandığını göstermektedir. Deprem türlerine göre performans farklılıkları incelendiğinde, Düzce ve Gölcük kayıtlarının en yüksek tepkileri oluşturduğu, El Centro ve Loma depremlerinin ise daha düşük ivme değerlerine yol açtığı tespit edilmiştir.



Şekil 98. ST-1-30-C modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

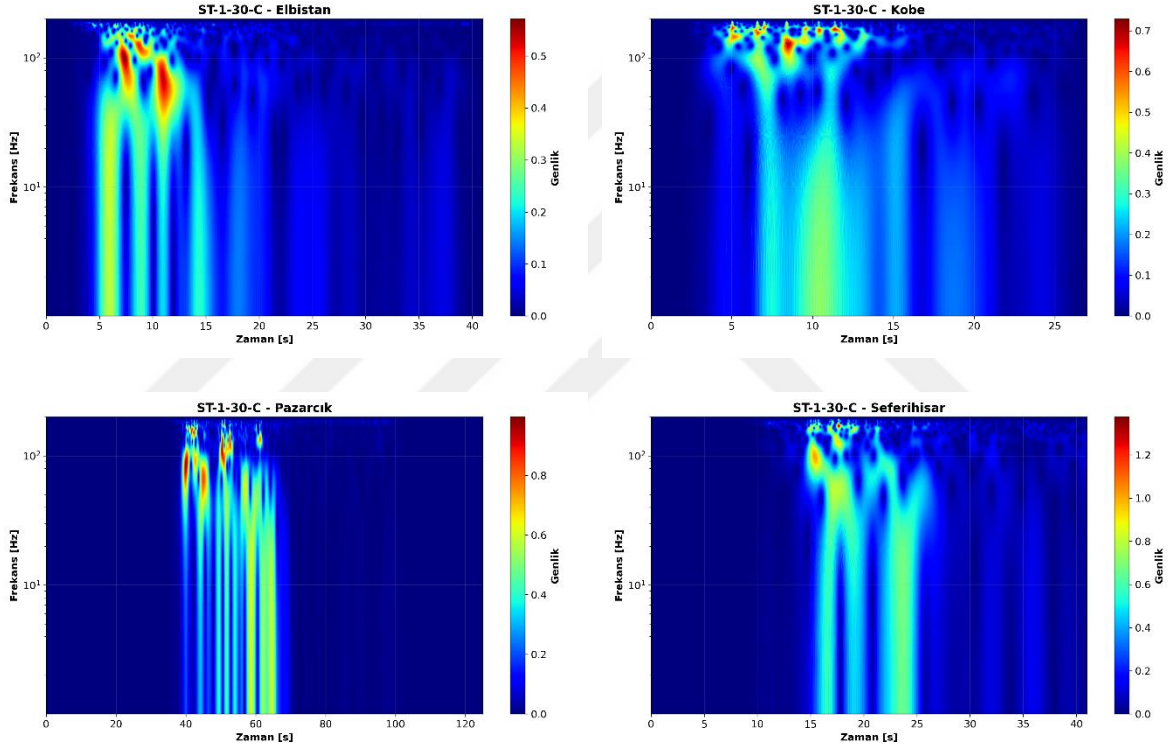
ST-1-30-C modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 97), yapının belirgin frekans seçiciliği ve zaman-bağımlı dinamik karakteristikler sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, bu düşük frekans bandı ölçekli modelin esnek davranış karakterini yansıtmaktadır. Analiz edilen on bir deprem kaydı arasında spektral genlik değerleri 0,5 ile 1,75 arasında geniş bir dağılım göstermiş, bu da modelin farklı sismik uyarı türlerine oldukça farklı tepkiler verdiğini işaret etmektedir.

En dikkat çekici bulgu Afyon deprem kaydında gözlemlenen 1,75 genlik değeridir. Bu değer diğer tüm deprem kayıtlarından belirgin şekilde yüksek olup, 6-12 saniye zaman aralığında geniş bir frekans bandında (50-200 Hz) sürekli yüksek enerji yoğunlaşması şeklinde kendini göstermektedir. Bu durum, Afyon kaydının frekans içeriğinin modelin doğal karakteristikleriyle güçlü bir uyum sergilediğini ve potansiyel rezonans koşullarının oluştuğunu düşündürmektedir. Buna karşılık, Kobe ve Elbistan kayıtları sırasıyla 0,7 ve 0,5 genlik değerleriyle en düşük tepkileri vermiş, bu kayıtların model için daha az kritik oldukları anlaşılmıştır.

Zamansal davranış açısından modelin çoğu deprem kaydında ilk 10-15 saniye içerisinde ana aktivitesini tamamladığı gözlemlenmiştir. Düzce, Loma, Gölcük ve Elbistan kayıtları bu hızlı sönüm karakteristiğini sergilerken, Sivrice, Seferihisar ve Erzincan kayıtları 15-20

saniyeye kadar uzanan aktivite göstermiştir. Bu uzun süreli aktivite, söz konusu deprem kayıtlarının modelde sürekli enerji transferini destekleyen frekans bileşenlerine sahip olduğunu işaret etmektedir.

Frekans dağılımı incelendiğinde, modelin 50-150 Hz aralığında en yoğun tepkileri verdiği belirlenmiştir. Bu aralık, modelin birincil dinamik karakteristiğini oluşturmakta olup, çoğu deprem kaydında spektral enerjinin bu bandda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. El Centro kaydında tespit edilen çift fazlı aktivite (2-8 saniye ve 10-12 saniye) ise modelin farklı frekans modları arasında geçiş yapabildiğini ve aynı sismik uyarı altında çoklu dinamik tepkiler sergileyebildiğini göstermektedir. Gölcük ve Seferihisar kayıtlarında 1,2 seviyesinde ulaşan genlik değerleri, bu kayıtların model için kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 99. ST-1-30-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Kobe, Pazarcık, Seferihisar)

ST-1-40-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

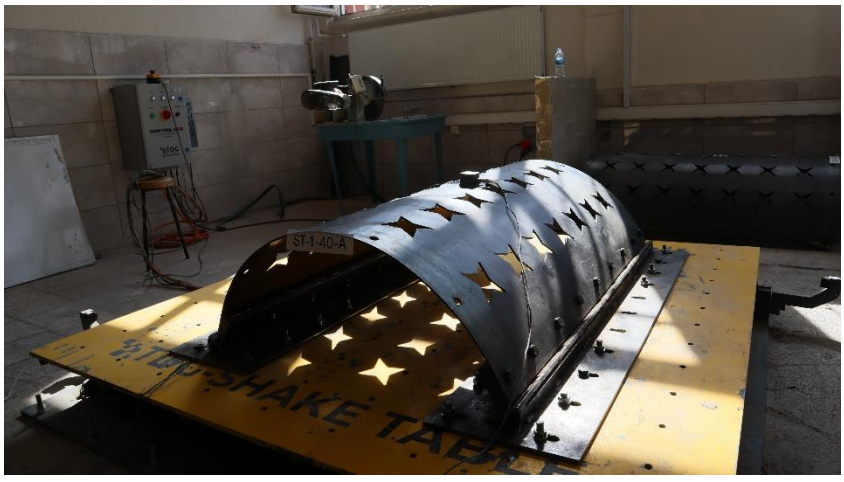
ST-1-40-A tonoz modeli (Şekil 98) için gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının doğal titreşim karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim temelli modal çözümleme uygulanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen ilk altı doğal frekans değeri sırasıyla 47,64 Hz, 91,73 Hz, 96,22 Hz, 141,42 Hz, 162,93 Hz ve 216,4 Hz olarak hesaplanmıştır. Özellikle temel mod frekansı olan 47,64 Hz, yapının dinamik davranışında kritik rol oynamakta

ve bu frekans civarındaki dış zorlamaların rezonansa yol açma potansiyeli bulunduğunu göstermektedir.

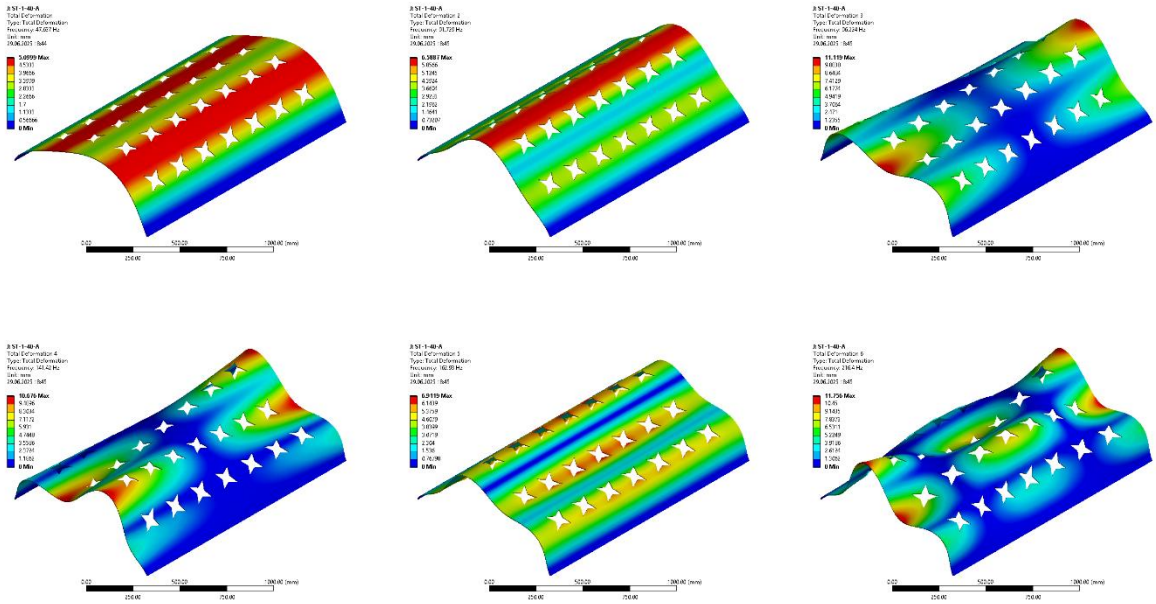
Mod şekilleri (Şekil 99) incelendiğinde, yapının her modda farklı deformasyon paternleri sergilediği görülmüştür. Birinci modda gözlemlenen deformasyon paterni düzenli ve simetrik bir yayılım göstermekte olup, maksimum deformasyon değeri 5,1 mm olarak ölçülmüştür. İkinci ve üçüncü modlar, daha karmaşık titreşim şekilleriyle öne çıkmakta ve özellikle üçüncü modda maksimum deformasyonun 11,12 mm seviyesine ulaşması, yapının belirli bölgelerinde titreşim enerjisinin yoğunlaştığını göstermektedir. Bu iki modun yakın frekanslarda yer alması ($\Delta f = 4{,}49$ Hz), modlar arası etkileşim ihtimalini ortaya koymakta ve bu frekans bandının mühendislik tasarımlarında dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Dördüncü ve beşinci modlarda deformasyon paternleri daha lokalize hale gelmiş ve dalga boylarının kısaldığı görülmüştür. Altıncı modda ise 11,76 mm ile tüm modlar içerisindeki en yüksek maksimum deformasyon değeri elde edilmiştir. Bu durum, yapının yüksek frekanslı uyarımlar altında belirli bölgelerinde oldukça büyük yer değiştirmelere maruz kalabileceğini göstermektedir.

Efektif kütle analizine göre, X doğrultusunda birinci modun 0,19 ton değerindeki kütlesel katılımıyla baskın olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapının X eksenindeki dinamik yanıtının büyük ölçüde temel mod tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. İkinci modda Y yönündeki 0,05 tonluk katılım, bu doğrultuda ikinci modun etkinliğini öne çıkarırken; üçüncü modda Z eksenine ait 0,03 tonluk efektif kütle, dikey dinamik davranış açısından bu modun belirleyici rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 100. ST-1-40-A deney modeli



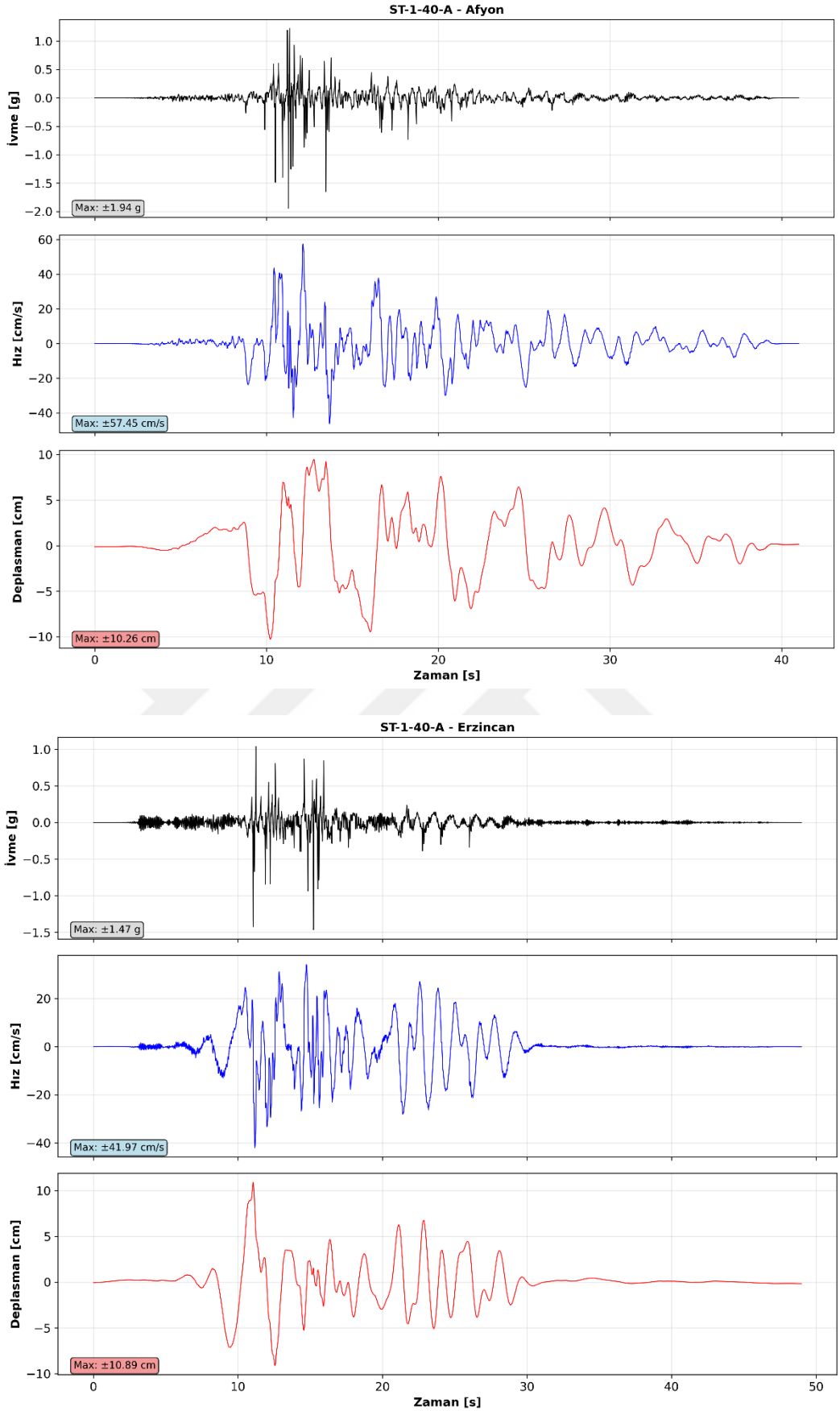
Şekil 101. ST-1-40-A modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

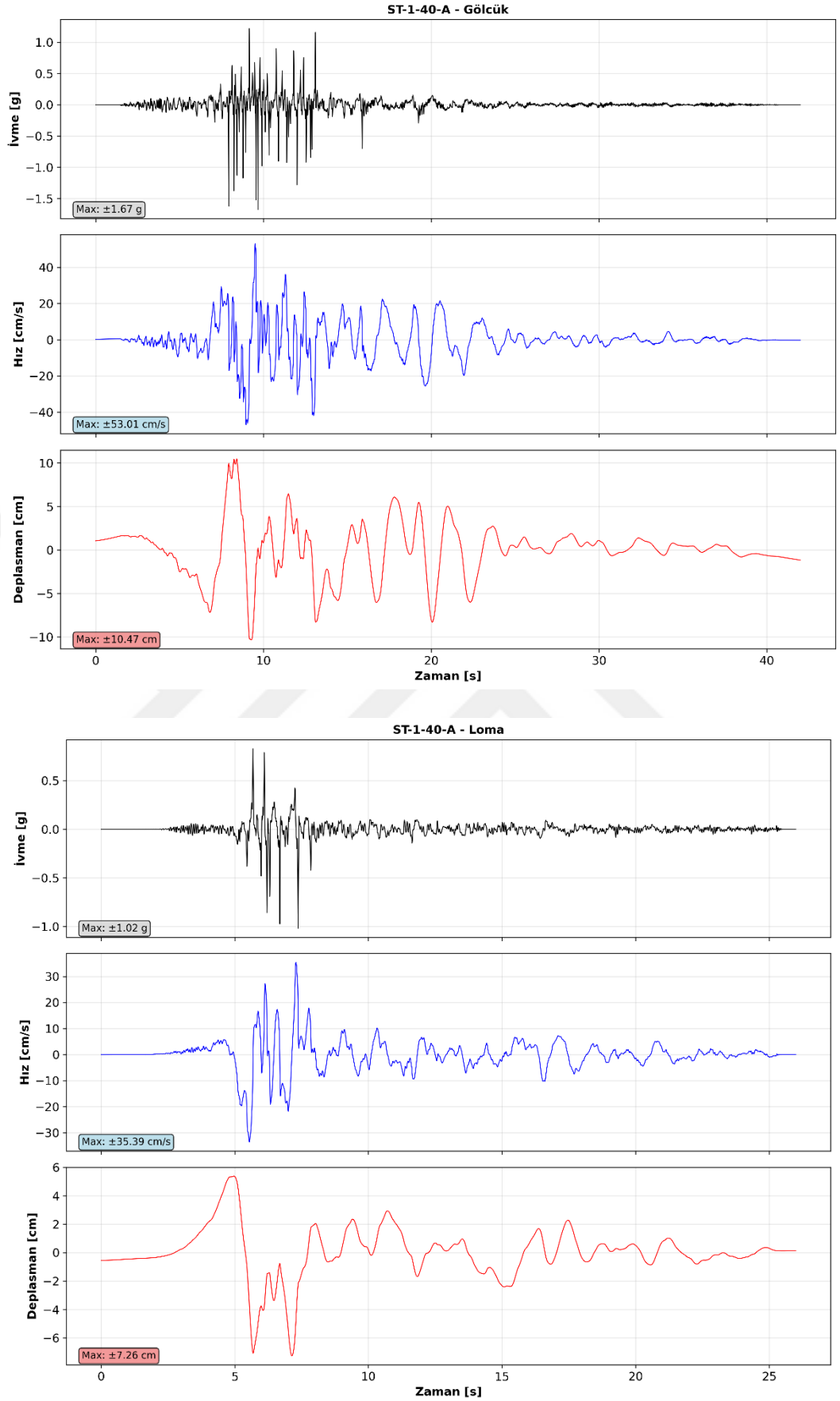
ST-1-40-A modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 100 ve Şekil 101) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (1,94 g), Gölcük (1,67 g) ve Seferihisar (1,60 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,42 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 64,17 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Sivrice (58,28 cm/s) ve Afyon (57,45 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir.

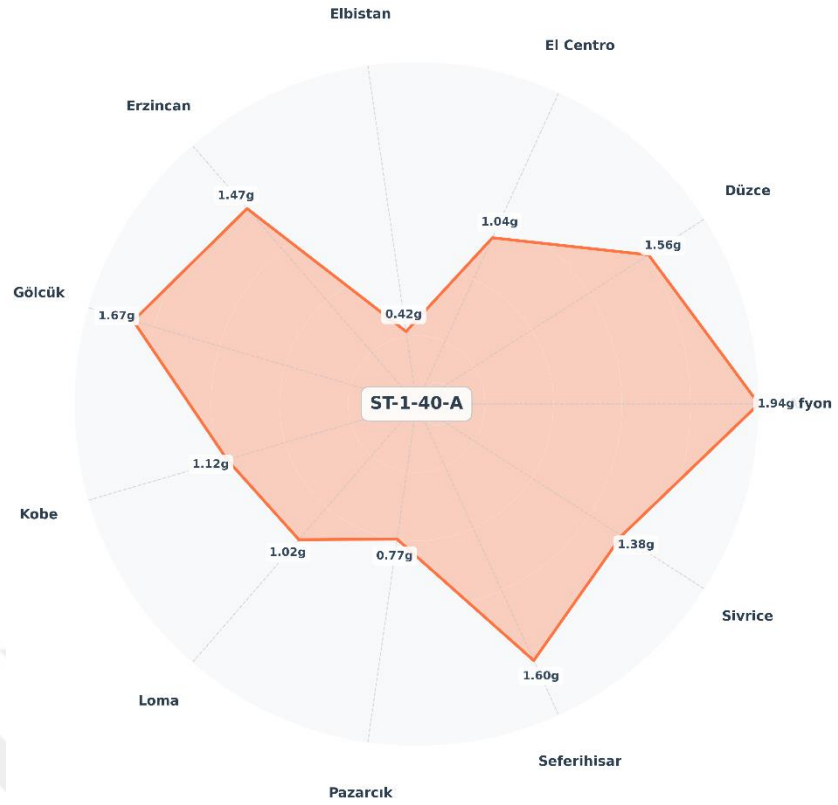
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,13 cm), Sivrice (13,46 cm) ve Düzce (12,79 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,26 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 102. ST-1-40-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, Erzincan, Gölcük, Loma)



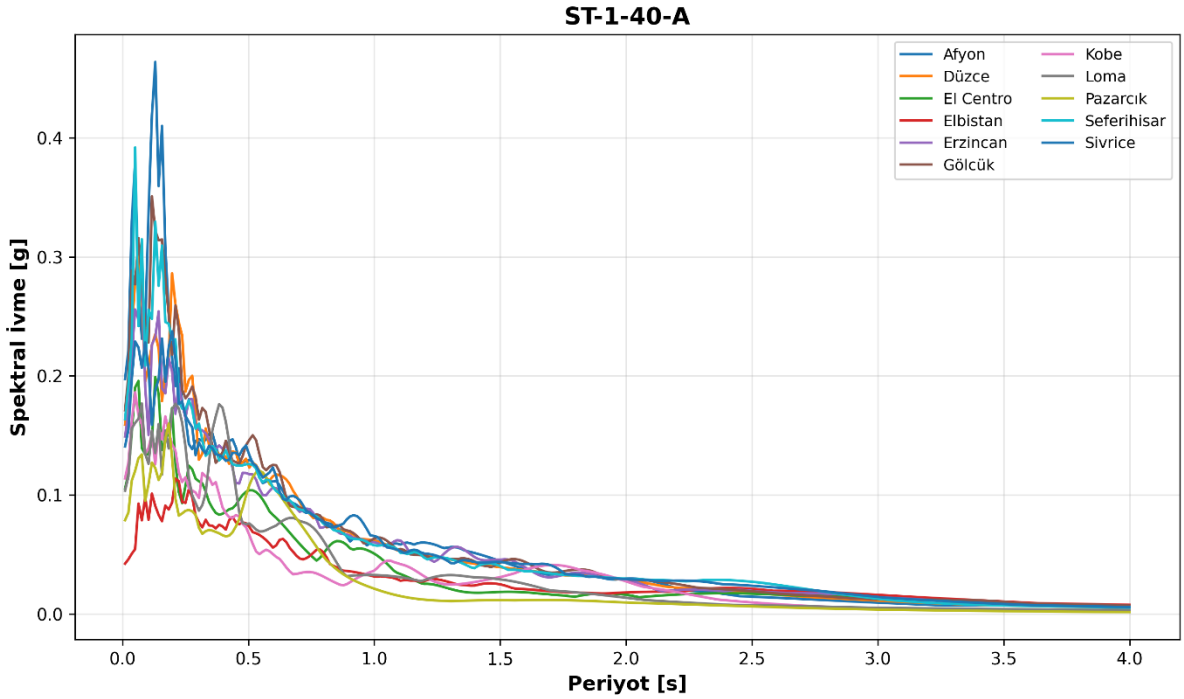
Şekil 100. ST-1-40-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, Erzincan, Gölcük, Loma)



Şekil 103. ST-1-40-A modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-40-A modelinin spektral ivme sonuçları (Şekil 102), modelin kısa periyot bölgesinde (0 -0,5 s) yoğunlaştığını göstermektedir, Ayon ve Kobe deprem kayıtlarında 0,50-0,55g seviyelerine ulaşan pik değerler, modelin bu periyot aralığında son derece duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 0,1-0,3 saniye aralığında gözlemlenen yüksek ivme değerleri, modelin rijit yapı karakteristiği sergilediğini göstermektedir. Modelin daha uzun periyotlardaki davranışına ilişkin veri bulunmamakla birlikte, mevcut sonuçlar modelin kısa periyotlu deprem etkilerine karşı yüksek risk taşıdığını göstermektedir. Bu bulgular ışığında, modelin kısa periyotlu deprem etkilerine karşı özel önlemlerle desteklenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 104. ST-1-40-A spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-40-A modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 103), modelin belirgin frekans seçiciliği ve değişken dinamik karakteristikler sergilediğini ortaya koymaktadır. En dikkat çekici bulgu, Seferihisar deprem kaydında gözlemlenen 1,4 genlik değeridir. Bu değer, analiz edilen tüm kayıtlar arasında en yüksek tepkiyi oluşturmakta ve modelin bu spesifik uyarıya karşı güçlü bir duyarlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Bu yüksek tepki, 8-20 saniye zaman aralığında 50-150 Hz frekans bandında geniş bir yayılım göstermiş ve modelin bu kayıt altında uzun süreli enerji birikimi yaşadığını işaret etmektedir.

Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0,5 ile 1,4 arasında değişim sergilemiştir. Düzce, Gölcük ve Erzincan kayıtları 1,0-1,2 aralığında orta-yüksek tepkiler verirken, bu kayıtların tümünde erken dönem yoğun aktivite (5-10 saniye) gözlemlenmiştir. Düzce kaydında 6-8 saniye aralığında 50-200 Hz bandında yoğun spektral aktivite, Gölcük'te 5-12 saniye aralığında 1,2 seviyesinde geniş bandlı tepki ve Erzincan'da 8-18 saniye aralığında uzun süreli 1,0 seviyesinde aktivite tespit edilmiştir. Bu üç kayıt, modelin orta-yüksek genlik aralığında tutarlı davranış sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

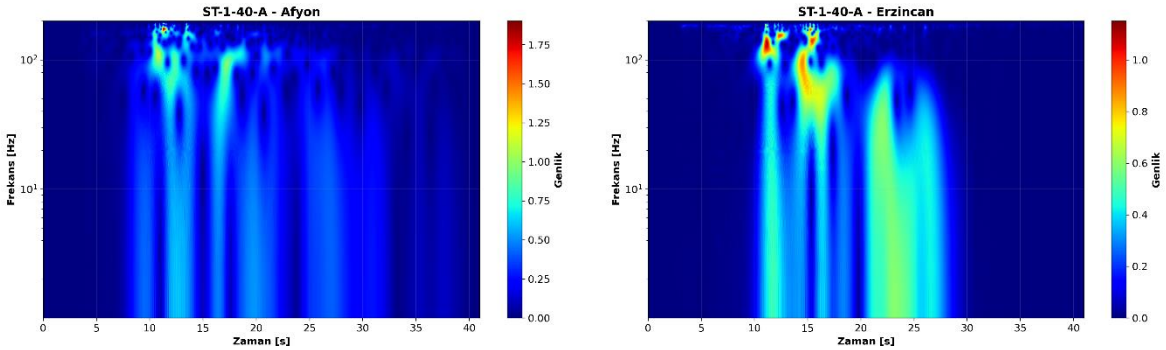
Loma, Pazarcık ve Sivrice kayıtları ise modelin farklı zamansal karakteristikler sergilediği örnekleri oluşturmaktadır. Loma kaydında 3-6 saniye aralığında 1,0 seviyesinde kısa

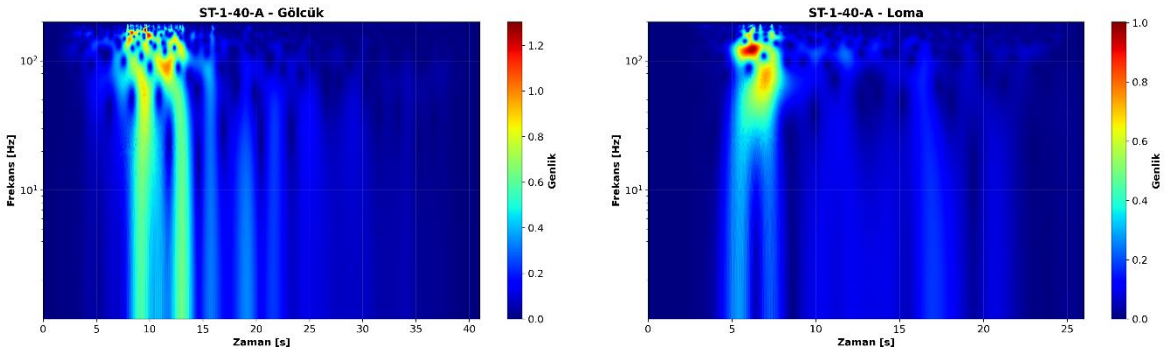
süreli yoğun aktivite gözlenirken, Pazarcık'ta aktivite 40-60 saniye aralığında tespit edilmiştir. Sivrice kaydında ise çoklu aktivite dönemleri (6-10 ve 15-20 saniye) gözlemlenmiş, bu da modelin bu kayıt altında farklı dinamik modları art arda aktive edebildiğini ortaya koymaktadır.

El Centro ve Afyon kayıtları 0,8 seviyesinde orta düzey tepkiler vermiş, her ikisinde de çift fazlı aktivite paterni belirlenmiştir. El Centro'da 2-8 ve 10-12 saniye aralıklarında iki ayrı aktivite dönemi, Afyon'da ise 6-12 saniye aralığında daha yayılı bir tepki gözlemlenmiştir. Elbistan kaydı 0,5 seviyesiyle en düşük genlik değerini verirken, 6-10 saniye aralığında sınırlı aktivite sergilemiştir. Kobe kaydında ise 0,7 seviyesinde 4-12 saniye aralığına yayılan orta süreli aktivite tespit edilmiştir.

Zamansal davranış incelendiğinde, modelin çoğu deprem kaydında ilk 10-15 saniye içerisinde ana aktivitesini tamamladığı gözlemlenmiştir. Düzce, Loma, Gölcük, Elbistan ve Kobe kayıtları bu hızlı sönüm karakteristiğini sergilerken, Seferihisar, Sivrice ve Erzincan kayıtları 15-20 saniyeye kadar uzanan aktivite göstermiştir. Bu uzun süreli aktivite, söz konusu deprem kayıtlarının modelde sürekli enerji transferini destekleyen frekans bileşenlerine sahip olduğunu işaret etmektedir.

Frekans dağılımı açısından, modelin 50-150 Hz aralığında en yoğun tepkileri verdiği belirlenmiştir. Bu aralık, modelin birincil dinamik karakteristiğini oluşturmakta olup, çoğu deprem kaydında spektral enerjinin bu bandda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. El Centro ve Sivrice kayıtlarında tespit edilen çoklu aktivite dönemleri, modelin farklı frekans modları arasında geçiş yapabildiğini ve aynı sismik uyarı altında tekrarlayan dinamik tepkiler sergileyebildiğini göstermektedir.





Şekil 105. ST-1-40-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, Erzincan, Gölcük, Loma)

ST-1-40-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-1-40-B tonoz modeli (Şekil 104) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 47,11 Hz, 91,35 Hz, 95,81 Hz, 138,99 Hz, 164,12 Hz ve 210,54 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 47,11 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

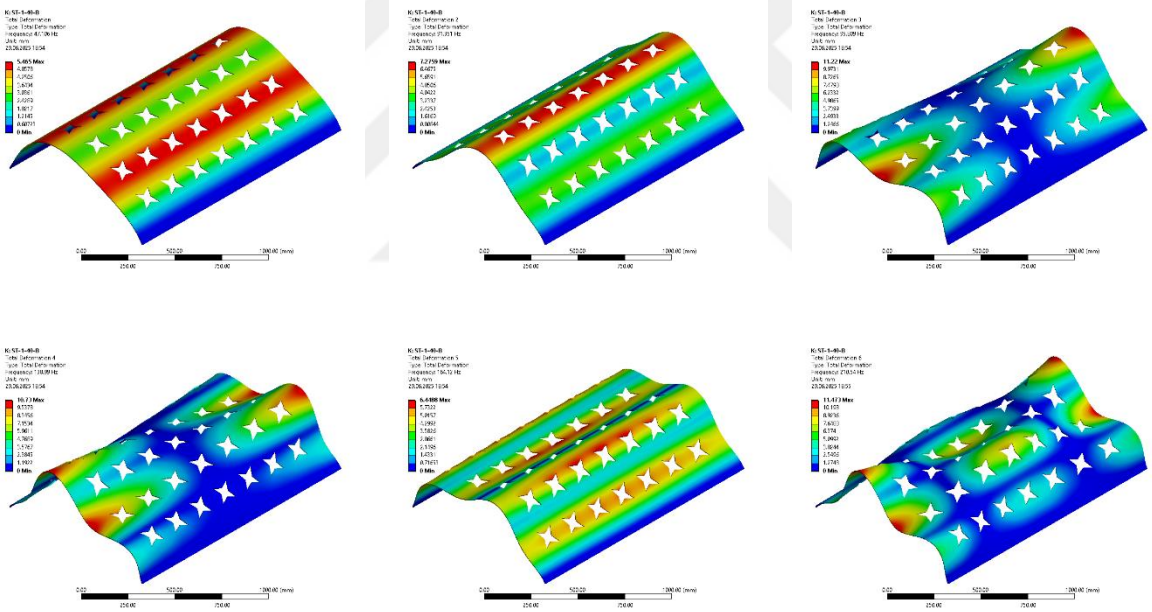
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 105), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 5,46 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 4,46 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve altıncı modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 11,47 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,03 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %43,72 gibi oldukça yüksek bir katılım sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, X doğrultusundaki dinamik yüklemeler altında temel modun kritik öneme sahip olduğunu ve dinamik analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun tüm doğrultularda %99,89 ila %100 arasında değişen oranlarda kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 106. ST-1-40-B deney modeli



Şekil 107. ST-1-40-B modal deformasyon şekilleri

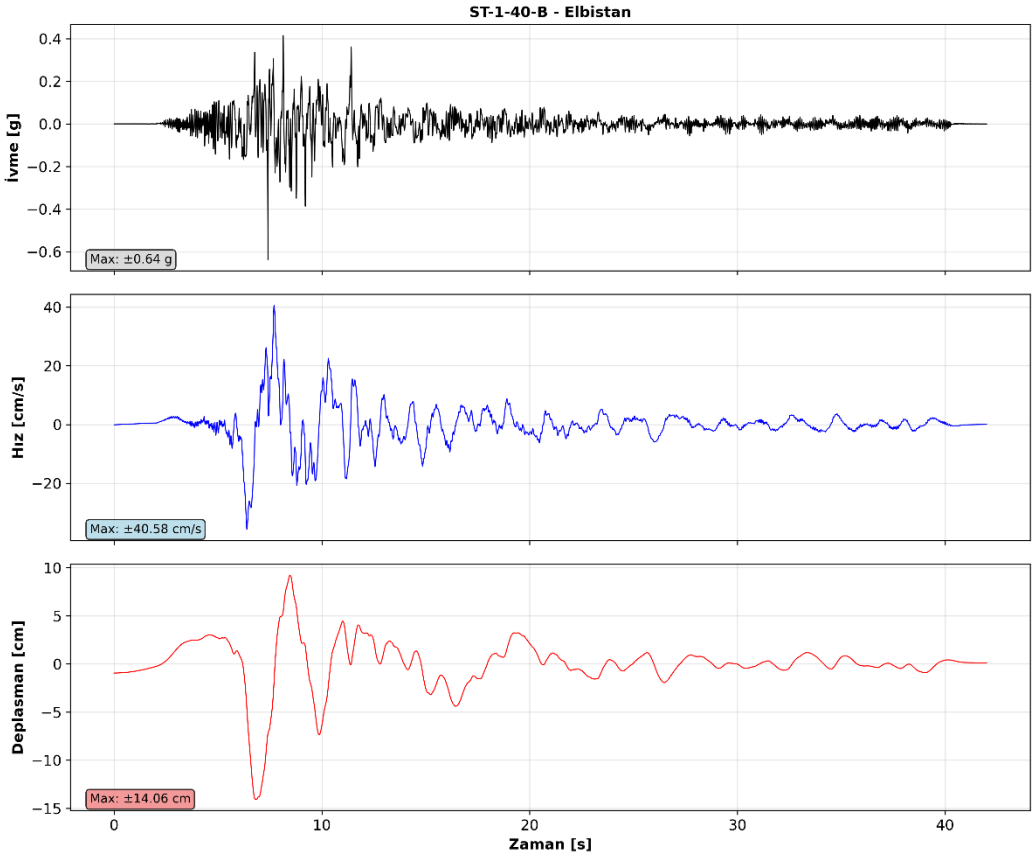
Dinamik tepki değerlendirmesi

ST-1-40-B modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 106 ve Şekil 107) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (1,92 g), Gölcük (1,59 g) ve Seferihisar (1,53 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,64 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir.

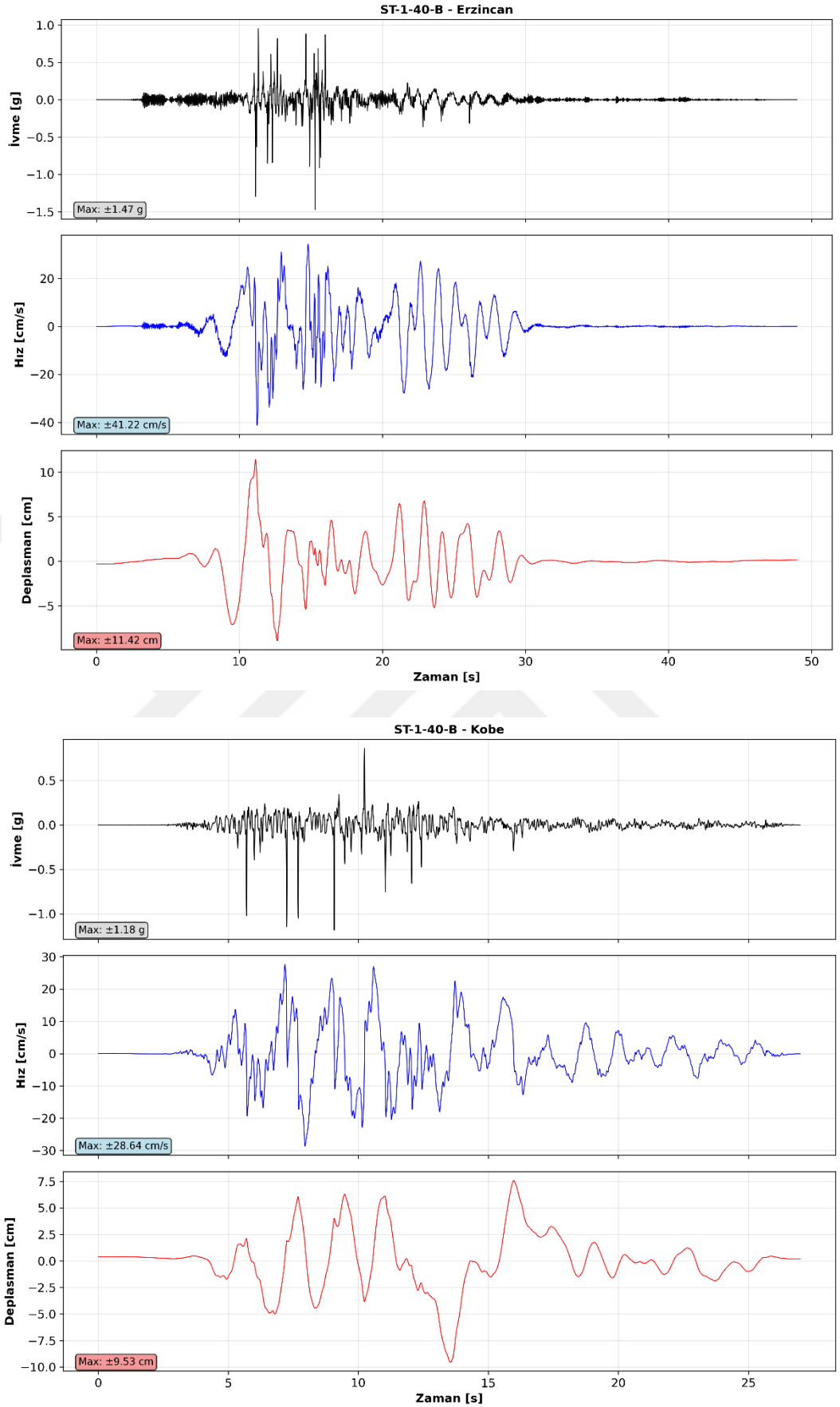
Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 63,72 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Sivrice (57,93 cm/s) ve Afyon (56,42 cm/s)

depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

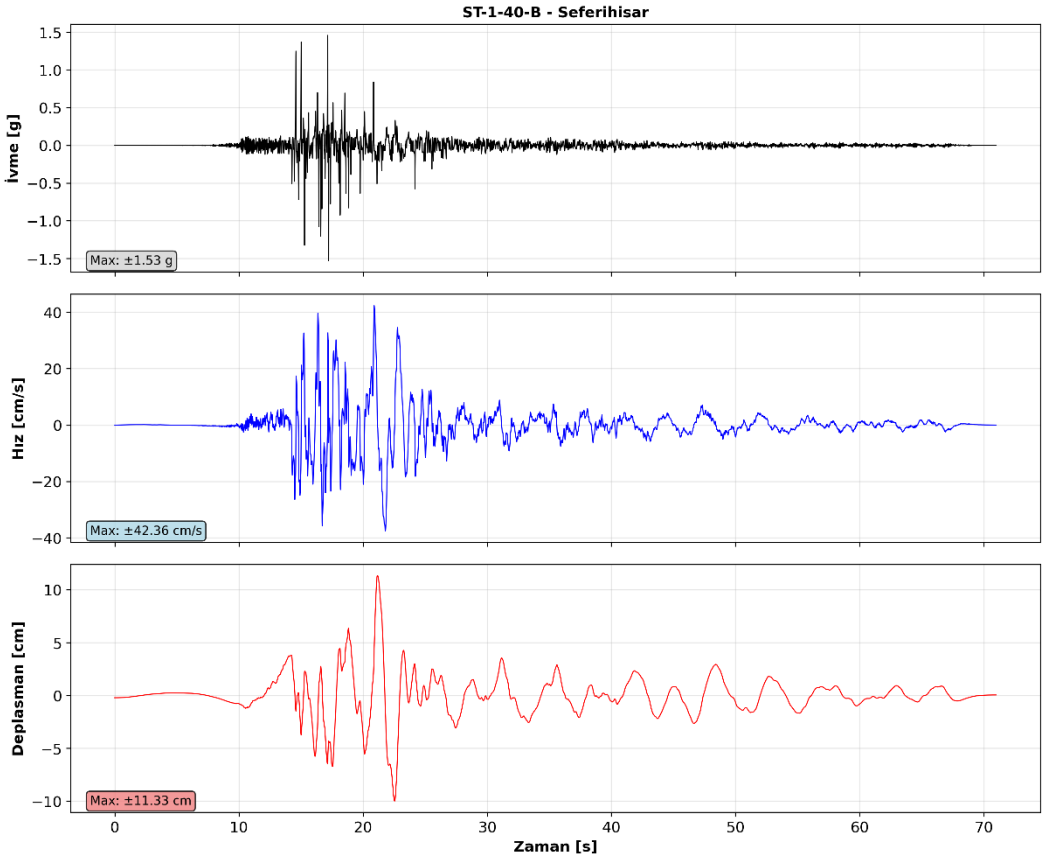
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,06 cm), Sivrice (13,23 cm) ve Düzce (12,58 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,00 cm ile kaydedilmiştir.



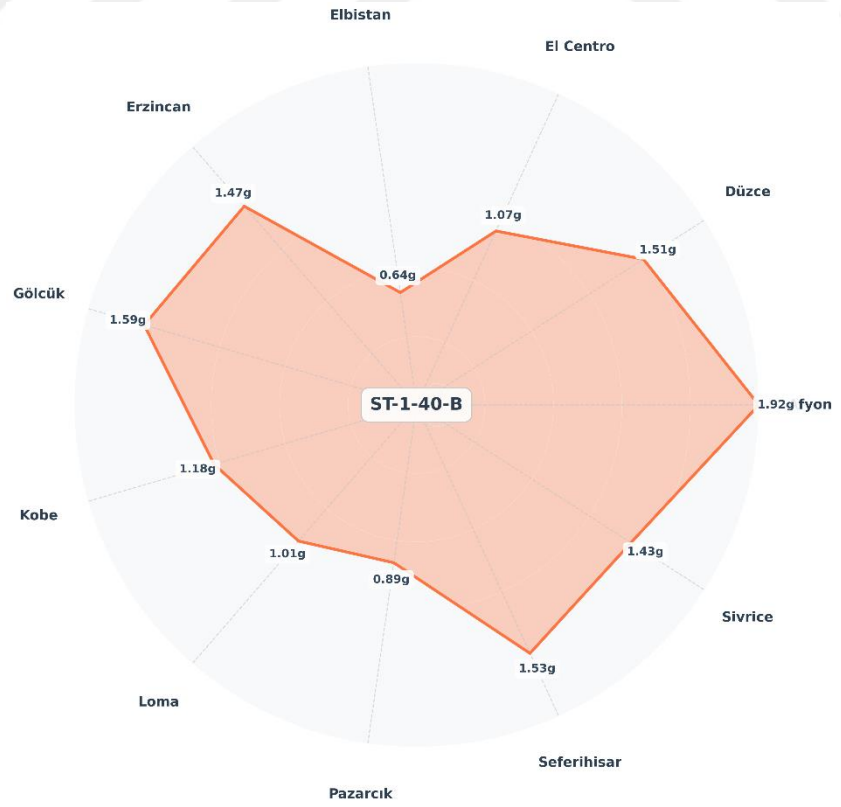
Şekil 108. ST-1-40-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Kobe, Seferihisar)



Şekil 106. ST-1-40-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Kobe, Seferihisar) (devamı)



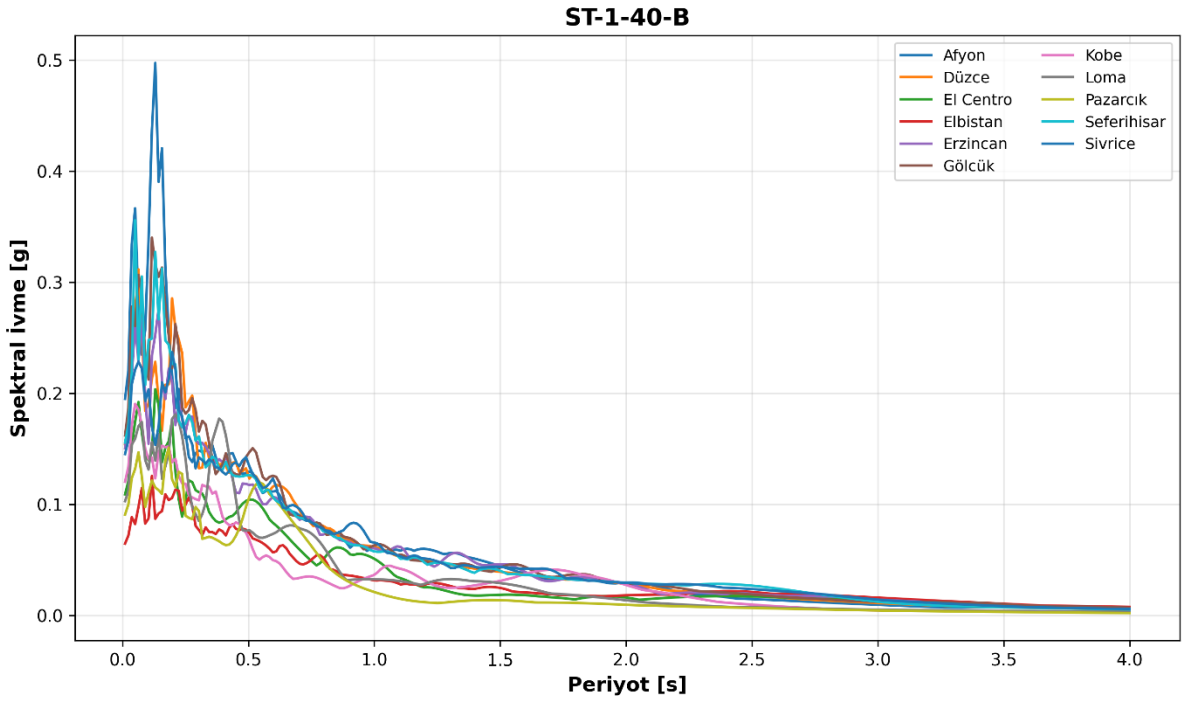
Şekil 106. ST-1-40-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Kobe, Seferihisar) (devamı)



Şekil 109. ST-1-40-B modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-40-B modelinin performans analizleri (Şekil 108), modelin 1,0-2,5 saniye periyot aralığında kritik davranışlar sergilediğini göstermektedir. Erzincan ve Pazarcık depremlerinde bu aralıkta 0,35-0,38g seviyelerinde ölçülen pik ivmeler, modelin orta periyotlarda yüksek duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Uzun periyotlarda (2,5-4,0 s) ivme değerlerinin 0,10-0,15g aralığında seyretmesi ise modelin bu frekans aralığında dengeli bir performans sergilediğini işaret etmektedir. Modelin özellikle orta periyotlu deprem etkilerine karşı özel olarak değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 110. ST-1-40-B modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-40-B modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 109), modelin karakteristik dinamik davranış özellikleri sergilediğini ve deprem kayıt türlerine göre belirgin tepki farklılıkları gösterdiğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0.5 ile 1.75 arasında geniş bir dağılım sergilemiştir. Bu geniş genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı karakteristiklerine karşı oldukça değişken tepkiler verme kapasitesine sahip olduğunu işaret etmektedir.

En dikkat çekici bulgu, Afyon deprem kaydında gözlemlenen 1,75 genlik değeridir. Bu değer, analiz edilen tüm kayıtlar arasında en yüksek tepkiyi oluşturmakta ve modelin bu spesifik uyarıya karşı güçlü bir duyarlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Afyon kaydında 6-12 saniye

zaman aralığında 50-200 Hz frekans bandında yoğun spektral aktivite gözlemlenmiş, bu da modelin bu kayıt altında uzun süreli ve yüksek genlikli enerji birikimi yaşadığını ortaya koymaktadır. Seferihisar kaydı 1,2 seviyesiyle ikinci en yüksek tepkiyi verirken, 8-18 saniye aralığında geniş bandlı aktivite sergilemiştir.

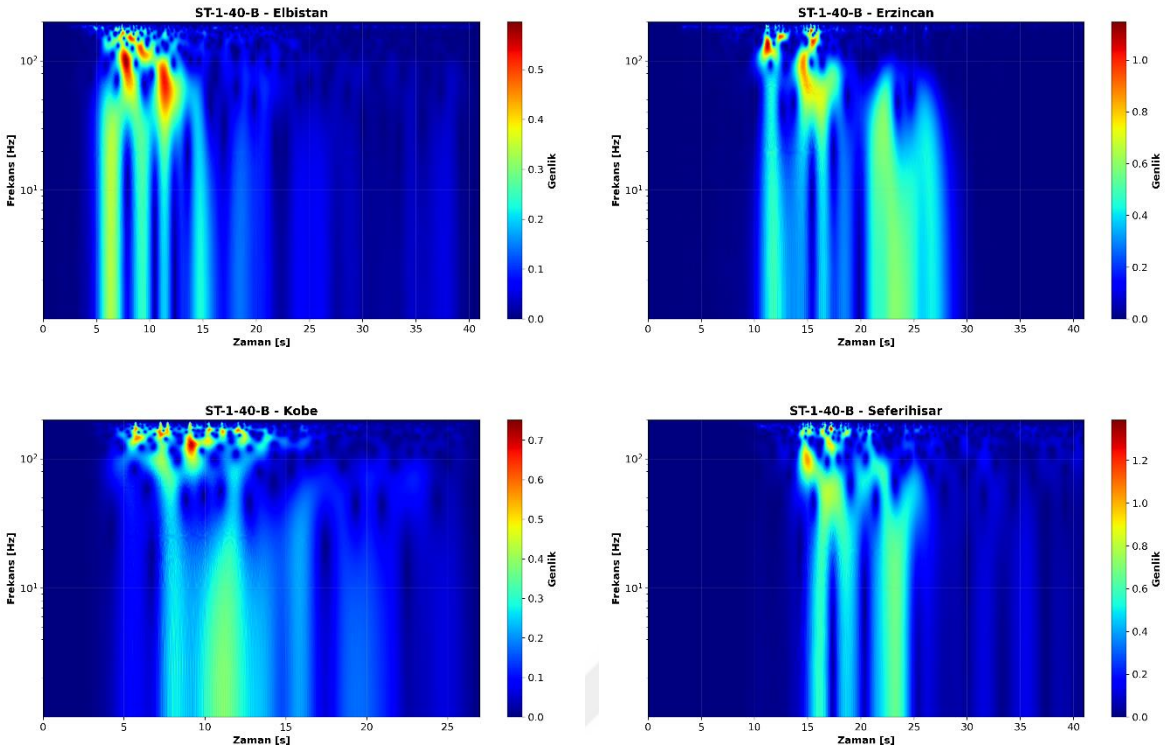
Düzce, Gölcük ve Erzincan kayıtları 1,0-1,2 aralığında orta-yüksek tepkiler vermiş ve benzer zamansal karakteristikler sergilemiştir. Düzce kaydında 5-8 saniye aralığında 50-200 Hz bandında yoğun spektral aktivite, Gölcük'te 5-12 saniye aralığında 1,2 seviyesinde geniş bandlı tepki ve Erzincan'da 8-18 saniye aralığında uzun süreli 1,0 seviyesinde aktivite tespit edilmiştir. Bu üç kayıt, modelin tutarlı orta-yüksek genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir ve hepsinde erken dönem aktivitesi dominant karakter göstermektedir.

Loma ve Sivrice kayıtları özel zamansal karakteristikler sergilemektedir. Loma kaydında 3-6 saniye aralığında 1,0 seviyesinde kısa süreli ancak yoğun aktivite gözlenirken, Sivrice kaydında çoklu aktivite dönemleri (6-10 ve 15-20 saniye) tespit edilmiştir. Sivrice'deki bu çift fazlı aktivite, modelin bu kayıt altında farklı dinamik modları sıralı olarak aktive edebildiğini göstermektedir. El Centro kaydı ise 0,8 seviyesinde çift fazlı aktivite paterni sergilemiş, 2-8 ve 10-12 saniye aralıklarında iki ayrı aktivite dönemi gözlemlenmiştir.

Pazarcık kaydında 40-60 saniye aralığında aktivite gözlemlenmiş ve bu aktivite 1,0 seviyesinde yoğun bir spektral yığılma şeklinde kendini göstermiştir. Kobe kaydında 0,7 seviyesinde 4-12 saniye aralığına yayılan orta süreli aktivite, Elbistan kaydında ise 0,5 seviyesiyle en düşük genlik değeri tespit edilmiş ve bu kayıt 6-10 saniye aralığında sınırlı aktivite sergilemiştir.

Zamansal davranış açısından, modelin çoğu deprem kaydında ilk 10-15 saniye içerisinde ana aktivitesini tamamladığı gözlemlenmiştir. Düzce, Loma, Gölcük ve Elbistan kayıtları bu hızlı sönüm karakteristiğini sergilerken, Afyon, Seferihisar, Sivrice ve Erzincan kayıtları 15-20 saniyeye kadar uzanan aktivite göstermiştir. Bu uzun süreli aktivite, söz konusu deprem kayıtlarının modelde sürekli enerji transferini destekleyen frekans bileşenlerine sahip olduğunu işaret etmektedir.

Frekans dağılımı incelendiğinde, modelin 50-150 Hz aralığında en yoğun tepkileri verdiği belirlenmiştir. Bu aralık, modelin birincil dinamik karakteristiğini oluşturmakta olup, çoğu deprem kaydında spektral enerjinin bu bandda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. El Centro ve Sivrice kayıtlarında tespit edilen çoklu aktivite dönemleri, modelin farklı frekans modları arasında geçiş yapabildiğini ve aynı sismik uyarı altında tekrarlayan dinamik tepkiler sergileyebildiğini göstermektedir.



Şekil 111. ST-1-40-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Erzincan, Kobe, Seferihisar)

ST-1-40-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-1-40-C tonoz modeli (Şekil 110) üzerinde yürütülen modal analiz çalışması kapsamında, yapının doğal frekansları ve titreşim modları belirlenerek dinamik karakteristikleri ortaya konmuştur. İlk altı mod için hesaplanan doğal frekanslar sırasıyla 46,51 Hz, 90,64 Hz, 95,24 Hz, 135,74 Hz, 163,00 Hz ve 203,92 Hz olarak elde edilmiştir. Bu değerlerden ilki olan 46,51 Hz, yapının temel modunu temsil etmekte olup, bu frekansa yakın dış etkilerin rezonans riskini artırabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Mod şekilleri (Şekil 111) incelendiğinde, birinci modda simetrik ve düzgün bir deformasyon paterninin oluştuğu, maksimum deformasyon değerinin ise 5,51 mm olduğu gözlemlenmiştir. İkinci ve üçüncü modlarda yapının daha karmaşık biçimlerde titreşim sergilediği ve özellikle üçüncü modda maksimum deformasyonun 11,30 mm'ye ulaştığı görülmektedir. Bu iki modun frekanslarının birbirine yakın olması (Δf = 4,60 Hz), mod yakınlığına bağlı etkileşim potansiyelini artırmakta ve bu aralıkta meydana gelebilecek yapısal rezonanslara karşı dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir.

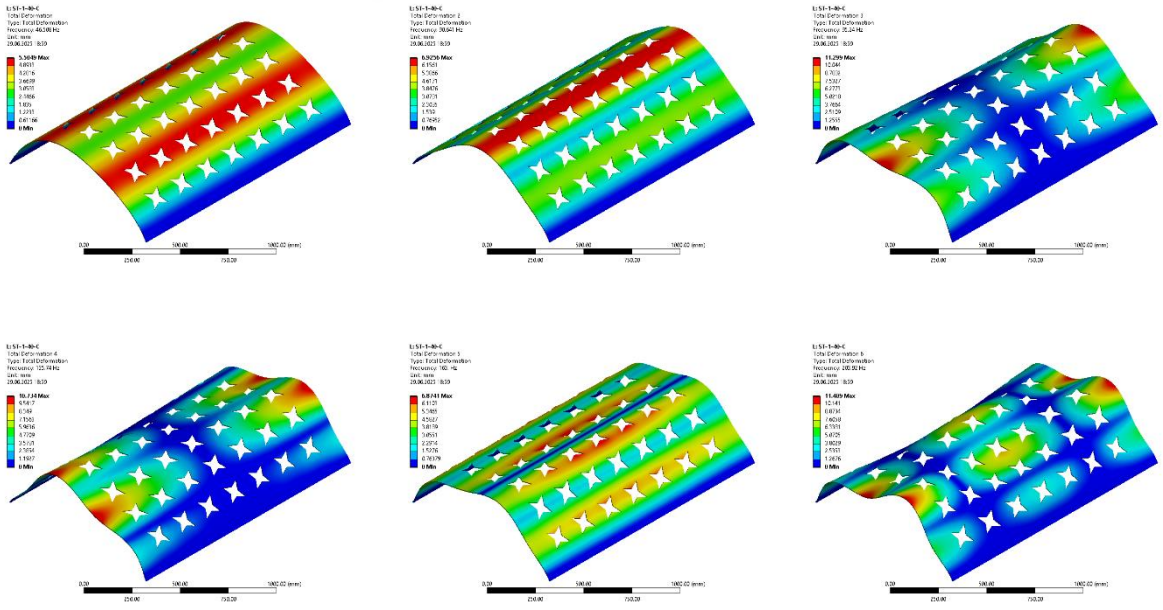
Dördüncü ve beşinci modlarda deformasyon paternlerinin daha lokalize hale geldiği, beşinci modda maksimum deformasyonun 6,87 mm ile sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Altıncı modda ise 11,41 mm'lik maksimum deformasyon ile tüm modlar arasında en yüksek yer

değiştirme değerine ulaşılmış ve bu durum, yapının belirli alanlarında yüksek genlikli dinamik davranış sergileyebileceğini ortaya koymuştur.

Efektif kütle katılım oranları açısından incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun 0,18 ton ile öne çıktığı ve temel modun bu doğrultuda baskın olduğu belirlenmiştir. İkinci modda Y ekseninde 0,05 tonluk katılım elde edilmiş, bu da bu modun özellikle yatay doğrultudaki dinamik davranışta etkili olduğunu göstermektedir. Üçüncü modda ise Z ekseninde 0,03 tonluk katılım ile dikey titreşim bileşenlerinin kontrolü sağlanmaktadır.



Şekil 112. ST-1-40-C deney modeli



Şekil 113. ST-1-40-C modeli modal deformasyon şekilleri

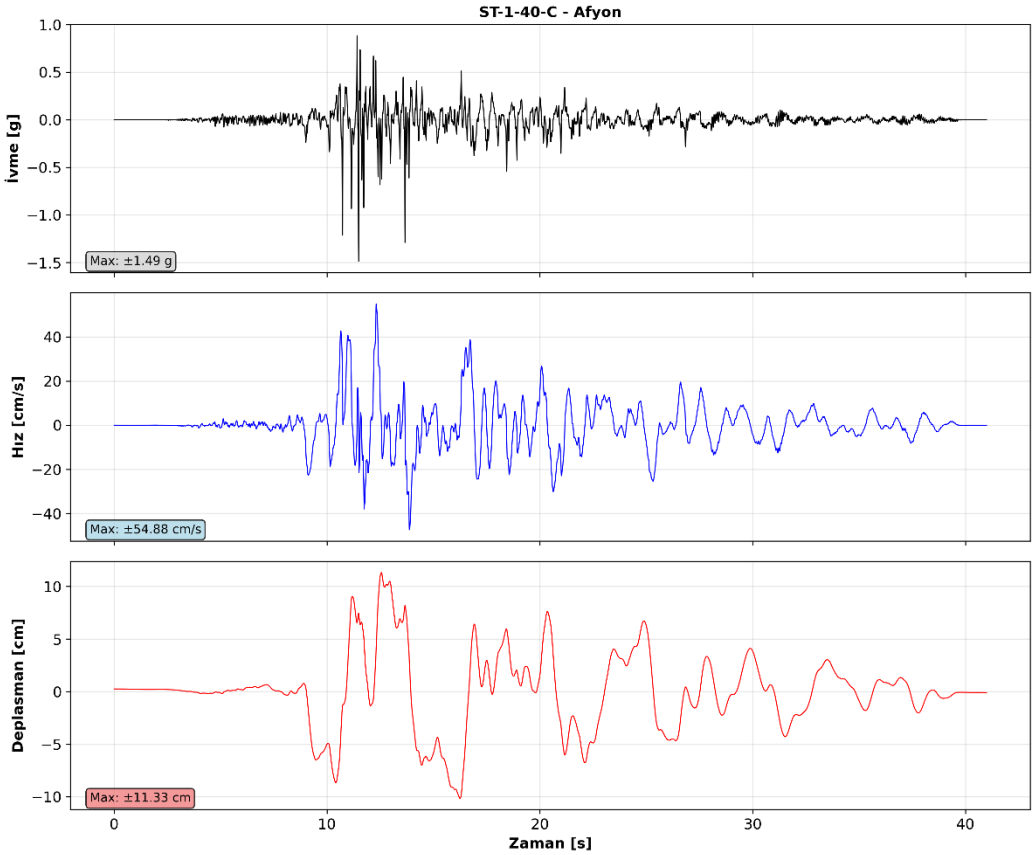
Dinamik tepki değerlendirmesi

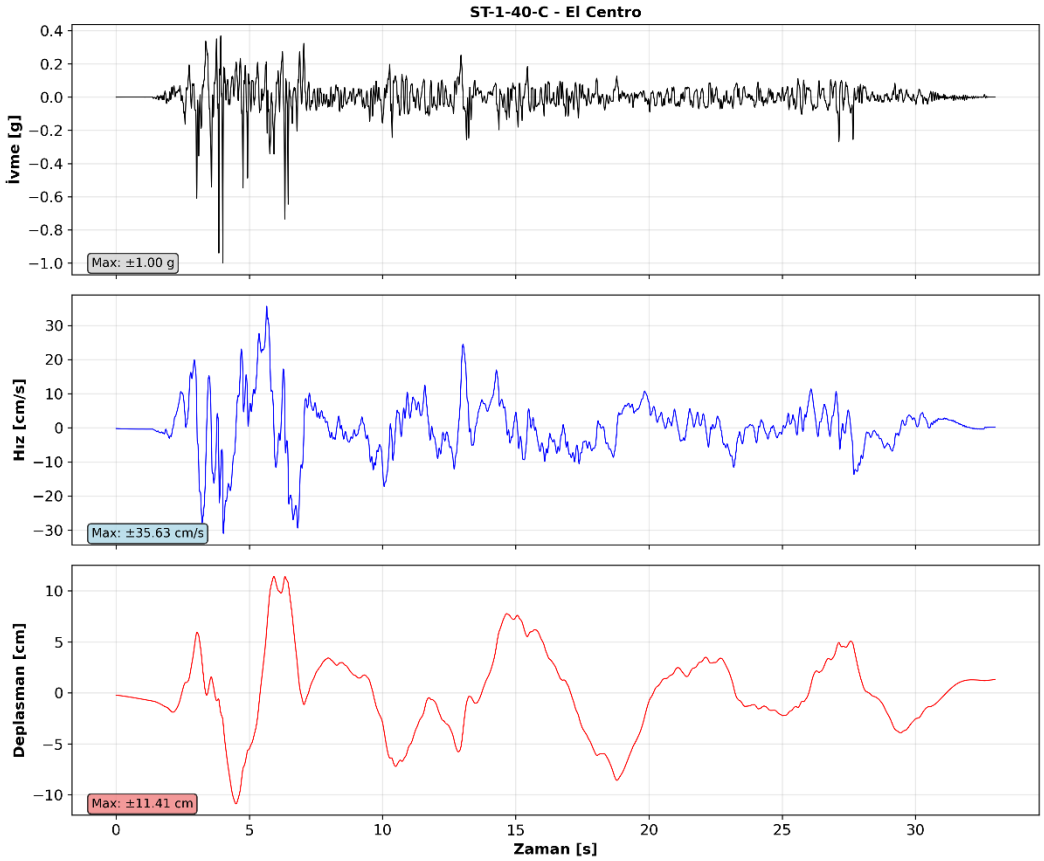
ST-1-40-C modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 112 ve Şekil 113) ayrıntılı

şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Gölcük (1,50 g), Afyon (1,49 g) ve Pazarcık (1,48 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,42 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir.

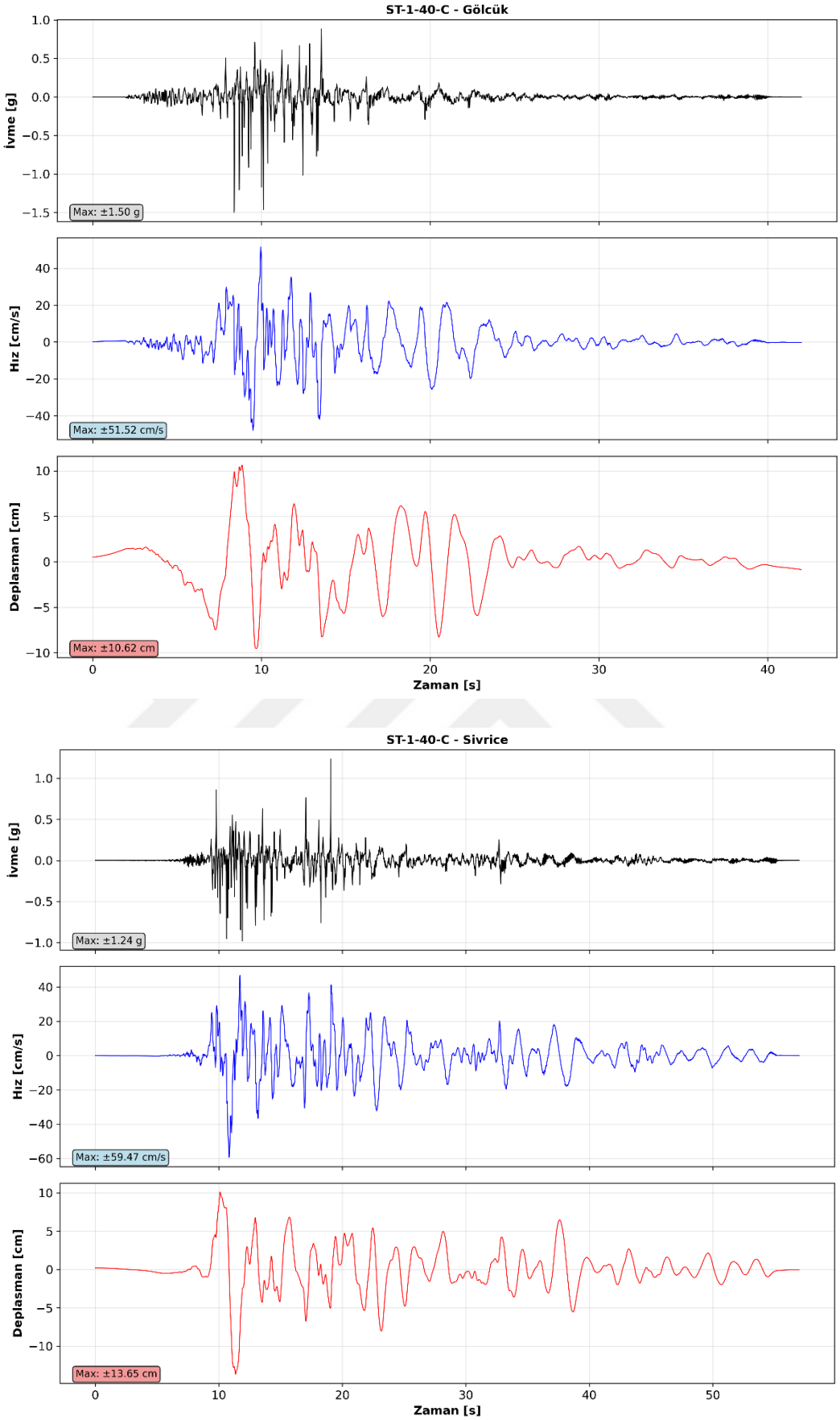
Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 64,45 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Sivrice (59,47 cm/s) ve Afyon (54,88 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (13,93 cm), Düzce (13,81 cm) ve Sivrice (13,65 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 6,91 cm ile kaydedilmiştir.

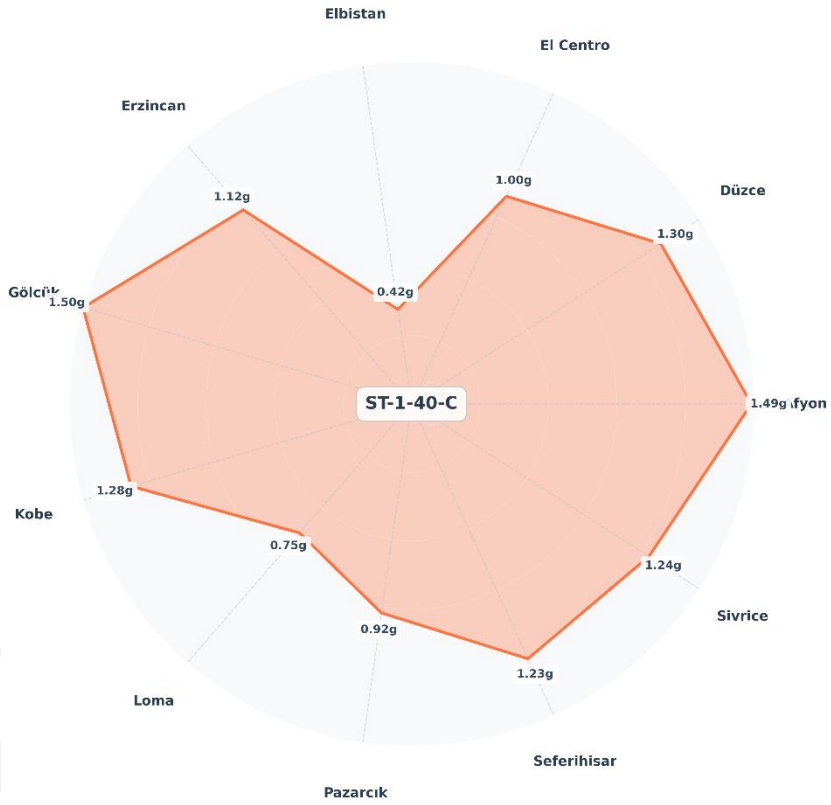




Şekil 114. ST-1-40-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice)



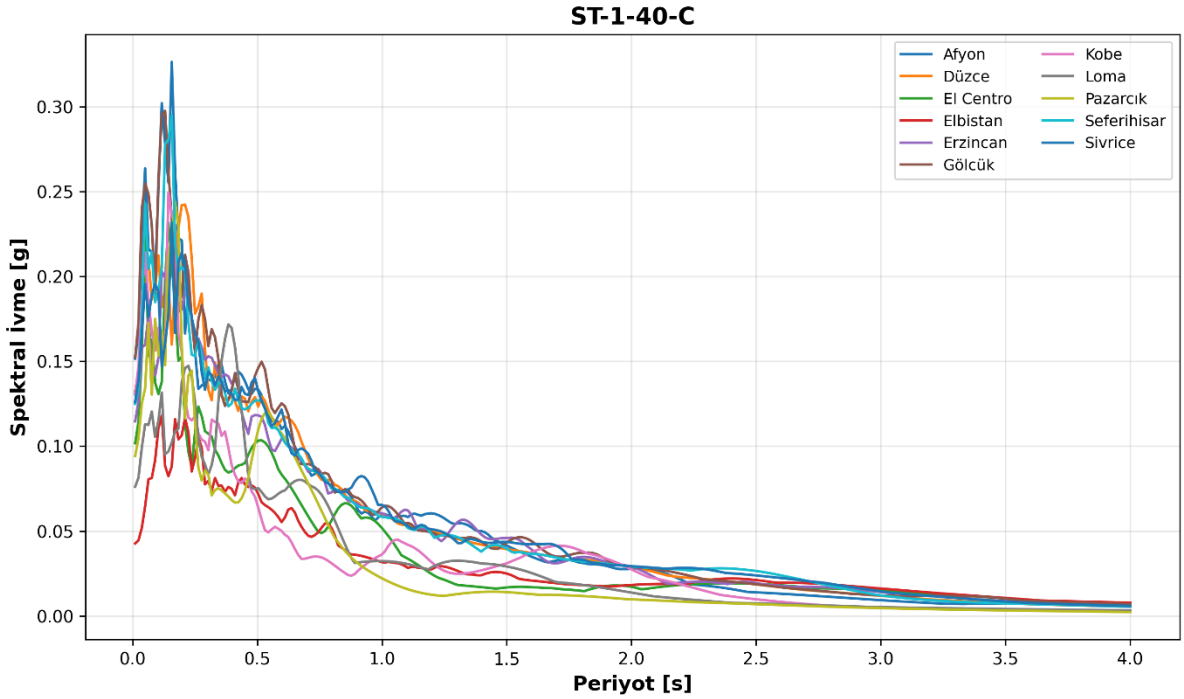
Şekil 112. ST-1-40-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice) (devamı



Şekil 115. ST-1-40-C modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-1-40-C modelinin spektral ivme analizleri (Şekil 114), modelin 0-4,0 saniye periyot aralığında karakteristik davranışlar sergilediğini ortaya koymaktadır. Model özellikle 0,5-1,5 saniye aralığında belirgin yüksek tepkiler vermekte olup, Düzce ve Gölcük deprem kayıtlarında bu periyotlarda 0,40-0,45g seviyelerine ulaşan pik ivme değerleri gözlemlenmiştir. Kısa periyot bölgesinde (0-0,5 s) ivmelerin 0,30-0,35g aralığında seyretmesi, modelin bu bölgede orta derecede duyarlı olduğunu göstermektedir. Uzun periyotlarda (2,0-4,0 s) ise ivme değerlerinin 0,15g altına düşmesi, modelin bu frekans aralığında kontrollü bir davranış sergilediğini işaret etmektedir. Deprem türlerine göre performans farklılıkları incelendiğinde, Düzce ve Gölcük kayıtlarının modelde en yüksek tepkileri oluşturduğu, El Centro ve Loma depremlerinin ise daha düşük ivme değerlerine yol açtığı tespit edilmiştir.



Şekil 116. ST-1-40-C modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-1-40-C modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 115), modelin daha dengeli ve öngörülebilir dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0,5 ile 1,2 arasında nispeten dar bir dağılım sergilemiştir. Bu dar genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı daha tutarlı ve kontrollü tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

En yüksek tepkiler Afyon ve Seferihisar deprem kayıtlarında gözlemlenmiş, her ikisinde de 1,2 genlik değerine ulaşılmıştır. Afyon kaydında 6-12 saniye zaman aralığında çift fazlı aktivite paterni sergilenirken, bu aktivite 50-200 Hz frekans bandında geniş bir yayılım göstermiştir. Seferihisar kaydında ise 8-20 saniye aralığında daha uzun süreli ancak benzer genlikte aktivite tespit edilmiş, bu da modelin bu kayıt altında sürekli enerji birikimi yaşadığını ortaya koymaktadır. Her iki kayıt da modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıları oluşturmaktadır.

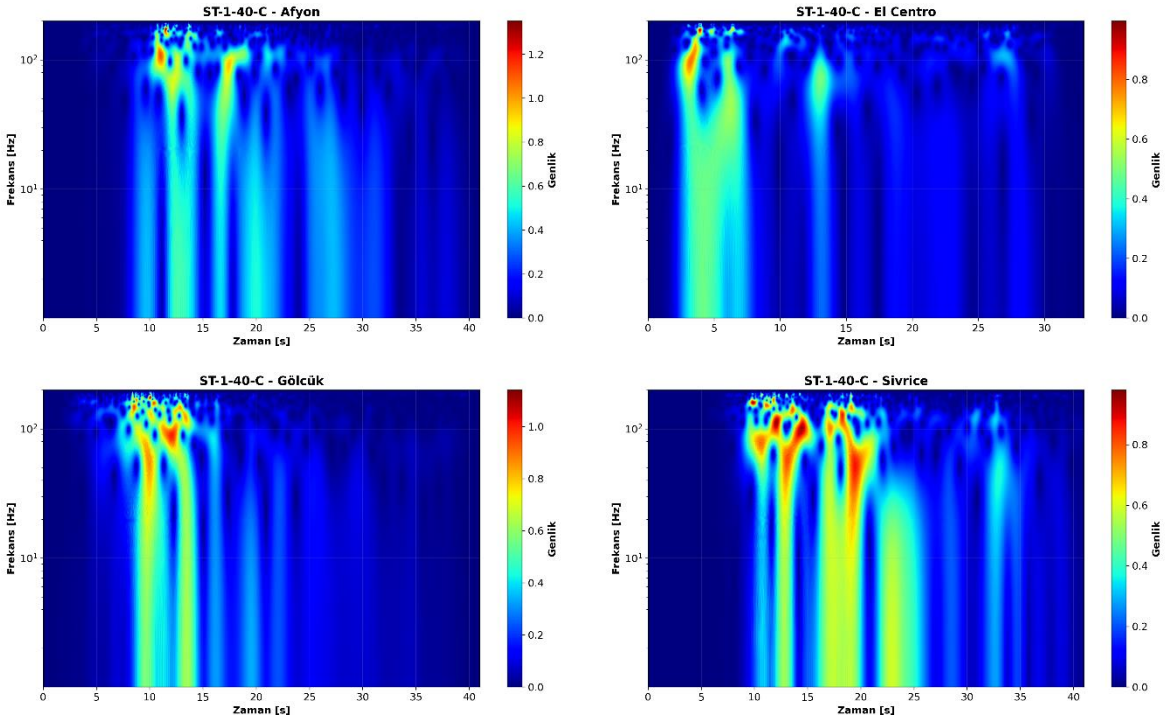
Düzce, Gölcük, Erzincan ve Sivrice kayıtları 0,8-1,0 aralığında orta-yüksek tepkiler vermiş ve benzer zamansal karakteristikler sergilemiştir. Düzce kaydında 5-8 saniye aralığında 1,0 seviyesinde yoğun spektral aktivite, Gölcük'te 5-12 saniye aralığında benzer seviyede geniş bandlı tepki gözlemlenmiştir. Erzincan'da 8-18 saniye aralığında uzun süreli 1,0 seviyesinde aktivite, Sivrice'de ise çoklu aktivite dönemleri (6-10 ve 15-20 saniye) tespit edilmiştir. Bu dört kayıt, modelin tutarlı orta-yüksek genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

El Centro ve Loma kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. El Centro kaydında 0,8 seviyesinde çift fazlı aktivite paterni gözlenmiş, 2-8 ve 10-12 saniye aralıklarında iki ayrı aktivite dönemi tespit edilmiştir. Loma kaydında ise 3-6 saniye aralığında 0,8 seviyesinde kısa süreli ancak yoğun aktivite gözlemlenmiştir. Her iki kayıt da modelin farklı zamansal segmentlerde aktivasyon gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Kobe kaydında 0,8 seviyesinde 4-12 saniye aralığına yayılan orta süreli aktivite, Elbistan kaydında ise 0,5 seviyesiyle en düşük genlik değeri tespit edilmiş ve bu kayıt 6-10 saniye aralığında sınırlı aktivite sergilemiştir.

Zamansal davranış açısından, modelin çoğu deprem kaydında ilk 10-15 saniye içerisinde ana aktivitesini tamamladığı gözlemlenmiştir. Düzce, Loma, Gölcük ve Elbistan kayıtları bu hızlı sönüm karakteristiğini sergilerken, Afyon, Seferihisar, Sivrice ve Erzincan kayıtları 15-20 saniyeye kadar uzanan aktivite göstermiştir. Bu uzun süreli aktivite grubunda, modelin sürekli enerji transferi kapasitesinin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

Frekans dağılımı incelendiğinde, modelin 50-150 Hz aralığında en yoğun tepkileri verdiği belirlenmiştir. Bu aralık, modelin birincil dinamik karakteristiğini oluşturmakta olup, çoğu deprem kaydında spektral enerjinin bu bandda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. El Centro ve Sivrice kayıtlarında tespit edilen çoklu aktivite dönemleri, modelin farklı frekans modları arasında geçiş yapabildiğini ve aynı sismik uyarı altında tekrarlayan dinamik tepkiler sergileyebildiğini göstermektedir.



Şekil 117. ST-1-40-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük, Sivrice)

ST-2 Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2 tonoz modeli (Şekil 116) için gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının doğal titreşim karakteristikleri ortaya konmuş ve dinamik davranışları detaylandırılmıştır. İlk altı doğal frekans değeri sırasıyla 25,53 Hz, 56,19 Hz, 56,88 Hz, 94,20 Hz, 104,34 Hz ve 160,20 Hz olarak hesaplanmıştır. İlk modda elde edilen 25,53 Hz'lik düşük frekans değeri, yapının temel titreşim modunu temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış zorlamaların rezonans oluşturma riski taşıdığı görülmektedir.

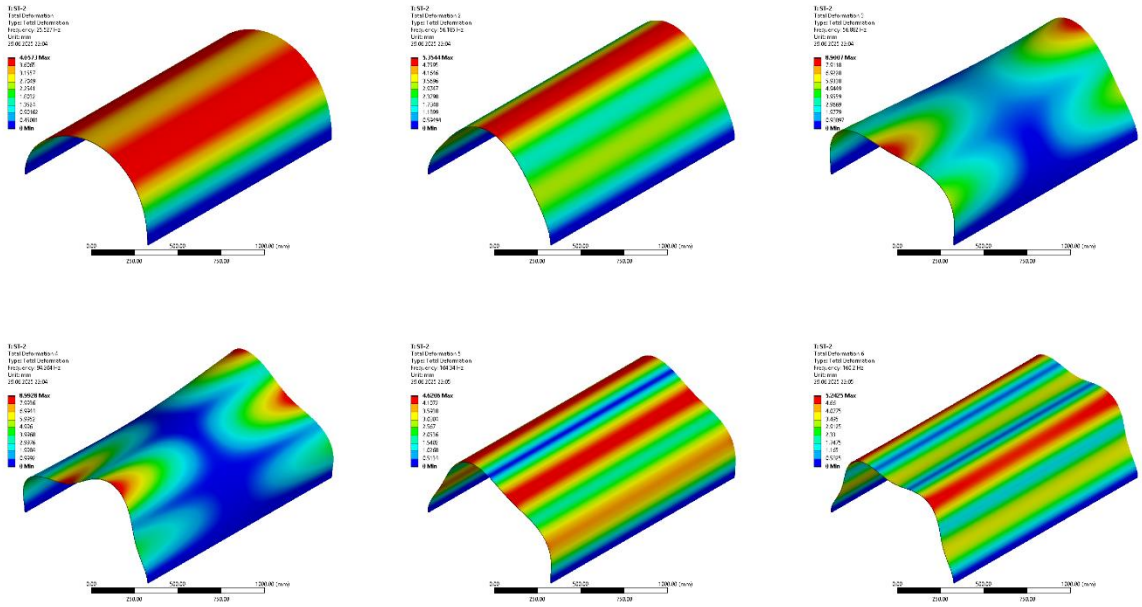
Mod şekilleri (Şekil 117) incelendiğinde, birinci ve ikinci modlarda oldukça düzenli ve yaygın deformasyon desenleri gözlenmiş, maksimum deformasyon değerleri sırasıyla 4,06 mm ve 5,35 mm olarak belirlenmiştir. Üçüncü ve dördüncü modlarda ise deformasyon karakteri karmaşıklaşmış ve lokal genlik artışları gözlemlenmiştir. Özellikle üçüncü modda 8,90 mm, dördüncü modda ise 8,99 mm'lik maksimum deformasyon değerlerine ulaşılmıştır. Bu iki modun frekanslarının birbirine oldukça yakın olması ($\Delta f = 0,69$ Hz), modlar arası etkileşim potansiyelinin yüksek olduğunu ve rezonans durumlarında titreşim büyümesine yol açabileceğini göstermektedir.

Beşinci ve altıncı modlar ise daha yüksek frekanslarda gerçekleşmekle birlikte, simetrik ve kısa dalga boylu deformasyon paternleri sergilemiştir. Bu modlarda maksimum deformasyon değerleri sırasıyla 4,62 mm ve 5,24 mm olarak ölçülmüş ve bu modların da dinamik değerlendirmelerde dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur.

Efektif kütle katılım analizine göre, X doğrultusunda birinci modun 0,28 ton değerindeki katılımı ile baskın olduğu belirlenmiştir. İkinci modda Y eksenine ait 0,12 ton'luk katılım öne çıkarken, üçüncü modda Z yönünde 0,07 ton'luk katılım değerine ulaşılmıştır. Bu bulgular, yapının her eksende farklı modlar aracılığıyla kontrol edildiğini göstermektedir.



Şekil 118. ST-2 deney modeli



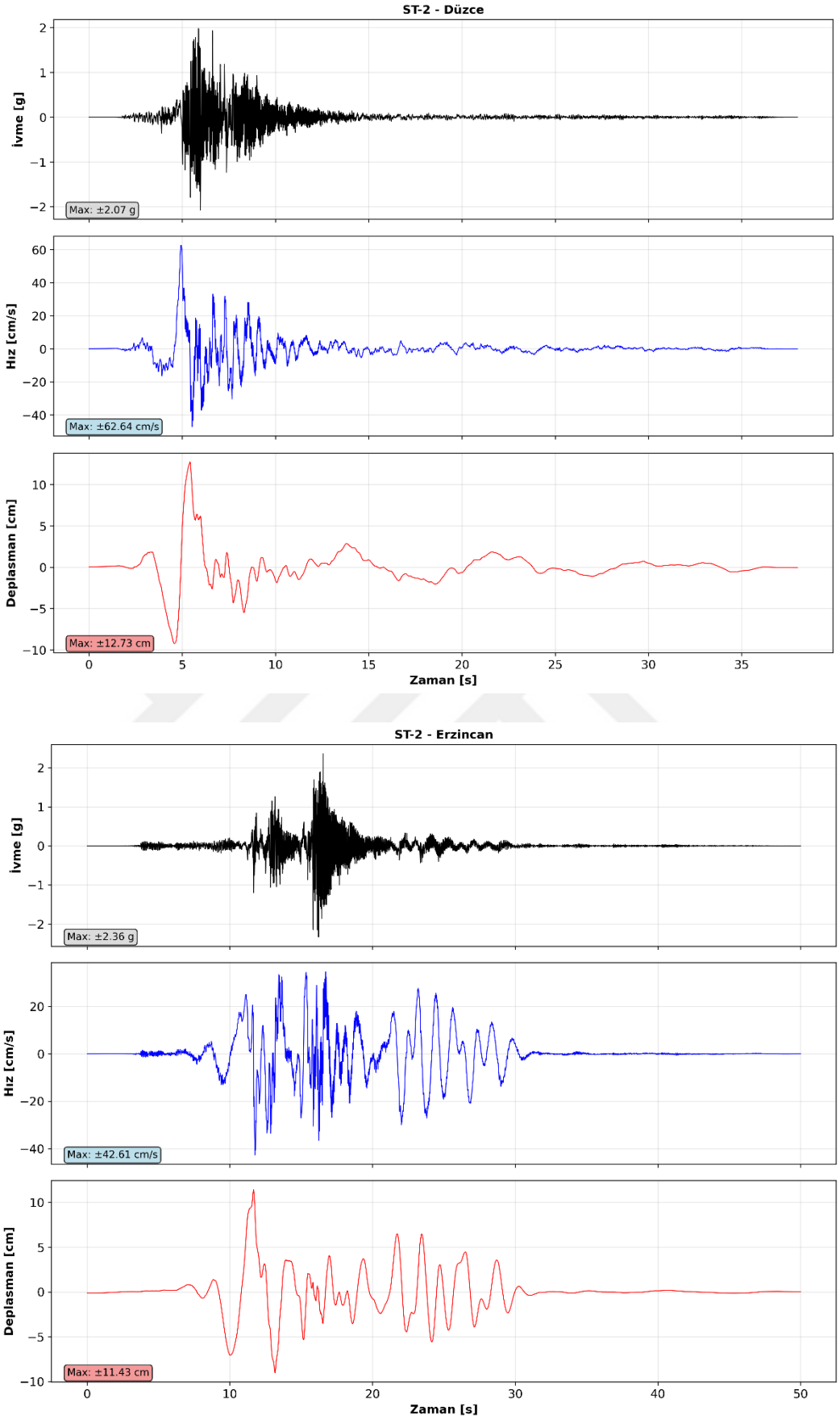
Şekil 119. ST-2 modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

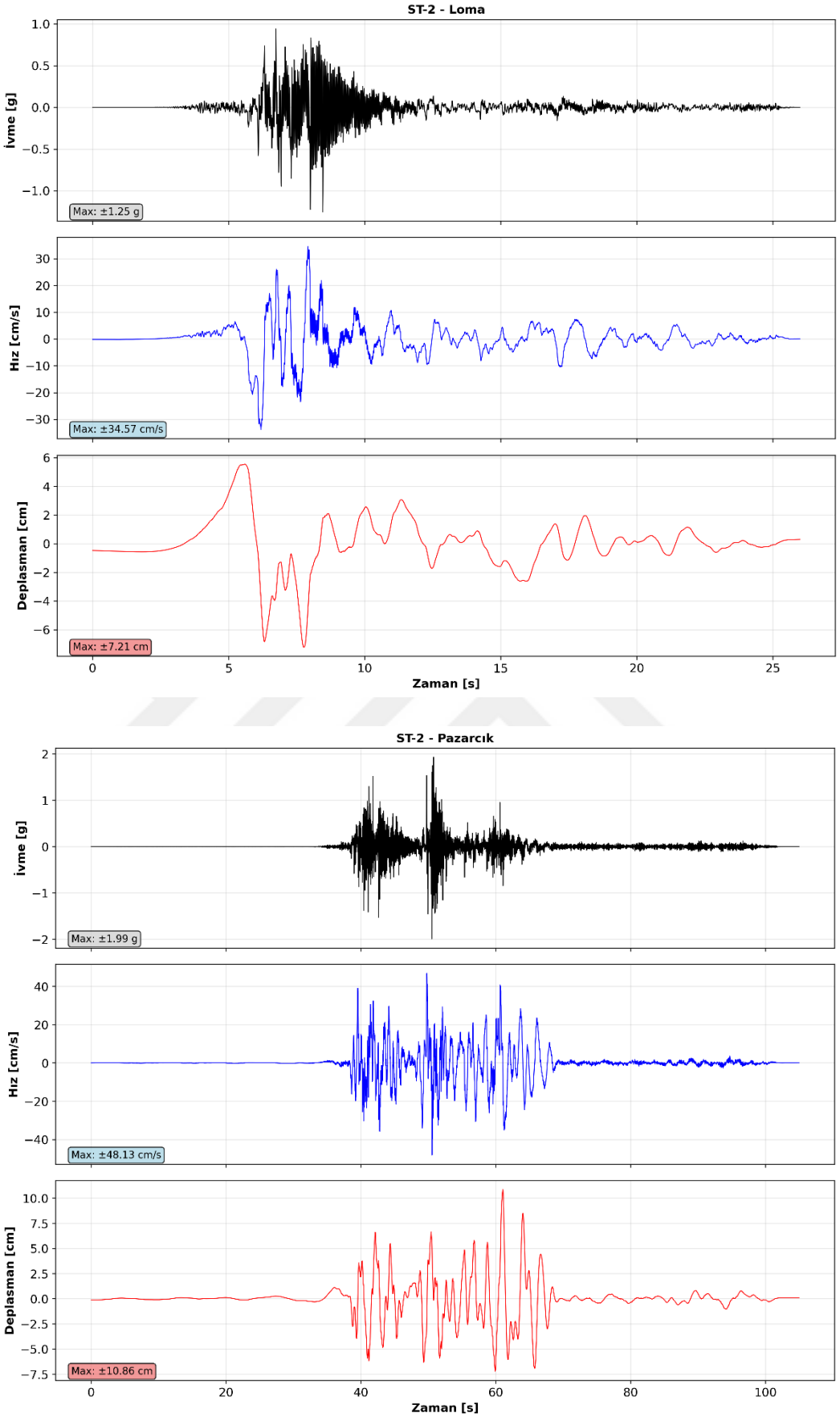
ST-2 modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 118 ve Şekil 119) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (2,82 g), Gölcük (2,65 g) ve Erzincan (2,36 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,74 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir. Radar grafikteki dağılım, modelin ivme düzeyinde özellikle kuvvetli yer hareketlerine karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini, ancak belirli kayıtlar için sınırlı ivme tepkisi oluşturduğunu işaret etmektedir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Sivrice depreminde yaklaşık 63,39 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Afyon (62,86 cm/s) ve Düzce (62,64 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

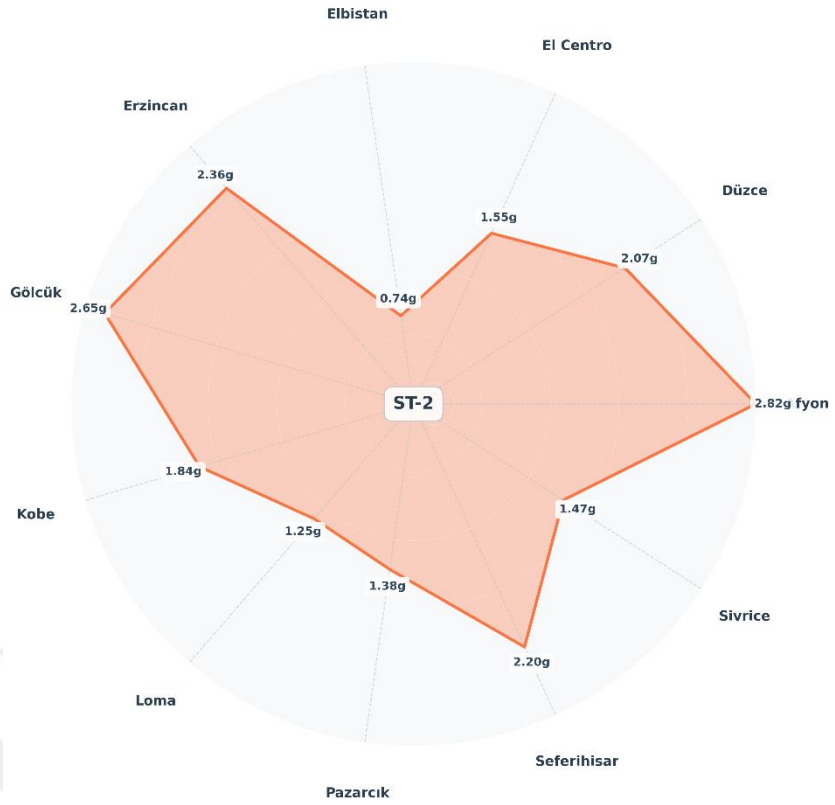
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,08 cm), Sivrice (13,78 cm) ve Düzce (12,73 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,21 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 120. ST-2 modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Erzincan, Loma, Pazarcık)



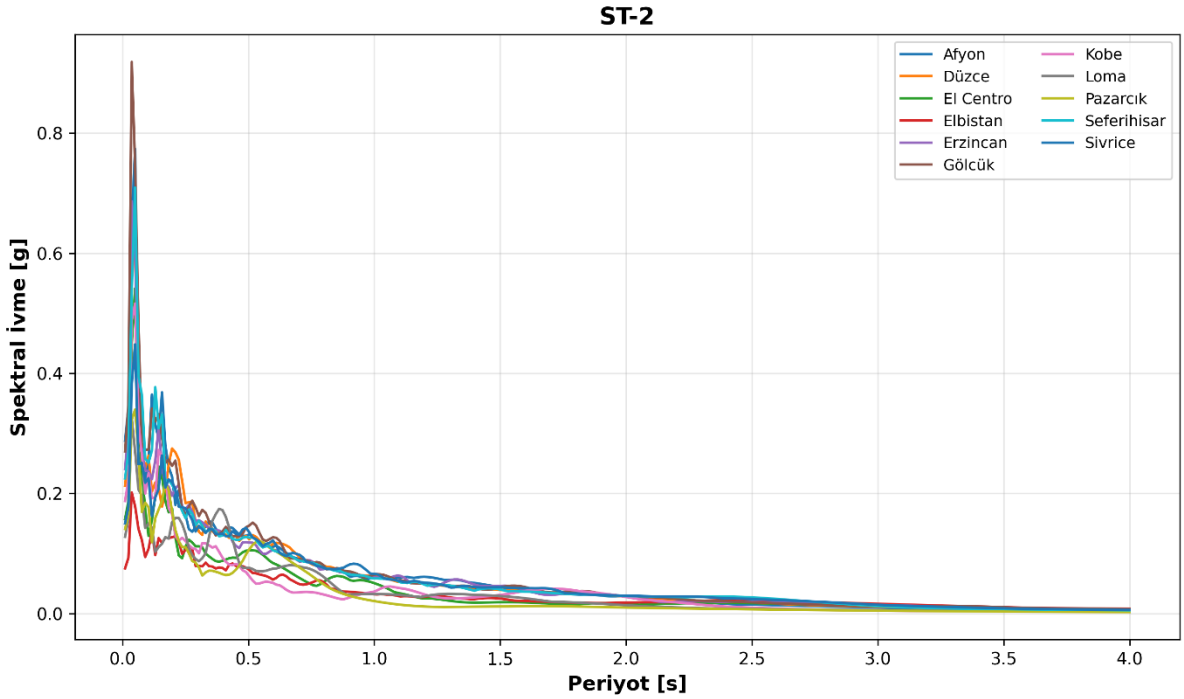
Şekil 118. ST-2 modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Erzincan, Loma, Pazarcık) (devamı)



Şekil 121. ST-2 modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2 modelinin spektral ivme analizleri (Şekil 120), modelin deprem davranışını 0-4,0 saniye periyot aralığında detaylı şekilde ortaya koymaktadır. Model, özellikle 0,5-1,5 saniye aralığında belirgin şekilde yüksek tepkiler vermekte olup, Düzce ve Gölcük depremlerinde bu aralıkta 0,40-0,45g'ye varan pik ivme değerleri kaydedilmiştir. Kısa periyotlarda (0-0,5 s) ivmelerin 0,30-0,35g seviyelerinde seyretmesi, modelin bu bölgede orta derecede duyarlı olduğunu göstermektedir. Uzun periyot bölgesinde (2,0-4,0 s) ise ivme değerlerinin 0,15g'nin altına düşmesi, modelin bu frekans aralığında daha kontrollü bir performans sergilediğini işaret etmektedir. Deprem türlerine göre performans farklılıkları incelendiğinde, Düzce ve Gölcük kayıtlarının modelde en yüksek tepkileri oluşturduğu, El Centro ve Loma depremlerinin ise daha düşük ivme değerlerine yol açtığı gözlemlenmiştir. Uzun periyotlu etkilerde modelin yeterli performans gösterdiği görülmekle birlikte, farklı zemin koşulları altında yapılacak ilave analizlerle modelin davranış karakteristiklerinin daha detaylı anlaşılması mümkün olacaktır.



Şekil 122. ST-2 modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2 modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 121), modelin geniş spektral genlik aralığında değişken dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0,6 ile 3,0 arasında oldukça geniş bir dağılım sergilemiştir. Bu geniş genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı değişken ve adaptif tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

En yüksek tepki Gölcük deprem kaydında gözlemlenmiş ve 3,0 genlik değerine ulaşılmıştır. Gölcük kaydında 5-10 saniye zaman aralığında çok yoğun spektral aktivite sergilenirken, bu aktivite 50-150 Hz frekans bandında yoğunlaşmıştır. Bu kayıt, modelin en hassas olduğu sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin maksimum enerji transferi kapasitesini göstermektedir.

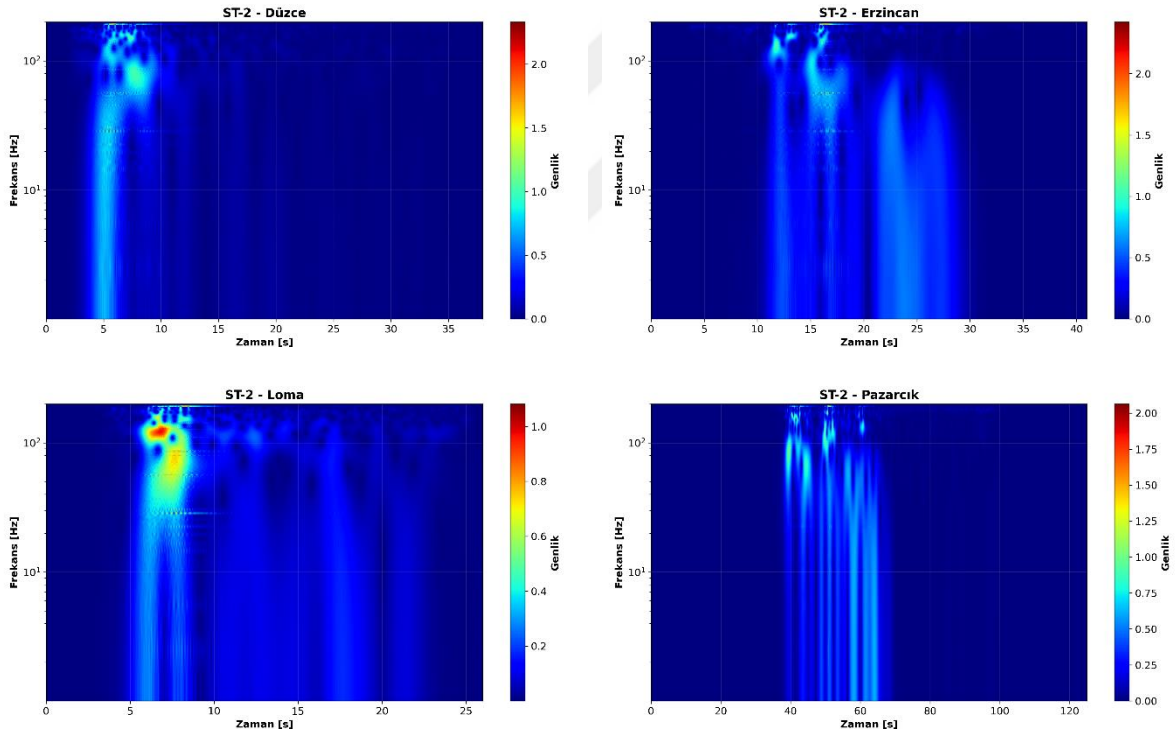
Seferihisar kaydı 2,0 seviyesinde ikinci en yüksek tepkiyi vermiş ve 8-20 saniye aralığında uzun süreli aktivite sergilemiştir. Bu kayıtta model, sürekli enerji birikimi paterni göstermiş ve geniş bandlı spektral dağılım sergilemiştir. Afyon kaydında benzer şekilde 2,0 seviyesinde tepki gözlenmiş, ancak daha kısa süreli olan 8-15 saniye aralığında yoğun aktivite tespit edilmiştir.

El Centro ve Kobe kayıtları 1,4 seviyesinde orta-yüksek tepkiler vermiş ve benzer zamansal karakteristikler sergilemiştir. El Centro kaydında 2-15 saniye aralığında geniş bandlı aktivite, Kobe'de ise 3-12 saniye aralığında daha kompakt spektral tepki gözlemlenmiştir. Her iki kayıt da modelin orta seviye genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Loma, Sivrice ve Pazarcık kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Loma kaydında 1,0 seviyesinde 3-8 saniye aralığında yoğun ve kısa süreli aktivite gözlenmiştir. Sivrice kaydında ise çoklu aktivite dönemleri tespit edilmiş, 5-12 ve 15-22 saniye aralıklarında iki ayrı aktivasyon fazı gözlemlenmiştir. Pazarcık kaydı dikkat çekici şekilde 35-60 saniye aralığında aktivite sergilemiş ve 1,0 seviyesinde tepki vermiştir.

Düzce, Erzincan ve Elbistan kayıtları düşük-orta seviye tepkiler vermiştir. Düzce kaydında 4-8 saniye aralığında 0,8 seviyesinde kısa süreli aktivite, Erzincan'da 10-15 saniye aralığında benzer seviyede orta süreli tepki gözlemlenmiştir. Elbistan kaydında ise 5-12 saniye aralığında 0,6 seviyesiyle en düşük genlik değeri tespit edilmiştir.

Zamansal davranış açısından, modelin farklı deprem kayıtlarında çeşitli aktivasyon paternleri sergilediği gözlemlenmiştir. Düzce, Loma, Gölcük ve Kobe kayıtları erken dönem aktivasyon karakteristiğini sergilerken, Afyon, Seferihisar, Sivrice ve Erzincan kayıtları 15-22 saniyeye kadar uzanan aktivite göstermiştir.



Şekil 123. ST-2 modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Erzincan, Loma, Pazarcık)

ST-2-20-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2-20-A tonoz modeli (Şekil 122) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri

sırasıyla 24,47 Hz, 51,79 Hz, 53,86 Hz, 87,21 Hz, 92,95 Hz ve 152,67 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 24,47 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

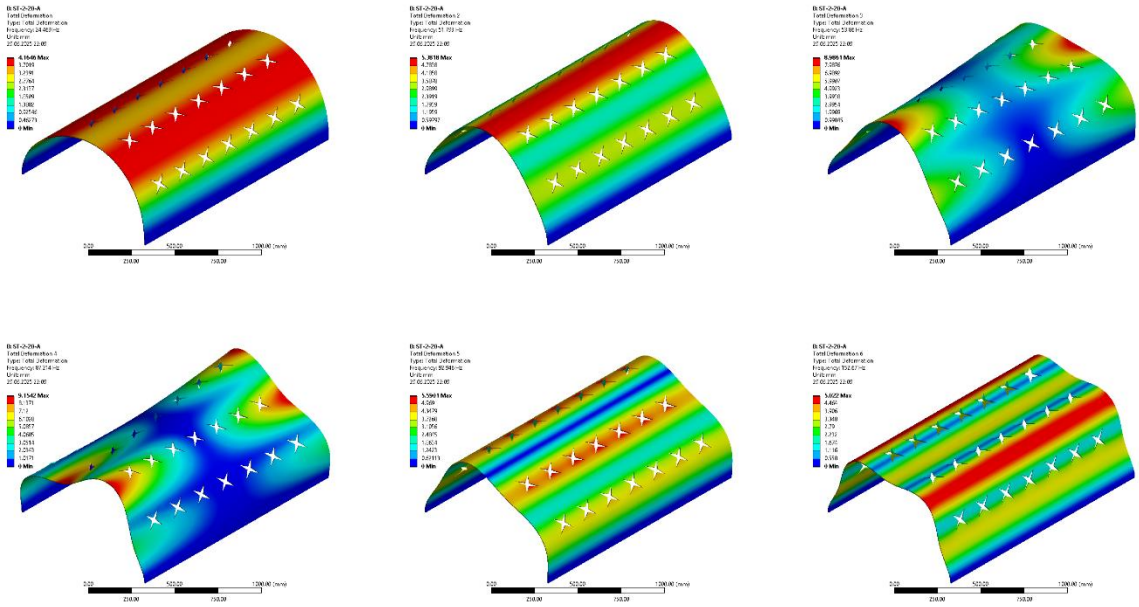
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 123), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 4,16 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 2,07 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve dördüncü modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 9,15 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Kütlesel katılım oranları incelendiğinde, X doğrultusunda birinci modun %67,24 gibi oldukça yüksek bir katılım sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, X doğrultusundaki dinamik yüklemeler altında temel modun kritik öneme sahip olduğunu ve dinamik analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi, ilk altı modun X doğrultusunda %100, Y doğrultusunda %100, Z doğrultusunda %100 oranında kütlesel katılıma sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 124. ST-2-20-A deney modeli



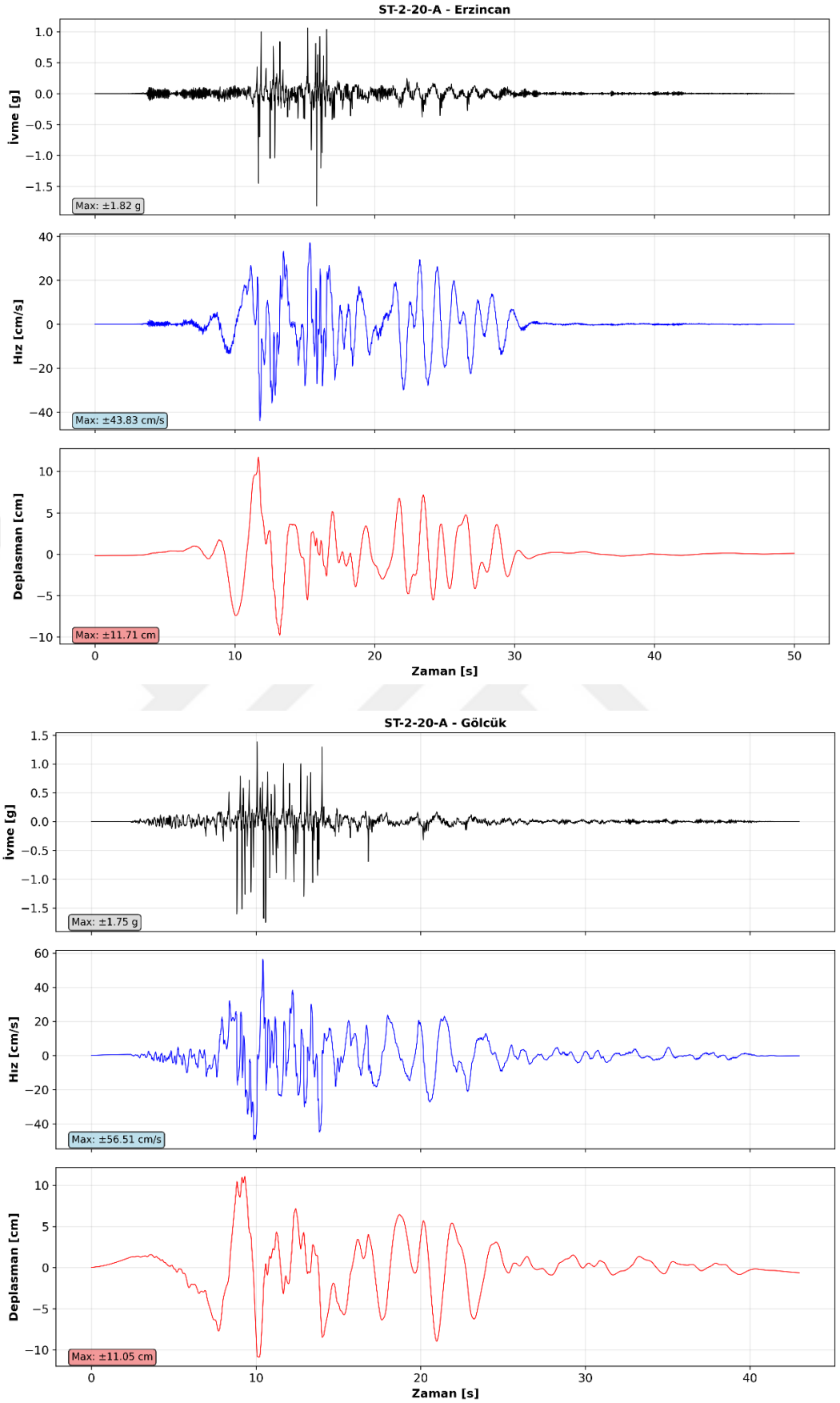
Şekil 125. ST-2-20-A modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

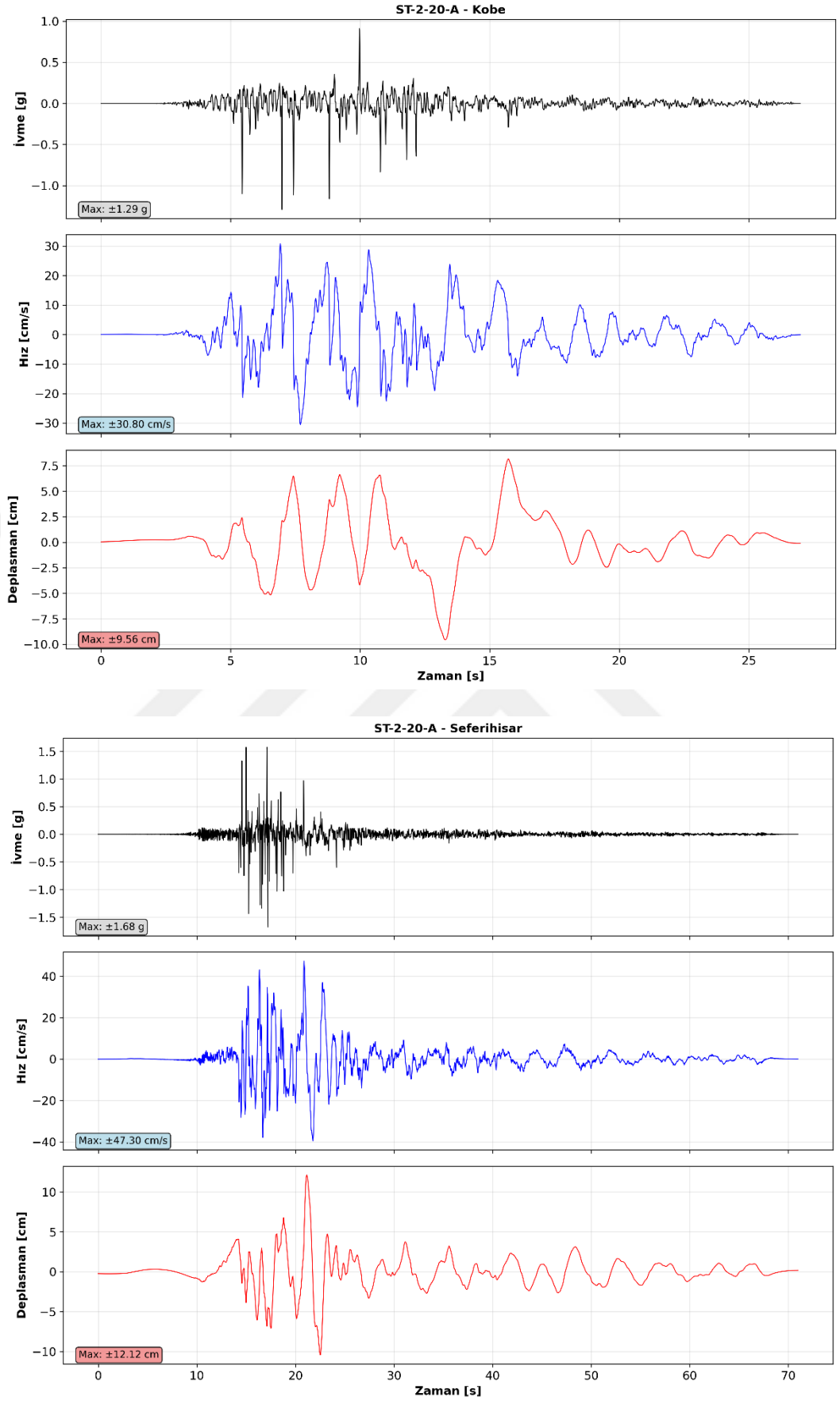
ST-2-20-A modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 124 ve Şekil 125) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Afyon (2,17 g), Erzincan (1,82 g) ve Gölcük (1,75 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,77 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir. Radar grafikteki dağılım, modelin ivme düzeyinde özellikle kuvvetli yer hareketlerine karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini, ancak belirli kayıtlar için sınırlı ivme tepkisi oluşturduğunu işaret etmektedir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Düzce depreminde yaklaşık 66,65 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Afyon (61,23 cm/s) ve Sivrice (61,70 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

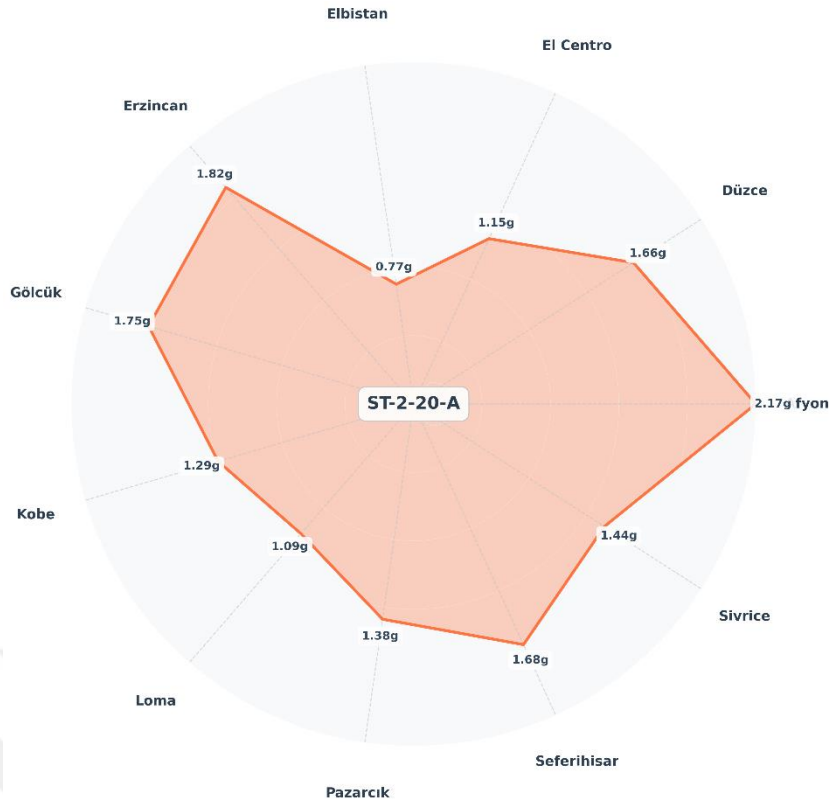
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (15,18 cm), Sivrice (14,27 cm) ve Düzce (13,19 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,47 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 126. ST-2-20-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Erzincan, Gölcük, Kobe, Seferihisar)



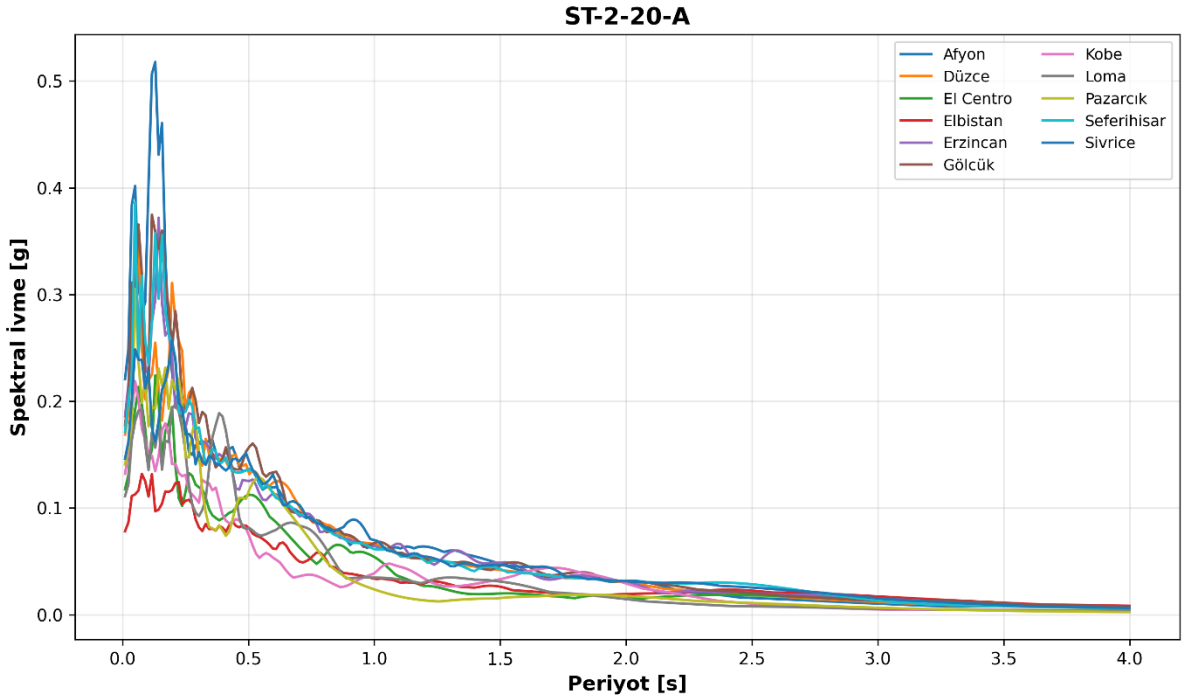
Şekil 124. ST-2-20-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Erzincan, Gölcük, Kobe, Seferihisar) (devamı)



Şekil 127. ST-2-20-A modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-20-A modelinin spektral ivme sonuçları (Şekil 126), modelin kısa periyot bölgesinde yoğunlaştığını göstermektedir. Ayon ve Kobe deprem kayıtlarında 0,50-0,55g seviyelerine ulaşan pik değerler, modelin bu periyot aralığında son derece duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 0,1-0,3 saniye aralığında gözlemlenen yüksek ivme değerleri, modelin rijit yapı karakteristiği sergilediğini göstermektedir. Modelin daha uzun periyotlardaki davranışına ilişkin veri bulunmamakla birlikte, mevcut sonuçlar modelin kısa periyotlu deprem etkilerine karşı yüksek risk taşıdığını göstermektedir.



Şekil 128. ST-2-20-A modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-20-A modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 127), modelin kontrollü ve daha sınırlı spektral genlik aralığında dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0,6 ile 2,0 arasında nispeten dar bir dağılım sergilemiştir. Bu dar genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı daha tutarlı ve öngörülebilir tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

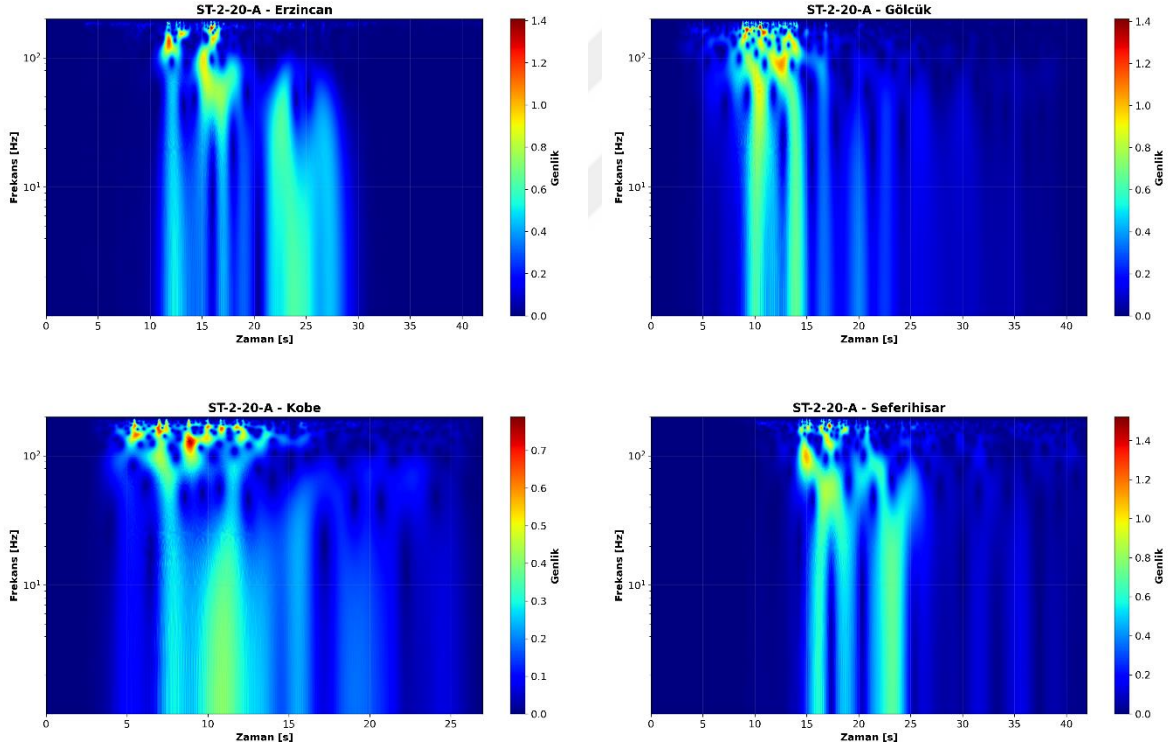
En yüksek tepkiler Afyon ve Seferihisar deprem kayıtlarında gözlemlenmiş, her ikisinde de 2,0 genlik değerine ulaşılmıştır. Afyon kaydında 8-15 saniye zaman aralığında çift fazlı aktivite paterni sergilenirken, bu aktivite 50-150 Hz frekans bandında geniş bir yayılım göstermiştir. Seferihisar kaydında ise 8-18 saniye aralığında daha uzun süreli ancak benzer genlikte aktivite tespit edilmiş, bu da modelin bu kayıt altında sürekli enerji birikimi yaşadığını ortaya koymaktadır. Her iki kayıt da modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıları oluşturmaktadır.

Erzincan, Gölcük ve Sivrice kayıtları 1,4 seviyesinde orta-yüksek tepkiler vermiş ve benzer zamansal karakteristikler sergilemiştir. Erzincan kaydında 8-18 saniye aralığında uzun süreli spektral aktivite, Gölcük'te 5-15 saniye aralığında geniş bandlı tepki gözlemlenmiştir. Sivrice'de ise çoklu aktivite dönemleri (5-12 ve 15-22 saniye) tespit edilmiş ve modelin

tekrarlayan dinamik tepkiler sergileyebildiği gözlemlenmiştir. Bu üç kayıt, modelin tutarlı orta-yüksek genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Düzce, El Centro ve Loma kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Düzce kaydında 1,2 seviyesinde 4-8 saniye aralığında yoğun ve kısa süreli aktivite gözlemlenmiştir. El Centro kaydında 0,8 seviyesinde çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiş, 2-8 ve 10-15 saniye aralıklarında iki ayrı aktivite dönemi gözlemlenmiştir. Loma kaydında ise 1,0 seviyesinde 3-8 saniye aralığında kompakt spektral tepki sergilenmiştir. Bu kayıtlar, modelin farklı zamansal segmentlerde aktivasyon gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Kobe, Elbistan ve Pazarcık kayıtları düşük-orta seviye tepkiler vermiştir. Kobe kaydında 0,7 seviyesinde 3-12 saniye aralığına yayılan orta süreli aktivite gözlemlenmiştir. Elbistan kaydında 0,6 seviyesiyle en düşük genlik değeri tespit edilmiş ve bu kayıt 5-12 saniye aralığında sınırlı aktivite sergilemiştir. Pazarcık kaydı dikkat çekici şekilde 40-60 saniye aralığında aktivite göstermiş ve 1,0 seviyesinde tepki vermiştir.



Şekil 129. ST-2-20-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Erzincan, Gölcük, Kobe, Seferihisar)

ST-2-20-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2-20-B tonoz modeli (Şekil 128) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz kapsamında, yapının doğal frekansları ve buna bağlı olarak gelişen titreşim modları belirlenmiştir. İlk altı

doğal frekans sırasıyla 24,32 Hz, 51,60 Hz, 53,62 Hz, 86,74 Hz, 94,44 Hz ve 140,54 Hz olarak hesaplanmıştır. İlk mod frekansının 24,32 Hz gibi düşük bir değerde gerçekleşmesi, yapının temel titreşim davranışının düşük enerjili dinamik etkilerle şekillendiğini göstermekte ve bu aralıktaki zorlamaların rezonans riski taşıyabileceğini ortaya koymaktadır.

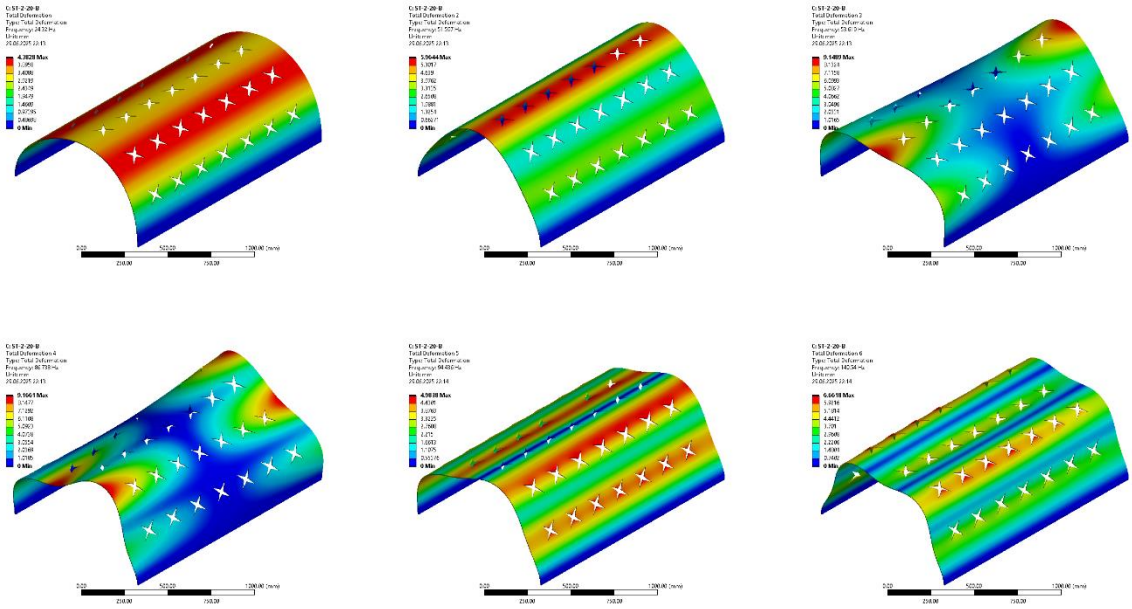
Mod şekillerine (Şekil 129) bakıldığında, birinci modda düzenli ve simetrik deformasyon paternleri gözlemlenmiş, maksimum deformasyon 4,38 mm olarak ölçülmüştür. İkinci modda ise bu değer 5,96 mm'ye ulaşarak deformasyon etkisinin daha da arttığını göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü modlarda ise deformasyon geometrileri karmaşık hale gelmiş; bu modlarda maksimum deformasyon değerleri sırasıyla 9,15 mm ve 9,17 mm olarak tespit edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü modlar arasında oldukça küçük bir frekans farkının (Δf = 2,02 Hz) bulunması, modlar arası etkileşim ihtimalini artırmakta ve bu aralıkta rezonans etkilerinin daha şiddetli olabileceğini göstermektedir.

Beşinci ve altıncı modlarda simetrik fakat daha kısa dalga boylu deformasyon paternleri oluşmuş, maksimum deformasyon değerleri sırasıyla 4,98 mm ve 6,66 mm olarak belirlenmiştir. Bu değerler, bu modların da dinamik analizde göz ardı edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Efektif kütle katılım oranlarına göre, X yönünde birinci mod 0,27 ton ile baskın kütlesel katılım göstermektedir. Bu sonuç, yapıdaki X eksenine yönelik dinamik davranışın temel mod tarafından kontrol edildiğini açıkça göstermektedir. Y yönü için en yüksek katılım ikinci modda olup 0,11 ton, Z ekseni için ise üçüncü modda 0,07 ton efektif kütleye ulaşılmıştır. Bu durum, yapının farklı doğrultulardaki dinamik tepkisinin farklı modlar tarafından yönetildiğini göstermektedir.



Şekil 130. ST-2-20-B deney modeli



Şekil 131. ST-2-20-B modal deformasyon şekilleri

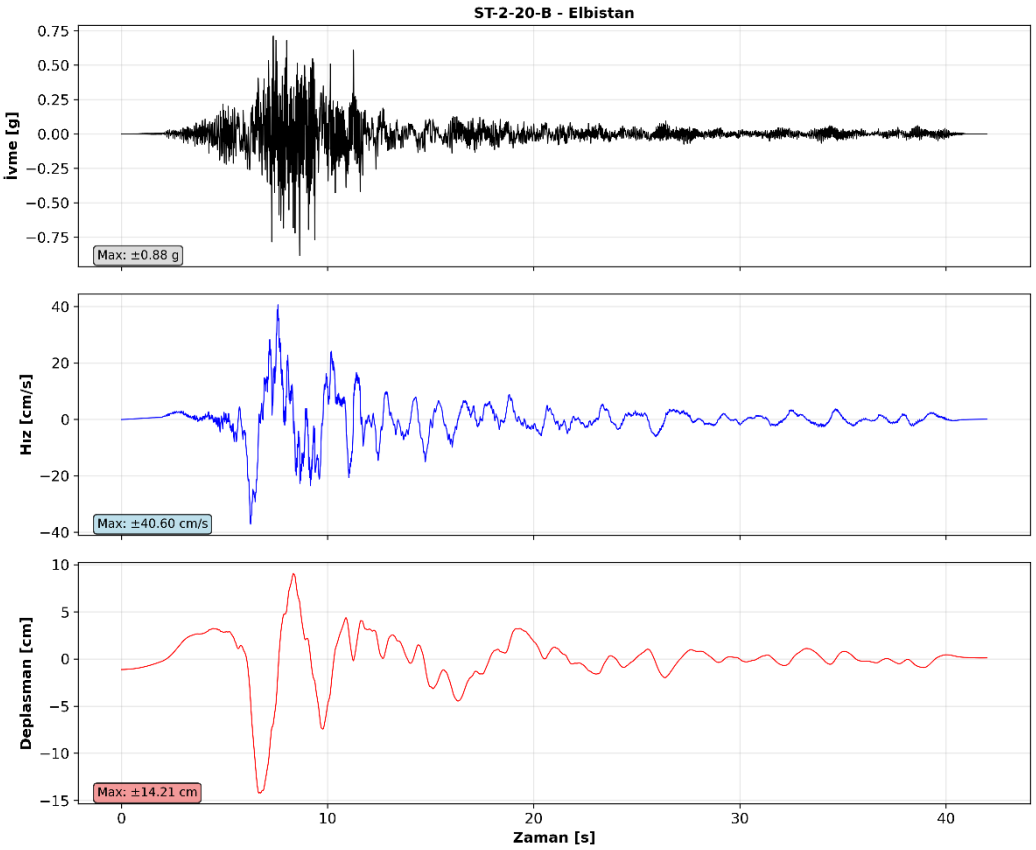
Dinamik tepki değerlendirmesi

ST-2-20-B modelinin 11 farklı deprem kaydı altındaki dinamik tepkileri (Şekil 130 ve Şekil 131), ivme, hız ve deplasman düzeyleri üzerinden bütüncül olarak incelendiğinde, modelin çeşitli yer hareketlerine karşı gösterdiği performans kapsamlı şekilde ortaya konmuştur. Deprem girdileri arasında farklı şiddet ve spektral içeriklere sahip olan bu kayıtlar, modelin rijitlik, sönüm ve dinamik stabilite özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

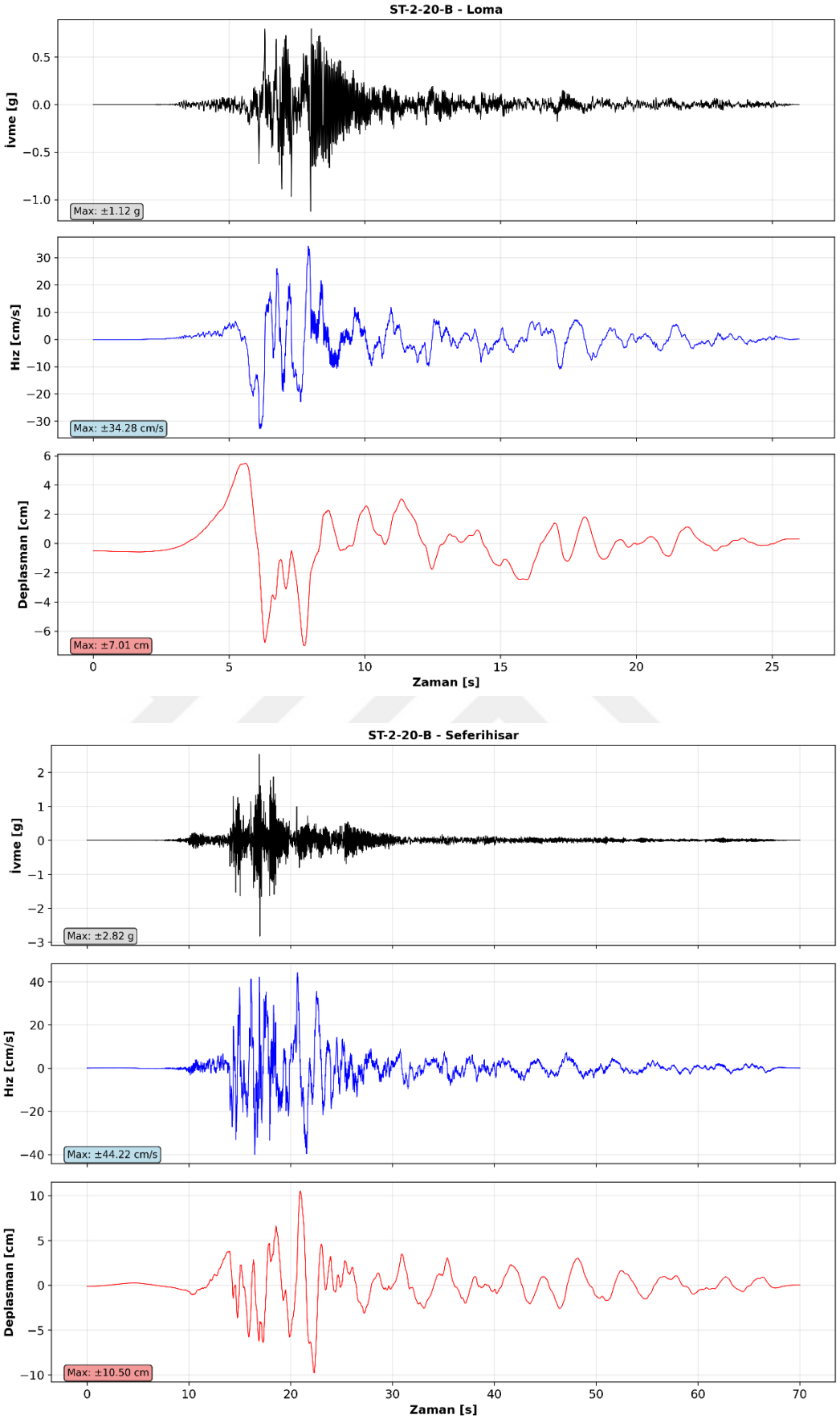
İvme zaman geçmişleri incelendiğinde, modelin maksimum yer ivmesine Gölcük (2,45 g), Pazarcık (2,87 g) ve Seferihisar (2,82 g) depremlerinde maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu yüksek ivmeli kayıtlar, yapının sarsıntı anındaki ani kuvvet değişimlerine karşı dayanım sınırlarını zorlamıştır. Diğer taraftan Elbistan (0,88 g), Loma (1,12 g) ve El Centro (1,35 g) gibi görece düşük ivmeli depremlerde daha sınırlı bir titreşim cevabı gözlenmiştir. Radar grafik üzerinden yapılan karşılaştırma da, ivme düzeylerindeki bu çeşitliliği açık biçimde doğrulamaktadır.

Hız tepkileri bakımından, özellikle Sivrice (57,86 cm/s), Gölcük (58,24 cm/s), Düzce (63,98 cm/s) ve Afyon (57,63 cm/s) depremleri öne çıkmakta; bu durum, yapının hız büyüklüğüne karşı verdiği atalet cevabının önemli seviyelere ulaştığını göstermektedir. Gerek tepe değerlerin büyüklüğü gerekse yüksek enerjili titreşimlerin süresi, bu kayıtların yapının salınım spektrumuna ciddi katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Elbistan ve Loma depremlerinde hız cevabı daha düşük kalmış, bu da ivme spektrumundaki sınırlılıkla örtüşen bir dinamik davranışa işaret etmektedir.

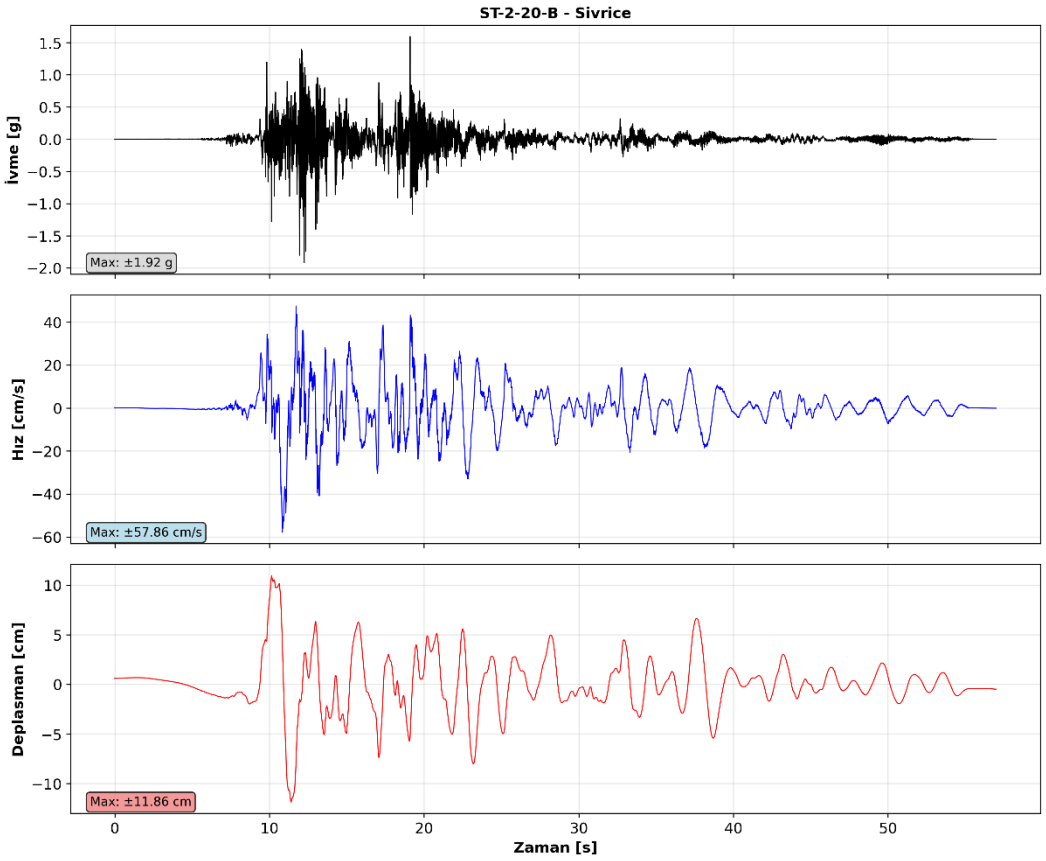
Deplasman grafikleri incelendiğinde, Elbistan depreminde 14,21 cm ile en yüksek yatay yer değiştirme gözlenmiştir. Bu değeri Düzce (13,13 cm) ve Afyon (12,30 cm) takip etmektedir. Özellikle bu üç depremde, yapının rijitlik sınırları zorlanmış ve enerji emilimi yüksek oranda deformasyonla gerçekleştirilmiştir. Gölcük, Erzincan, Sivrice ve Pazarcık depremleri de benzer şekilde yapıda önemli yer değiştirme potansiyellerine neden olmuş, ancak sönümleme etkisi ile titreşimlerin daha hızlı azaldığı izlenmiştir. Loma depreminde gözlenen 7,01 cm'lik deplasman ise, düşük enerjili ve kısa süreli titreşimlerin model üzerinde sınırlı etkiler yarattığını göstermektedir.



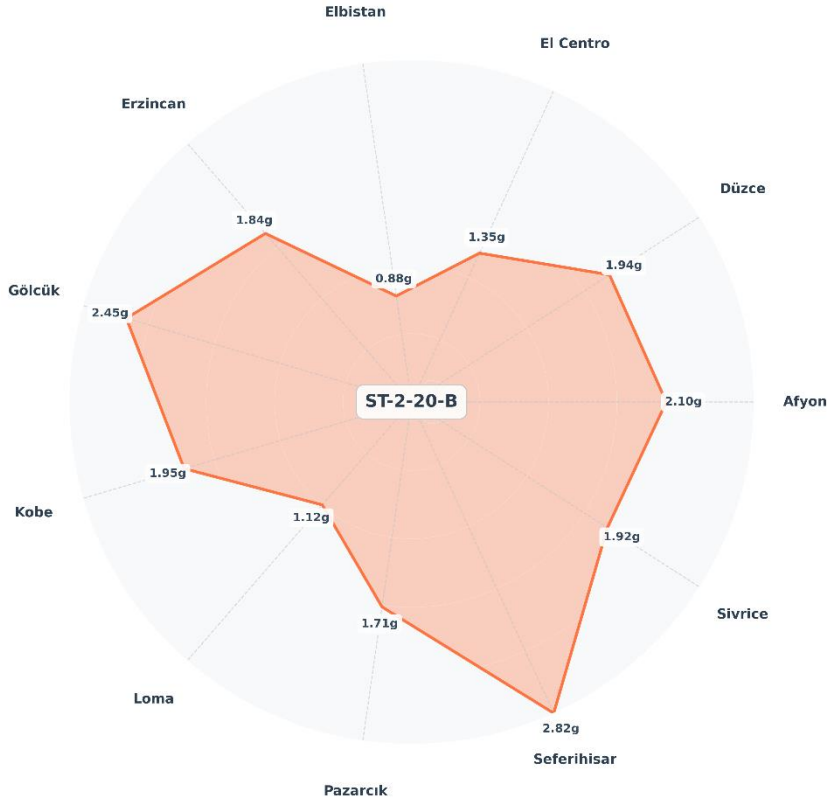
Şekil 132. ST-2-20-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Loma, Seferihisar, Sivrice)



Şekil 130. ST-2-20-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Loma, Seferihisar, Sivrice) (devamı)



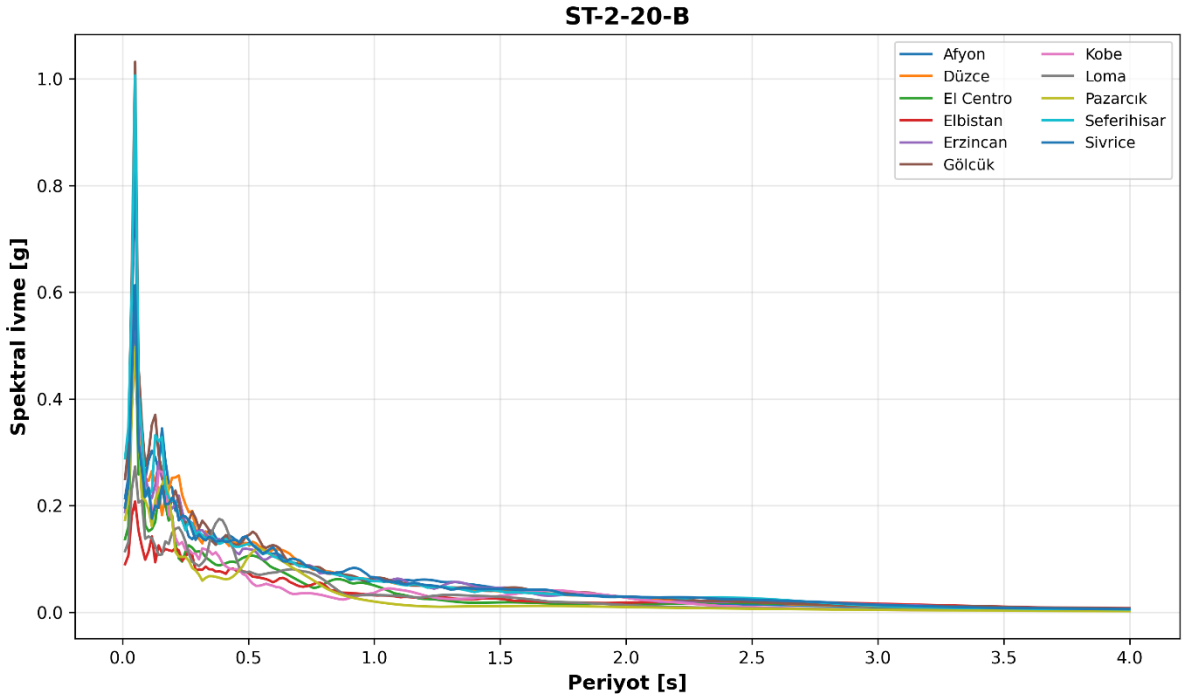
Şekil 130. ST-2-20-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Loma, Seferihisar, Sivrice) (devamı)



Şekil 133. ST-2-20-B modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-20-B modelinin performans analizleri (Şekil 132), modelin özellikle 1,0-2,0 saniye periyot aralığında kritik davranışlar sergilediğini ortaya koymaktadır. Erzincan ve Pazarcık depremlerinde 0,35-0,38g seviyelerinde ölçülen pik ivmeler, modelin bu periyot aralığında önemli bir dinamik yanıt verdiğini göstermektedir. Kısa periyot bölgesinde (0-0,5 s) ivmelerin 0,25g civarında kalması, modelin ST-2-20-C'ye kıyasla bu bölgede daha az duyarlı olduğunu göstermektedir. Uzun periyotlarda (2,5-4,0 s) ise ivme değerlerinin 0,10-0,15g aralığında seyretmesi, modelin bu frekans aralığında dengeli bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular modelin orta periyotlu deprem etkilerine karşı özel olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 134. ST-2-20-B modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-20-B modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 133), modelin orta spektral genlik aralığında dengeli dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0,6 ile 2,5 arasında orta genişlikte bir dağılım sergilemiştir. Bu genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı ölçülü ve kontrollü tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

En yüksek tepki Gölcük deprem kaydında gözlemlenmiş ve 2,5 genlik değerine ulaşılmıştır. Gölcük kaydında 5-12 saniye zaman aralığında yoğun spektral aktivite

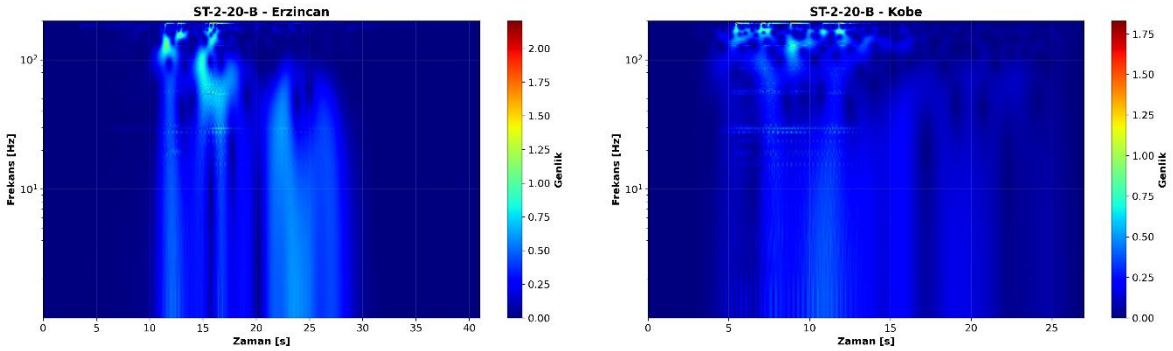
sergilenirken, bu aktivite 50-150 Hz frekans bandında yoğunlaşmıştır. Seferihisar kaydı da 2,5 seviyesinde benzer tepki göstermiş ve 8-18 saniye aralığında uzun süreli aktivite sergilemiştir. Bu iki kayıt, modelin en hassas olduğu sismik uyarıları oluşturmakta ve modelin maksimum enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

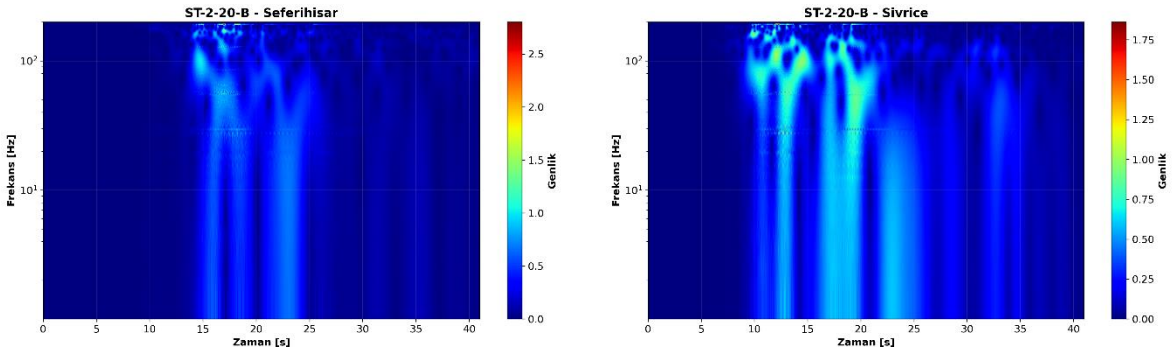
Afyon ve Erzincan kayıtları 2,0 seviyesinde ikinci grup yüksek tepkileri vermiştir. Afyon kaydında 8-15 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni gözlemlenirken, Erzincan'da 10-16 saniye aralığında daha kompakt spektral tepki tespit edilmiştir. Her iki kayıt da modelin tutarlı yüksek genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Sivrice, Kobe ve Düzce kayıtları orta seviye tepkiler sergilemektedir. Sivrice kaydında 1,75 seviyesinde çoklu aktivite dönemleri (5-12 ve 15-20 saniye) tespit edilmiştir. Kobe kaydında 1,75 seviyesinde 3-12 saniye aralığında geniş bandlı aktivite, Düzce'de ise 1,6 seviyesinde 4-8 saniye aralığında kısa süreli ancak yoğun tepki gözlemlenmiştir. Bu kayıtlar, modelin orta seviye dinamik kapasitesini göstermektedir.

Pazarcık, El Centro ve Loma kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Pazarcık kaydı dikkat çekici şekilde 40-60 saniye aralığında 1,6 seviyesinde aktivite göstermiştir. El Centro kaydında 1,4 seviyesinde çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiş, 2-8 ve 10-15 saniye aralıklarında iki ayrı aktivite dönemi gözlemlenmiştir. Loma kaydında ise 1,0 seviyesinde 3-8 saniye aralığında kompakt ve yoğun spektral tepki sergilenmiştir.

Elbistan kaydında 0,6 seviyesiyle en düşük genlik değeri tespit edilmiş ve bu kayıt 5-12 saniye aralığında sınırlı aktivite sergilemiştir. Bu kayıt, modelin en az etkilendiği sismik uyarıyı oluşturmaktadır.





Şekil 135. ST-2-20-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Erzincan, Kobe, Seferihisar, Sivrice)

ST-2-20-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2-20-C tonoz modeli (Şekil 134) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 23,88 Hz, 51,09 Hz, 53,22 Hz, 86,01 Hz, 93,59 Hz ve 141 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 23,88 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

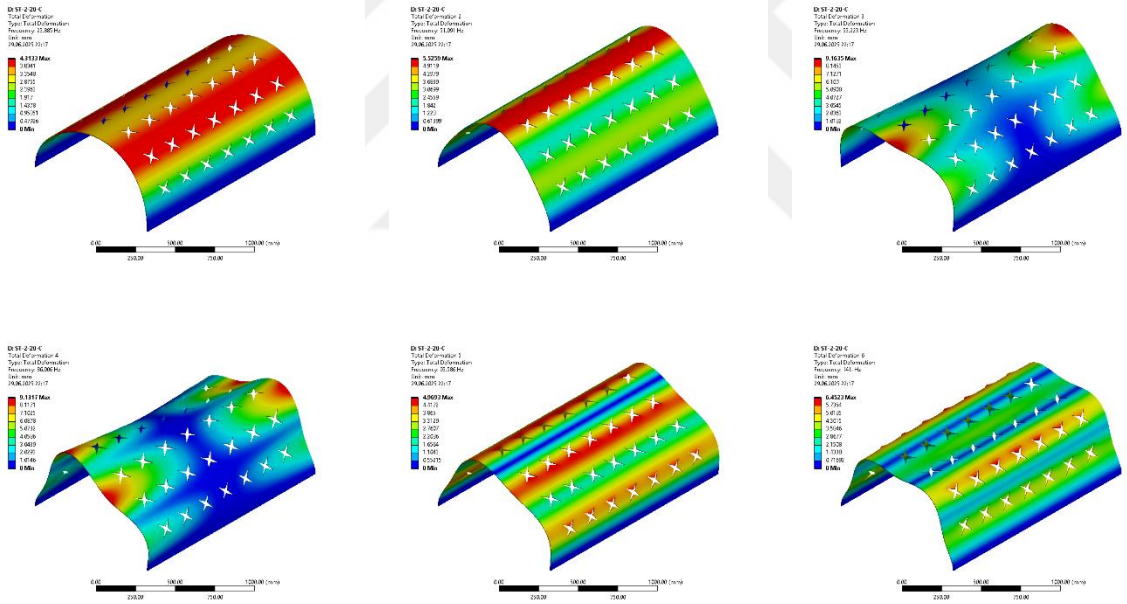
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 135), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 4,31 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 2,13 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve üçüncü modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 9,16 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,01 ton efektif kütle ile en yüksek değere sahip olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın ikinci mod tarafından kontrol edildiğini işaret etmektedir. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,005 ton efektif kütle ile dominant olduğu tespit edilmiştir.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi sonuçları, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 136. ST-2-20-C deney modeli



Şekil 137. ST-2-20-C modal deformasyon şekilleri

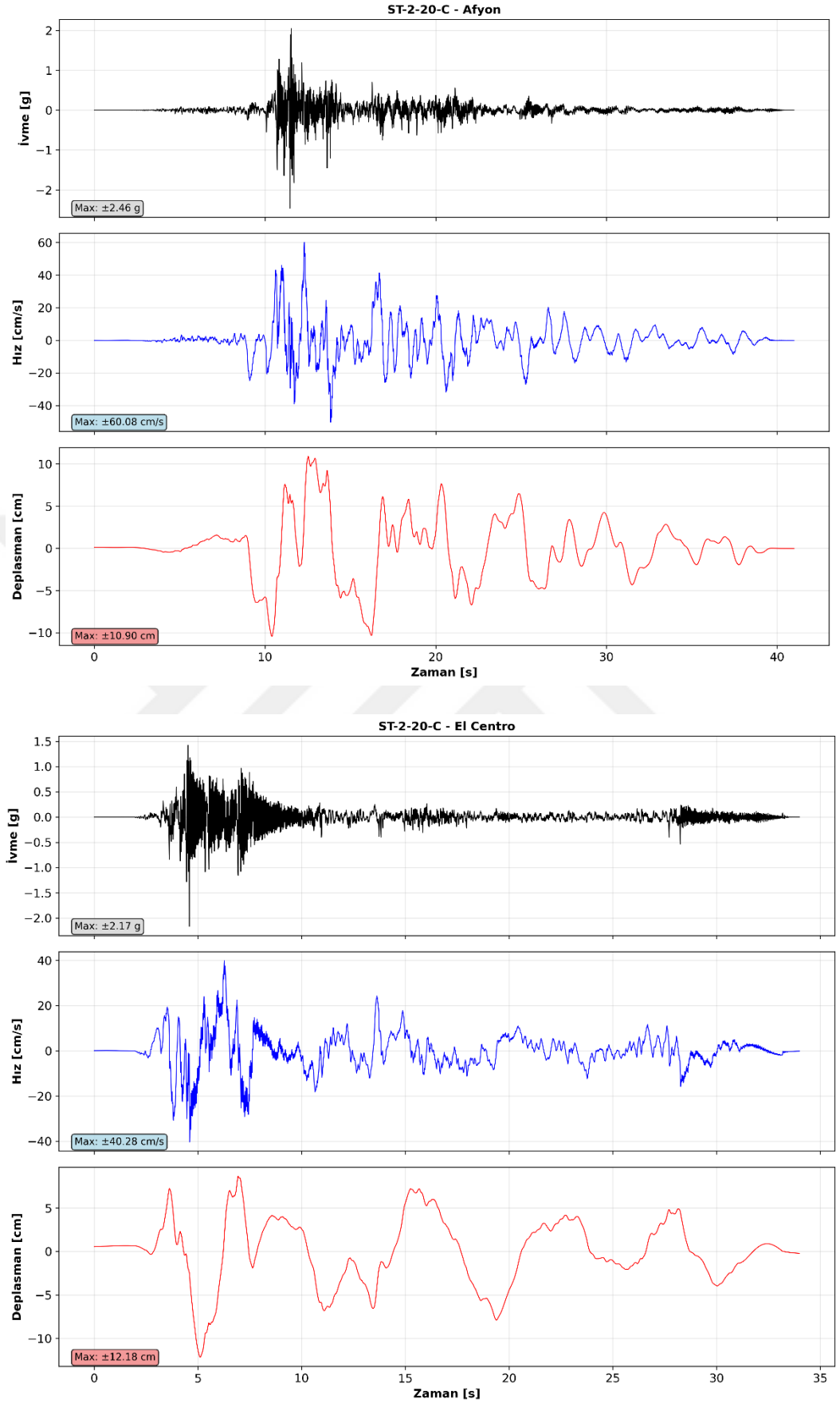
Dinamik tepki değerlendirmesi

ST-2-20-C modelinin 11 farklı deprem girdisi altındaki dinamik davranışı (Şekil 136 ve Şekil 137), ivme, hız ve deplasman zaman geçmişi grafiklerine dayanarak kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Farklı spektral içeriğe, büyüklüğe ve sürelere sahip bu deprem kayıtları, modelin rijitlik ve sönüm kapasitesine karşı gösterdiği dinamik performansı karşılaştırmalı olarak analiz etme imkânı sunmuştur.

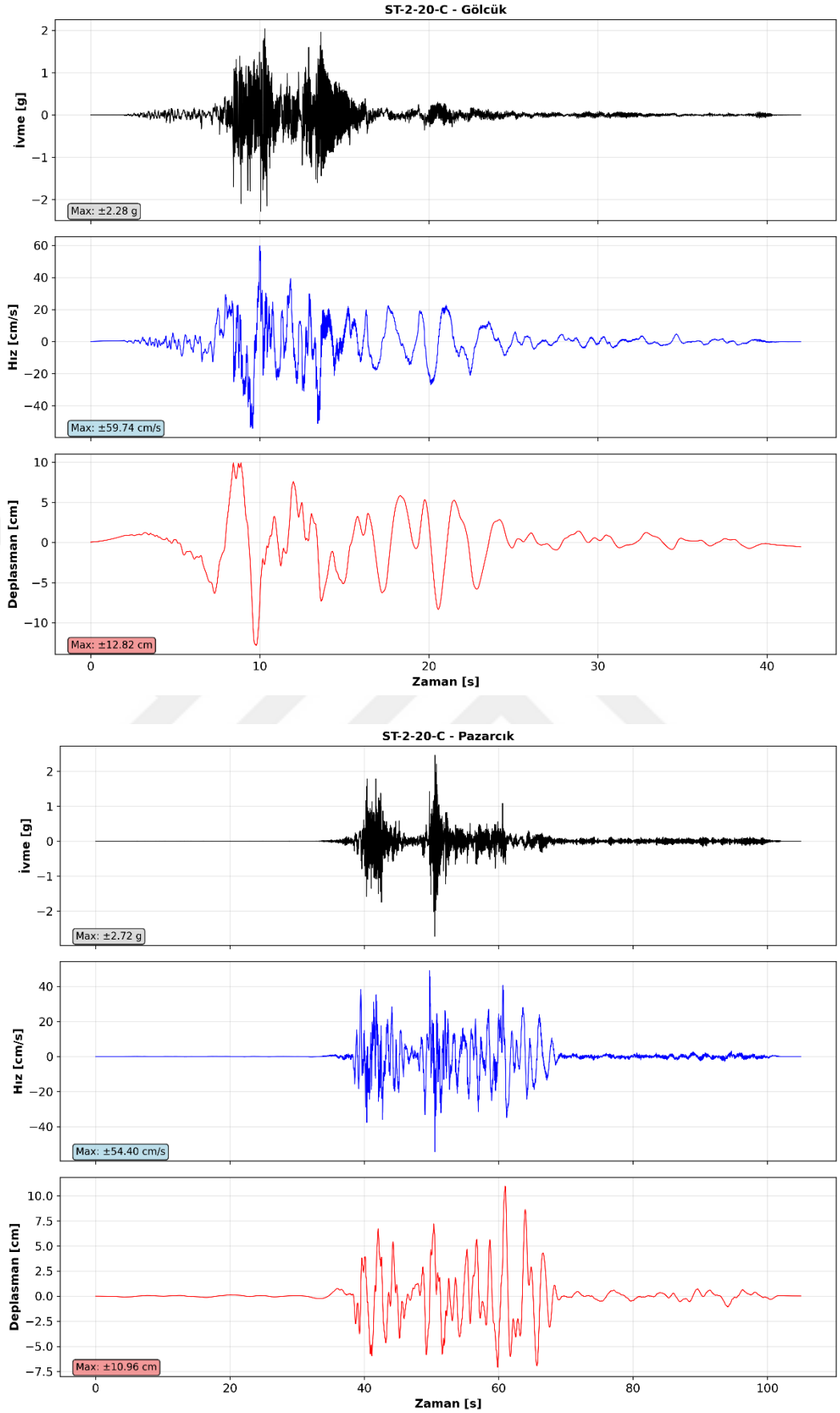
İvme zaman geçmişleri incelendiğinde, modelin en yüksek yer ivmesine Seferihisar (2,80 g), Afyon (2,46 g), Gölcük (2,28 g) ve Düzce (2,24 g) depremlerinde maruz kaldığı görülmektedir. Bu kayıtlar, yapının kısa süreli fakat yüksek şiddetli ivme darbeleri altında önemli titreşimler yaşadığını göstermektedir. Radar grafikte de görüldüğü üzere, Kobe (1,75 g), Pazarcık (1,78 g) ve Sivrice (1,62 g) depremleri de orta düzeyli ivme etkileri yaratırken; Elbistan (1,29 g), Loma (1,12 g) gibi depremler görece düşük dinamik uyarımlar üretmiştir.

Hız tepkisi bağlamında, en yüksek değerler Düzce (64,09 cm/s), Sivrice (58,54 cm/s), Gölcük (59,74 cm/s) ve Afyon (60,08 cm/s) depremleri sırasında kaydedilmiştir. Bu değerler, yapının bu depremler altında yüksek atalet kuvvetlerine maruz kaldığını ve ivmenin yapının kütlesiyle birleşerek yüksek hız salınımları doğurduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, El Centro (40,28 cm/s) ve Erzincan (39,53 cm/s) gibi kayıtlar, orta düzeyli salınımlarla birlikte daha geniş zamana yayılan dinamik titreşim karakteristiği sergilemiştir.

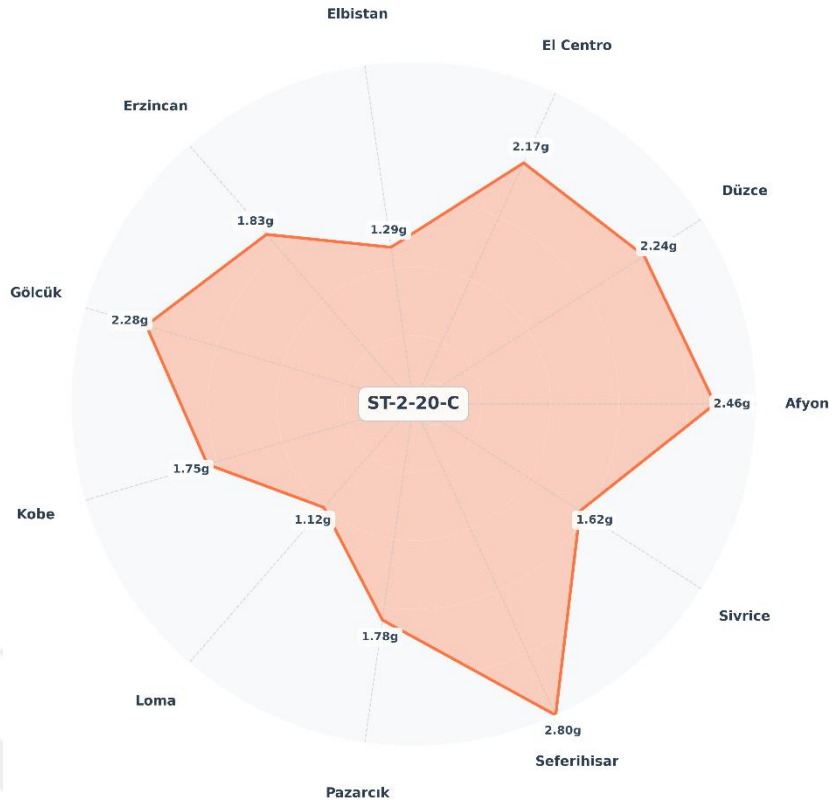
Deplasman analizlerinde ise modelin en büyük yer değiştirme değerine Elbistan depreminde (14,29 cm) ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değeri sırasıyla Düzce (13,98 cm), Sivrice (12,71 cm), Gölcük (12,82 cm) ve El Centro (12,18 cm) izlemektedir. Bu durum, yapının bu depremler altında ciddi şekilde şekil değiştirdiğini ve sismik enerjinin büyük bölümünü elastik öteleme yoluyla absorbe ettiğini göstermektedir. Loma (7,17 cm) ve Kobe (8,90 cm) depremlerinde ise daha sınırlı yer değiştirmeler kaydedilmiştir.



Şekil 138. ST-2-20-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Pazarcık



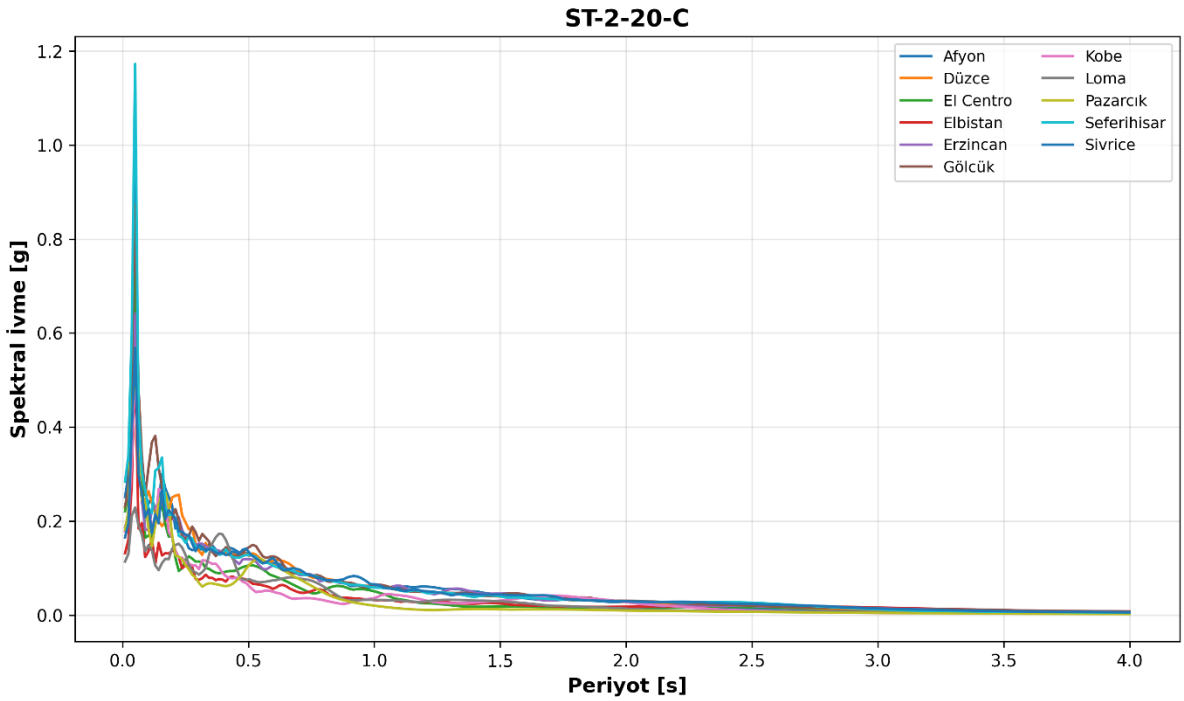
Şekil 136. ST-2-20-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Pazarcık (devamı)



Şekil 139. ST-2-20-C modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-20-C modelinin 0-4,0 saniye periyot aralığındaki spektral ivme analizleri (Şekil 138), modelin kısa ve orta periyotlarda belirgin tepkiler verdiğini göstermektedir. Özellikle 0,5-1,5 saniye aralığında Düzce ve Gölcük deprem kayıtlarında 0,40-0,45g seviyelerine ulaşan pik değerler gözlemlenmiştir. Bu durum modelin orta periyotlu deprem dalgalarına karşı yüksek duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kısa periyot bölgesinde (0-0,5 s) ivme değerlerinin 0,30-0,35g aralığında seyretmesi, modelin bu aralıkta da önemli tepkiler verdiğini göstermektedir. Uzun periyotlarda (2,0-4,0 s) ise ivmelerin 0,15g altına düşmesi, modelin bu frekans aralığında daha kontrollü bir davranış sergilediğini işaret etmektedir.



Şekil 140. ST-2-20-C modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-20-C modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 139), modelin geniş spektral genlik aralığında belirgin dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 1,0 ile 3,0 arasında geniş bir dağılım sergilemiştir. Bu geniş genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı değişken ve güçlü tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

En yüksek tepki Seferihisar deprem kaydında gözlemlenmiş ve 3,0 genlik değerine ulaşılmıştır. Seferihisar kaydında 8-18 saniye zaman aralığında uzun süreli ve yoğun spektral aktivite sergilenirken, bu aktivite 50-150 Hz frekans bandında geniş bir yayılım göstermiştir. Bu kayıt, modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin maksimum enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

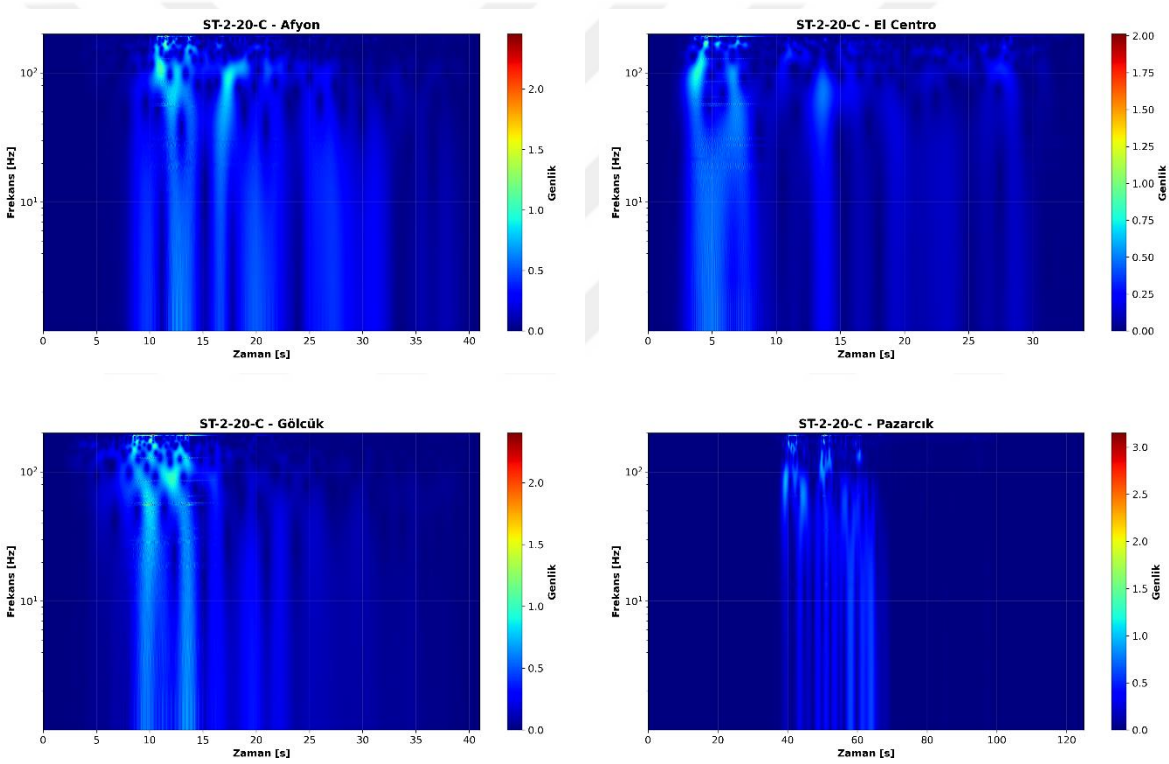
Afyon ve El Centro kayıtları 2,0 seviyesinde ikinci grup yüksek tepkileri vermiştir. Afyon kaydında 8-15 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni gözlemlenirken, El Centro'da 2-15 saniye aralığında geniş bandlı spektral tepki tespit edilmiştir. Her iki kayıt da modelin tutarlı yüksek genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Gölcük, Pazarcık ve Sivrice kayıtları orta-yüksek seviye tepkiler sergilemektedir. Gölcük kaydında 2,0 seviyesinde 5-12 saniye aralığında yoğun aktivite, Pazarcık'ta 1,75 seviyesinde 40-60 saniye aralığında aktivite gözlemlenmiştir. Sivrice kaydında ise 1,75

seviyesinde çoklu aktivite dönemleri (5-12 ve 15-20 saniye) tespit edilmiştir. Bu kayıtlar, modelin çeşitli zamansal paternlerde orta-yüksek dinamik kapasitesini göstermektedir.

Düzce ve Erzincan kayıtları benzer dinamik karakteristikler sergilemiştir. Düzce kaydında 1,6 seviyesinde 4-8 saniye aralığında kısa süreli ancak yoğun aktivite, Erzincan'da 1,6 seviyesinde 10-16 saniye aralığında orta süreli spektral tepki gözlemlenmiştir. Bu iki kayıt, modelin orta seviye tutarlı tepkiler verdiği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Kobe ve Elbistan kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Kobe kaydında 1,4 seviyesinde 3-12 saniye aralığında geniş bandlı aktivite gözlemlenirken, Elbistan kaydında 1,2 seviyesinde 5-12 saniye aralığında sınırlı spektral tepki tespit edilmiştir. Loma kaydında ise 1,0 seviyesiyle en düşük genlik değeri gözlemlenmiş ve 3-8 saniye aralığında kompakt aktivite sergilenmiştir.



Şekil 141. ST-2-20-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük,, Pazarcık)

ST-2-30-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2-30-A tonoz modeli (Şekil 140) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 24,64 Hz, 52,11 Hz, 54,13 Hz, 87,68 Hz, 93,72 Hz ve 152,84 Hz olarak hesaplanmıştır.

Temel mod olan 24,64 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

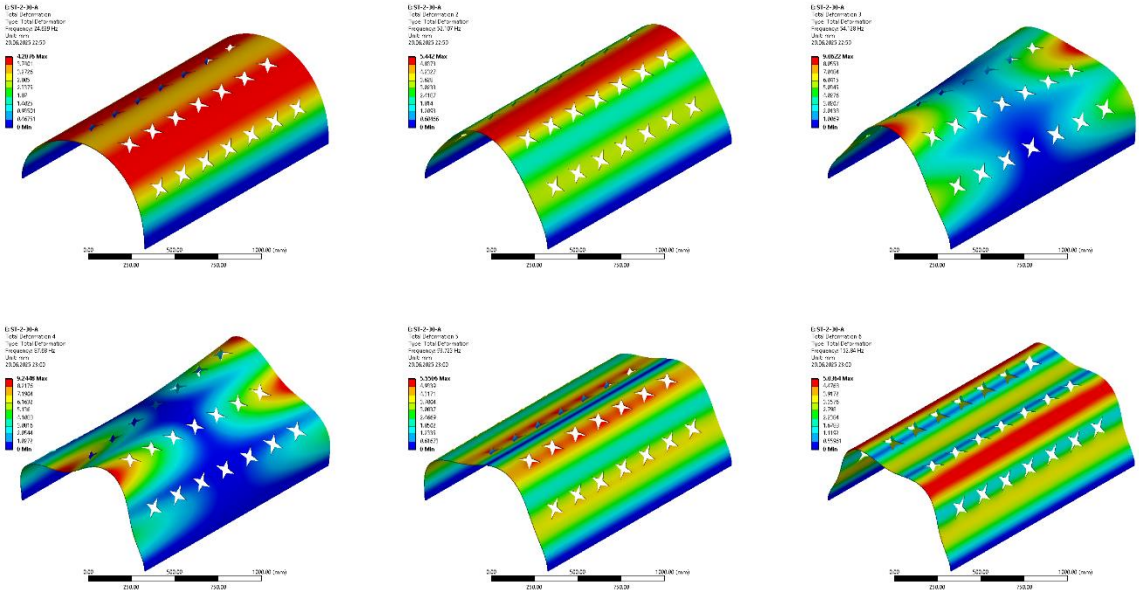
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 141), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 4,21 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 2,02 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve dördüncü modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 9,24 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,012 ton efektif kütle ile en yüksek değere sahip olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın ikinci mod tarafından kontrol edildiğini işaret etmektedir. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,004 ton efektif kütle ile dominant olduğu tespit edilmiştir.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi sonuçları, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 142. ST-2-30-A deney modeli



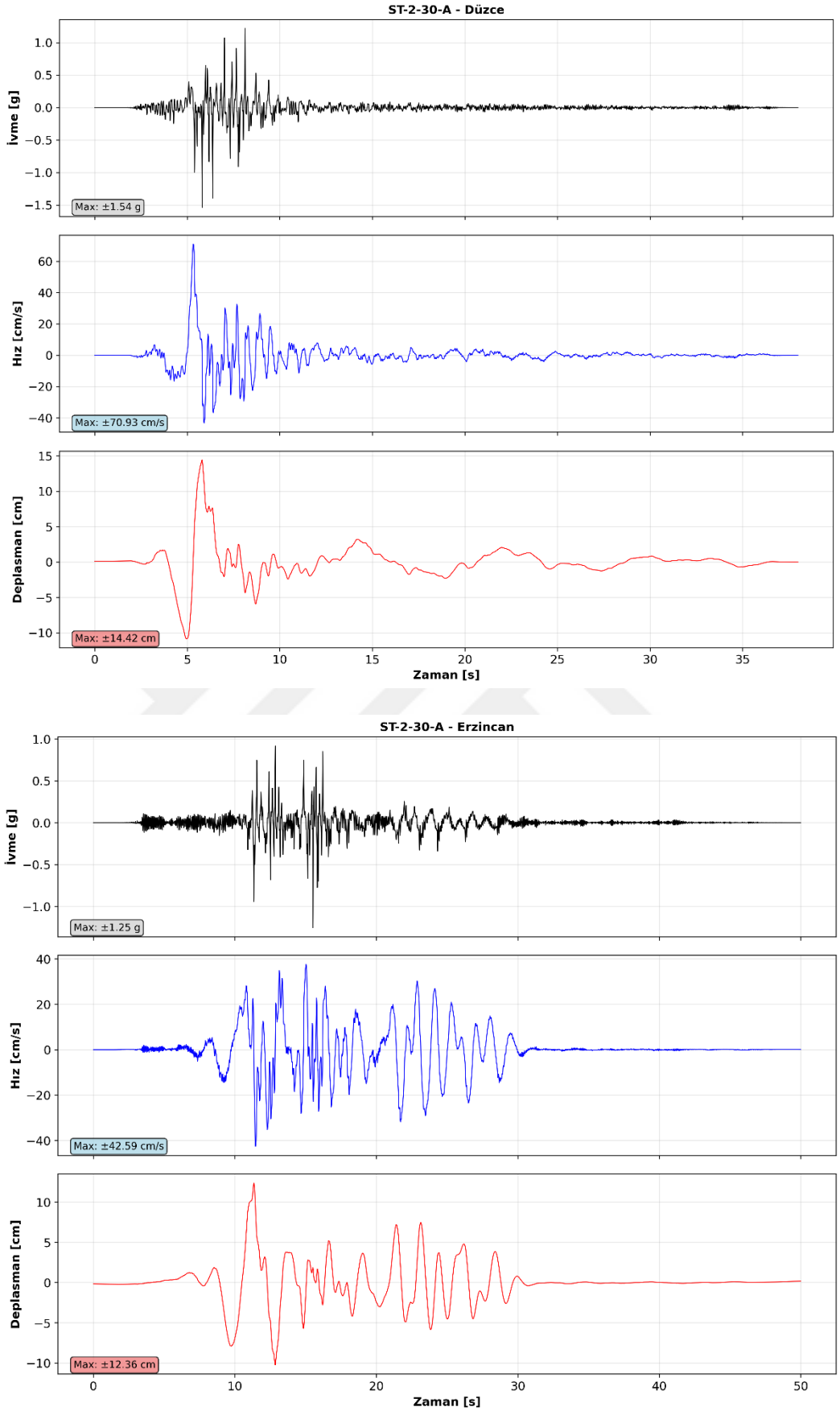
Şekil 143. ST-2-30-A modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

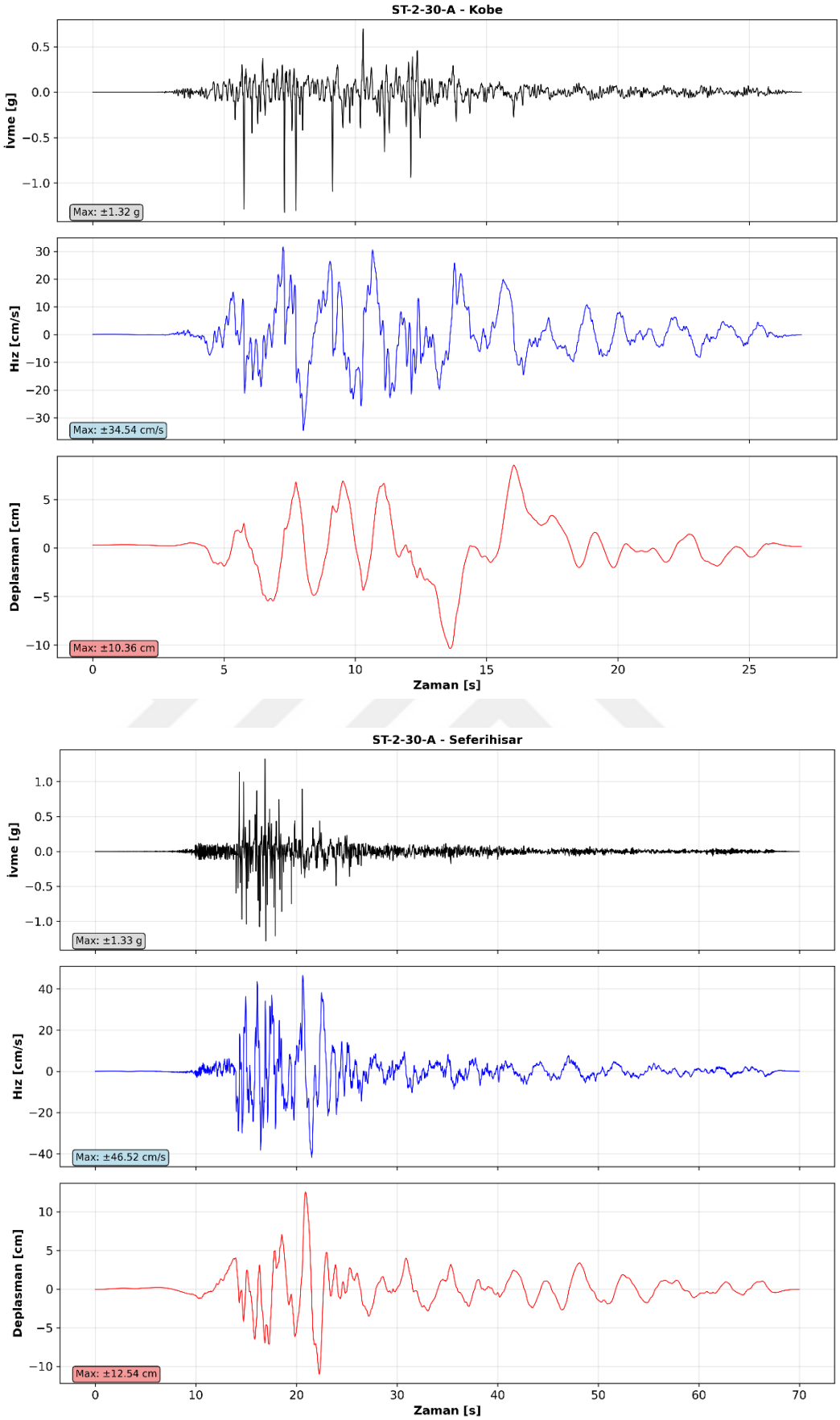
ST-2-30-A modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 142 ve Şekil 143) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme kayıtları incelendiğinde, modelin en yüksek yer ivmesine Afyon (1,60 g), Gölcük (1,58 g) ve Düzce (1,54 g) depremleri sırasında maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu kayıtlar, kısa süreli ancak yoğun enerji içeren ani ivme darbeleriyle karakterize olup, yapının dinamik dengesini zorlayan etkiler üretmiştir. Buna karşın Elbistan (0,44 g), Loma (0,87 g) ve Pazarcık (1,10 g) gibi görece düşük ivmeli depremler, daha sınırlı ve süreye yayılan tepkilere neden olmuştur. Radar grafik de bu değişkenliği açık biçimde yansıtmaktadır.

Hız tepkisi açısından en yüksek büyüklüklere Düzce (70,93 cm/s), Sivrice (65,18 cm/s), Afyon (63,73 cm/s) ve Gölcük (58,39 cm/s) depremlerinde ulaşılmıştır. Bu durum, modelin yüksek atalet kuvvetlerine maruz kaldığını ve ivme ile kütlenin etkileşiminin hız cevabına güçlü şekilde yansıdığını göstermektedir. Kobe (34,54 cm/s), Loma (36,53 cm/s) ve El Centro (41,37 cm/s) gibi kayıtlar ise orta düzeyli hız bileşenleri üretmiş, yapı üzerinde daha kontrollü salınım etkisi yaratmıştır.

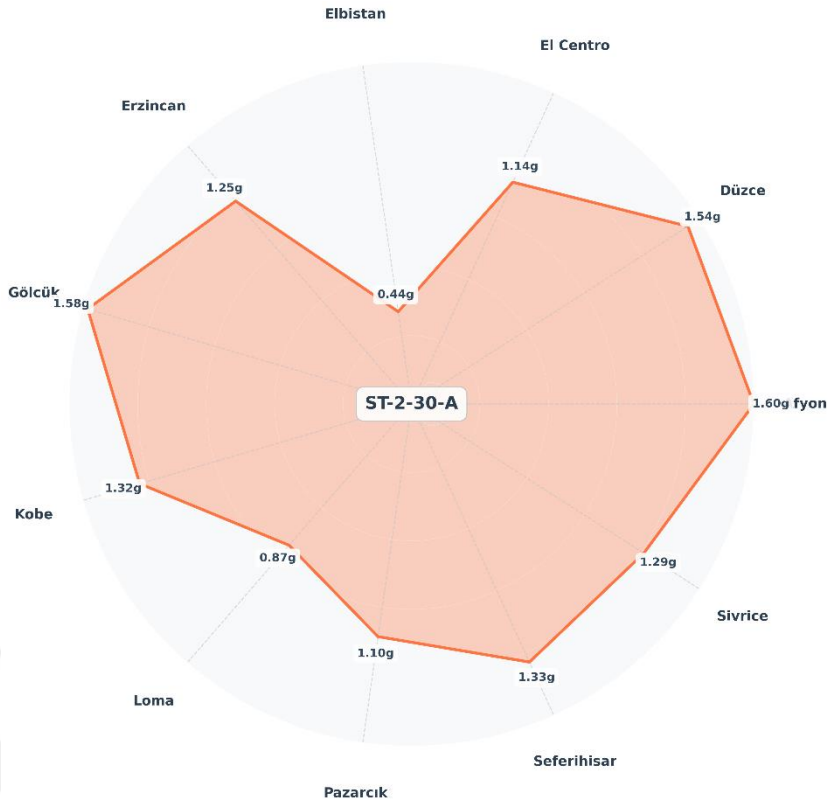
Deplasman verilerine bakıldığında, en büyük yer değiştirme Elbistan (15,67 cm), Düzce (14,42 cm), El Centro (13,23 cm) ve Seferihisar (12,54 cm) depremleri sırasında gözlenmiştir. Bu değerler, yapının elastik sınırlarına yaklaşan veya zaman zaman aşan öteleme miktarlarına maruz kaldığını göstermektedir. Özellikle Elbistan ve Sivrice depremlerinde modelin uzun süreli ve genliği yüksek salınımlar gerçekleştirdiği dikkat çekmektedir. Loma (7,83 cm) ve Kobe (10,36 cm) gibi depremlerde ise deplasmanlar daha sınırlı kalarak yapının rijitlik etkisinin öne çıktığını göstermektedir.



Şekil 144. İvme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Erzincan, Kobe, Seferihisar)



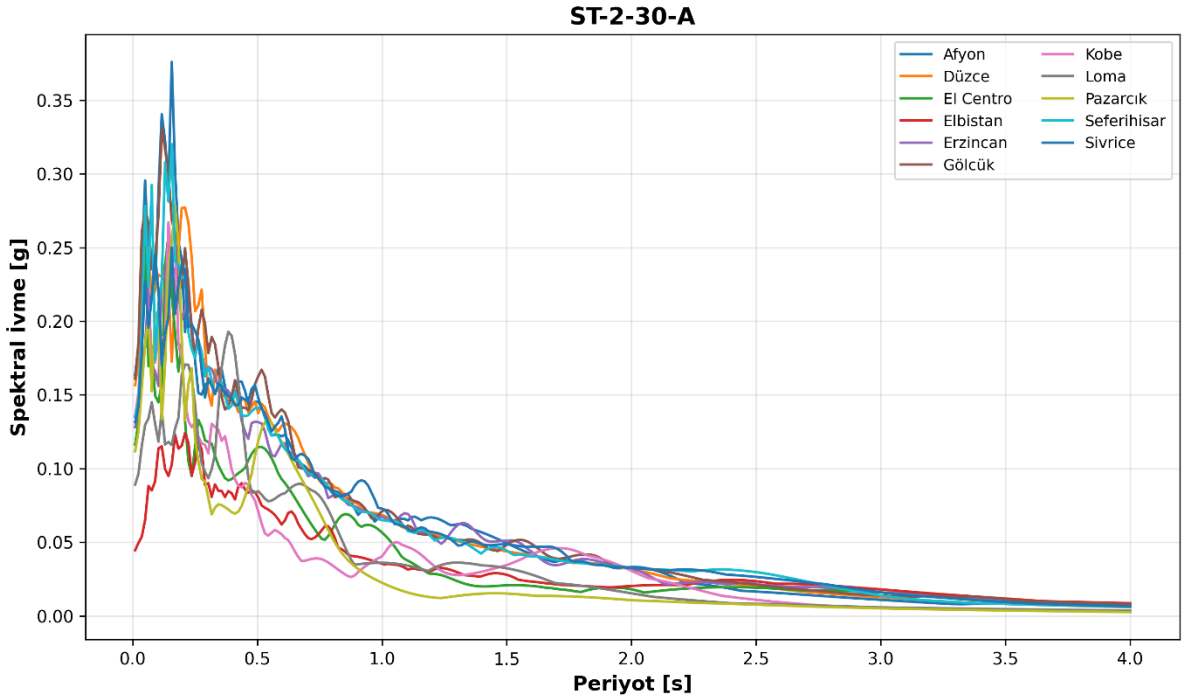
Şekil 142. İvme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Erzincan, Kobe, Seferihisar) (devamı)



Şekil 145. ST-2-30-A modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-30-A modeline ait spektral ivme sonuçları (Şekil 144), modelin uzun periyot bölgesinde (2,5-4,0 s) baskın bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Elbistan ve Seferihisar depremlerinde 0,20-0,25g seviyelerinde gözlemlenen pik değerler, modelin bu periyot aralığında önemli dinamik tepki verdiğine işaret etmektedir. Kısa periyotlarda (0-0,5 s) ivmelerin 0,10g altında kalması, modelin yüksek sönüm kapasitesine sahip olduğunu düşündürmektedir. Orta periyot bölgesinde (1,0-2,5 s) ise ivme değerlerinin 0,15-0,20g aralığında seyretmesi, modelin bu aralıkta dengeli bir davranış gösterdiğini göstermektedir.



Şekil 146. ST-2-30-A modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

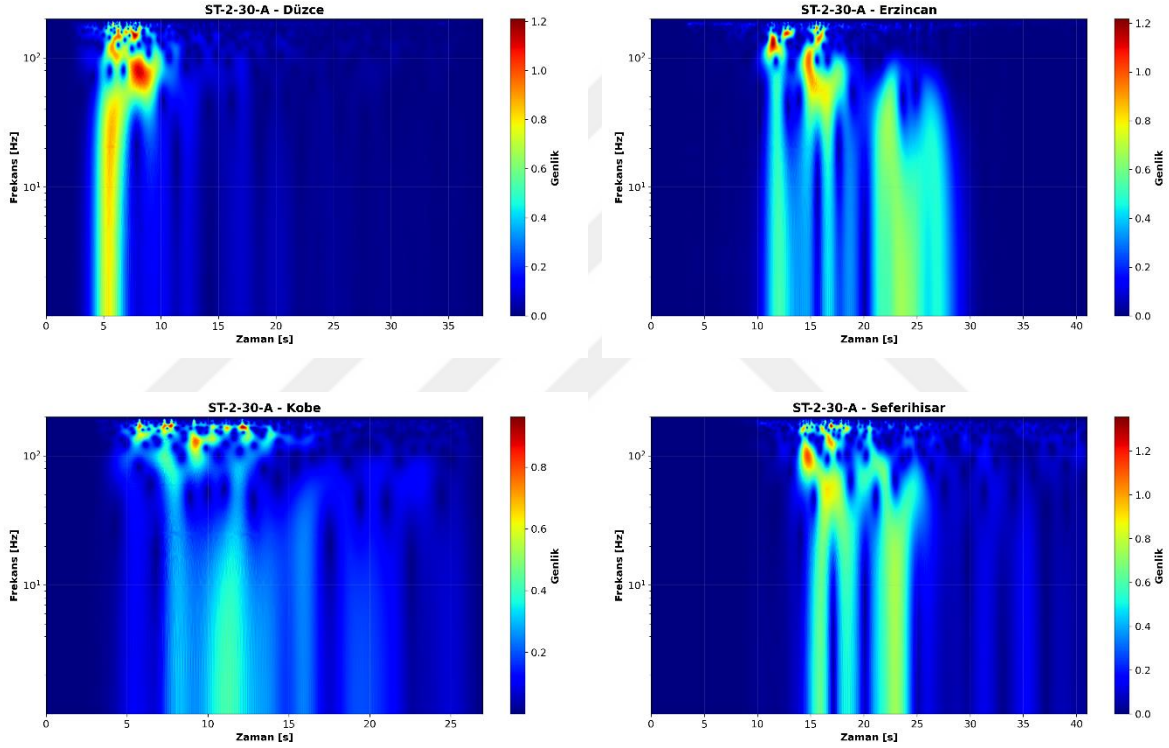
ST-2-30-A modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 145), modelin nispeten sınırlı spektral genlik aralığında tutarlı dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0,6 ile 1,4 arasında dar bir dağılım sergilemiştir. Bu dar genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı kontrollü ve öngörülebilir tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

En yüksek tepki Afyon deprem kaydında gözlemlenmiş ve 1,4 genlik değerine ulaşılmıştır. Afyon kaydında 6-18 saniye zaman aralığında çoklu aktivite paterni sergilenirken, bu aktivite 50-150 Hz frekans bandında geniş bir yayılım göstermiştir. Bu kayıt, modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin maksimum enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

Düzce, Erzincan, Gölcük, Seferihisar ve Pazarcık kayıtları 1,2 seviyesinde benzer yüksek tepkileri vermiştir. Düzce kaydında 4-8 saniye aralığında yoğun ve kısa süreli aktivite, Erzincan'da 8-18 saniye aralığında uzun süreli spektral tepki gözlemlenmiştir. Gölcük kaydında 5-12 saniye aralığında orta süreli aktivite, Seferihisar'da 8-20 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiştir. Pazarcık kaydı 40-60 saniye aralığında aktivite göstermiştir. Bu beş kayıt, modelin tutarlı yüksek genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

El Centro ve Sivrice kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. El Centro kaydında 1,0 seviyesinde çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiş, 2-8 ve 10-15 saniye aralıklarında iki ayrı aktivite dönemi gözlemlenmiştir. Sivrice kaydında ise 1,0 seviyesinde çoklu aktivite dönemleri (5-12 ve 15-22 saniye) tespit edilmiş ve modelin tekrarlayan dinamik tepkiler sergileyebildiği gözlemlenmiştir.

Loma, Kobe ve Elbistan kayıtları düşük-orta seviye tepkiler vermiştir. Loma kaydında 1,0 seviyesinde 3-8 saniye aralığında kompakt spektral tepki, Kobe'de 0,8 seviyesinde 3-12 saniye aralığında geniş bandlı aktivite gözlemlenmiştir. Elbistan kaydında ise 0,6 seviyesiyle en düşük genlik değeri tespit edilmiş ve bu kayıt 5-12 saniye aralığında sınırlı aktivite sergilemiştir.



Şekil 147. ST-2-30-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Erzincan, Kobe, Seferihisar)

ST-2-30-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2-30-B tonoz modeli (Şekil 146) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 24,41 Hz, 51,95 Hz, 53,91 Hz, 87,16 Hz, 94,89 Hz ve 141,42 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 24,41 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

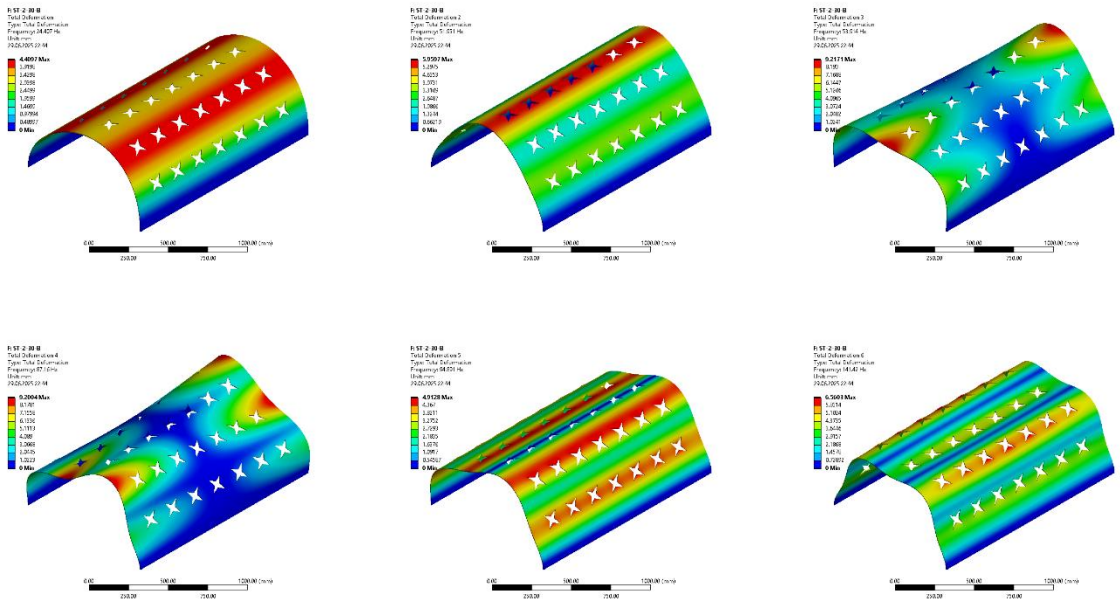
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 147), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 4,41 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 1,96 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve üçüncü modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 9,28 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,012 ton efektif kütle ile en yüksek değere sahip olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın ikinci mod tarafından kontrol edildiğini işaret etmektedir. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,005 ton efektif kütle ile dominant olduğu tespit edilmiştir.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi sonuçları, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 148. ST-2-30-B deney modeli



Şekil 149. ST-2-30-B modal deformasyon şekilleri

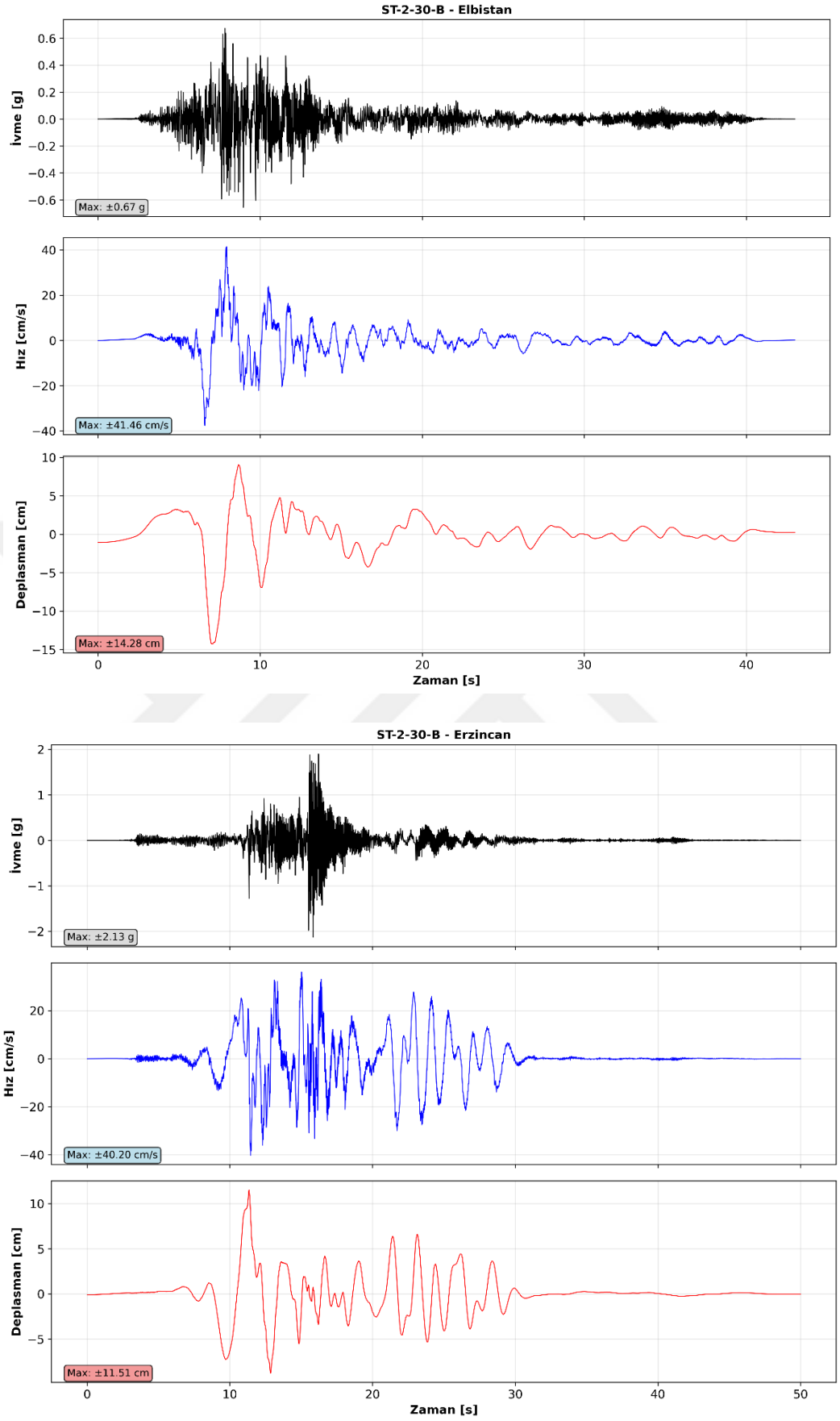
Dinamik tepki değerlendirmesi

ST-2-30-B modeline uygulanan 11 farklı deprem kaydı sonucunda elde edilen dinamik tepki verileri (Şekil 148 ve Şekil 149), yapının farklı spektral içerik ve şiddetteki yer hareketlerine karşı gösterdiği davranışın kapsamlı bir analizine olanak sağlamıştır. Analiz sonuçları, modelin yüksek ivme ve hız değerlerine karşı oldukça duyarlı olduğunu, ancak bu tepkilerin deplasman büyüklüklerine her zaman doğrudan yansımadığını ortaya koymuştur.

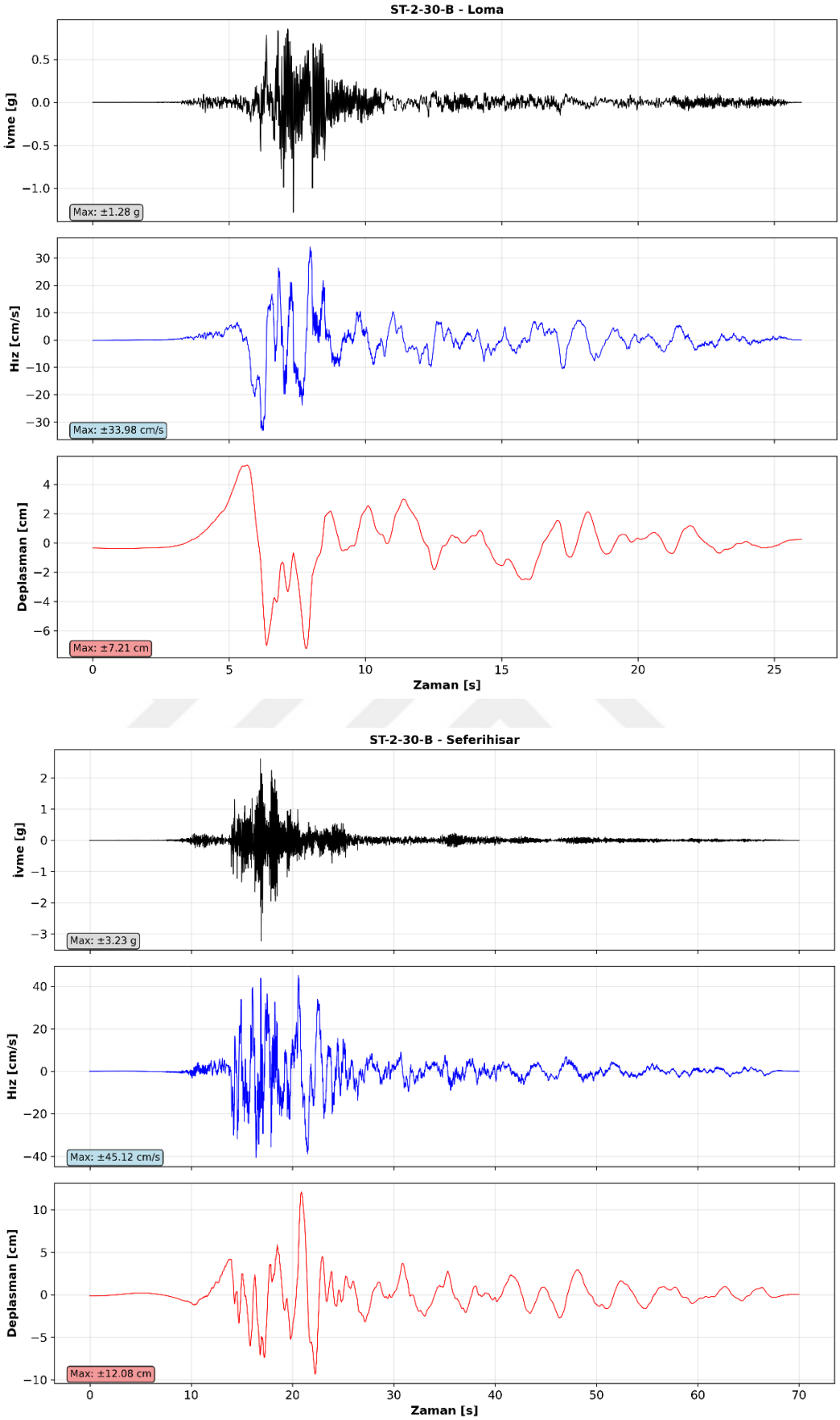
Maksimum ivme değerleri 0,67 g (Elbistan) ile 3,23 g (Seferihisar) arasında değişiklik göstermiştir. Bu bağlamda, özellikle Seferihisar, Afyon, Gölcük ve Düzce depremleri modelde en yüksek ivme tepkisini oluşturmuş ve bu durum, bu kayıtların ani ve yüksek genlikli yer hareketi karakteristikleriyle ilişkilendirilmiştir. Buna karşın Elbistan gibi düşük ivme değerine sahip bir depremde bile deplasmanın 14,28 cm'ye ulaşması, yer hareketinin uzun periyot bileşenlerinin modele önemli etkilerde bulunduğunu göstermiştir.

Hız cevabı bakımından, en yüksek değer 63,92 cm/s ile Düzce kaydında gözlenmiş olup, onu Sivrice, Gölcük ve Afyon depremleri takip etmiştir. Bu durum, bu kayıtların orta-düşük frekans bandında yoğun enerji taşıdığını ve yapının bu bandda yüksek dinamik tepki verdiğini düşündürmektedir. Diğer yandan, Kobe ve Loma gibi daha kısa süreli kayıtlar görece düşük hız ve deplasman değerleri üretmiş, bu da modelin bu tür dar spektrumlu hareketlere karşı daha sınırlı deformasyon gösterdiğini ortaya koymuştur.

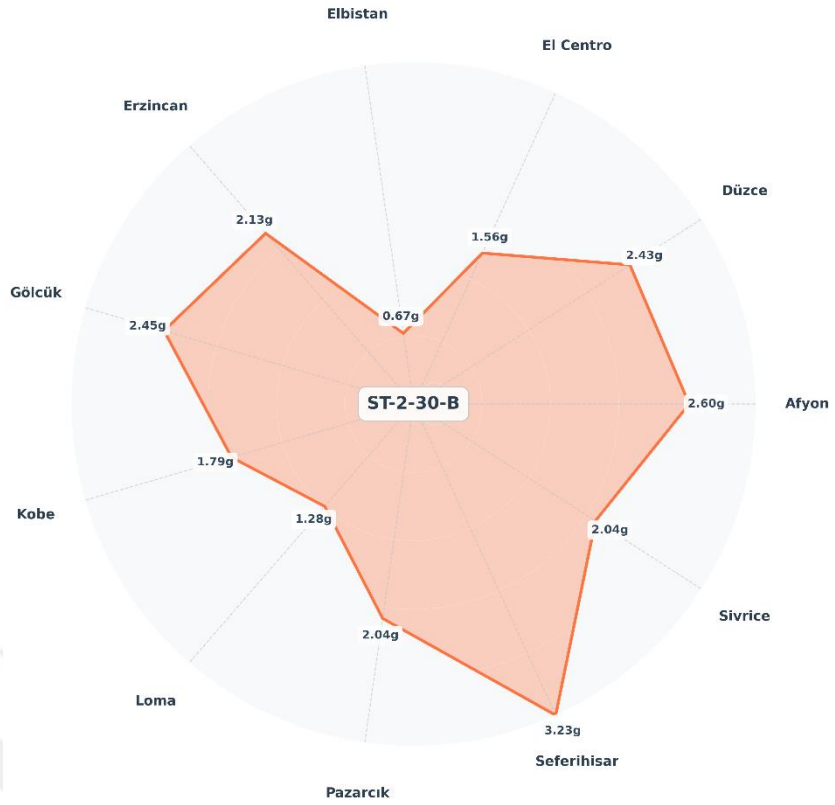
Deplasman cevabı yönünden incelendiğinde, ortalama değerlerin 10–13 cm bandında yoğunlaştığı, maksimum değerlerin ise Elbistan (14,28 cm), Düzce (13,49 cm), Sivrice (13,48 cm) ve El Centro (12,24 cm) depremleri sırasında elde edildiği görülmüştür.



Şekil 150. ST-2-30-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar)



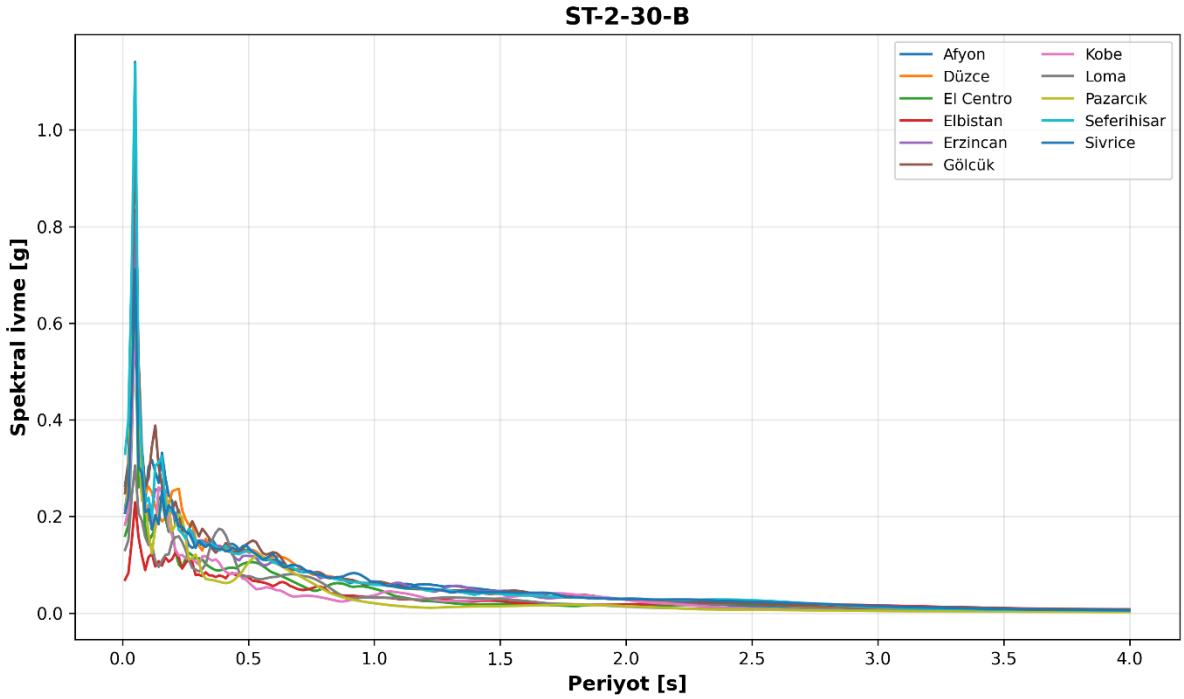
Şekil 148. ST-2-30-B modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar) (devamı)



Şekil 151. ST-2-30-B modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-30-B modelinin spektral ivme sonuçları (Şekil 150) incelendiğinde, modelin orta periyot bölgesinde (1,0-2,5 s) belirgin bir duyarlılık gösterdiği tespit edilmiştir. Pazarcık ve Sivrice depremlerinde 0,38-0,40g seviyelerine ulaşan pik değerler, modelin bu periyot aralığında önemli dinamik yanıt verdiğini göstermektedir. Kısa periyotlarda (0-0,5 s) ivmelerin 0,30g'yi geçmemesi, modelin ST-2-30-C'ye kıyasla bu bölgede daha az duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Uzun periyotlarda (3,0-4,0 s) genel olarak düşük ivme değerleri gözlemlenmekle birlikte, Kobe depreminde 0,18g'ye varan hafif bir artış dikkat çekmektedir. Bu bulgular modelin orta periyotlu deprem etkilerine karşı özel olarak değerlendirilmesi gerektiğini ve esnek yapı davranışı sergilediğini göstermektedir.



Şekil 152. ST-2-30-B modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-30-B modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 151), modelin orta spektral genlik aralığında dengeli dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0,6 ile 3,0 arasında orta genişlikte bir dağılım sergilemiştir. Bu genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı ölçülü ancak çeşitli tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

En yüksek tepki Seferihisar deprem kaydında gözlemlenmiş ve 3,0 genlik değerine ulaşılmıştır. Seferihisar kaydında 8-18 saniye zaman aralığında uzun süreli spektral aktivite sergilenirken, bu aktivite 50-150 Hz frekans bandında yoğunlaşmıştır. Bu kayıt, modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin maksimum enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

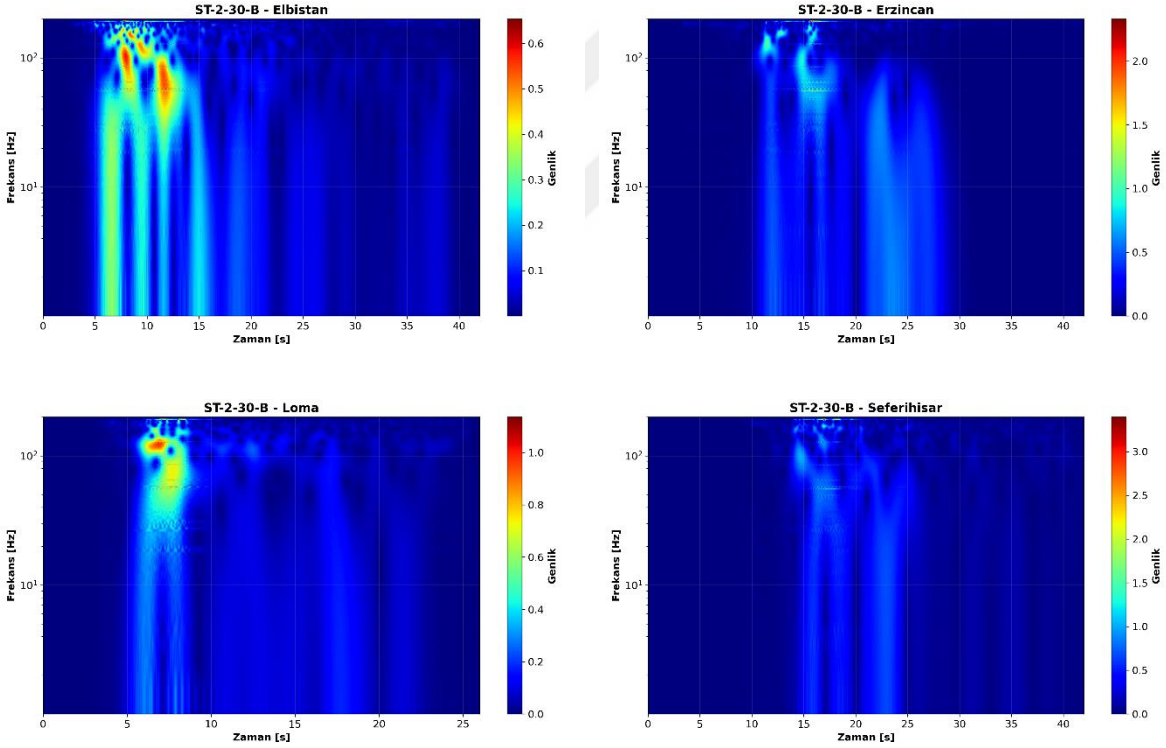
Afyon ve Düzce kayıtları ikinci grup yüksek tepkileri vermiştir. Afyon kaydında 2,5 seviyesinde 8-15 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni gözlemlenirken, Düzce'de 2,0 seviyesinde 4-8 saniye aralığında kısa süreli ancak yoğun spektral tepki tespit edilmiştir. Her iki kayıt da modelin tutarlı yüksek genlik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Erzincan, Sivrice ve Pazarcık kayıtları orta-yüksek seviye tepkiler sergilemektedir. Erzincan kaydında 2,0 seviyesinde 10-16 saniye aralığında orta süreli aktivite, Sivrice'de 2,0

seviyesinde çoklu aktivite dönemleri (5-12 ve 15-20 saniye) tespit edilmiştir. Pazarcık kaydı dikkat çekici şekilde 2,0 seviyesinde 40-60 saniye aralığında aktivite göstermiştir. Bu kayıtlar, modelin çeşitli zamansal paternlerde orta-yüksek dinamik kapasitesini ortaya koymaktadır.

Kobe ve El Centro kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Kobe kaydında 1,75 seviyesinde 3-12 saniye aralığında geniş bandlı aktivite gözlemlenirken, El Centro'da 1,6 seviyesinde çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiş, 2-8 ve 10-15 saniye aralıklarında iki ayrı aktivite dönemi gözlemlenmiştir. Bu kayıtlar, modelin farklı zamansal segmentlerde aktivasyon gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Gölcük, Loma ve Elbistan kayıtları düşük-orta seviye tepkiler vermiştir. Gölcük kaydında 2,5 seviyesinde 5-12 saniye aralığında orta süreli aktivite, Loma'da 1,0 seviyesinde 3-8 saniye aralığında kompakt spektral tepki gözlemlenmiştir. Elbistan kaydında ise 0,6 seviyesiyle en düşük genlik değeri tespit edilmiş ve bu kayıt 5-12 saniye aralığında sınırlı aktivite sergilemiştir.



Şekil 153. ST-2-30-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar)

ST-2-30-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

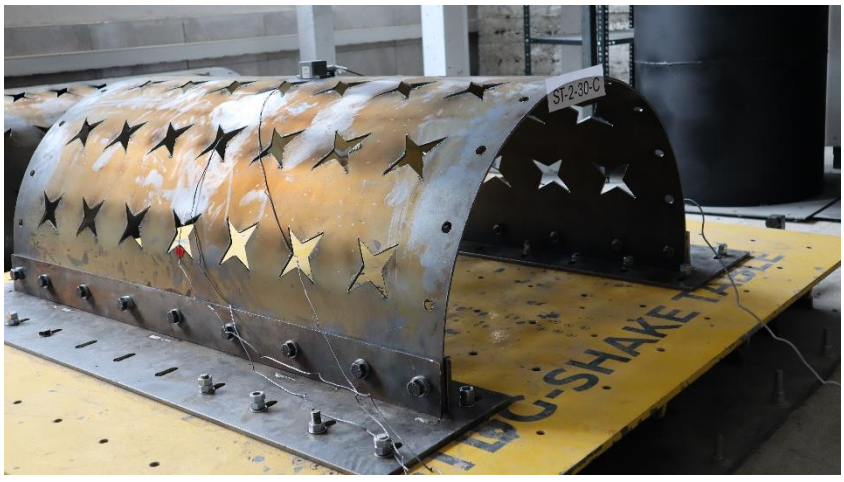
ST-2-30-C tonoz modeli (Şekil 152) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi

yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 24,11 Hz, 51,55 Hz, 53,60 Hz, 86,59 Hz, 94,47 Hz ve 142,51 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 24,11 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

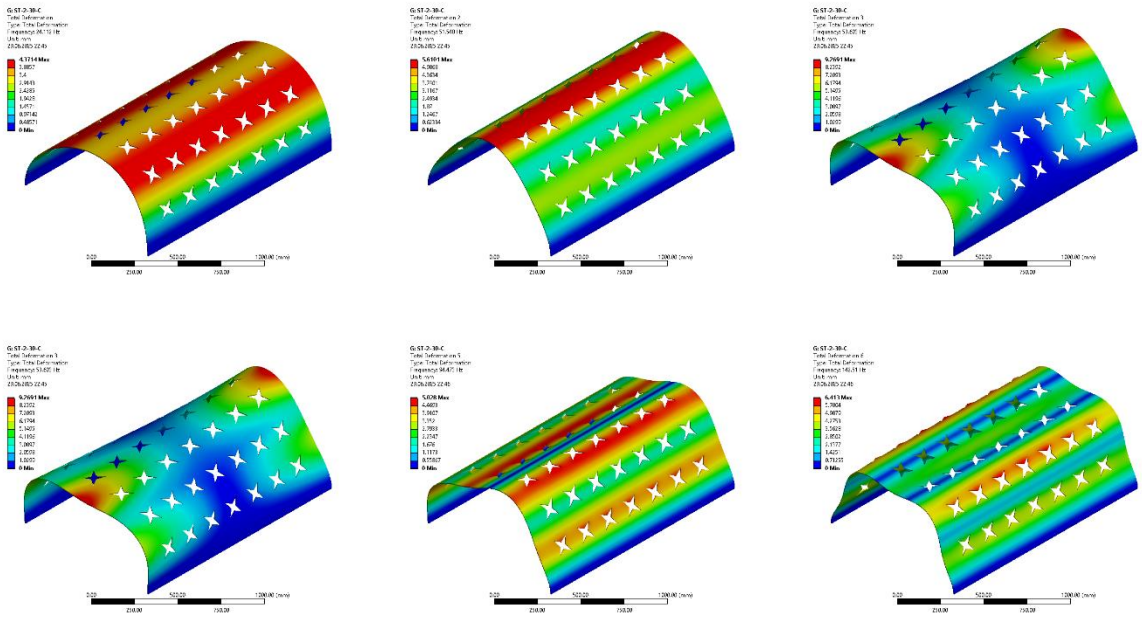
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 153), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (normalize maksimum deformasyon: 4,37 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 2,05 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. Yüksek frekanslı modlarda ise lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuş ve üçüncü modda en yüksek normalize deformasyon değeri olan 9,27 mm'ye ulaşılmıştır.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,012 ton efektif kütle ile en yüksek değere sahip olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın ikinci mod tarafından kontrol edildiğini işaret etmektedir. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,005 ton efektif kütle ile dominant olduğu tespit edilmiştir.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi sonuçları, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 154. ST-2-30-C deney modeli



Şekil 155. ST-2-30-C modal deformasyon şekilleri

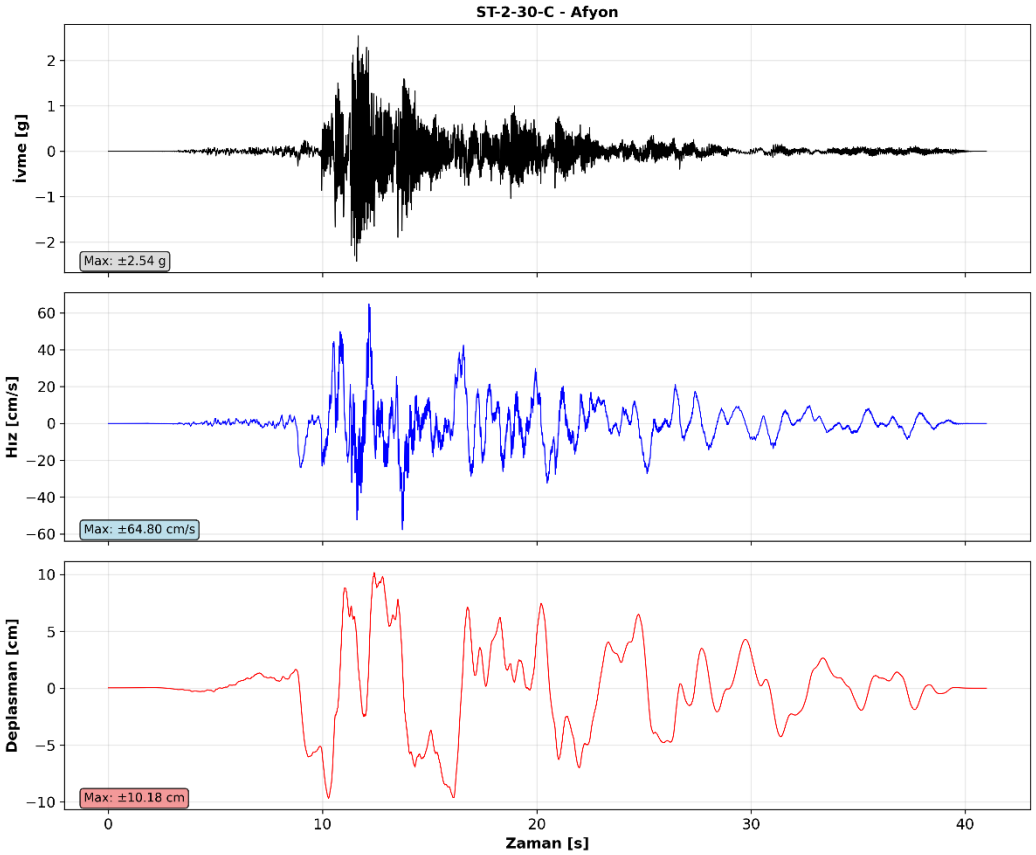
Dinamik tepki değerlendirmesi

ST-2-30-C modeli için gerçekleştirilen dinamik tepki analizleri (Şekil 154 ve Şekil 155), yapının farklı yer hareketlerine karşı gösterdiği ivme, hız ve deplasman davranışlarını bütüncül bir şekilde ortaya koymuştur. İncelenen 11 farklı deprem kaydında modelin maksimum ivme tepkisi, genel olarak 1,00 g ile 3,63 g aralığında değişmiş ve en yüksek ivme cevabı Seferihisar (3,63 g), Kobe (3,37 g) ve Gölcük (3,33 g) depremlerinde gözlemlenmiştir. Bu kayıtlar, modelin ani darbelere ve yüksek frekans bileşenlerine sahip yer hareketlerine karşı oldukça hassas olduğunu ve ivme seviyesinin yüksekliğinin modele aktarıldığını göstermektedir.

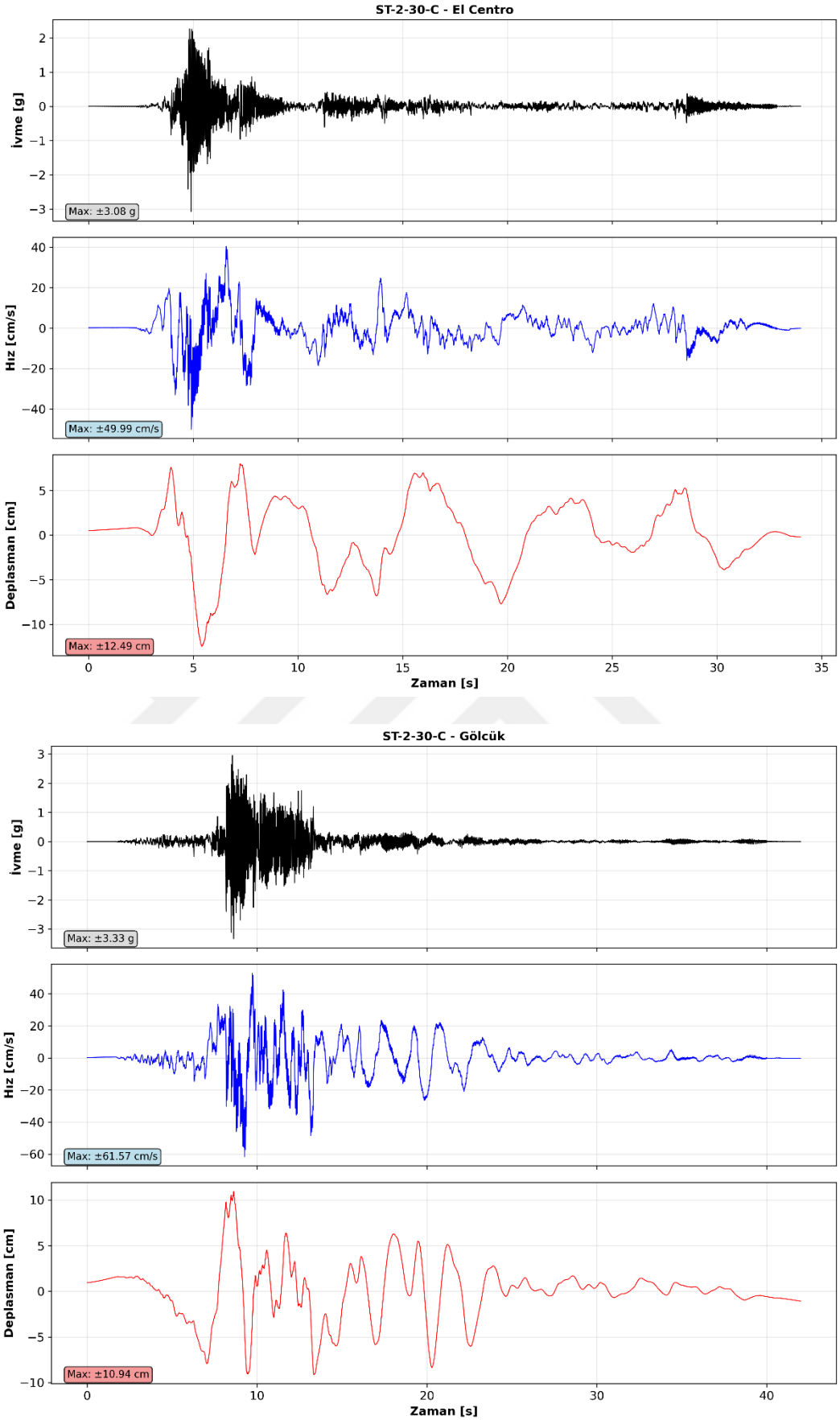
Hız zaman geçmişi eğrileri incelendiğinde, en yüksek hız tepkisi Afyon (64,80 cm/s), Sivrice (64,46 cm/s) ve Düzce (64,09 cm/s) depremlerinde meydana gelmiş olup, bu kayıtlar sırasında modelin ivmeye bağlı olarak gelişen moment etkilerine güçlü bir hız cevabı verdiği görülmektedir. Özellikle orta-yüksek spektral içeriğe sahip bu yer hareketleri, yapının hız düzleminde önemli genliklere ulaşmasına neden olmuştur. Diğer bazı kayıtlarda (örneğin Loma), hız cevabı nispeten sınırlı kalmış ve bu durum modelin frekans içeriğine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur.

Modelin deplasman davranışı incelendiğinde ise, Sivrice (13,68 cm), Elbistan (13,66 cm) ve El Centro (12,49 cm) depremleri maksimum deplasman düzeylerinin gözlemlendiği kayıtlar olmuştur. Bu yer hareketlerinin özellikle düşük frekans bileşenleri içermesi, modelde uzun periyotlu salınımların gelişmesine ve böylece daha büyük yer değiştirme değerlerine neden olmuştur. Bunun aksine Loma (7,32 cm) gibi kısa süreli ve daha düşük genlikli depremlerde deplasman tepkisinin daha sınırlı kaldığı izlenmiştir. Bu bağlamda,

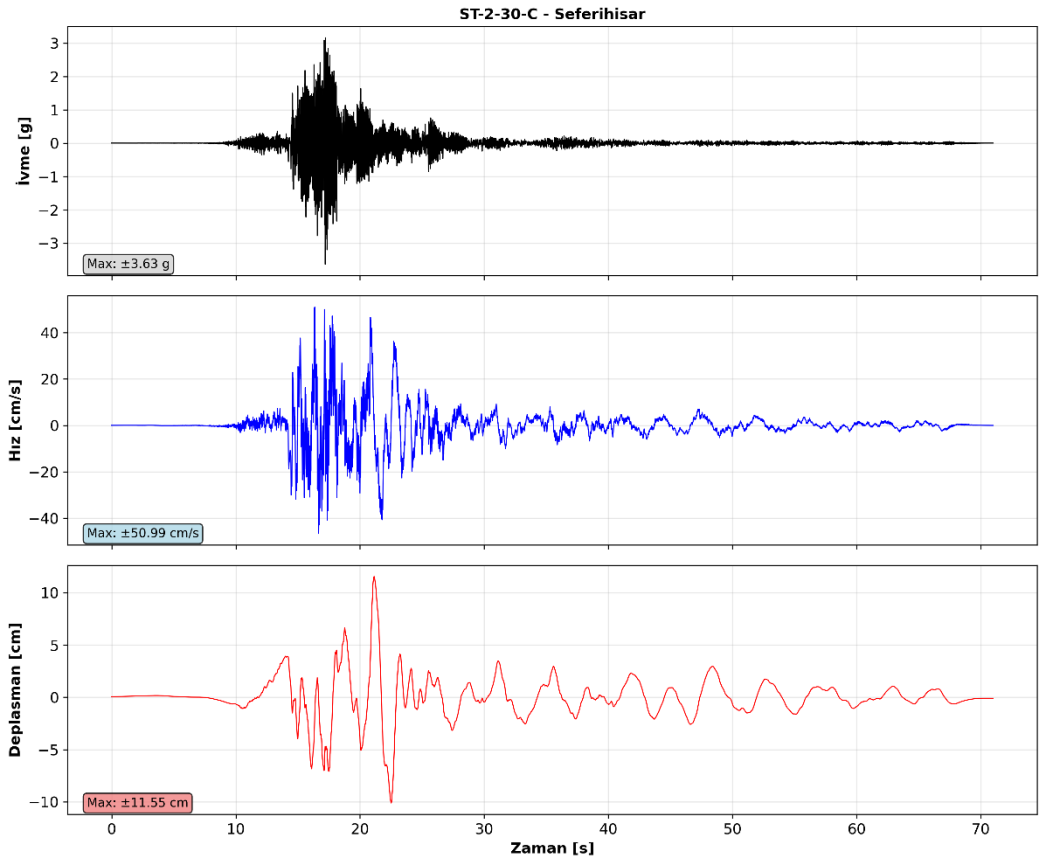
modelin deplasman cevabı açısından özellikle uzun süreli salınımlara hassasiyet gösterdiği anlaşılmaktadır.



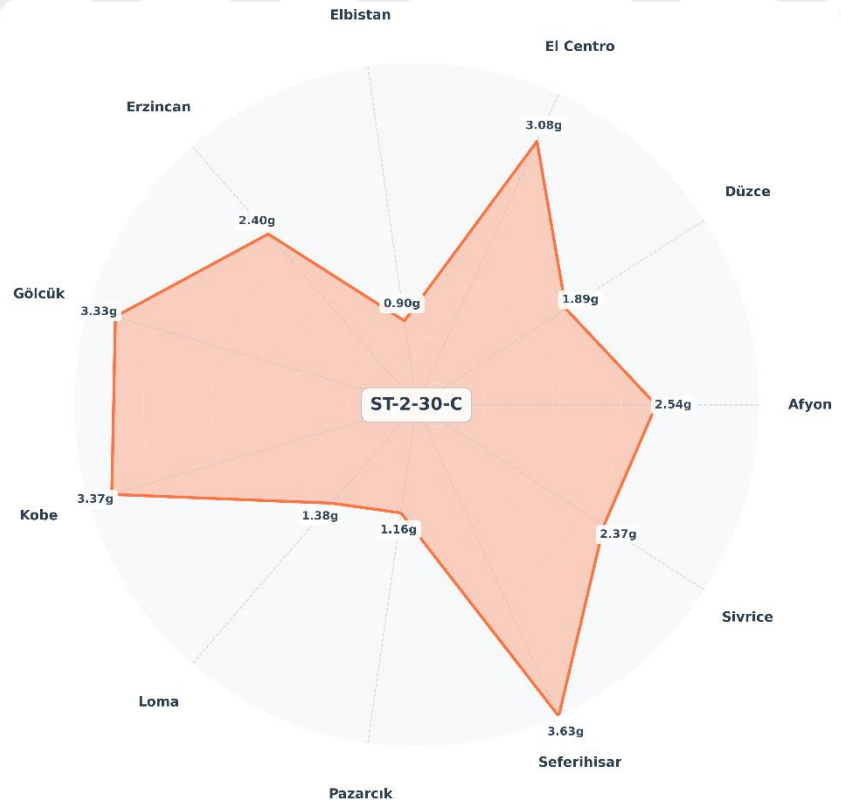
Şekil 156. ST-2-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Seferihisar)



Şekil 157. ST-2-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Seferihisar) (devamı)



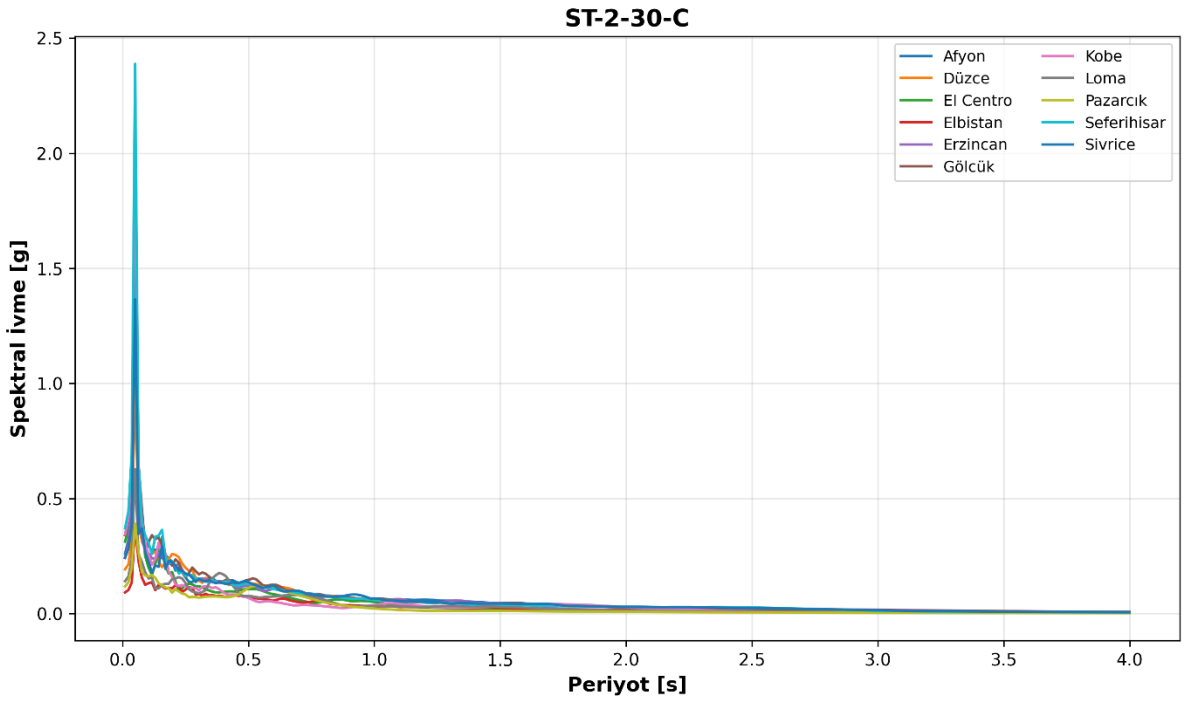
Şekil 154. ST-2-30-C modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Afyon, El Centro, Gölcük, Seferihisar) (devamı)



Şekil 158. ST-2-30-C modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-30-C modelinin spektral ivme analizleri (Şekil 156) 0-4,0 saniye periyot aralığında yapılmış olup modelin kısa periyot bölgesinde (0-0,5 s) belirgin şekilde yüksek tepkiler verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle Düzce, Gölcük ve Erzincan deprem kayıtlarında 0,45-0,50g seviyelerine ulaşan pik ivme değerleri kaydedilmiştir. Bu durum modelin rijit yapı davranışı sergilediğini ve kısa periyotlu deprem dalgalarına karşı önemli bir rezonans riski taşıdığını göstermektedir. Orta periyot bölgesinde (1,0-2,0 s) ivme değerlerinin 0,25g civarına düşmesi, modelin bu aralıkta daha kontrollü bir davranış sergilediğine işaret etmektedir. Uzun periyotlarda (3,0-4,0 s) ise tüm deprem senaryolarında ivmelerin 0,10g altında kalması, modelin bu frekans aralığında etkin sönümleme sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 159. ST-2-30-C modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-30-C modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 157), modelin düşük spektral genlik aralığında sınırlı dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında çok zayıf aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0 ile 4,5 arasında geniş ancak çoğunlukla düşük bir dağılım sergilemiştir. Bu genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı minimal tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

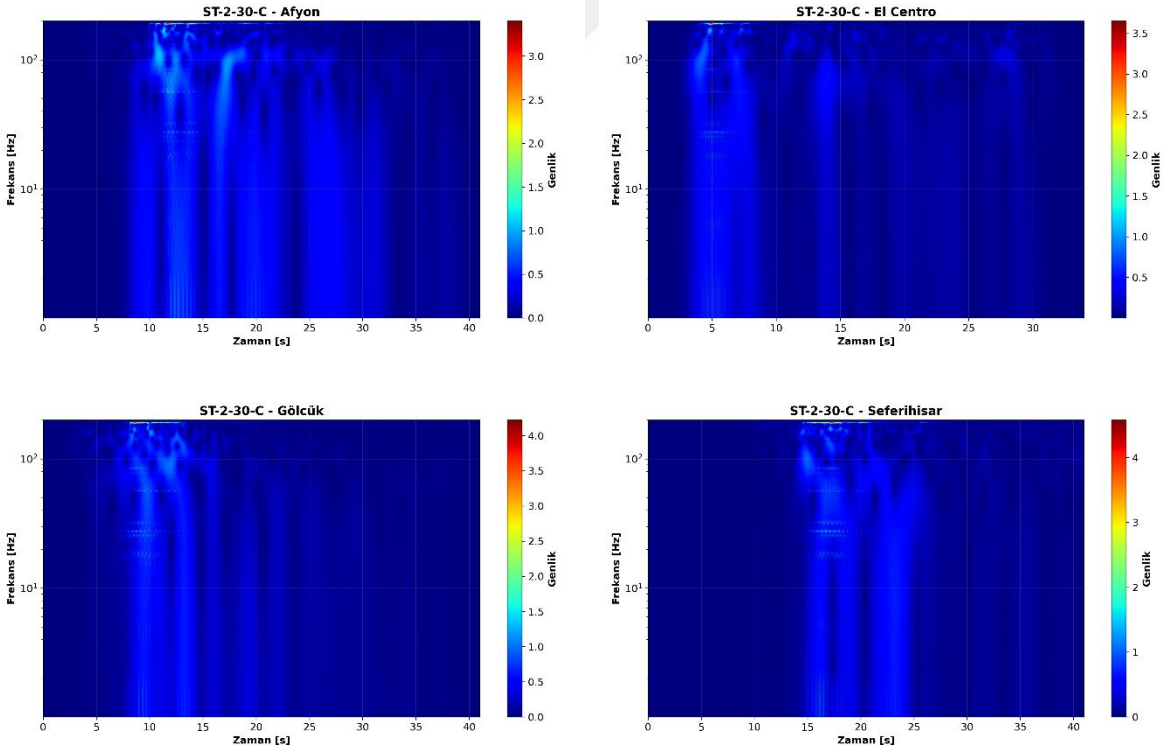
En yüksek tepki Seferihisar deprem kaydında gözlemlenmiş ve 4,5 genlik değerine ulaşılmıştır. Seferihisar kaydında 8-16 saniye zaman aralığında orta süreli spektral aktivite

sergilenirken, bu aktivite 80-200 Hz frekans bandında yoğunlaşmıştır. Bu kayıt, modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin maksimum enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

Düzce kaydı ikinci en yüksek tepkiyi vermiştir. Düzce'de 1,6 seviyesinde 4-8 saniye aralığında kısa süreli ancak kompakt spektral tepki tespit edilmiştir. Bu kayıt, modelin hızlı aktivasyon ve sönüm davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Sivrice, Loma ve Elbistan kayıtları orta seviye tepkiler sergilemektedir. Sivrice kaydında 2,5 seviyesinde 5-15 saniye aralığında çoklu aktivite dönemleri tespit edilmiştir. Loma'da 1,2 seviyesinde 4-7 saniye aralığında kompakt spektral tepki gözlemlenirken, Elbistan kaydında 0,8 seviyesinde 5-12 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni gözlemlenmiştir. Bu kayıtlar, modelin çeşitli zamansal paternlerde sınırlı dinamik kapasitesini ortaya koymaktadır.

Afyon, El Centro, Erzincan, Gölcük ve Kobe kayıtları minimal seviye tepkiler vermiştir. Bu kayıtlarda spektral aktivite çok düşük seviyelerde kalmış ve genlik değerleri 0,1-0,5 aralığında sınırlı kalmıştır. Afyon kaydında 8-15 saniye aralığında çok zayıf aktivite, El Centro'da 2-8 saniye aralığında minimal tepki tespit edilmiştir. Erzincan, Gölcük ve Kobe kayıtlarında ise neredeyse hiç spektral aktivite gözlemlenmemiştir.



Şekil 160. ST-2-30-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Afyon, El Centro, Gölcük, Seferihisar)

ST-2-40-A Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2-40-A tonoz modeli (Şekil 158) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 24,78 Hz, 52,35 Hz, 54,343 Hz, 88,04 Hz, 94,32 Hz ve 152,92 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 24,78 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

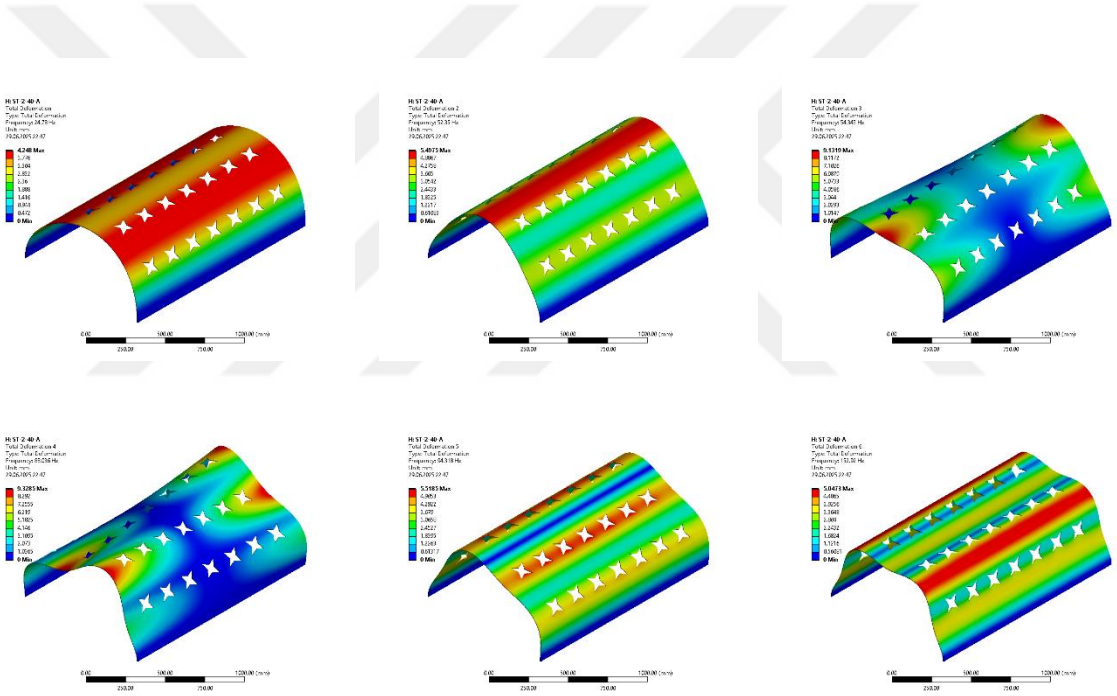
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 159), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli deformasyon paterni sergilerken (maksimum deformasyon: 4,25 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması ($\Delta f = 1,99$ Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. İkinci modda 5,50 mm maksimum deformasyon değeri elde edilirken, üçüncü modda en yüksek deformasyon olan 9,13 mm değerine ulaşılmıştır. Yüksek frekanslı modlarda ise dördüncü modda 9,33 mm, beşinci modda 5,52 mm ve altıncı modda 5,05 mm deformasyon değerleri gözlenmiş ve lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuştur.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Beşinci modun X doğrultusunda 0,014 ton efektif kütle ile ikinci en yüksek değere sahip olması, yüksek frekanslı bu modun da X doğrultusundaki dinamik davranışa katkı sağladığını işaret etmektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,012 ton efektif kütle ile en yüksek değere sahip olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın ikinci mod tarafından kontrol edildiğini gösterirken, altıncı modun 0,005 ton efektif kütle ile ikinci sırada yer alması bu doğrultuda yüksek frekanslı modların da etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,005 ton efektif kütle ile dominant olduğu tespit edilmiştir.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi sonuçları, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 161. ST-2-40-A deney modeli



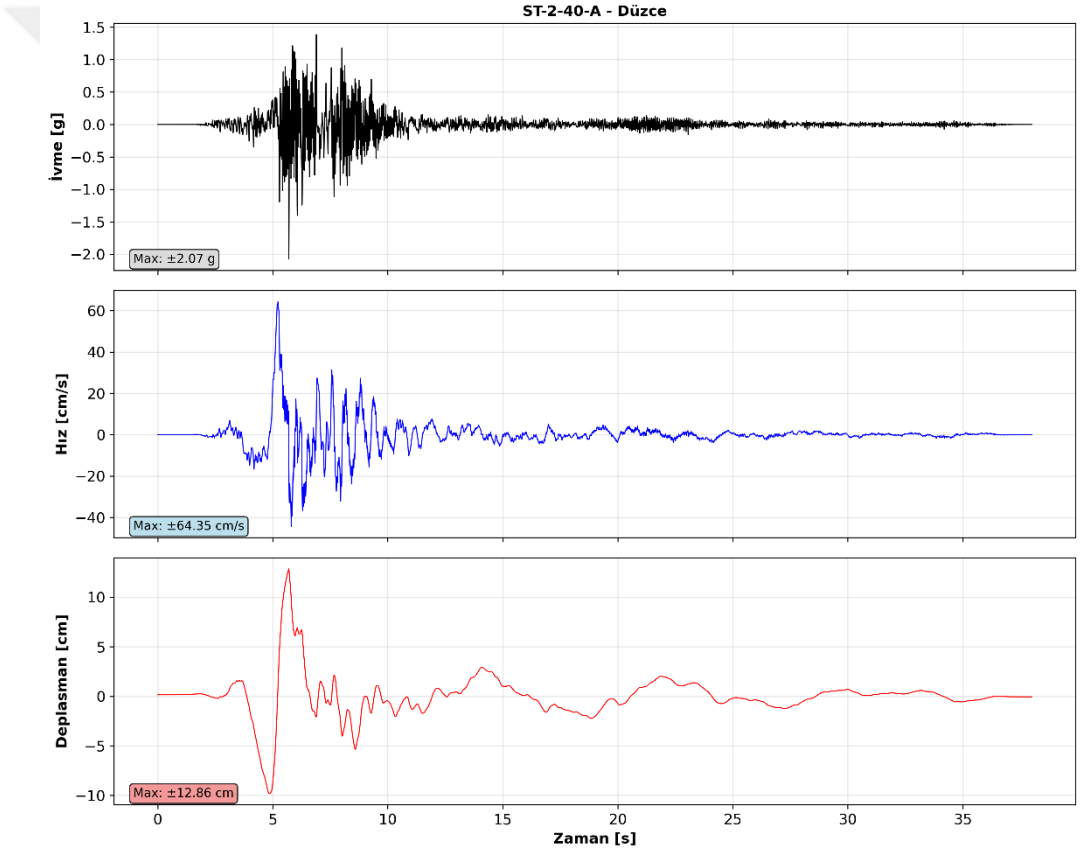
Şekil 162. ST-2-40-A modal deformasyon şekilleri

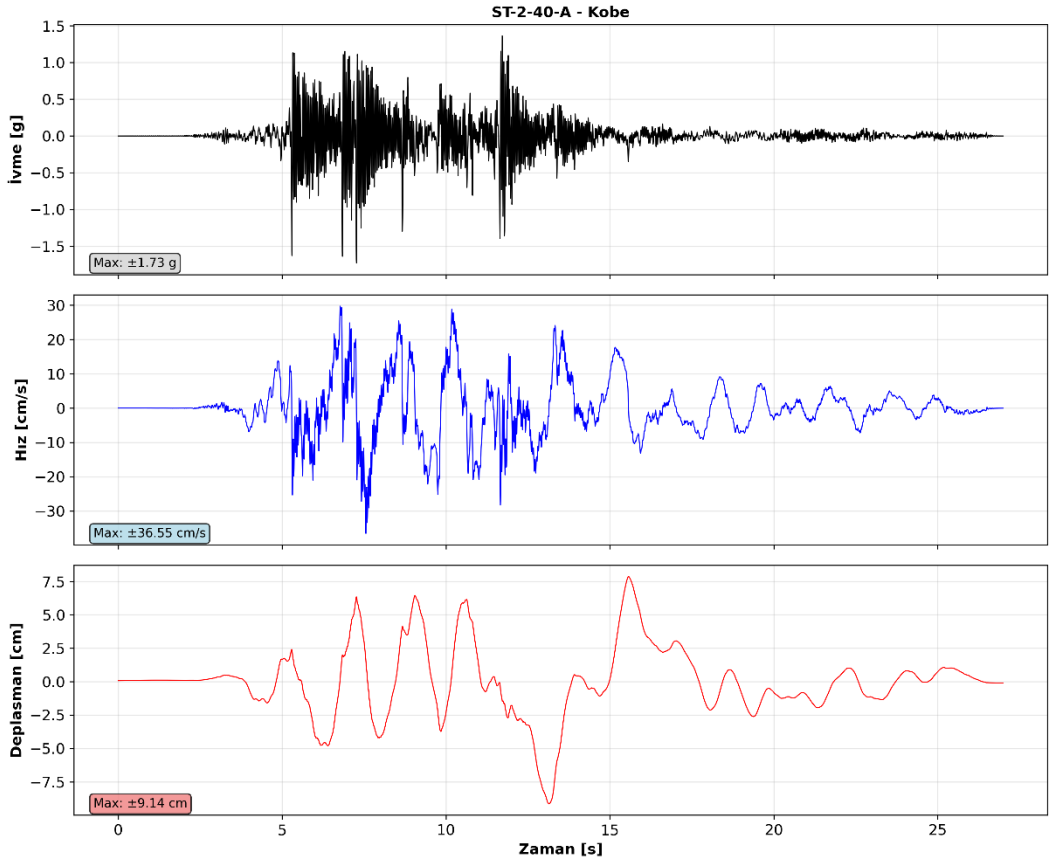
Dinamik tepki değerlendirmesi

ST-2-40-A modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 160 ve Şekil 161) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Seferihisar (2,40 g), Afyon (2,28 g) ve Gölcük (2,32 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,71 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir. Radar grafikteki dağılım, modelin ivme düzeyinde özellikle kuvvetli yer hareketlerine karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini, ancak belirli kayıtlar için sınırlı ivme tepkisi oluşturduğunu işaret etmektedir.

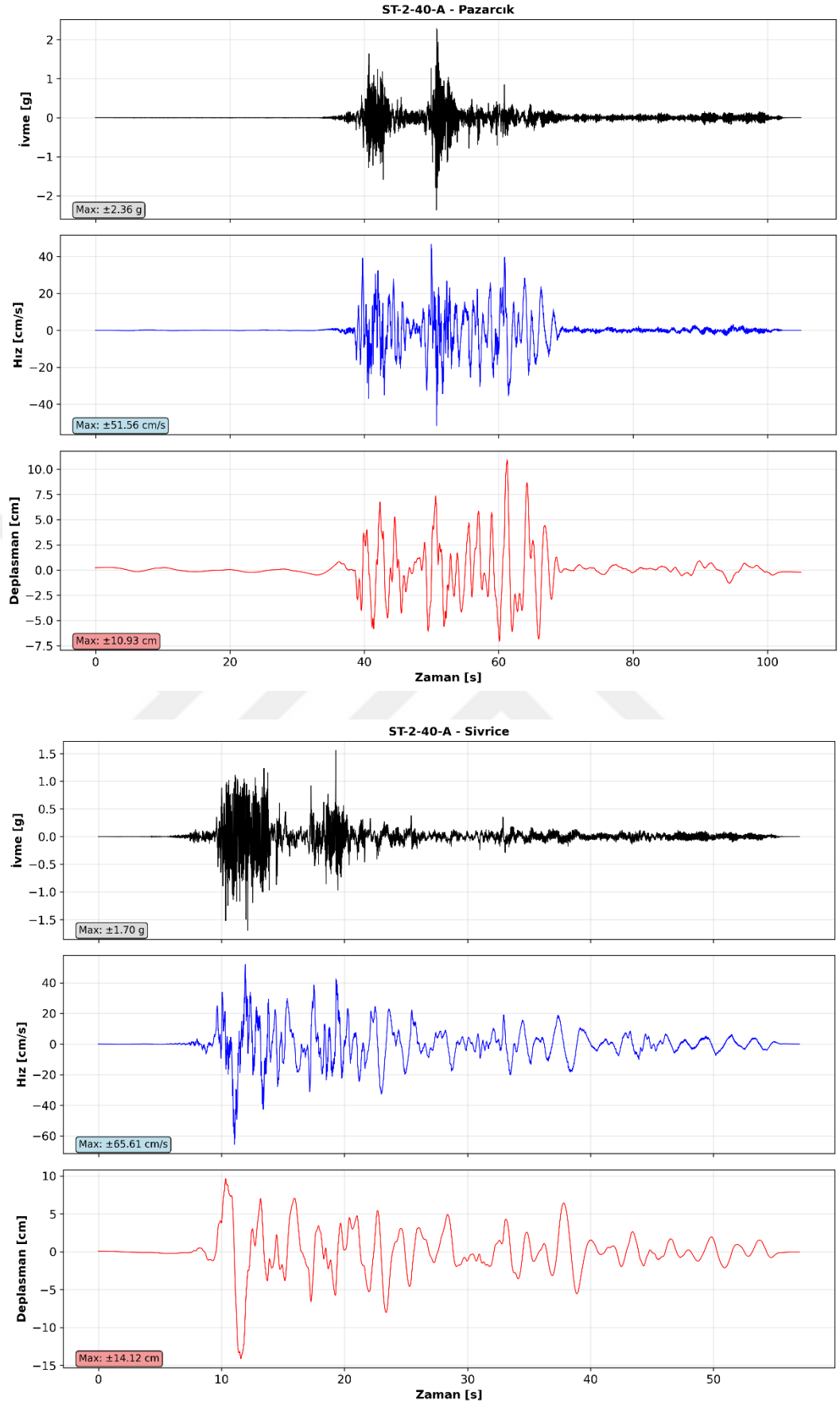
Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Sivrice depreminde yaklaşık 65,61 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Düzce (64,35 cm/s) ve Gölcük (59,04 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,11 cm), Sivrice (14,12 cm) ve Düzce (12,86 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,06 cm ile kaydedilmiş ve bu kayıt yapının göreli düşük frekanslı ve düşük enerjili etkilenmesini işaret etmektedir.

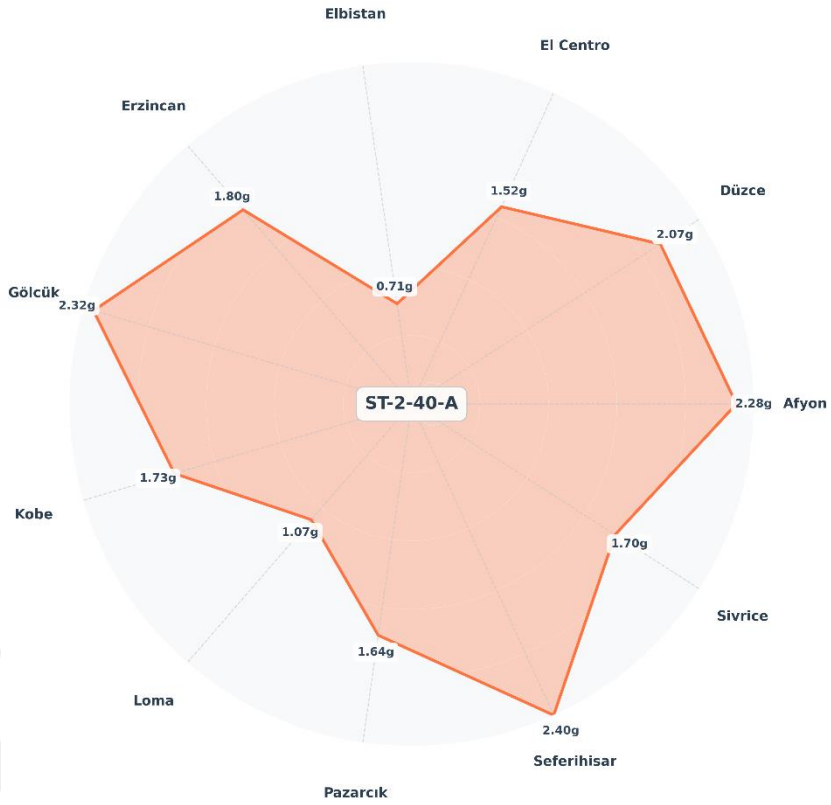




Şekil 163. ST-2-40-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Kobe, Pazarcık, Sivrice)



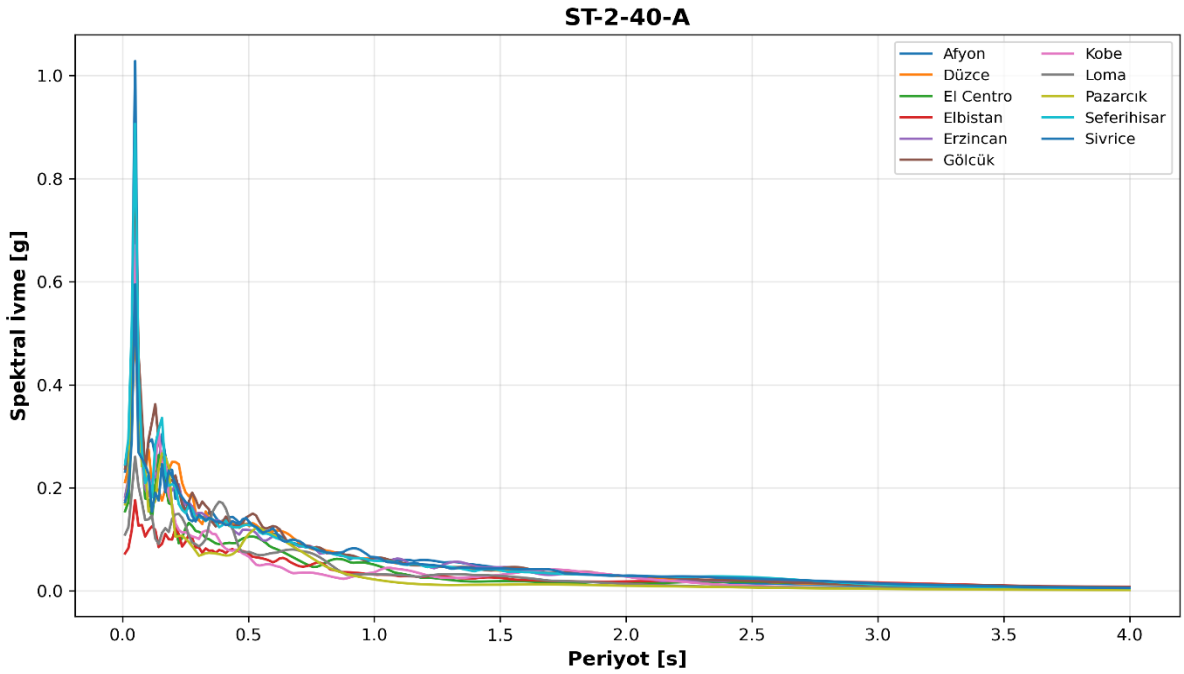
Şekil 160. ST-2-40-A modeli ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, Kobe, Pazarcık, Sivrice) (devamı)



Şekil 164. ST-2-40-A modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-40-A modeline ait spektral ivme sonuçları (Şekil 162), modelin uzun periyot bölgesinde (2,5-4,0 s) baskın bir davranış sergilediğini göstermektedir. Elbistan ve Seferihisar depremlerinde 0,20-0,25g seviyelerinde gözlemlenen pik değerler, modelin bu periyot aralığında önemli bir dinamik tepki verdiğine işaret etmektedir. Kısa periyotlarda (0-0,5 s) ivmelerin 0,10g altında kalması, modelin yüksek sönüm kapasitesine sahip olduğunu düşündürmektedir. Orta periyot bölgesinde (1,0-2,5 s) ise ivme değerlerinin 0,15-0,20g aralığında seyretmesi, modelin bu aralıkta dengeli bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, modelin özellikle uzun periyotlu deprem etkilerine karşı tasarlandığını ve yüksek katlı yapılar için uygun olduğunu göstermektedir. Modelin performansını optimize etmek için uzun periyotlu taban izolasyon sistemlerinin kullanımı önerilmektedir.



Şekil 165. ST-2-40-A modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-40-A modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 141), modelin düşük spektral genlik aralığında oldukça sınırlı dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında çok zayıf aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0 ile 2,25 arasında dar bir dağılım sergilemiştir. Bu genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı çok minimal tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

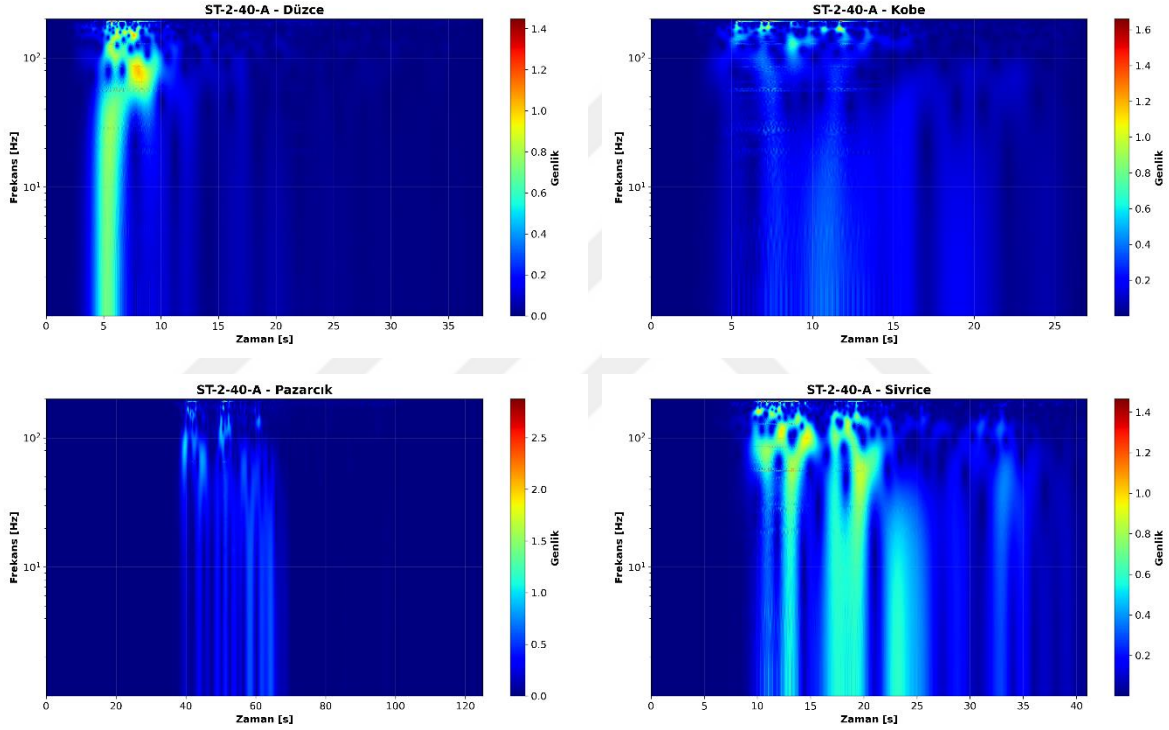
En yüksek tepki Seferihisar deprem kaydında gözlemlenmiş ve 2,25 genlik değerine ulaşılmıştır. Seferihisar kaydında 8-16 saniye zaman aralığında orta süreli spektral aktivite sergilenirken, bu aktivite 60-150 Hz frekans bandında yoğunlaşmıştır. Bu kayıt, modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin sınırlı enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

Afyon ve Erzincan kayıtları ikinci grup tepkileri vermiştir. Afyon kaydında 2,25 seviyesinde 8-12 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni gözlemlenirken, Erzincan'da 2,0 seviyesinde 10-14 saniye aralığında orta süreli spektral tepki tespit edilmiştir. Her iki kayıt da modelin sınırlı ancak tutarlı dinamik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Gölcük, Pazarcık ve Sivrice kayıtları orta seviye tepkiler sergilemektedir. Gölcük kaydında 2,0 seviyesinde 5-9 saniye aralığında kompakt aktivite tespit edilmiştir. Sivrice kaydı dikkat çekici şekilde 1,4 seviyesinde 5-12 ve 15-20 saniye aralıklarında çoklu aktivite dönemleri göstermiştir. Bu kayıtlar, modelin çeşitli zamansal paternlerde sınırlı dinamik kapasitesini ortaya koymaktadır.

Düzce, El Centro ve Kobe kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Düzce kaydında 1,4 seviyesinde 4-8 saniye aralığında kısa süreli aktivite gözlemlenirken, El Centro'da 1,4 seviyesinde 2-6 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiş, erken dönem tepkisi göstermiştir. Kobe kaydında 1,6 seviyesinde 3-8 saniye aralığında geniş bandlı ancak zayıf aktivite gözlemlenmiştir. Bu kayıtlar, modelin farklı zamansal segmentlerde çok sınırlı aktivasyon gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Loma ve Elbistan kayıtları düşük-orta seviye tepkiler vermiştir. Loma kaydında 1,0 seviyesinde 3-6 saniye aralığında kompakt spektral tepki gözlemlenirken, Elbistan'da 0,6 seviyesinde 5-12 saniye aralığında çift fazlı ancak çok zayıf aktivite sergilenmiştir. Bu kayıtlar modelin en düşük dinamik tepki verdiği sismik uyarıları oluşturmaktadır.



Şekil 166. ST-2-40-A modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, Kobe, Pazarcık, Sivrice)

ST-2-40-B Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

ST-2-40-B tonoz modeli (Şekil 164) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 24,57 Hz, 52,26 Hz, 54,18 Hz, 87,55 Hz, 95,51 Hz ve 142,68 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 24,57 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

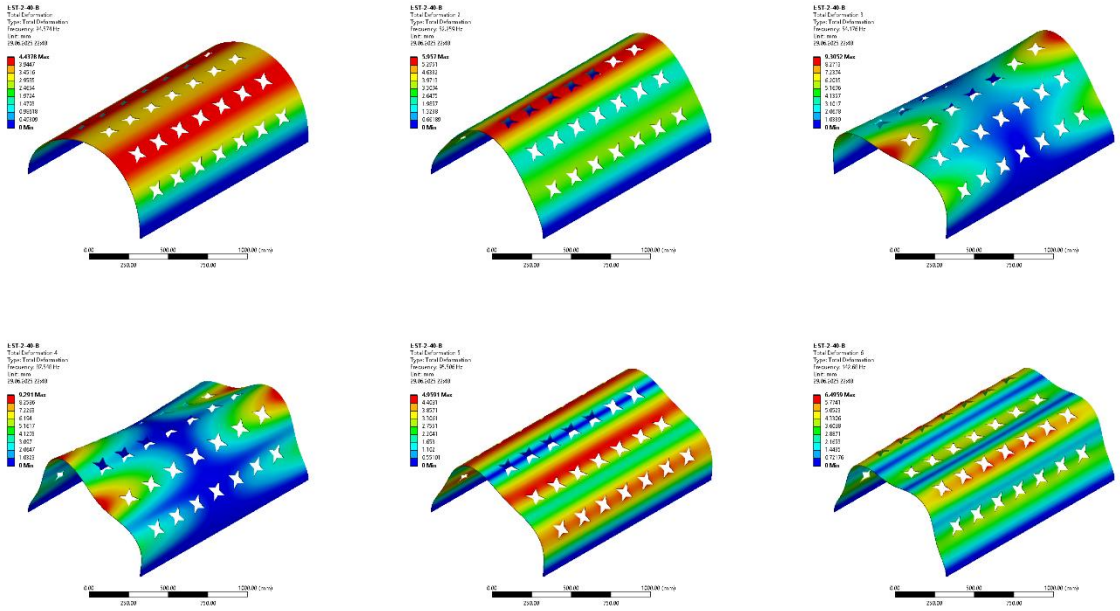
Elde edilen mod şekilleri (Şekil 141), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal deformasyon paterni sergilerken (maksimum deformasyon: 4,44 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 1,92 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. İkinci modda 5,96 mm maksimum deformasyon değeri elde edilirken, üçüncü modda en yüksek deformasyon olan 9,30 mm değerine ulaşılmıştır. Yüksek frekanslı modlarda ise dördüncü modda 9,29 mm, beşinci modda 4,96 mm ve altıncı modda 6,50 mm deformasyon değerleri gözlenmiş ve lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuştur.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Beşinci modun X doğrultusunda 0,015 ton efektif kütle ile ikinci en yüksek değere sahip olması, yüksek frekanslı bu modun da X doğrultusundaki dinamik davranışa katkı sağladığını işaret etmektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,012 ton efektif kütle ile en yüksek değere sahip olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın ikinci mod tarafından kontrol edildiğini gösterirken, altıncı modun 0,005 ton efektif kütle ile ikinci sırada yer alması bu doğrultuda yüksek frekanslı modların da etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,005 ton efektif kütle ile dominant olduğu tespit edilmiştir.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi sonuçları, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 167. ST-2-40-B deney modeli



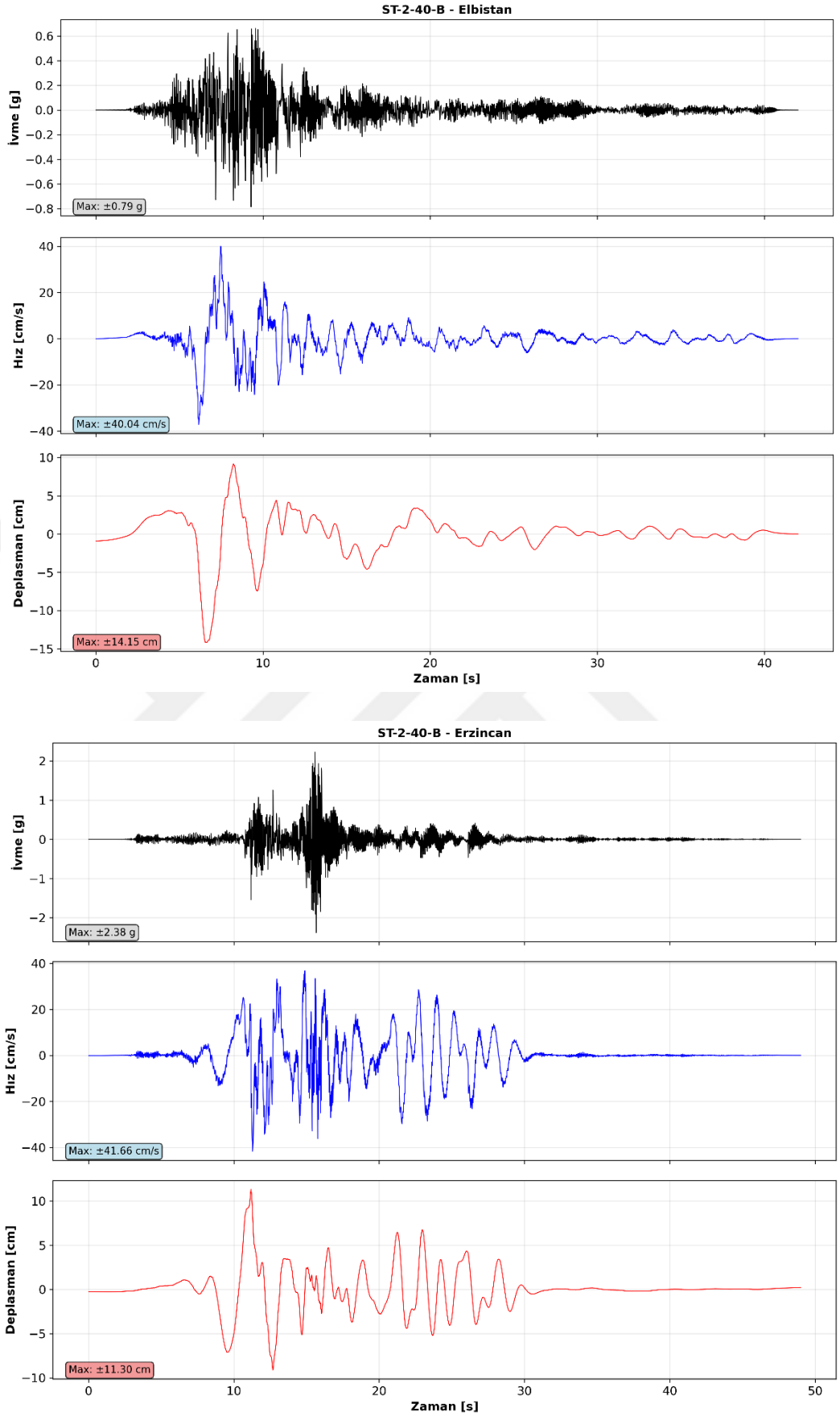
Şekil 168. ST-2-40-B modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

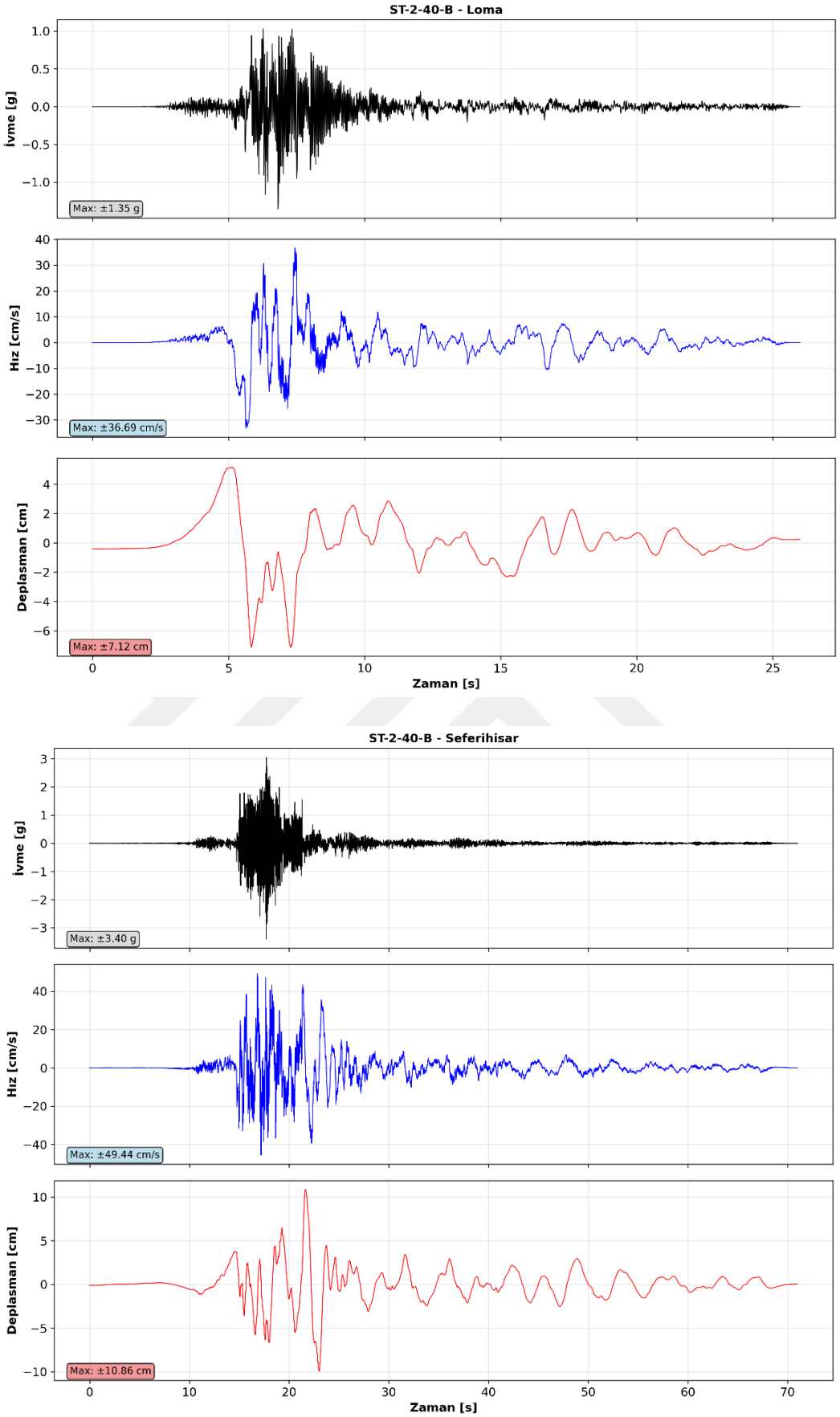
ST-2-40-B modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 166 ve Şekil 167) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Seferihisar (3,40 g), Gölcük (3,27 g) ve Kobe (3,09 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,79 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Afyon depreminde yaklaşık 68,33 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Düzce (64,30 cm/s) ve Sivrice (61,96 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

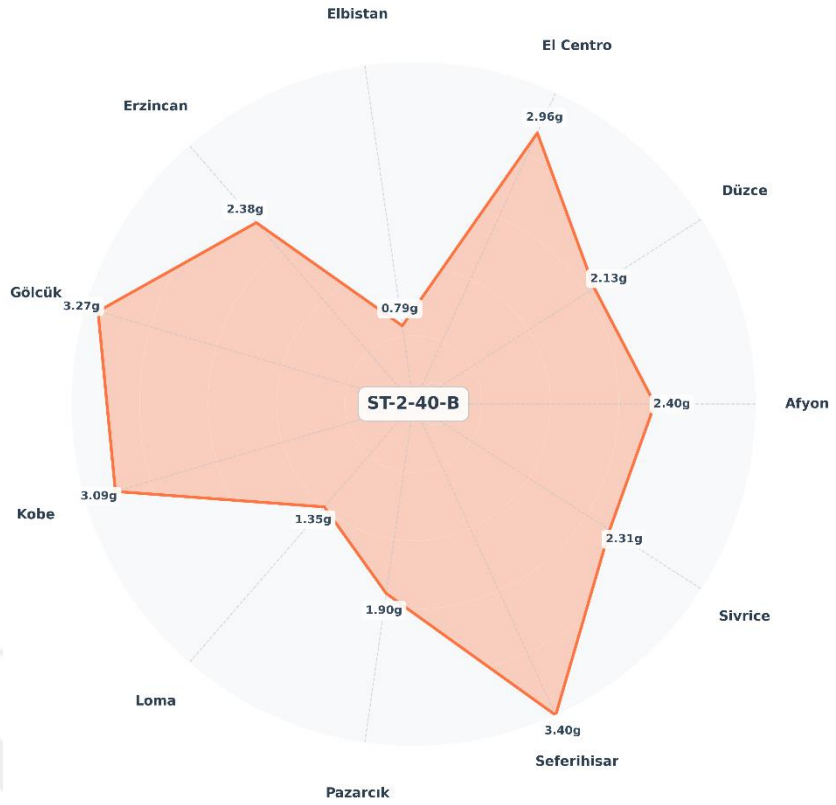
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,15 cm), Sivrice (12,69 cm) ve Düzce (12,33 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,12 cm ile kaydedilmiş ve bu kayıt yapının göreli düşük frekanslı ve düşük enerjili etkilenmesini işaret etmektedir.



Şekil 169. ST-2-40-B ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar)



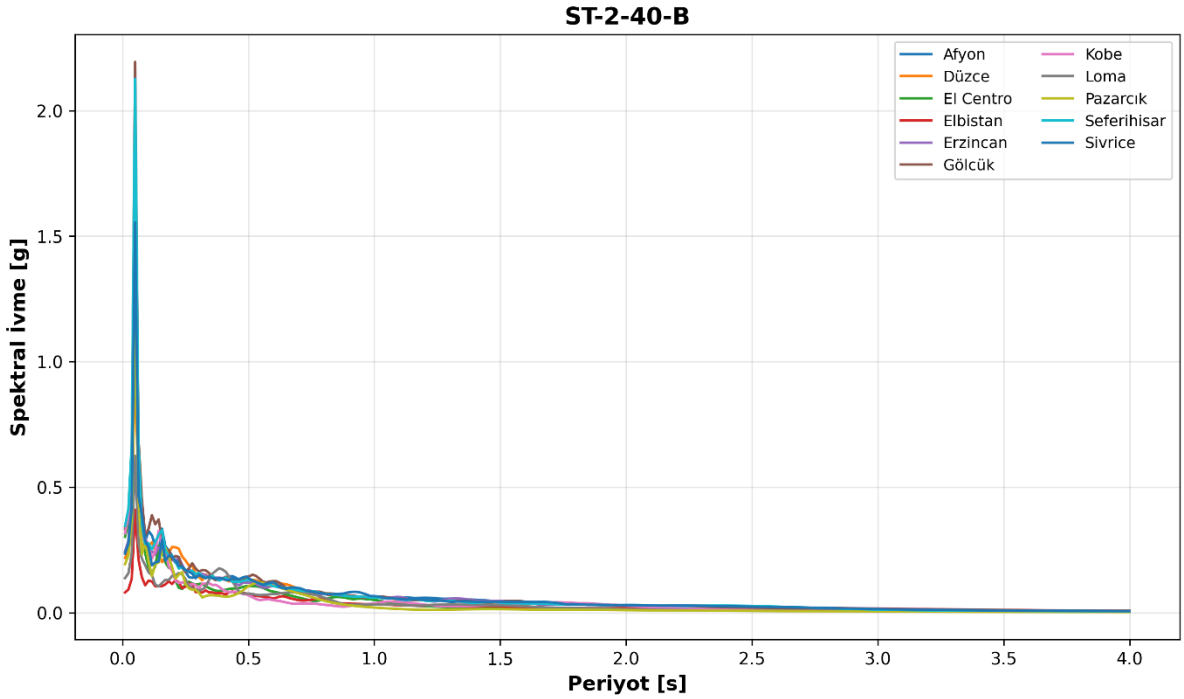
Şekil 166. ST-2-40-B ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar) (devamı)



Şekil 170. ST-2-40-B modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-40-B modelinin spektral ivme sonuçları (Şekil 168) incelendiğinde, modelin orta periyot bölgesinde (1,0-2,5 s) belirgin bir duyarlılık gösterdiği görülmektedir. Pazarcık ve Sivrice depremlerinde 0,38-0,40g seviyelerine ulaşan pik değerler, modelin bu periyot aralığında önemli bir dinamik yanıt verdiğini göstermektedir. Kısa periyotlarda (0-0,5 s) ivmelerin 0,30g'yi geçmemesi, modelin ST-2-40-C'ye kıyasla bu bölgede daha az duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Uzun periyotlarda (3,0-4,0 s) genel olarak düşük ivme değerleri gözlemlenmekle birlikte, Kobe depreminde 0,18g'ye varan hafif bir artış dikkat çekmektedir. Bu bulgular, modelin orta periyotlu deprem etkilerine karşı özel olarak değerlendirilmesi gerektiğini ve esnek yapı davranışı sergilediğini göstermektedir. Modelin performansını iyileştirmek için orta periyot bölgesine yönelik sismik izolasyon tedbirlerinin uygulanması faydalı olacaktır.



Şekil 171. ST-2-40-B modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-40-B modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları (Şekil 169), modelin çok düşük spektral genlik aralığında oldukça sınırlı dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında minimal aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0 ile 3,0 arasında çok dar bir dağılım sergilemiştir. Bu genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı çok minimal tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

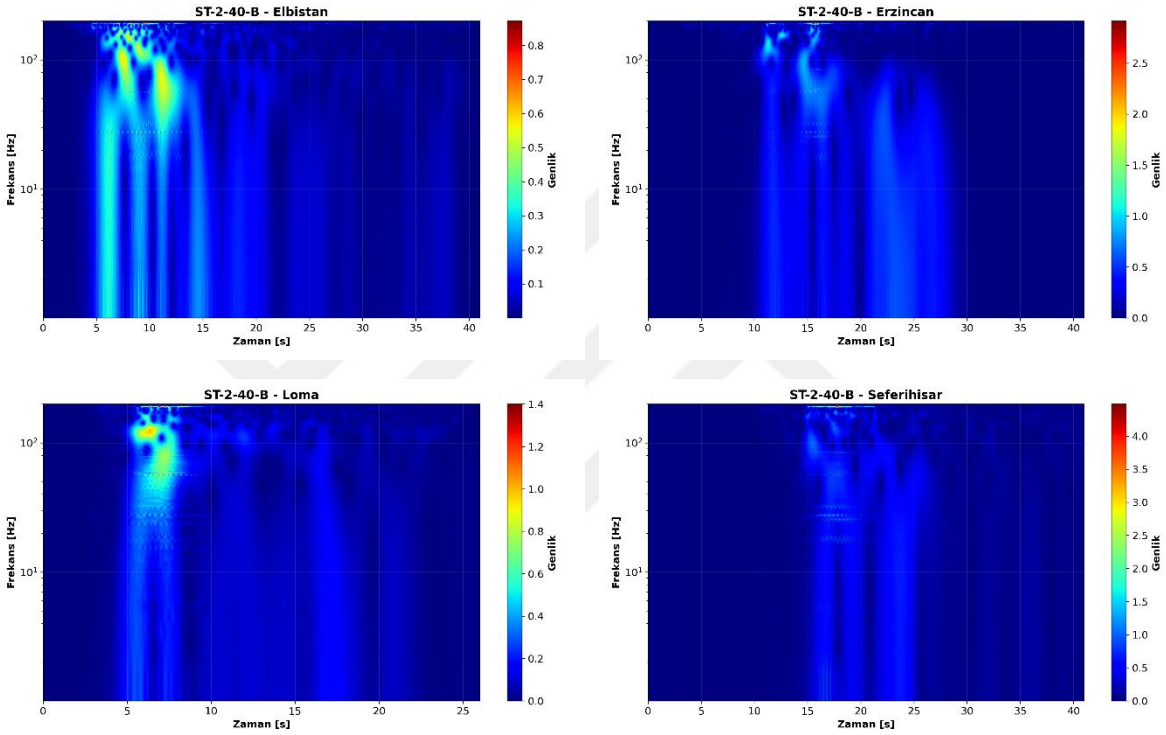
En yüksek tepki Afyon deprem kaydında gözlemlenmiş ve 3,0 genlik değerine ulaşılmıştır. Afyon kaydında 8-15 saniye zaman aralığında orta süreli spektral aktivite sergilenirken, bu aktivite 70-200 Hz frekans bandında yoğunlaşmıştır. Bu kayıt, modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin sınırlı enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

Erzincan ve Sivrice kayıtları ikinci grup tepkileri vermiştir. Erzincan kaydında 2,5 seviyesinde 8-14 saniye aralığında orta süreli aktivite paterni gözlemlenirken, Sivrice'de 2,5 seviyesinde 5-12 saniye aralığında kompakt spektral tepki tespit edilmiştir. Her iki kayıt da modelin tutarlı ancak sınırlı dinamik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Düzce, Pazarcık ve Gölcük kayıtları orta-düşük seviye tepkiler sergilemektedir. Düzce kaydında 1,8 seviyesinde 4-8 saniye aralığında kısa süreli aktivite tespit edilmiştir. Gölcük kaydında ise çok minimal aktivite seviyelerinde 5-10 saniye aralığında sınırlı spektral tepki gözlemlenmiştir. Bu kayıtlar, modelin çeşitli zamansal paternlerde düşük dinamik kapasitesini ortaya koymaktadır.

Loma ve Elbistan kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Loma kaydında 1,4 seviyesinde 3-7 saniye aralığında kompakt aktivite gözlemlenirken, Elbistan'da 0,8 seviyesinde 5-12 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiştir. Bu kayıtlar, modelin farklı zamansal segmentlerde çok sınırlı aktivasyon gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Seferihisar, El Centro ve Kobe kayıtları minimal seviye tepkiler vermiştir. Bu kayıtlarda spektral aktivite çok düşük seviyelerde kalmış ve genlik değerleri 0,1-0,5 arasında sınırlı kalmıştır. Seferihisar kaydında 10-18 saniye aralığında çok zayıf aktivite, El Centro'da neredeyse hiç spektral tepki gözlenmemiştir. Kobe kaydında ise minimal düzeyde spektral aktivite tespit edilmiştir.



Şekil 172. ST-2-40-B modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Elbistan, Erzincan, Loma, Seferihisar)

ST-2-40-C Modelinin Davranışsal ve Performans Değerlendirmesi

Modal analiz bulguları

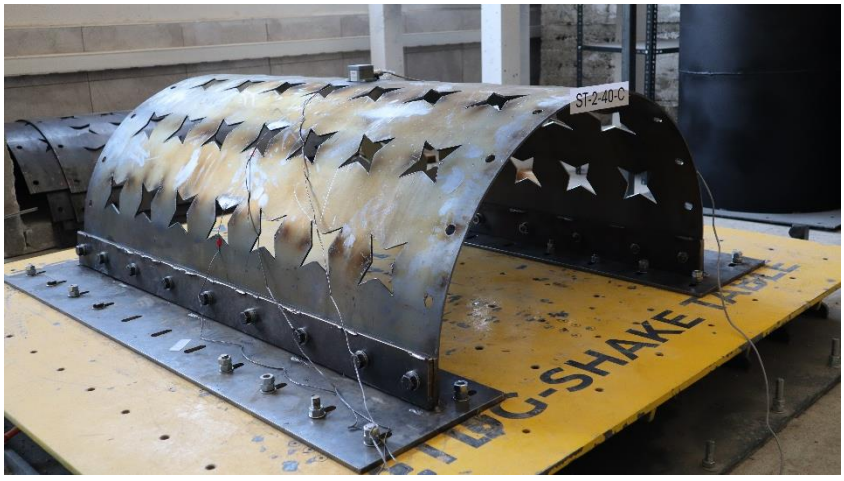
ST-2-40-C tonoz modeli (Şekil 170) üzerinde gerçekleştirilen modal analiz çalışmasında, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim analizi yürütülmüştür. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans değerleri sırasıyla 24,30 Hz, 51,92 Hz, 53,91 Hz, 87,05 Hz, 95,18 Hz ve 143,69 Hz olarak hesaplanmıştır. Temel mod olan 24,30 Hz değeri tonoz yapının en kritik dinamik özelliğini temsil etmekte olup, bu frekans civarındaki dış uyarımların rezonans riski oluşturabileceğini göstermektedir.

Elde edilen mod şekilleri (Şekil 171), tonoz yapının farklı dinamik uyarımlara karşı sergileyeceği deformasyon desenlerini ortaya koymaktadır. Birinci mod düzenli sinüzoidal

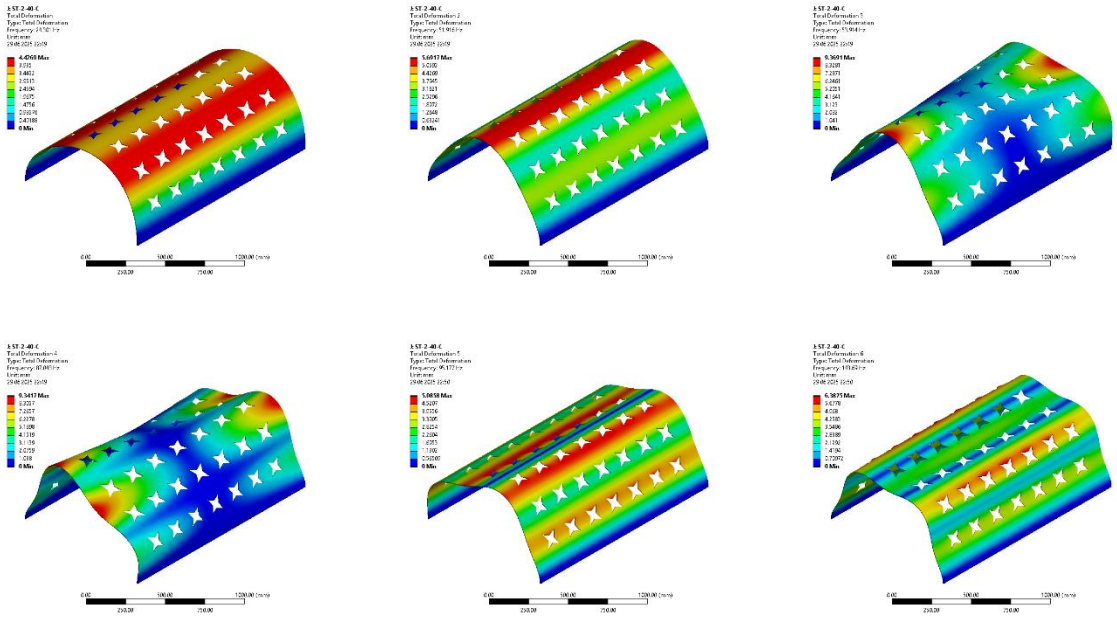
deformasyon paterni sergilerken (maksimum deformasyon: 4,43 mm), ikinci ve üçüncü modlarda daha karmaşık deformasyon şekilleri gözlenmiştir. Özellikle ikinci ve üçüncü modların birbirine yakın frekans değerlerine sahip olması (Δf = 1,99 Hz), yapıda yakın modların varlığını işaret etmekte ve bu frekans bandında mod etkileşimlerinin oluşabileceğini göstermektedir. İkinci modda 5,69 mm maksimum deformasyon değeri elde edilirken, üçüncü modda 9,37 mm, dördüncü modda en yüksek deformasyon olan 9,34 mm değerine ulaşılmıştır. Yüksek frekanslı modlarda ise beşinci modda 5,08 mm ve altıncı modda 6,39 mm deformasyon değerleri gözlenmiş ve lokalize deformasyon bölgeleri oluşmuştur.

Efektif kütle analizi sonuçları, yapının farklı doğrultulardaki dinamik davranışının farklı modlar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. X doğrultusunda birinci modun 0,07 ton efektif kütle ile dominant olması, bu doğrultudaki dinamik tepkinin büyük ölçüde temel mod tarafından yönetildiğini göstermektedir. Beşinci modun X doğrultusunda 0,015 ton efektif kütle ile ikinci en yüksek değere sahip olması, yüksek frekanslı bu modun da X doğrultusundaki dinamik davranışa katkı sağladığını işaret etmektedir. Y doğrultusunda ikinci modun 0,011 ton efektif kütle ile en yüksek değere sahip olması, bu doğrultudaki dinamik davranışın ikinci mod tarafından kontrol edildiğini gösterirken, altıncı modun 0,005 ton efektif kütle ile ikinci sırada yer alması bu doğrultuda yüksek frekanslı modların da etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Z doğrultusunda ise üçüncü modun 0,004 ton efektif kütle ile dominant olduğu tespit edilmiştir.

Kümülatif efektif kütle fraksiyonu analizi sonuçları, modal analizde dikkate alınan mod sayısının yapının dinamik davranışını karakterize etmek için yeterli olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 173. ST-2-40-C deney modeli



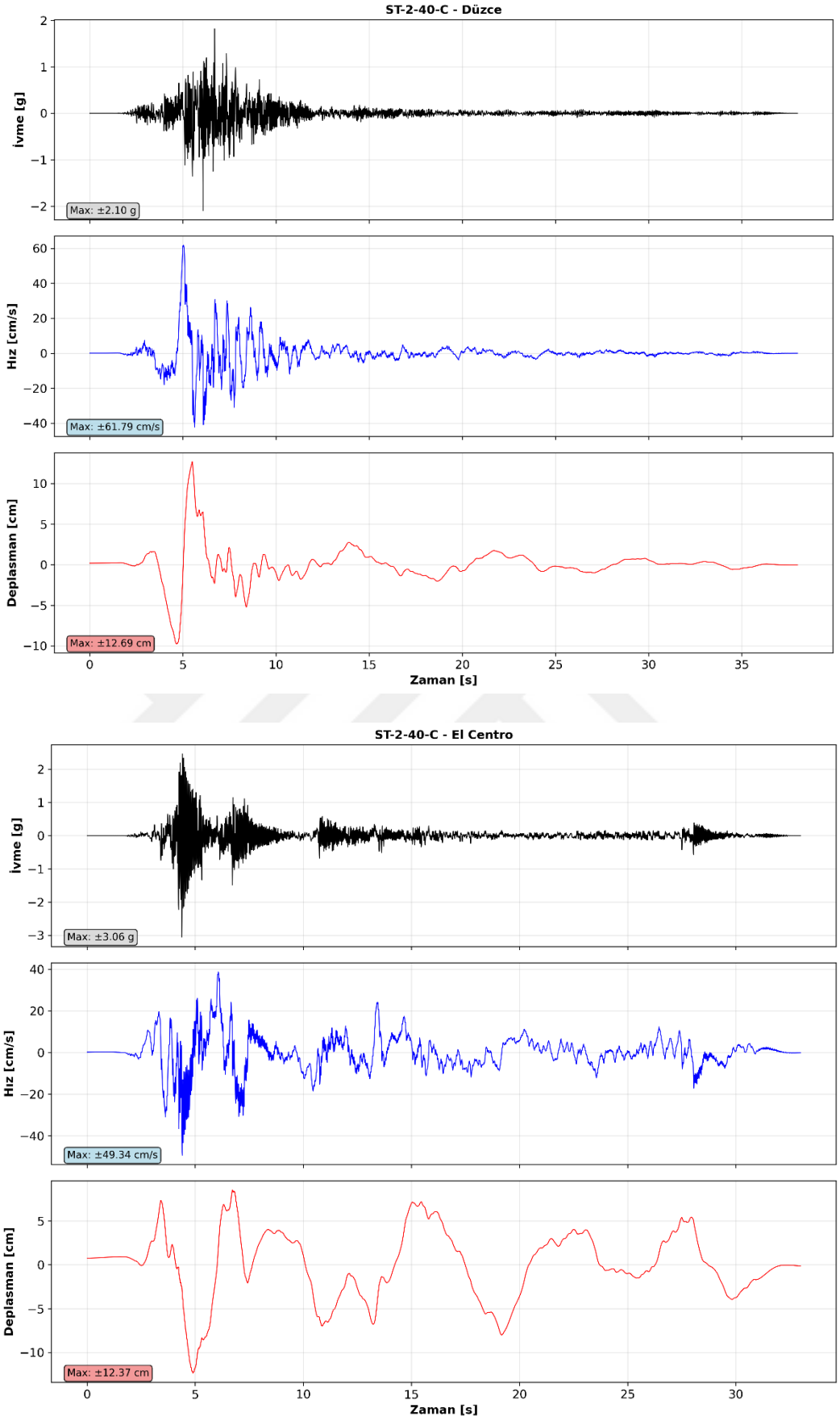
Şekil 174. ST-2-40-C modeli modal deformasyon şekilleri

Dinamik tepki değerlendirmesi

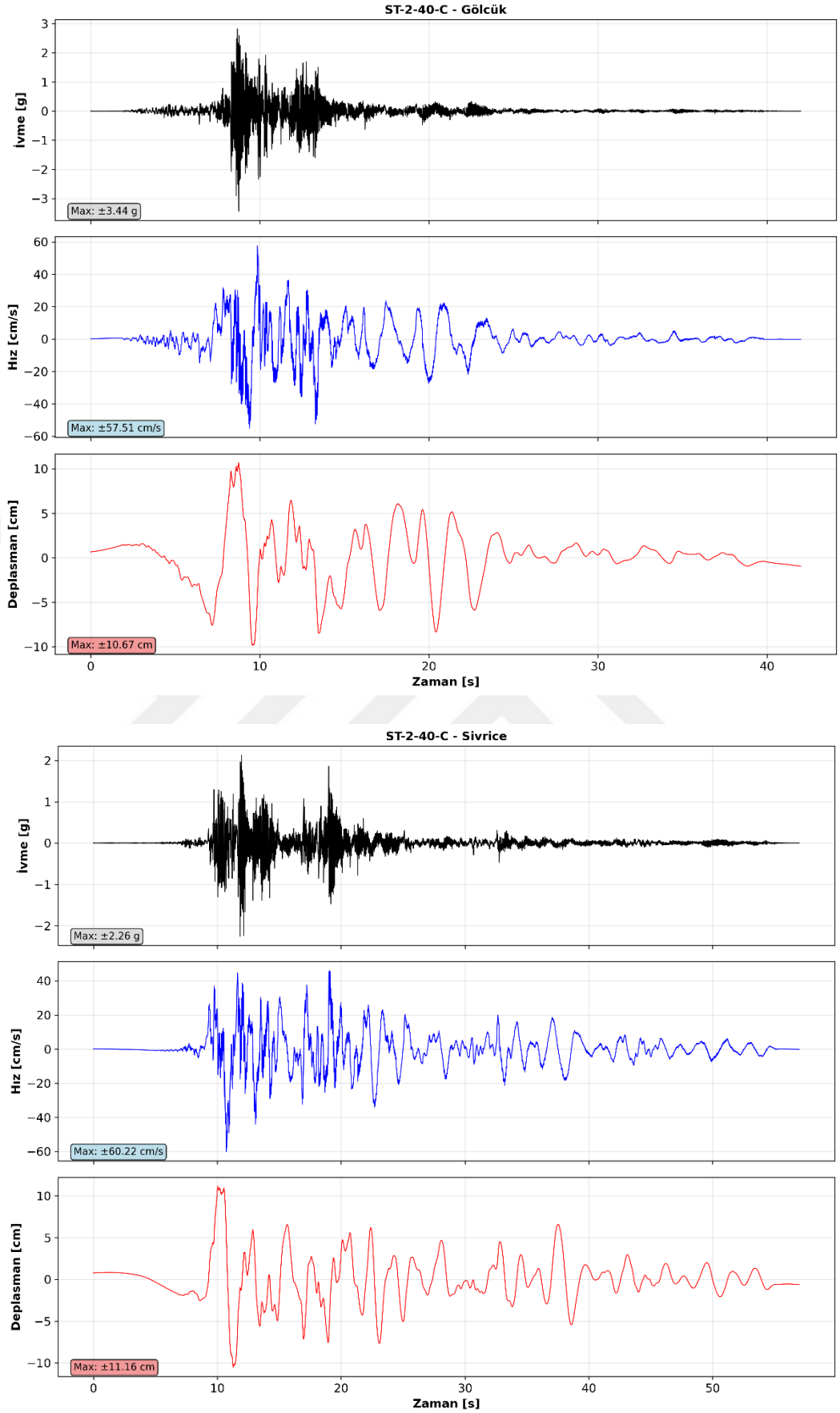
ST-2-40-C modeli üzerinde gerçekleştirilen 11 farklı deprem kaydına ait dinamik analizler, yapının sismik uyarılara karşı verdiği tepkileri (Şekil 172 ve Şekil 173) ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. İvme tepkileri incelendiğinde, modelin en yüksek ivme değerine Gölcük (3,44 g), El Centro (3,06 g) ve Kobe (2,96 g) depremleri sırasında ulaştığı görülmektedir. Buna karşın Elbistan depremi, 0,75 g ile en düşük ivme tepkisini üretmiştir. Radar grafikteki dağılım, modelin ivme düzeyinde özellikle kuvvetli yer hareketlerine karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini, ancak belirli kayıtlar için sınırlı ivme tepkisi oluşturduğunu işaret etmektedir.

Hız bileşeni açısından değerlendirildiğinde, en yüksek hız tepkisinin Afyon depreminde yaklaşık 64,58 cm/s düzeyine ulaştığı, bunu Düzce (61,79 cm/s) ve Sivrice (60,22 cm/s) depremlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu depremlerin kısa sürede yüksek enerji transferine neden olduğunu düşündürmektedir. Hız verilerindeki genlik dağılımı, yapının hem kısa süreli hem de uzun süreli titreşim bileşenlerine duyarlılığını yansıtmaktadır.

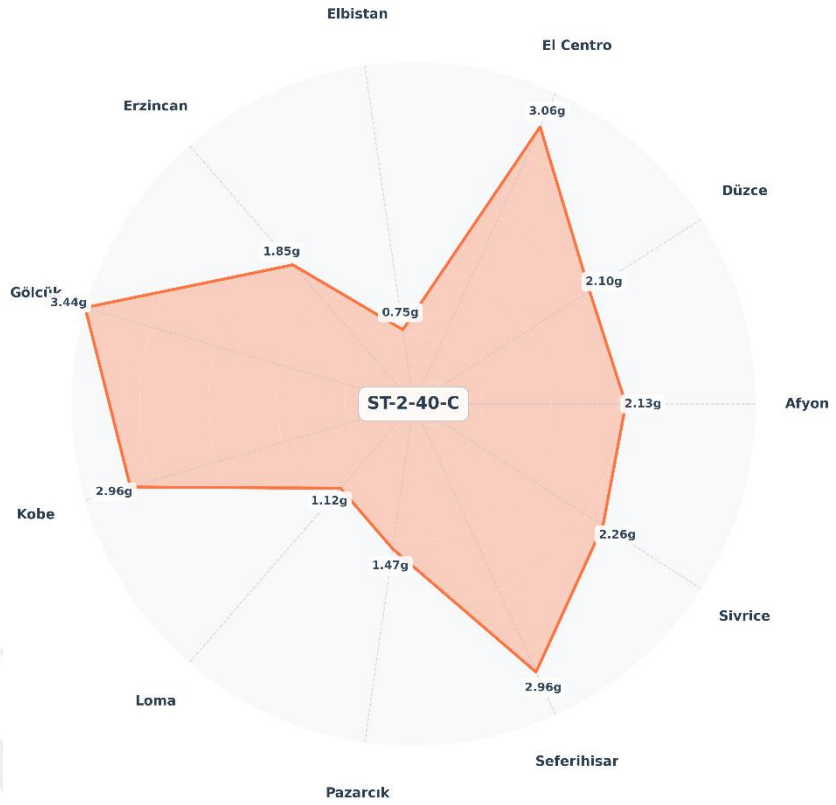
Deplasman tepkileri incelendiğinde, Elbistan (14,31 cm), Düzce (12,69 cm) ve El Centro (12,37 cm) depremleri en yüksek yer değiştirme değerlerini üretmiştir. Bu durum, yapının bu depremlerde düşük frekanslı ve uzun süreli enerji bileşenlerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. En düşük deplasman ise Loma depreminde 7,14 cm ile kaydedilmiştir.



Şekil 175. ST-2-40-C ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, El Centro, Gölcük, Sivrice)



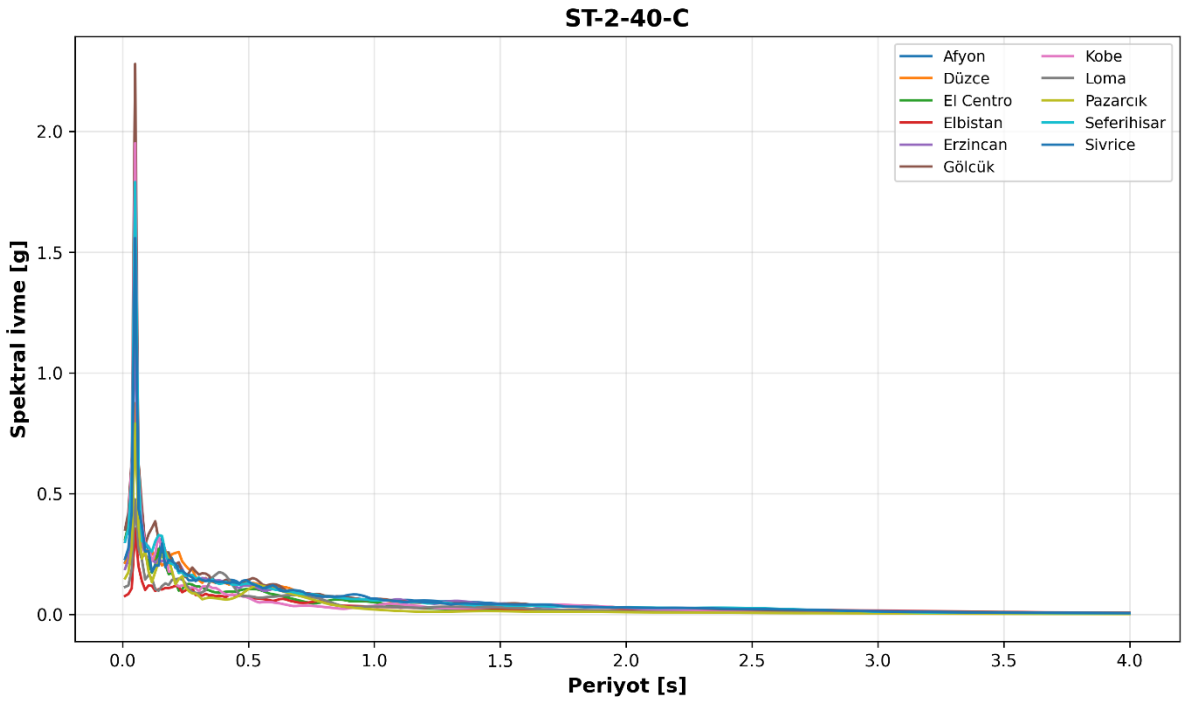
Şekil 172. ST-2-40-C ivme-zaman, hız-zaman ve deplasman-zaman grafikleri (Düzce, El Centro, Gölcük, Sivrice)



Şekil 176. ST-2-40-C modeli maksimum ivme tepkileri

Spektral ivme değerlendirmesi

ST-2-40-C modelinin spektral ivme analizleri (Şekil 175), 0-4,0 saniye periyot aralığında yapılan ölçümlerde modelin belirgin şekilde kısa periyotlara duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle 0-0,5 saniye aralığında Düzce, Gölcük ve Erzincan depremlerinde 0,45-0,50g seviyelerine ulaşan yüksek pik değerler gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin rijit yapı karakteristiği sergilediğini ve kısa periyotlu deprem dalgalarına karşı önemli bir rezonans riski taşıdığını göstermektedir. Orta periyot bölgesinde (1,0-2,0 s) ivme değerlerinin 0,25g seviyelerine düşmesi, modelin bu aralıkta daha kontrollü bir davranış sergilediğine işaret etmektedir. Uzun periyotlarda (3,0-4,0 s) ise tüm deprem senaryolarında ivmelerin 0,10g altında kalması, modelin bu frekans aralığında etkin bir sönümleme sağladığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu modelin kısa periyotlu deprem etkilerine karşı özel önlemlerle desteklenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 177. ST-2-40-C modeli spektral ivme eğrileri

Zaman-frekans (wavelet) spektrum analizi

ST-2-40-C modelinin on bir farklı deprem kaydı altındaki wavelet analizi sonuçları 176, modelin düşük spektral genlik aralığında oldukça sınırlı dinamik davranış karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Model genellikle 10-200 Hz frekans aralığında minimal aktivite göstermiş olup, spektral genlik değerleri 0 ile 3,5 arasında dar bir dağılım sergilemiştir. Bu genlik aralığı, modelin farklı sismik uyarı türlerine karşı çok sınırlı tepkiler verme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

En yüksek tepki Seferihisar deprem kaydında gözlemlenmiş ve 3,5 genlik değerine ulaşılmıştır. Seferihisar kaydında 8-16 saniye zaman aralığında orta süreli spektral aktivite sergilenirken, bu aktivite 70-150 Hz frekans bandında yoğunlaşmıştır. Bu kayıt, modelin en yüksek hassasiyet gösterdiği sismik uyarıyı oluşturmakta ve modelin sınırlı enerji transferi kapasitesini ortaya koymaktadır.

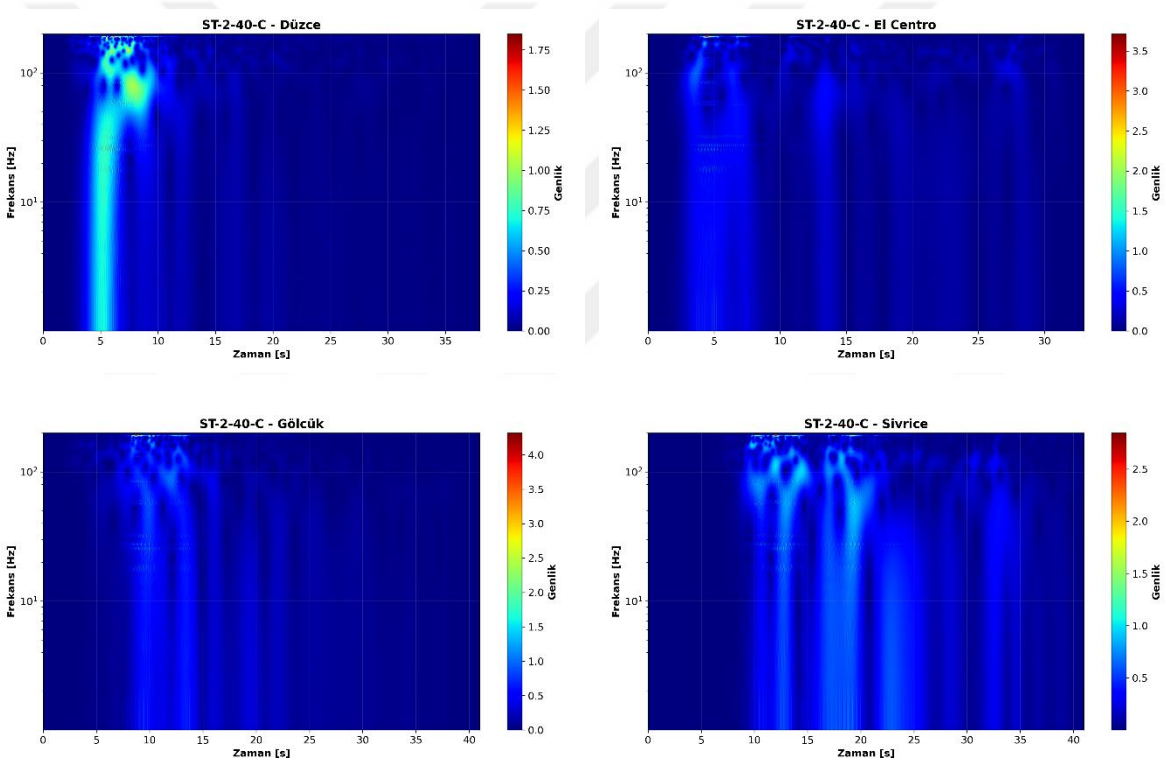
Afyon ve Sivrice kayıtları ikinci grup tepkileri vermiştir. Afyon kaydında 2,5 seviyesinde 8-14 saniye aralığında orta süreli aktivite paterni gözlemlenirken, Sivrice'de 2,5 seviyesinde 5-12 saniye aralığında kompakt spektral tepki tespit edilmiştir. Her iki kayıt da modelin tutarlı ancak sınırlı dinamik davranışı sergilediği deprem grubu olarak değerlendirilebilir.

Erzincan ve Düzce kayıtları orta-düşük seviye tepkiler sergilemektedir. Erzincan kaydında 2,5 seviyesinde 8-14 saniye aralığında orta süreli aktivite, Düzce'de 1,75 seviyesinde

4-8 saniye aralığında kısa süreli spektral tepki tespit edilmiştir. Bu kayıtlar, modelin çeşitli zamansal paternlerde sınırlı dinamik kapasitesini ortaya koymaktadır.

Loma ve Elbistan kayıtları özel dinamik karakteristikler sergilemektedir. Loma kaydında 1,0 seviyesinde 3-7 saniye aralığında kompakt aktivite gözlemlenirken, Elbistan'da 0,6 seviyesinde 5-12 saniye aralığında çift fazlı aktivite paterni tespit edilmiştir. Bu kayıtlar, modelin farklı zamansal segmentlerde çok sınırlı aktivasyon gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

El Centro, Gölcük ve Kobe kayıtları minimal seviye tepkiler vermiştir. Bu kayıtlarda spektral aktivite çok düşük seviyelerde kalmış ve genlik değerleri 0,1-0,5 arasında sınırlı kalmıştır. El Centro kaydında neredeyse hiç spektral aktivite gözlenmezken, Gölcük ve Kobe kayıtlarında da minimal düzeyde tepkiler tespit edilmiştir.



Şekil 178. ST-2-40-C modeli wavelet tabanlı frekans-zaman çözümlemesi (Düzce, El Centro, Gölcük, Sivrice)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Plaka Yapılar

Çalışma kapsamında, yıldız şekilli öksetik boşluklara sahip farklı aks sayısı (4, 5, 6) ve yıldız açıklığı (20°, 30°, 40°) ile tasarlanmış PL serisi plakaların mekanik performansları deneysel testler ve sonlu eleman analizleri aracılığıyla detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, hem yıldız açıları hem de aks sayısının yapısal davranış üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Genel olarak, aks sayısındaki artışla birlikte taşıma kapasitesinde ve süneklik değerlerinde anlamlı azalmalar meydana gelmiştir. Özellikle altı akslı modellerin tümünde daha düşük yük taşıma kapasiteleri ve sınırlı uzama değerleri gözlenmiş, bu modellerin daha kırılgan bir yapısal davranış sergilediği belirlenmiştir.

Öte yandan, yıldız açısının artışı da yapının deformasyon karakteristiğini etkilemiş; 20° açıklıklı modellerin daha esnek ve yaygın plastik deformasyon yayılımına sahip olduğu, 30° açıklıkta taşıma kapasitesinin nispeten yüksek olduğu ancak sünekliğin 20°'ye göre azaldığı, 40° açıklıkta ise rijitliğin arttığı fakat plastik deformasyonun lokalize olup sünekliğin belirgin biçimde düştüğü tespit edilmiştir. Tüm seriler içinde PL-20-A modeli, yüksek süneklik ve dengeli taşıma kapasitesi ile sünek davranış gerektiren uygulamalar açısından öne çıkmıştır. PL-30-A modeli ise yüksek taşıma kapasitesi ve makul seviyedeki deformasyon yayılımı ile rijitlik-süneklik dengesi aranan uygulamalarda tercih edilebilecek bir konfigürasyon olmuştur. Buna karşılık, PL-40-C modeli en düşük yük kapasitesi ve en sınırlı uzama ile en kırılgan yapı olarak öne çıkmıştır.

Sayısal analiz sonuçları ile deneysel veriler arasında elastik bölgede yüksek derecede uyum sağlanmış; von Mises gerilme ve eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları, deneyde gözlenen çatlak alanlarıyla büyük ölçüde örtüşmüştür. Ancak plastikleşme sonrası kırılma eğilimlerinin FEA analizlerinde daha yayılı biçimde temsil edildiği görülmüştür.

Tüm bu bulgular doğrultusunda, yapısal uygulamalarda düşük aks sayısına (özellikle 4 aks) sahip modellerin tercih edilmesi önerilmektedir. Süneklik öncelikli uygulamalarda 20° yıldız açıklığı, taşıma kapasitesi ile süneklik arasında denge arayan durumlarda ise 30° yıldız açıklığı uygun bir tasarım seçeneği olarak değerlendirilebilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu tür geometrilerin hasar modellemesi ile daha hassas temsil edilebilmesi için gelişmiş kırılma kriterleri ve parametrik optimizasyon analizlerinin kullanılması önerilmektedir.

Elde edilen veriler, yıldız şekilli öksetik boşluklu plakaların geometrik parametrelerinin mekanik performans üzerinde kritik etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, mevcut çalışmada çatlak oluşumu ve ilerlemesi, sonlu eleman analizlerinde doğrudan modellenememiş; plastik deformasyon sonrası hasar davranışı yalnızca dolaylı biçimde yansıtılabilmiştir. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalarda, kırılma mekaniği modelleri, kohezyonlu zon yaklaşımları veya gelişmiş hasar kriterleri gibi yöntemlerin FEA sistemlerine entegre edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, sadece yıldız açıklığı ve aks sayısı değil; yıldız boşluklarının yönelimi, kenar mesafesi oranı ve malzeme türü gibi diğer parametrik değişkenlerin de mekanik davranış üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla kapsamlı bir çok değişkenli optimizasyon analizi gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır. Son olarak, elde edilen tasarım ilkelerinin yalnızca çekme yüklemeleriyle sınırlı kalmayıp, eğilme, burulma ve darbe gibi farklı yükleme türleri altında da test edilmesi, plaka tasarımlarının çok yönlü mühendislik uygulamaları için uygun hale getirilmesine katkı sağlayacaktır.

Tonoz Yapılar

Çalışma kapsamında, farklı geometrik parametrelere sahip yıldız biçimli öksetik boşluklu tonoz kabuk modellerin dinamik davranışları, sarsma tablası deneyleri aracılığıyla çok yönlü olarak incelenmiştir. H/B oranı (0,3 ve 0,5), yıldız boşluklarının açıları (20°, 30°, 40°) ve enine yöndeki yıldız sayısı (4, 5, 6) olmak üzere üç temel parametre grubu altında toplam 20 farklı model değerlendirilmiş; her model, 11 farklı gerçek deprem kaydı altında test edilmiştir.

Yapı yüksekliğinin artması ile tanımlanan H/B oranı, modellerin dinamik karakteristiğini belirgin biçimde etkilemiştir. ST-1 grubu (H/B=0,3), ST-2 grubuna kıyasla daha yüksek doğal frekanslara ve daha kısa periyotlara sahiptir; bu durum ST-1'in daha rijit/kısa periyotlu tepkiye sahip olduğunu, ST-2'nin ise daha düşük frekanslı/uzun periyotlu bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle ST-2 modelleri, uzun periyot içeriği baskın yer hareketleri altında daha yüksek deplasman taleplerine maruz kalabilmektedir.

Yıldız boşluğu açıklığının artması davranışı belirgin biçimde değiştirmektedir: 20° açıklıklı modellerde deformasyon daha yaygın ve süneklik daha yüksektir; 30° açıklıkta taşıma kapasitesi ile deformasyon yayılımı arasında görece dengeli bir durum elde edilir; 40° açıklıkta ise rijitlik artar fakat plastik deformasyon daha lokalize olur ve süneklik azalır. Wavelet analizlerinde 40° için bazı kayıtlarda genliklerin istikrarlı bir banda yayıldığı görülse de, bu durum süneklik avantajı anlamına gelmemektedir.

Enine yöndeki yıldız sayısının artması (A→C) toplam boşluk oranını büyütür ve efektif rijitliği düşürür; modal şekiller daha lokalize hale gelir. C tiplerinde yer değiştirme genliklerinin

A tipine göre artması, deformabilitenin yükseldiğini göstermektedir.

Düşük frekanslı/uzun süreli kayıtlar (Elbistan, El Centro) yüksek deplasmanları tetiklerken; kısa süreli/yüksek ivmeli girdiler (Düzce, Kobe) ilk saniyelerde yüksek frekanslı yanıt üretir. Bu, sistemin frekans içeriğine karşı seçici ve mod-dominant karakterini doğrular.

Spektral ivme sonuçları ST-1 modellerinin kısa periyotlara (≈0–0,5 s) daha duyarlı olduğunu; ST-2'de talebin daha uzun periyotlara kayabildiğini göstermektedir. Wavelet analizlerinde Afyon, Sivrice ve Seferihisar kayıtları altında yüksek frekanslı rezonans kümeleri, ilk doğal frekanslarla çakışarak rezonans olasılığını artırmaktadır.

H/B seçimi hedef davranışa göre yapılmalıdır: kısa periyot-rijit tepki için ST-1 (H/B=0,3), uzun periyot uyumluluğu ve yer değiştirme yönetimi için ST-2 (H/B=0,5) tercih edilebilir. Yıldız açısında süneklik öncelikli tasarımlar için 20°, denge arayan durumlar için 30°, rijitlik öncelikli koşullar için 40° daha uygun bir çerçeve sunar. Aks sayısı artırılacaksa boşluk oranının optimize edilmesi ve topolojinin simetrik kurgulanması kritik önemdedir. Çok eksenli zemin hareketleri (X-Y-Z) ile testler, malzeme çeşitlerinin (kompozit kabuklar, fiber takviyeli beton, 3B baskı vb.) denenmesi ve pasif/yarı-aktif sönümleme elemanlarının entegrasyonu önerilir. Parametrik modelleme ve yapay zeka destekli optimizasyon (GA, swarm, evrimsel) ile performans-maliyet dengesi geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

Abraham, L. H. (1962). Structural design of missiles and spacecraft. *(No Title)*. https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272505086080

Addis, W. (2007). *Building: 3000 years of design engineering and construction* (C. 601). Phaidon London. https://www.academia.edu/download/37851373/building-3-000-years-of-design-engineering-and-construction.pdf

AFAD, 2021. T.C İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durumu Yönetim Başkanlığı, Ankara, Türkiye.

Aizon, N. H., Adnan, A., Ramli, M. Z., Arjuna, N., Alel, A., & Yuzir, M. A. M. (2020, June). Seismic performance of long cable-stayed bridge with various time history loading using finite element method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 479, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.

Al-Rifaie, H., & Sumelka, W. (2019). The Development of a New Shock Absorbing Uniaxial Graded Auxetic Damper (UGAD). *Materials*. https://doi.org/10.3390/ma12162573

ANSYS Inc. (2021). *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2021*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc.

Anwar, N., & Ahmed, F. N. (2017). *Structural cross-sections*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/9780128044438/structural-cross-sections

Arnold, F. (2018). Mathematics and the Islamic Architecture of Córdoba. *Arts*. https://doi.org/10.3390/arts7030035

Asefi, M., & Bahremandi-Tolou, M. (2021). Realization of Historical Persian Ornamental and Geometric Patterns as Architectural Components in Innovative Reciprocal Frame Barrel Vaults. *International Journal of Space Structures*. https://doi.org/10.1177/09560599211035708

Avelino, R. M., Iannuzzo, A., Mele, T. V., & Block, P. (2021). Parametric Stability Analysis of Groin Vaults. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/app11083560

Bagewadi, S. S., & Bhagchandani, R. K. (2023). Effect of gradient structure on additively manufactured auxetic and hybrid auxetic structure for energy absorption applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *237*(8), 1739-1751.

Baldwin, S. E. (1950). *The dome, a study in the history of ideas/EB Smith*. New Jersey: Princeton Univ. Press.

Barnes, M. R. (1988). Form-finding and analysis of prestressed nets and membranes. *Computers & Structures*, *30*(3), 685-695.

Beskhyroun, S., Wotherspoon, L., Ma, Q. T., & Popli, B. (2013, June). System identification of a 13-story reinforced concrete building through ambient and forced vibration. In *4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece*.

Beyen, K., 2021. Damage identification analyses of a historic masonry structure in t-f domain. Tek. Dergi. https://doi.org/10.18400/tekderg.426728.

Bhaskar, K., & Varadan, T. K. (2021). *Plates: Theories and Applications*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69424-1

Billington, D. P. (1985). *The tower and the bridge: The new art of structural engineering*. Princeton University Press.

Block, P., & Ochsendorf, J. (2007). Thrust network analysis: A new methodology for three-dimensional equilibrium. *Journal of the International Association for shell and spatial structures*, *48*(3), 167-173.

Brumana, R., Condoleo, P., Grimoldi, A., & Previtali, M. (2019). Towards a Semantic Based Hub Platform of Vaulted Systems: Hbim Meets a Geodb. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w11-301-2019

Bumanis, G., Argalis, P. P., Sahmenko, G., Mironovs, D., Rucevskis, S., Korjakins, A., & Bajare, D. (2023). Thermal and sound insulation properties of recycled expanded polystyrene granule and gypsum composites. *Recycling*, *8*(1), 19.

Calladine, C. R. (1983). *Theory of shell structures*. Cambridge university press.

Carrera, E., Brischetto, S., & Nali, P. (2011). *Plates and shells for smart structures: Classical and advanced theories for modeling and analysis* (C. 36). John Wiley & Sons.

Celep, Z., 2018. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. İstanbul, Beta Basın Yayın Dağıtım, 2018.

Chiang, Y.-C. (2022). Design and fabrication of shell structures: Aided by radial basis functions and reconfigurable mechanisms. *A+ BE| Architecture and the Built Environment*, *03*, 1-172.

Chilton, J. (2000). *The engineer's contribution to contemporary architecture: Heinz Isler*. Thomas Telford Publishing. https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/eccahi.28784.0002

Chopra, A., 1995. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Cremona, L. (1885). *Elements of projective geometry*. Clarendon Press.

Csonka, P. (1987). Theory and practice of membrane shells. *Duesseldorf: VDI-Verlag*. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987tpms.book.....C/abstract

Da Silva, C. C. C., Helbig, D., Cunha, M. L., Dos Santos, E. D., Rocha, L. A. O., Real, M. D. V., & Isoldi, L. A. (2019). Numerical buckling analysis of thin steel plates with centered hexagonal perforation through constructal design method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *41*(8), 309. https://doi.org/10.1007/s40430-019-1815-7

Deng, X., Zhao, J., Cai, J., & Liu, X. (2022). Tunable origami metamaterial with arbitrary single-curvature configuration. *Mechanism and Machine Theory*, *171*, 104745.

Dhanasekar, M., Zahra, T., Jelvehpour, A., Noor-E-Khuda, S., & Thambiratnam, D. (2016). Modelling of Auxetic Foam Embedded Brittle Materials and Structures. *Applied Mechanics and Materials*. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.846.151

El Boustani, C., Bleyer, J., Arquier, M., Ferradi, M.-K., & Sab, K. (2020). Elastoplastic and limit analysis of 3D steel assemblies using second-order cone programming and dual finite-elements. *Engineering Structures*, *221*, 111041.

Eser, H., & Hasançebi, O. (2024). Ülkemiz Mühendislik Uygulamalarında Çelik Çatı Sistemlerinin Optimum Tasarımına Dair İnceleme. *Turkish Journal of Civil Engineering*. https://doi.org/10.18400/tjce.1543461

Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchinson, I. J., & Rogers, S. C. (1991). Molecular network design. *Nature*, *353*(6340), 124-124.

Gaetani, A., Monti, G., Lourénço, P. B., & Marcari, G. (2016). Design and Analysis of Cross Vaults Along History. *International Journal of Architectural Heritage*. https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1132020

Gallerand, L., Legrand, M., Dupont, T., & Leclaire, P. (2022). Vibration and damping analysis of a thin finite-size microperforated plate. *Journal of Sound and Vibration, 541,* 117295.

Gallerand, L., Legrand, M., Dupont, T., & Leclaire, P. (2023). Vibration of microperforated plate with spatial distribution of multiple-sized perforations. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, *268*(3), 5568-5574. https://www.ingentaconnect.com/content/ince/incecp/2023/00000268/00000003/art00063

Gallerand, L., Legrand, M., Dupont, T., Panneton, R., & Leclaire, P. (2024). Damping performance of finite microperforated plates using multi-size and spatial distributions of perforations. *Applied Acoustics, 222,* 110041.

Gan, Z., Zhuge, Y., Thambiratnam, D., Chan, T. H. T., Zahra, T., & Asad, M. (2022). Recent Advances in Auxetics: Applications in Cementitious Composites. *International Journal of Protective Structures*. https://doi.org/10.1177/20414196211062620

Ghaedizadeh, A., Shen, J., Ren, X., & Xie, Y. M. (2016). Tuning the performance of metallic auxetic metamaterials by using buckling and plasticity. *Materials*, *9*(1), 54.

Gilabert-Sansalvador, L., Montuori, R., & Rosado-Torres, A. L. (2020). Constructive analysis of maya vaulted architecture from photogrammetric survey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *44*, 357-363.

Gohnert, M. (2022). *Shell Structures*. Springer. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-84807-1.pdf

Gördes, M. A., & Güngör, M. C. (2022). Phokaia Kazılarında Ele Geçen Pişmiş Toprak Çatı Kiremitleri Ve Kiremidin Tarihsel Yolculuğu. *Uluslararası Sosyal Bilimler Akademik Araştırmalar Dergisi*. https://doi.org/10.58201/utsobilder.1096105

Grima, J. N., Alderson, A., & Evans, K. E. (2004). *Negative Poisson's ratios from rotating rectangles. Comput Methods Sci Technol 10 (2): 137–145*.

Gupta, R. (2005). System Behaviour of Wood Truss Assemblies. *Progress in Structural Engineering and Materials*. https://doi.org/10.1002/pse.203

Helbig, D., Silva, C. C. C. da, Real, M. de V., Santos, E. D. dos, Isoldi, L. A., & Rocha, L. A. O. (2016). Study about buckling phenomenon in perforated thin steel plates employing computational modeling and constructal design method. *Latin American Journal of Solids and Structures*, *13*(10), 1912-1936.

Heyman, J. (1977). Equilibrium of shell structures. *(No Title)*. https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000798353227392

Heyman, J. (1995). *The stone skeleton: Structural engineering of masonry structures*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Huerta, S. (2006). Structural Design in the Work of Gaudí. *Architectural Science Review*, *49*(4), 324-339. https://doi.org/10.3763/asre.2006.4943

Intrigila, C., Nodargi, N. A., & Bisegna, P. (2022). The Compressive Response of Additively-Manufactured Hollow Truss Lattices: An Experimental Investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08716-0

Karbaschi, M. E., & Dehdashti, G. (2012). Shaping and Ultimate Loading of Space Trusses, Shaped by Post-Tensioning Technique. *International Journal of Space Structures*. https://doi.org/10.1260/0266-3511.27.1.43

Kim, S. (2024). A Machine-Learning-Based Failure Mode Classification Model for Reinforced Concrete Columns Using Simple Structural Information. *Applied Sciences*, *14*(3), 1243. https://doi.org/10.3390/app14031243

Kladovasilakis, N., Tsongas, K., Kostavelis, I., Tzovaras, D., & Tzetzis, D. (2021). Effective Mechanical Properties of Additive Manufactured Strut-Lattice Structures: Experimental and Finite Element Study. *Advanced Engineering Materials*. https://doi.org/10.1002/adem.202100879

Körner, C., & Liebold-Ribeiro, Y. (2014). A systematic approach to identify cellular auxetic materials. *Smart Materials and Structures*, *24*(2), 025013.

Lakes, R. (1987). Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. *Science*, *235*(4792), 1038-1040. https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038

Larsen, S., Sigmund, O., & Groen, J. P. (2018). Optimal Truss and Frame Design From Projected Homogenization-Based Topology Optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. https://doi.org/10.1007/s00158-018-1948-9

Li, Q., Su, Y., Wu, Y., Borgart, A., & Rots, J. G. (2017). Form-finding of shell structures generated from physical models. *International Journal of Space Structures*, *32*(1), 11-33.

Lim, T.-C. (2021). A perfect 2D auxetic sliding mechanism based on an Islamic geometric pattern. *Engineering Research Express*, *3*(1), 015025.

Liu, C., Xu, K., Zhang, Y., Hu, H., Tao, X., Zhang, Z., Deng, W., & Zhang, X. (2022). Design and Fabrication of Extremely Lightweight Truss-Structured Metal Mirrors. *Materials*. https://doi.org/10.3390/ma15134562

Liu, Y., Zhao, C., Xu, C., Ren, J., & Zhong, J. (2023). Auxetic meta-materials and their engineering applications: A review. *Engineering Research Express*, *5*(4), 042003.

Maxwell, J. C. (1864). XLV. *On reciprocal figures and diagrams of forces*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, *27*(182), 250-261. https://doi.org/10.1080/14786446408643663

Maxwell, J. C. (1866). On reciprocal diagrams in space, and their relation to Airy's function of stress. *Proceedings of the London Mathematical Society*, *1*(1), 58-63.

Meyer, C., & Sheer, M. (2005). Do concrete shells deserve another look? *Concrete international*, *27*(10), 43-50.

Mitchell, W. J. (2001). Roll over Euclid: How Frank Gehry designs and builds. *Frank Gehry, Architect*, *354*.

Mittelstedt, C. (2023). Theory of plates and shells. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Mo, J., Cheung, S., & Das, R. (2018). *Demystifying Numerical Models: Step-by Step Modeling of Engineering Systems*. Butterworth-Heinemann.

Mukhopadhyay, T., & Adhikari, S. (2016). Effective in-plane elastic properties of auxetic honeycombs with spatial irregularity. *Mechanics of Materials*, *95*, 204-222.

Najafi, M., Ahmadi, H., & Liaghat, G. (2021). Experimental Investigation on Energy Absorption of Auxetic Structures. *Materials Today Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.075

Novak, N., Vesenjak, M., & Ren, Z. (2016). Auxetic cellular materials-a review. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, *62*(9), 485-493.

Nuclear Energy Group, Muto, K., Bailey, R. W., & Mitchell, K. J. (1963). Nominated Lecture: Special Requirements for the Design of Nuclear Power Stations to Withstand Earthquakes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, *177*(1), 155-203. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1963_177_018_02

Ojha, V., Pantò, B., & Nicosia, G. (2023). Adaptive Search Space Decomposition Method for Pre- And Post-Buckling Analyses of Space Truss Structures. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105593

Otto, F., & Rasch, B. (1995). *Finding form*. Axel Menges. https://papersearch.net/google_link/fulltext.asp?file_name=2a100244.pdf

Pietraszkiewicz, W., & Gorski, J. (2013). *Shell Structures: Theory and Applications: Volume 3* (C. 3). CRC Press.

Pinto, C., & Fonseca, J. (2020). Effects of initial form-finding models on shape, force paths, and buckling of anti-funicular shells with free edges. *Structures*, *23*, 472-480.

Pottmann, H., Liu, Y., Wallner, J., Bobenko, A., & Wang, W. (2007). Geometry of multi-layer freeform structures for architecture. *ACM SIGGRAPH 2007 Papers*, 65. https://doi.org/10.1145/1275808.1276458

Powell, G. H. (2010). *Modeling for structural analysis: Behavior and basics*. Computers and Structures Berkeley, CA. https://thuvienso.hcmute.edu.vn/tailieu/2022/20220806/runordie6/csi_modeling_for_structural_analysis_p1_6606.pdf

Prawoto, Y. (2012). Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. *Computational Materials Science*, *58*, 140-153. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012

Procházka, P., & Válek, M. (2017). *Optimal Shape of Truss Structures Supporting Protective Walls*. https://doi.org/10.2495/safe170401

Rahim, K. A. N. A. (2019). Modelling of reinforced concrete beam-column joint for cyclic earthquake loading. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, *7*(2), 67-114.

Repin, V. A., Lukina, A., & Strekalkin, A. (2024). Parameterization of Maxwell—Cremona Diagram for Determining Forces in Elements of a Scissors Truss. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-97-108

Rossberg, J., & Leon, R. T. (2013). Evolution of Codes in the USA. *Forty-Fourth Meet. Jt. Panel Wind Seism. Eff., National Earthquake Hazards Reduction Program, Gaithersburg*. http://www.nehrp.gov/pdf/UJNR_2013_Rossberg_Manuscript.pdf

Salas, C. C., Frutos, C. B., & Adell, J. M. (2021). *Gaudí, a New Architectural Concept of Maximum Structural Efficiency: Catenary Vaults, Complex Ruled Surfaces, Branched Pillars and an Endless Innovative Strategies*. https://doi.org/10.23967/sahc.2021.119

Schek, H.-J. (1974). The force density method for form finding and computation of general networks. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, *3*(1), 115-134.

Schlaich, J. (2004). Conceptual design of light structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, *45*(3), 157-168.

Schmidt, L. C., & Selby, S. (2001). Shape Formation of Some Dome-Like Space Trusses. *International Journal of Space Structures*. https://doi.org/10.1260/0266351011495232

Shi, G., Wang, M., Bai, Y., Wang, F., Shi, Y., & Wang, Y. (2012). Experimental and modeling study of high-strength structural steel under cyclic loading. *Engineering Structures*, *37*, 1-13.

Shuaibu, A. S., Deng, J., Xu, C., Ade-Oke, V. P., Aliyu, A. S., & Momoh, D. (2024). Advancing Auxetic Materials: Emerging Development and Innovative Applications. *Reviews on Advanced Materials Science*. https://doi.org/10.1515/rams-2024-0021

Stanga, C. (2021). *Criteria and Tools to Catalogue Brick-Masonry Vaults. The Gis-Database of Frame, a Fasce and Planterian Vaults Between the 16th and 18th Century in Northern Italy*. https://doi.org/10.4995/arqueologica9.2021.12084

Suzuki, S., & Knippers, J. (2022). A Generic Particle Model with Topologic Modeling Capabilities for the Computational Form-Finding of Elastic Structures. *Computer-Aided Design, 145*, 103158.

Szilard, R. (2004). Theories and applications of plate analysis: Classical, numerical and engineering methods. *Appl. Mech. Rev., 57*(6), B32-B33.

Şahin, Ö., & Caglar, N. (2023). Simulation-based model-updating method for linear dynamic structural systems. *Applied Sciences*, *13*(18), 10494.

TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri, Ankara.

Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. https://trid.trb.org/View/102979

Trentadue, F., Mastromarino, E., Quaranta, G., Petrone, F., Monti, G., & Marano, G. C. (2014). Bending Stiffness of Truss-Reinforced Steel-Concrete Composite Beams. *Open Journal of Civil Engineering*. https://doi.org/10.4236/ojce.2014.43024

Truman, K. Z., & Cheng, F. Y. (1997). How to optimize for earthquake loads. In *Guide to structural optimization* (pp. 237-262).

Ugural, A. C. (2017). *Plates and shells: Theory and analysis*. CRC Press. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315104621/plates-shells-ansel-ugural

Veloso, C., Mota, C., Cunha, F., Sousa, J. C., & Fangueiro, R. (2023). A Comprehensive Review on in-Plane and Through-the-Thickness Auxeticity in Composite Laminates for Structural Applications. *Journal of Composite Materials*. https://doi.org/10.1177/00219983231205345

Von Meiss, P. (2000). The aesthetics of gravity. *arq: Architectural Research Quarterly*, *4*(3), 237-246.

Vorhof, M., Sennewald, C., Schegner, P., Pham, Q., Hoffmann, G. W., Gereke, T., & Cherif, C. (2023). Lightweight Panels With High Delamination Resistance Made of Integrally Woven Truss-Like Fabric Structures. *Journal of Industrial Textiles*. https://doi.org/10.1177/15280837221150202

Vouga, E., Höbinger, M., Wallner, J., & Pottmann, H. (2012). Design of self-supporting surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, *31*(4), 1-11. https://doi.org/10.1145/2185520.2185583

Wang, L., Zhou, Y., & Shi, W. (2023). Seismic control of a smart structure with semiactive tuned mass damper and adaptive stiffness property. *Earthquake Engineering and Resilience*, *2*(1), 74-93.

Wu, A., Tsai, K., Chen, C., Chen, L., & Lin, Y. (2022). Experimental Behavior of Truss-confined Buckling-restrained Braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. https://doi.org/10.1002/eqe.3777

Zboinska, M. A., & Dumitrescu, D. (2020). On the Aesthetic Significance of Imprecision in Computational Design: Exploring Expressive Features of Imprecision in Four Digital Fabrication Approaches. *International Journal of Architectural Computing*. https://doi.org/10.1177/1478077120976493

Zhang, C., & Zhao, Y. F. (2024). A critical review on the application of machine learning in supporting auxetic metamaterial design. *Journal of Physics: Materials*, *7*(2), 022004. https://doi.org/10.1088/2515-7639/ad33a4

Zhou, H., Zhang, Y., Fu, F., & Wu, J. (2020). Collapse Mechanism of Single-Layer Cylindrical Latticed Shell Under Severe Earthquake. *Materials*, *13*(11), 2519.

Zhou, L., Zeng, J., Jiang, L., & Hu, H. (2017). Low-Velocity Impact Properties of 3D Auxetic Textile Composite. *Journal of Materials Science*. https://doi.org/10.1007/s10853-017-1789-8

Zipkin, P. (2001). The limits of mass customization. *MIT Sloan management review*, *42*(3), 81.

Zulifqar, A., Hua, T., & Hu, H. (2018). Development of uni-stretch woven fabrics with zero and negative Poisson's ratio. *Textile Research Journal*, *88*(18), 2076-2092. https://doi.org/10.1177/0040517517715095