

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ÇELİK ÇERÇEVE YAPILARDA ALÜMİNYUM KÖPÜK DOLGULU KOLON
VE SANDVIÇ DÖŞEME KULLANIMININ SİSMİK DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA

ÖZGÜL DEMİRAĞ

Mart 2026
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ÇELİK ÇERÇEVE YAPILARDA ALÜMİNYUM KÖPÜK DOLGULU KOLON
VE SANDVIÇ DÖŞEME KULLANIMININ SİSMİK DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING ALUMINUM FOAM-FILLED
COLUMNS AND SANDWICH SLABS ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF
STEEL FRAME STRUCTURES**

DOKTORA

ÖZGÜL DEMİRAĞ

Mart 2026

GÜMÜŞHANE



**GÜMÜŞHANE
ÜNİVERSİTESİ**

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ÇELİK ÇERÇEVE YAPILARDA ALÜMİNYUM KÖPÜK DOLGULU KOLON
VE SANDVIÇ DÖŞEME KULLANIMININ SİSMİK DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING ALUMINUM FOAM-FILLED
COLUMNS AND SANDWICH SLABS ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF
STEEL FRAME STRUCTURES**

DOKTORA

ÖZGÜL DEMİRAĞ

DANIŞMAN: PROF. DR. EMRE ÖZYURT

Mart 2026

GÜMÜŞHANE

KABUL VE ONAY

Prof. Dr. Emre ÖZYURT danışmanlığında, **Özgül DEMİRAĞ** tarafından hazırlanan “Çelik Çerçeve Yapılarda Alüminyum Köpük Dolgulu Kolon ve Sandviç Döşeme Kullanımının Sismik Davranış Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” isimli bu çalışma, 05/03/2026 tarihinde yapılan doktora tez savunma sınavı sonucunda Oy Birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Ertekin ÖZTEKİN (Başkan)

.....
Prof. Dr. Emre ÖZYURT (Danışman)

.....
Doç. Dr. Mahmut KILIÇ (Üye)

.....
Prof. Dr. Merve MAALI (Üye)

.....
Doç. Dr. Onur ARAZ (Üye)

Lisansüstü tez savunma sınavında başarılı bulunarak kabul edilen bu tezin ciltlenmiş hali, /..... /..... tarihli ve / sayılı Enstitü Yönetim Kurulu toplantısında görüşülmüş ve tez yazım kılavuzuna uygun bulunarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Doktora Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Çelik Çerçeve Yapılarda Alüminyum Köpük Dolgulu Kolon ve Sandviç Döşeme Kullanımının Sismik Davranış Üzerindeki Etkisinin Araştırılması**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, danışmanımın sorumluluğunda hazırladığımı, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

05/03/2026

.....
Özgül DEMİRAĞ

TEŞEKKÜR

Bu tezin ortaya çıkmasında, akademik bilgi birikimi, yol gösterici yaklaşımı ve sürecin her aşamasında sağladığı değerli katkılarla bana rehberlik eden danışmanım Prof. Dr. Emre ÖZYURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez konusunun geliştirilmesinden yöntemsel yaklaşımın belirlenmesine, eleştirel geri bildirimlerinden motive edici desteğine kadar bu çalışmanın bilimsel niteliğinin şekillenmesinde katkısı belirleyici olmuştur. Akademik bakış açısını, eleştirel düşünme yetisini ve disiplinli çalışma anlayışını bana kazandırdığı için kendisine ayrıca minnettarım.

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca bilgi, deneyim ve önerileriyle akademik gelişimime önemli katkılar sunan; tez çalışmam süresince değerlendirme ve yönlendirmeleriyle araştırmama katkı sağlayan Prof. Dr. Ertekin ÖZTEKİN'e; eleştirel yaklaşımı ve yapıcı değerlendirmeleriyle çalışmamın gelişimine katkıda bulunan Doç. Dr. Mahmut KILIÇ'a; tez jürimde yer alarak değerli değerlendirme ve katkılarıyla çalışmamın gelişimine katkı sağlayan Prof. Dr. Merve MAALI'ya ve Doç. Dr. Onur ARAZ'a; çözüm odaklı yaklaşımı ve teşvik edici tutumuyla karşılaştığım güçlükleri aşmamda destek olan ve motivasyonumu korumamda önemli katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Emine ÇORUH'a; çalışmanın farklı aşamalarında sunduğu analitik bakış açısı ve akademik-teknik rehberliğinin yanı sıra yapıcı geri bildirimleri ve moral desteğiyle çalışmayı kararlılıkla sürdürebilmemde önemli bir dayanak olan Prof. Dr. Salim Serkan NAS'a içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, eğitim hayatım boyunca bilgi ve deneyimleriyle gelişimime katkı sunan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca akademik ve kişisel anlamda yanımda olan; zorlandığım anlarda desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim. Destekleri ve dostlukları sayesinde bu süreci daha anlamlı kıldıkları için kendilerine minnettarım.

Son olarak, hayatımın her döneminde olduğu gibi bu tez çalışması sürecinde de koşulsuz destekleri, sabırları ve anlayışlarıyla her zaman yanımda olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın tamamlanmasında onların desteği en büyük dayanağım olmuştur.

Özgül DEMİRAĞ
GÜMÜŞHANE – 2026

ÖZET

Bir yapının deprem etkileri altındaki davranışı; yapının kütle, rijitlik ve sönüm gibi dinamik özellikleri ile deprem hareketinin karakteristikleri arasındaki etkileşim sonucunda şekillenmektedir. Yapıların sünek davranışı, deprem sırasında açığa çıkan enerjiyi plastik şekil değiştirmeler yoluyla sönümleyebilme kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Çelik yapıların sismik performansı ise yalnızca çelik malzemenin sünekliğine bağlı olmayıp, kolonlar, kirişler, birleşim bölgeleri ve kullanılan yapısal sistemlerin özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir.

Bu çalışmada, çelik çerçeve sistemlerin sismik davranışının iyileştirilmesine yönelik olarak alüminyum köpük esaslı yenilikçi çözümler ele alınmıştır. Alüminyum köpükler, tez kapsamında hem sandviç kompozit döşemelerde çekirdek malzemesi olarak hem de kutu kesitli çelik kolonlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Sandviç kompozit döşemelerin ve alüminyum köpük dolgulu kolonların, yapının rijitliği, enerji sönümlenme kapasitesi ve genel sismik davranışı üzerindeki etkileri sayısal analizler yardımıyla araştırılmıştır.

Bu amaçla, literatürde yer alan deneysel çalışmaların sonlu eleman modelleri ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve doğrulanmıştır. Ardından, geleneksel kompozit döşemeli ve boş kesitli kolonlara sahip çelik çerçeveler ile alüminyum köpük esaslı sistemlerin karşılaştırmalı sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, alüminyum köpük kullanılan sistemlerin yapının yanal rijitliğini artırdığını, yatay yer değiştirme ve görelî kat ötelemelerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Yenilikçi sistemlerde, özellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde iyileştirilmiş gerilme dağılımı ve artan enerji yutma kapasitesi gözlemlenmiştir.

Genel olarak, alüminyum köpük dolgulu sandviç kompozit döşemeler ile alüminyum köpük dolgulu çelik kolonların birleştirilmesinin, çelik çerçeve yapıların depreme dayanıklı performansını iyileştirmek için etkili bir yaklaşım sağladığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Çelik çerçeve, Enerji yutma kapasitesi, Sandviç kompozit, Sismik davranış, Sonlu elemanlar

ABSTRACT

The seismic response of a structure is governed by the interaction between its dynamic properties, including mass, stiffness, and damping, and the characteristics of ground motion. Structural ductility is directly related to the ability to dissipate seismic energy through plastic deformations. The seismic performance of steel structures depends not only on the ductility of steel material but also on the behaviour of columns, beams, joint regions, and adopted structural systems.

In this study, aluminium foam-based solutions are investigated to improve the seismic behaviour of steel frame systems. Aluminium foams are used both as core materials in sandwich composite slabs and as infill materials in box-section steel columns. Their effects on structural stiffness, energy dissipation capacity, and overall seismic performance are evaluated through numerical analyses.

For this purpose, finite element models of experimental studies in the literature are developed and validated using ABAQUS software. Subsequently, comparative numerical analyses are performed on steel frames with conventional composite slabs and hollow-section columns, and aluminium foam-based systems. The results demonstrate that systems using aluminium foam increase structural lateral stiffness and significantly reduce lateral displacement and relative story displacements. Improved stress distribution and increased energy absorption capacity were observed in the innovative systems, especially in column-beam connection regions.

Overall, the findings indicate that combining aluminium foam-filled sandwich composite slabs and aluminium foam-filled steel columns provides an effective approach for improving the seismic performance of steel frame structures.

Keywords: Steel frame, Energy dissipation capacity, Sandwich composite, Seismic behavior, Finite element model

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLOLAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.1.1. Alüminyum Köpük Malzemeler ve Mekanik Özellikleri.....	2
1.1.2. Alüminyum Köpük Sandviç Panellerin Yapısal Davranışı	8
1.1.3. Alüminyum Köpük Dolgulu Tübüler Elemanlar	15
1.1.4. Çelik Çerçeve Sistemleri ve Sismik Performans	24
1.1.5. Çelik Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Çevrimsel Yükler Altındaki Davranışı.....	28
1.2. Tezin Konusu ve Amacı.....	42
1.3. Tezin Kapsamı	43
1.4. Tezin Önemi ve Literatüre Katkısı.....	44
2. GENEL BİLGİLER.....	46
2.1. Çelik Çerçeve Yapıların Sismik Davranışı	49
2.1.1. Rijitlik, Süneklik ve Enerji Sönümlenme Kavramları.....	50
2.1.2. Enerji Sönümlenme ve Yeni Yapı Malzemeleri İhtiyacı.....	51
2.2. Alüminyum Metalik Köpük Çekirdekli Kompozit Sistemler	52
2.2.1. Alüminyum Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Yapısal Davranışı.....	55
2.2.2. Alüminyum Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Döşeme Elemanı Olarak Kullanımı.....	56
2.2.3. Alüminyum Köpüklerin Çelik Kolonlarda Dolgu Olarak Kullanımı	56
2.2.4. Döşeme ve Kolonlarda Eş zamanlı Kullanımın Sismik Sinerjisi.....	57
3. MATERYAL VE YÖNTEM	58
3.1. Sonlu Elemanlar Modelleme Yöntemi.....	58
3.2. Malzeme Modelleri ve Özellikleri	59

3.2.1. Çelik Malzeme Modeli.....	59
3.2.2. Alüminyum Köpük Malzeme Modeli	59
3.2.3. Beton ve Yapıştırıcı Malzeme Modelleri.....	59
3.3. Sayısal Analizlerin Doğrulanması	60
3.3.1. Latour vd. (2021) Tarafından Gerçekleştirilen Çalışmanın Doğrulanması	60
3.3.2. Li vd. (2023) Tarafından Gerçekleştirilen Çalışmanın Doğrulanması.....	65
3.3.3. Li ve Young (2021) Deneyinin Doğrulanması (T-Birleşimler)	73
3.4. Parametrik Çalışma Kapsamında Oluşturulan Modeller	76
3.4.1. Çok Katlı Çelik Çerçeve Sistemlerinin Modellenmesi	76
3.4.1.1 Yapı Sistemi.....	77
3.4.1.2. Malzeme Özellikleri.....	78
3.4.1.3. Sınır Şartları ve Yüklemeler	81
3.4.1.4. Temas Özellikleri	83
3.4.1.5. Sonlu Eleman Tipi ve Ağ Yapısı	83
3.4.2. Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Modellenmesi	85
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	89
4.1. Çok Katlı Çelik Çerçevelerin Sismik Performans Analiz Sonuçları	89
4.1.1. Doğal Frekanslar.....	89
4.1.2. Yer Değiştirme Tepkileri.....	93
4.1.3. Görelî Kat Ötelemeleri	99
4.1.4. Von Misses Gerilme Dağılımları.....	103
4.2. Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Çevrimsel Davranış Analizi Sonuçları	108
4.2.1. Yük-Yerdeğiştirme İlişkileri	108
4.2.2. Süneklik	110
4.2.3. Histeretik Enerji Yutma Kapasitesi.....	112
4.2.3. Monotonik Enerji Yutma Kapasitesi.....	116
5. SONUÇLAR	118
5.1. Sınırlamalar ve Gelecek Çalışmalar.....	121
KAYNAKÇA.....	123
ÖZGEÇMİŞ	145

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Alüminyum köpük sandviçin test numuneleri	62
Tablo 2. S280GD sınıfı çeliğin malzeme özellikleri.....	62
Tablo 3. Alüminyum köpüğün mekanik özellikleri	62
Tablo 4. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri	63
Tablo 5. Pik eğilme momenti - yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması.....	65
Tablo 6. Çeliğe ait malzeme özellikleri	67
Tablo 7. Betona ait malzeme özellikleri	67
Tablo 8. Çelik çerçeveye ait dinamik özellikler.....	67
Tablo 9. Maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması	70
Tablo 10. Maksimum yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması	71
Tablo 11. Maksimum birim Şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması	71
Tablo 12. Li ve Young (2021) tarafından test edilen túbüler T-birleşimlerin geometrik boyutları ve taşıma kapasiteleri	73
Tablo 13. Li ve Young'un (2021) deneylerinde kullanılan çelik numunelere ait malzeme özellikleri	74
Tablo 14. S235 sınıfı çeliğin malzeme özellikleri	79
Tablo 15. C30 sınıfı betonun malzeme özellikleri.....	79
Tablo 16. S280GD sınıfı çeliğin malzeme özellikleri.....	80
Tablo 17. Alüminyum köpüğün malzeme özellikleri.....	80
Tablo 18. Geolite gel yapıştırıcının mekanik özellikleri.....	81
Tablo 19. Deprem yüklerinin en büyük yer ivmesi ve buna karşılık gelen zaman adım(lar)ı.....	82
Tablo 20. Kiriş-kolon birleşimlerinin geometrik parametreleri.....	86
Tablo 21. Çelik çerçevelerin 1. ve 2. doğal frekansları	90
Tablo 22. 2x2 Çerçevelerin maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	99
Tablo 23. 2x1 Çerçevelerin maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	99
Tablo 24. 1x1 Çerçevelerin maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	99
Tablo 25. Alüminyum köpük dolgunsuz ve dolgulu birleşimlerin süneklik oranları	111
Tablo 26. Birleşimler kümülatif enerji dağılımının karşılaştırılması.....	115
Tablo 27. Zarf eğrileri üzerinden hesaplanan enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kobe (1995) (a) ve Northridge (1994) (b) depremlerinde çelik yapı hasar örnekleri	46
Şekil 2. Kapalı hücreli alüminyum köpüğün hücresel yapısı.....	53
Şekil 3. Açık hücreli metal köpüğün (a) ve kapalı hücreli metal köpüğün (b) mikroyapısının optik mikrografları.....	53
Şekil 4. Metalik köpükler için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	54
Şekil 5. I-kiriş benzeri yapısal konfigürasyon sergileyen alüminyum köpüklü sandviç kompozit panel.....	54
Şekil 6. Alüminyum köpük sandviç kompozit panel	55
Şekil 7. Alüminyum köpük dolgulu tüpler.....	57
Şekil 8. Alüminyum köpük sandviçin sonlu elemanlar modeli	61
Şekil 9. Modelin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş halleri.....	63
Şekil 10. Modelin sınır şart ve yükleme koşulları.....	64
Şekil 11. Göçme modlarının karşılaştırılması.....	64
Şekil 12. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 18. 1/2 Ölçekle küçültülmüş model (Birimler: mm).....	66
Şekil 14. Li vd.'nin deney düzeneğinin şematik görünümü	68
Şekil 15. El Centro depremi ivme kaydı	69
Şekil 16. İvme (AT1-6) ve yerdeğiştirme (DT1-6) dönüştürücü düzeni (Birimler: mm)	69
Şekil 17. Modelin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş hâli	70
Şekil 18. Sonlu eleman modelinin hasar modu (a) Li vd. (2023), (b) SEM	70
Şekil 19. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin J1'deki ivme değerlerinin karşılaştırılması (PGA = 0,51 g)	72
Şekil 20. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin J1'deki birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması (PGA = 0,51 g).....	72
Şekil 21. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin J2'nin 2-2 kesitindeki yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (PGA = 0,51 g).....	72
Şekil 22. Li ve Young'a (2021) ait tipik birleşim konfigürasyonu.....	73
Şekil 23. T7 birleşimine ait yükleme ve sınır koşulları ile ağ (mesh) düzeni	75
Şekil 24. Li ve Young'un (2021) deney sonuçları ile SE sonuçları arasındaki yük-görelî yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	75

Şekil 25. T7 numunesinin göçme modunun karşılaştırılması	76
Şekil 26. 8 Katlı çelik çerçeve modellerine ait üç boyutlu görünüşler	77
Şekil 27. Çelik çerçevelerin model kodu	77
Şekil 28. Alüminyum köpüğe ait mühendislik gerilmesi- birim şekil değiştirme eğrisi	81
Şekil 29. 8 Katlı çelik çerçeve modellerinin sınır şartları	82
Şekil 30. Northridge sismik dalgası	83
Şekil 31. 8 Katlı çelik çerçeve modellerinin ağlara bölünmüş sonlu elemanlar modelleri	85
Şekil 32. Kiriş-kolon birleşimlerinin sonlu elemanlar ağ yapısı ve yükleme noktası.....	86
Şekil 33. Yükleme protokolü	87
Şekil 34. Yük-yerdeğiştirme eğrilerinde akma ve nihai yerdeğiştirmenin belirlenmesi.	88
Şekil 35. Geleneksel çelik çerçeveler ile normalleştirilmiş ilk doğal frekansların karşılaştırılması	91
Şekil 36. Çerçeve sistemlerinin yanıl yer değiştirme-zaman eğrilerinin karşılaştırılması	94
Şekil 37. Alüminyum köpüğün çerçeve sistemlerinin maksimum kat yer değiştirmesi üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması.....	97
Şekil 38. Çerçeve sistemlerinin görelil kat öteleme oranları üzerindeki alüminyum köpük etkilerinin karşılaştırılması.....	101
Şekil 39. Çerçeve sistemlerinin Von Mises gerilme dağılımlarının karşılaştırmaları ..	105
Şekil 40. Alüminyum köpük dolgusuz ve dolgulu birleşimlerin çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrileri	109
Şekil 41. Alüminyum köpük dolgusuz ve dolgulu birleşimler için yük-yerdeğiştirme eğrileri	111
Şekil 42. Birleşimler kümülatif enerji kaybının karşılaştırılması	114
Şekil 43. Aynı yükleme döngüsünde kompozit birleşimler eşdeğer plastik gerinim dağılımları	115
Şekil 44. Yük-yerdeğiştirme zarf eğrilerinin karşılaştırılması	116

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- 2 B : 2 Boyutlu
- 3 B : 3 Boyutlu
- [C] : Sönümleme matrisi
- [M] : Kütle matrisi
- [K] : Rijitlik matrisi
- B : Dolgusuz çelik kiriş-kolon birleşim modeli
- b_0 : Kolon enkesit genişliği
- b_1 : Kiriş enkesit genişliği
- E : Elastisite modülü
- Eurocode 3 : Eurocode 3 – Bölüm 1993-1-1:2005 – Çelik Yapıların Tasarımı
- Eurocode 4 : Eurocode 4 – Bölüm 1994-1-1:2004 – Kompozit Yapıların Tasarımı
- Eurocode 8 : Eurocode 8 – Bölüm 1998-1:2004 – Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımı
- E_{toplam} : Toplam kümülatif enerji dağılımı
- E_y : Doğrusal enerji dağılımı
- $E_{ytoplam}$: Doğrusal kümülatif enerji dağılımı
- f_{ck} : Karakteristik basınç dayanımı
- FEMA-350 : FEMA-350: Yeni Çelik Moment-Kare Karkas Binalar İçin Önerilen Deprem Tasarım Kriterleri
- FEMA-351 : FEMA-351: Yeni Çelik Moment-Kare Karkas Binalar İçin Önerilen Deprem Tasarım Kriterleri
- FEMA-356 : FEMA-356: Binaların Depreme Dayanıklı Güçlendirilmesi İçin Ön Standart ve Açıklamalar
- f_y : Akma dayanımı
- f_u : Çekme dayanımı
- h_0 : Kolon enkesit yüksekliği
- h_1 : Yükleme plakası yüksekliği
- K : Alüminyum köpük dolgulu çelik kiriş-kolon birleşim modeli
- M : Eğilme momenti
- P_{max} : Maksimum yük
- P_u : Nominal nihai yük
- P_y : Akma yükü

SE	: Sonlu elemanlar
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
T	: Kalınlık
t_0	: Kolon enkesit kalınlığı
t_1	: Kiriş enkesit kalınlığı
α	: Kütle orantılı sönüm katsayısı
β	: Rijitlik orantılı sönüm katsayısı
β	: Kiriş genişliğinin kolon genişliğine oranı
γ	: Kolon genişliğinin kalınlığına oranı
γ	: Birim hacim oranı
δ	: Kopma uzaması
Δ	: Kiriş elemanının merkezindeki yerdeğişmeler
δ_{\max}	: Maksimum yükte meydana gelen yer değiştirme
δ_u	: Nihai yer değiştirme
δ_{u+}	: Pozitif yöndeki nihai yer değiştirmesi
δ_{u-}	: Negatif yöndeki nihai yer değiştirmesi
δ_y	: Akma yer değiştirmesi
δ_{y+}	: Pozitif yöndeki akma yer değiştirmesi
δ_{y-}	: Negatif yöndeki akma yer değiştirmesi
ε	: Birim şekil değiştirme
η_a	: Kümülatif enerji dağılım oranı η_a
μ	: Süneklik oranı
μ^+	: Pozitif yöndeki süneklik oranı
μ^-	: Negatif yöndeki süneklik oranı
μ_a	: Kümülatif süneklik oranı
ν	: Poisson oranı
φ	: Eğrilik
ε_{ln}^{pl}	: Logaritmik plastik birim şekil değiştirme
ε_{nom}	: Nominal birim şekil değiştirme
ξ	: Sönümlenme oranı
σ_c	: Nihai kopma dayanımı
σ_{cu}	: Nihai kopma dayanımı
σ_{nom}	: Nominal gerilme
σ_{true}	: Gerçek gerilme
ω	: Açısal frekans

1. GİRİŞ

Deprem etkisi altındaki yapıların tasarımında temel hedeflerden biri, yapısal güvenliği sağlarken aynı zamanda sünek davranış, enerji sönümlenme kapasitesi ve hasar kontrolünü etkin biçimde yönetebilen sistemler geliştirmektir. Geleneksel taşıyıcı sistemlerde bu hedefler çoğunlukla kesit büyütme, ilave sönümleyici elemanlar veya rijitlik artırıcı çözümler yoluyla sağlanmaya çalışılmakta; ancak bu yaklaşımlar yapısal kütlelerin artmasına ve dolayısıyla sismik atalet kuvvetlerinin büyümesine neden olabilmektedir. Bu durum, özellikle çok katlı çelik yapılarda daha hafif, çok fonksiyonlu ve sistem düzeyinde performans iyileştirmesi sağlayan alternatif yapı elemanlarına olan ihtiyacı artırmaktadır.

Son yıllarda hücreli yapıları sayesinde düşük yoğunluk, yüksek özgül rijitlik ve belirgin enerji sönümlenme kapasitesi sunan metalik köpükler, yapısal mühendislik uygulamaları açısından dikkat çekici bir malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır. Özellikle alüminyum köpükler; üretim kolaylığı, korozyon direnci, geri dönüştürülebilirlik ve geniş bir yoğunluk–mekanik özellik aralığında üretilebilme olanakları sayesinde yapısal uygulamalar için uygun bir aday olarak değerlendirilmektedir (Madgule vd., 2023; Fu ve Li, 2024; Hassan ve Alnaser, 2026). Alüminyum köpüklerin kademeli hücre çökmesine dayalı karakteristik mekanik davranışı, ani ve gevrek göçme yerine kontrollü deformasyon gelişimine olanak tanımakta; bu özellik, dinamik ve tekrarlı yükler altında enerji yutma potansiyeli açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Gibson ve Ashby, 2014; Banhart, 2001).

Alüminyum köpüklerin yapısal mühendislikteki en yaygın kullanım biçimlerinden biri, çekirdeği metalik köpük olan sandviç kompozit sistemlerdir. Bu sistemlerde hafif fakat enerji yutucu bir köpük çekirdek, rijit yüzey levhaları arasında bağlanarak çalışmakta ve klasik I-kiriş davranışını taklit eden verimli bir yük taşıma mekanizması oluşturmaktadır. Sandviç kompozitlerin bu yapısal avantajları, onları yalnızca havacılık ve otomotiv gibi alanlarda değil, aynı zamanda yapı mühendisliği uygulamalarında da araştırmaya değer bir alternatif hâline getirmiştir (Allen, 1969; Demirağ ve Öztekin, 2026; Fleck ve Deshpande, 2004; Zenkert, 1995). Özellikle döşeme sistemleri bağlamında, sandviç kompozit elemanların kütle azaltımı, eğilme rijitliği ve enerji sönümlenme potansiyelini bir arada sunabilmesi, sismik performans açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, hem çekirdeği alüminyum köpükten oluşan sandviç kompozit döşeme sistemlerinin hem de alüminyum köpük dolgulu çelik kutu kesitli kompozit kolonların, çelik çerçeve yapılar içerisindeki yapısal ve sismik performansı incelenmektedir. Çalışma kapsamında, geleneksel döşeme sistemleri ve içi boş çelik kutu kesitli kolonlar ile alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozit döşemeler ve alüminyum köpük dolgulu çelik kutu kesitli kolonlardan oluşan çok katlı çerçevelerin sismik performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yenilikçi ve geleneksel sistemler arasındaki sismik performans, başlıca doğal frekanslar, yanal yer değiştirme-zaman eğrileri, görelî kat ötelemeleri, Von Misses gerilme değerleri ve dağılımları, histeretik yük-yerdeğiştirme eğrileri, süneklik, histeretik enerji yutma kapasitesi ve monotonik enerji yutma kapasitesi potansiyeli olmak üzere ele alınmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

1.1.1. Alüminyum Köpük Malzemeler ve Mekanik Özellikleri

Alüminyum köpük, özellikle dinamik koşullar altında büyük miktarda enerjiyi sönümleyebilme özelliği, dayanıklılığı ve hafifliği ile literatürde yer almaktadır. Bu metalik köpük, metallerin mukavemetini ve sünekliğini, hücresel bir yapının düşük ağırlığı ve enerji dağıtım kapasitesiyle bir araya getirerek mühendislik açısından son derece avantajlı bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Özellikle, darbe, titreşim ve patlama yükleri altında iyi performans gösterebilme yetenekleri sayesinde, metal köpükler havacılık, otomotiv, nükleer ve inşaat mühendisliği dâhil olmak üzere çok çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (Cheng vd., 2016; Demirağ ve Öztekin, 2026; Gupta ve Pradyumna, 2022; Madenci vd., 2020; Nguyen vd., 2020; Yazman, 2021). Literatürde yer alan ilgili çalışmaların kronolojik bir genel değerlendirmesi aşağıda sunulmaktadır.

Kenny (1996), tarafından yürütülen çalışmada, SiC ve alümina parçacıklarla stabilize edilmiş alüminyum köpüklerin mekanik özellikleri sistematik bir biçimde ele alınmaktadır. Hücresel yapıya sahip olan bu gelişmiş malzemelerin enerji emilim kapasiteleri ve farklı yükleme koşulları altındaki mekanik davranışları incelenmiştir. Bu doğrultuda, Kenny'nin çalışması metalürjik süreçlerin optimize edilmesi ve yeni nesil hücresel malzemelerin geliştirilmesi noktasında literatüre kalıcı bir katkı olarak dâhil edilmektedir.

Baumeister vd. (1997), tarafından yürütülen araştırmada, ulaşım endüstrisinde aktif ve pasif güvenliği artırmak amacıyla düşük özgül ağırlıklı ve yüksek enerji emme

kapasitesine sahip alüminyum köpüklerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yöntem olarak, alüminyum veya alaşım tozlarının bir köpürtücü madde ile homojen bir şekilde karıştırıldığı, ardından ekstrüzyon veya sıcak presleme teknikleriyle sıkıştırılarak ısı işleme tabi tutulduğu bir toz metalurjisi tekniği kullanılmıştır. Bu süreç neticesinde, %90'a varan gözeneklilik oranlarına sahip, kapalı hücre yapılı ve düşük yoğunluklu metalik köpükler başarıyla elde edilmiştir. Bulgular, köpüklerin eğilme ve basma dayanımı ile elastisite modülü gibi temel mekanik özelliklerinin yoğunluğa bağlı olarak doğrusal olmayan bir güç yasası izlediğini ortaya koymuştur. Alüminyum köpüklerin, deformasyon sırasında enerjiiyi geri dönülemez plastik deformasyonla emdiği ve belirli durumlarda %90'a varan enerji emme verimliliğine ulaştığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu malzemelerin özellikle otomobil çarpışma bölgelerinde kontrollü enerji sönmülmesi için ideal olduğu ve performansın uygun yoğunluk seçimiyle optimize edilebileceği belirlenmiştir. Ayrıca, köpüklerin yanmazlık ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlarının ulaşım sektörü için kritik önem taşıdığı vurgulanmıştır.

Gibson (2000), metalik köpüklerin mekanik davranışlarının mühendislik disiplinlerindeki kritik rolünü ve potansiyelini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Araştırmada, hafif sandviç panellerden enerji sönmülme sistemlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılan bu malzemelerin mekanik özelliklerinin sistematik olarak analiz edilmesi hedeflenmiştir. Metalik köpüklerin deformasyon ve hasar mekanizmalarını tanımlayan güncel bilimsel ilerlemeler ve teknik veriler sentezlenerek bir araya getirilmiştir. Bu süreçte; elastik modüller, tek eksenli mukavemet, akma kriterleri, sürünme ve yorulma direnci gibi temel performans göstergeleri ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, köpüklerin mikro yapısı ile mekanik tepkileri arasındaki doğrusal ilişkiler ve yapısal bozulma süreçleri hakkında somut bulgulara ulaşılmıştır. Özellikle, bu malzemelerin enerji emilimi ve yapısal hafiflik sağlama konusundaki üstünlüğü teknik verilerle desteklenmiştir. Sonuç olarak, metalik köpüklerin sunduğu benzersiz özellikler kombinasyonunun ileri mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez bir çözüm sunduğu ve mevcut teorik altyapının pratik uygulamaları optimize edebileceği saptanmıştır.

Gibson (2001), metal köpüklerin ve hücreli metalik yapıların imalat olanaklarını, karakterizasyon yöntemlerini ve çeşitli endüstriyel uygulama alanlarını güncel literatür taraması eşliğinde bütüncül bir yaklaşımla incelemeyi hedeflemiştir. Uygulanan yöntem dahilinde üretim süreçleri; metalin işleme tabi tutulduğu temel fiziksel haller olan sıvı, katı, gaz ve iyonize durumlarına göre sistematik bir biçimde sınıflandırılmıştır. Mevcut karakterizasyon teknikleri tahribatlı ve tahribatsız analiz başlıkları altında

detaylandırılmış; olası uygulamalar ise yapısal ve fonksiyonel sektörler bazında titizlikle ele alınmıştır. Yapılan teknik incelemeler sonucunda, metalik eriyiklerin doğrudan köpürtülmesi, toz kompaktların ergitilmesi ve yatırım dökümü gibi birbirinden farklı pek çok teknolojik rotanın uygulanabilirliği saptanmıştır. Bu özel malzemelerin otomotiv ve havacılık gibi öncelikli mühendislik sektörlerinde ağırlık azaltma ve yüksek enerji sönümlenme kapasitesiyle öne çıktığı, filtrasyon gibi alanlarda ise özgün fonksiyonel çözümler sunduğu belirlenmiştir. Nihai sonuç olarak, hüresel metallerin endüstriyel seri üretim aşamaları için giderek daha ekonomik bir konuma ulaştığı değerlendirilmiştir. Gelecek akademik araştırmaların ise malzeme homojenliğinin artırılması ve üretim süreçlerinin öngörülebilirliğinin teknik olarak iyileştirilmesi üzerine yoğunlaştığı tespit edilmiştir.

Sun ve Zhao (2003), yenilikçi bir teknik olan sinterleme ve çözüldürme işlemi ile üretilen alüminyum köpüklerin statik ve dinamik enerji emme kapasiteleri detaylandırılmıştır. Araştırmada; sinterleme sıcaklığı, işlem süresi, magnezyum katkısı ve hücre boyutunun gözenekli yapının performansı üzerindeki etkilerinin sistematik olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Statik koşullardaki enerji emiliminin dinamik darbe koşullarına kıyasla iki kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Hücre boyutu etkisinde, statik emilim için 1200-1500 µm, dinamik emilim için 710-800 µm aralıklarının optimum olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin pürüzsüzlüğü sayesinde köpük yapısının homojenliği doğrulanmıştır. Sonuç olarak, parametrelerin optimize edilmesiyle yüksek enerji sönümlenme kabiliyetine sahip alüminyum köpüklerin üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Gibson (2005), alüminyum köpüklerin bilimsel temelleri ve otomotiv sektörü başta olmak üzere endüstriyel uygulama alanları kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmanın temel amacı, araçlarda hafifletme, darbe enerjisi emilimi ve akustik yalıtım sağlayan bu malzemelerin teknolojik potansiyelini ortaya koymaktır. Ayrıca, alüminyum sandviç paneller ve döküm çekirdekleri gibi karmaşık kompozit yapıların üretim metodolojileri teknik boyutuyla ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, alüminyum köpüklerin düşük ağırlıklarına karşın mükemmel bir eğilme direnci sunduğunu ve çarpışma anında sabit stres altında büyük deformasyonlara izin vererek yüksek enerji emdiğini kanıtlamaktadır. Mevcut teknolojik gelişmelerin, bu malzemeleri kitlesel ulaşım pazarı için daha çekici hale getireceği ve endüstriyel kullanımını yaygınlaştıracağı değerlendirilmektedir.

Bryant vd. (2006), hurda kompozisyonlarını temsil eden Al-2Mg ve Al-7Si-2Mg alaşımları model olarak seçilmiş; tescilli bir stabilizasyon sürecinin ardından, geleneksel

metal hidritler yerine metal karbonatlar köpürtücü ajan olarak kullanılmıştır. Üretilen numunelerin mekanik nitelikleri basma, çekme ve eğme testleriyle incelenirken; yapısal karakterizasyon için X-ışını tomografisinden faydalanılmıştır. Analizler sonucunda, %7 ile %30 arasında bağıl yoğunluğa ve 0,5 mm'den küçük hücre çapına sahip köpüklerin başarıyla üretildiği saptanmıştır. Köpük dayanımı ve modülünün büyük oranda yoğunluk tarafından belirlendiği, ancak %14 bağıl yoğunluk civarında mezoyapısal değişimlere bağlı olarak mekanik performansta belirgin düşüşler yaşandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, hurda bazlı alaşımların ince panel uygulamaları için ekonomik ve fonksiyonel bir alternatif sunduğu ortaya konulmuştur. Fragmentasyon indeksinin, düşük yoğunluklu köpüklerin geliştirilmesinde kritik bir yapısal gösterge olduğu vurgulanmıştır.

Mondal vd. (2009), kapalı hücreli alüminyum-uçucu kül kompozit köpüklerin basma deformasyon davranışları üzerinde gerinim hızı ve bağıl yoğunluğun etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Amaç, farklı bağıl yoğunluklara (0,08-0,13) sahip köpüklerin mekanik tepkilerini karakterize etmek ve plato gerilimi ile gerinim hızı arasındaki ilişkiyi ampirik bir modelle açıklamaktır. Elde edilen bulgular, plato geriliminin bağıl yoğunlukla kuvvetli bir güç yasası ilişkisi sergilediğini, ancak gerinim hızına karşı duyarlılığın 0,045 gibi oldukça düşük bir seviyede kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca yoğunlaşma geriniminin hem bağıl yoğunluktan hem de gerinim hızından neredeyse bağımsız olduğu, sadece dar bir aralıkta değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, uçucu külün ekonomik ve teknik açıdan verimli bir koyulaştırıcı olduğu, üretilen bu köpüklerin enerji sönümlenme uygulamalarında yüksek performans sunabileceği kanıtlanmıştır.

Kishimoto vd. (2014), kapalı hücreli alüminyum köpük-polimer kompozitlerin basma mekanik özelliklerini sistematik olarak incelemeyi ve elde edilen verileri herhangi bir polimer içermeyen saf alüminyum köpüklerle kıyaslamayı amaçlamıştır. Araştırma kapsamında, alüminyum köpük gözeneklerine epoksi ve poliüretan reçinelerin basınç uygulanarak enjekte edildiği titiz bir üretim süreci takip edilmiştir. Mekanik basma testlerinin gerçekleştirilmesinde elektronik universal test cihazı tercih edilmiş; tam alanlı yer değiştirme ve birim şekil değiştirme dağılımlarının hassas ve güvenilir bir biçimde ölçülmesinde ise tahribatsız bir optik teknik olan dijital görüntü korelasyonu yönteminden faydalanılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, basma yükü arttıkça birim şekil değiştirme dalgalanmalarının hızla yükseldiği ve malzemelerin karakteristik olarak homojen olmayan deformasyon özellikleri sergilediği saptanmıştır. Epoksi reçine dolgusunun; malzemenin Young modülü, Poisson oranı ve toplam basma

mukavemeti gibi temel mekanik parametreler üzerindeki iyileştirici etkisinin poliüretan dolguya kıyasla çok daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, alüminyum hücre duvarlarının öncelikli olarak hasar göreceği bölgelerin, gerinim haritaları üzerinden başarıyla tahmin edilebildiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, reçine bazlı polimer katkısının kapalı hücreli alüminyum köpüklerin mekanik performansını önemli ölçüde geliştirdiği açık bir biçimde ortaya konulmuş ve literatüre sunulmuştur.

Islam vd. (2015), kapalı hücreli alüminyum köpüklerin düşük ve yüksek gerinim hızı yüklemeleri altındaki mekanik tepkilerini ve baskın mikroskobik deformasyon mekanizmalarını belirlemeyi amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, hücre geometrisinin yaklaşık eliptik formda olduğunu ve malzemenin Z eksenine doğrultusunda oldukça heterojen bir hücre yapısı sergilediğini göstermiştir. Yüksek gerinim hızlarında malzemenin sertleştiği, hücre çökme davranışının ise yükleme yönü ile sıkıştırma hızına doğrudan bağımlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ortalama hücre boyutlarının yüksek yoğunluklu köpükler için 1,75-2,00 mm, düşük yoğunluklu köpükler için ise 3,75-4,00 mm aralığında değiştiği saptanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmayla hücresel ağdaki mikroyapısal evrim ve morfolojik değişim parametreleri bilimsel olarak ortaya konulmuştur. Bulguların, yüksek enerji soğurma kapasitesi gerektiren darbe ve patlama koruma sistemlerine yönelik optimize edilmiş ve hafifletilmiş malzeme yapılarının mühendislik tasarımlarına temel teşkil etmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, malzemenin gözeneklilik oranının %81 ile %89 arasında değiştiği ve fiziksel özelliklerin performans üzerindeki kritik etkisi vurgulanmıştır.

An vd. (2017), grafen nanopulcuklar ile takviye edilmiş alüminyum köpüklerin iç yapısını ve mekanik özelliklerini kapsamlı bir biçimde incelemiştir. Çalışmanın temel amacı, grafen nanopulcuklar ilavesinin gözenek morfolojisi, gözenek dağılımı ve yarı-statik basınç yükleri altındaki mekanik yanıt üzerindeki etkilerini detaylıca analiz etmektir. Sonuç olarak, grafen nanopulcukların sıvı filmleri stabilize ederek ve gaz difüzyonunu azaltarak köpük stabilitesini artırdığı belirlenmiştir. Seramik takviyeli kırılabilir köpüklerin aksine sünek bir deformasyon davranışı sergileyen bu hibrit malzemenin, enerji emilim verimliliğini iyileştirerek çarpışma güvenliği uygulamaları için ideal bir seçenek sunduğu ve havacılık gibi endüstriyel tasarımlarda kritik rol oynayabileceği sonucuna varılmıştır.

Zhao vd. (2020) tarafından yürütülen bu çalışmada, kapalı hücreli alüminyum köpüklerin üniform ve kademeli yoğunluk dağılımları altında sergilediği yarı-statik ve dinamik mekanik davranışlar ile enerji sönmeme kapasiteleri incelenmiştir. Sonuç olarak, alüminyum köpüklerin dinamik yükler altında gerinim hızı etkisiyle sertleştiği

ve kademeli yoğunluk tasarımlarının darbeye karşı koruyucu yapıların optimum tasarımı için kritik birer referans teşkil ettiği ortaya konulmuştur.

Dineshkumar vd. (2021), alüminyum köpüklerin fiziksel, mekanik ve termal davranışları ile üretim yöntemleri ve uygulama alanlarının sistematik bir incelemesi amaçlamıştır. Özellikle hafiflik, enerji sönümlenme ve yüksek mukavemet özellikleri sebebiyle tercih edilen bu ileri teknoloji malzemelerin endüstriyel potansiyeli ve teknik kısıtları detaylandırılmıştır. Sonuç olarak, alüminyum esaslı hibrit kompozitlerin otomotiv ve havacılık sektörlerinde emisyon azaltımı ve yakıt tasarrufu sağlayan kritik mühendislik malzemeleri olduğu vurgulanmıştır. Yürütülen bu kapsamlı çalışma, alüminyum köpük teknolojisinin gelecekteki tasarım uygulamaları için sunduğu teknik avantajları ve bilimsel gereksinimleri bütüncül bir perspektifle tüm ayrıntılarıyla ortaya koymaktadır.

Madgule vd. (2023), alüminyum metal köpüklerin üretim metodolojileri, fiziksel özellikleri ve endüstriyel uygulama alanları bütünsel bir yaklaşımla incelemiştir. Çalışmanın sonucunda, alüminyum metal köpüklerin devasa potansiyeline rağmen, üretim maliyetlerinin yüksekliği ve hazırlanan numunelerde homojen gözenek boyutu ile gözeneklilik yüzdesi elde etmedeki güçlükler sebebiyle henüz geniş çaplı bir ticari başarıya ulaşamadığı vurgulanmıştır. Sektörel adaptasyonun artırılabilmesi adına, daha ekonomik ve sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesinin bir zorunluluk olduğu sonucuna varılmıştır.

Li vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen bu araştırmada, enerji emilim performansını maksimize etmek amacıyla karbon fiber takviyeli polimer ile gözenekli alüminyum köpüğün organik olarak birleştirildiği özgün bir sargı yapısı tasarlanmıştır. Çalışmanın temel amacını, aksenal basma yükü altında bu hibrit yapının mekanik karakteristiklerini, deformasyon modlarını ve enerji sönümlenme kapasitesini sistematik olarak incelemek oluşturmaktadır. Yöntem çerçevesinde, beş farklı yapı konfigürasyonu üzerinde yarı-statik aksenal basma testleri icra edilmiş; deneysel veriler sonlu elemanlar analiziyle doğrulanarak alüminyum köpük yoğunluğu, fiber dizilim açısı ve tabaka kalınlığı gibi değişkenler üzerinden kapsamlı parametrik incelemeler yürütülmüştür. Sonuç itibarıyla, uygulanan sargı yönteminin malzemeler arasında güçlü bir reçine bağı oluşturduğu, bu sayede fiber kırılması ile köpük deformasyonunun sinerjik bir enerji sönümlenme mekanizması yarattığı saptanmıştır. Bu hibrit yapının, otomotiv sektöründe hafiflik ve çarpışma güvenliği gereksinimlerini karşılamada yüksek potansiyel taşıdığı sonucuna varılmıştır.

Mahto vd. (2025) üstün mukavemet-ağırlık oranına sahip açık hücreli alüminyum metal köpüklerin kıvılcım plazma sinterleme tekniği ve yer tutucu yöntemiyle üretilebilirliği kapsamlı bir biçimde incelemiştir. Elde edilen araştırma bulguları, gözeneklilik seviyesinin yer tutucu oranına paralel olarak %55 ile %76 arasında değiştiğini ve %60 üzerindeki hacimsel oranlarda birbirine tam bağlı homojen gözenek yapısının oluştuğunu göstermiştir. Mekanik testlerde, %70 NaCl içeren numunelerin en yüksek enerji emme kapasitesini sunduğu, fakat yer tutucu miktarı arttıkça plato gerilmesinin 123 MPa değerinden 8 MPa seviyesine kadar gerilediği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kıvılcım plazma sinterleme tekniğinin düşük sıcaklıkta lokalize ısıtma imkânı sağlaması sayesinde mikroyapısal tane büyümesini engellediği ve geleneksel döküm yöntemlerine kıyasla daha üstün mekanik dayanım sunduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada, bu yöntemin hedeflenen gözenek özelliklerine sahip alüminyum köpüklerin imalatında etkili bir alternatif olduğu saptanmıştır.

Özetle alüminyum köpük malzemeler üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, bu malzemelerin gözenek yapısı, üretim parametreleri ve enerji sönümleme kapasitesi gibi temel mekanik özelliklerinin belirlenmesine odaklanmaktadır. Ancak literatürdeki çalışmaların önemli bir bölümü malzeme ölçeğinde kalmakta olup, alüminyum köpüğün yapısal sistemler içerisindeki davranışı ve özellikle sismik yükler altında global sistem performansına etkisi yeterince araştırılmamıştır. Bu durum, alüminyum köpüğün yalnızca hafif ve enerji sönümleyici bir malzeme olarak değil, aynı zamanda yapısal davranışı yönlendiren aktif bir bileşen olarak değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu tez çalışması, bu boşluğu gidermeyi amaçlayarak alüminyum köpüğün yapı sistemi düzeyindeki sismik performans katkısını bütüncül bir şekilde incelemektedir.

1.1.2. Alüminyum Köpük Sandviç Panellerin Yapısal Davranışı

Alüminyum köpük, özellikle dinamik yükleme koşulları altında büyük miktarda enerjiyi emme yeteneği, dayanıklılığı ve hafifliği nedeniyle literatürde önemli bir ilgi görmüştür. Bu metalik köpük, metalik malzemelerin doğal mukavemetini ve sünekliliğini, hücresel bir yapının düşük yoğunluğu ve yüksek enerji dağıtım kapasitesiyle birleştirerek, mühendislik uygulamaları için son derece avantajlı bir malzeme haline getirir. Alüminyum köpük, genellikle ince ve sert yüzey tabakalarının hafif bir köpük çekirdeğe bağlandığı sandviç yapılarda çekirdek malzeme olarak kullanılır ve böylece üstün sertlik-ağırlık ve mukavemet-ağırlık oranları elde edilir. Bu tür konfigürasyonlar, gelişmiş eğilme sertliği, iyileştirilmiş darbe direnci ve etkili

titreşim sönümlenme performansı sağlar. Bu avantajlı mekanik özellikler sayesinde, alüminyum köpük ve alüminyum köpük sandviç paneller, havacılık, otomotiv, nükleer ve inşaat mühendisliği uygulamaları da dahil olmak üzere çeşitli mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde bildirilen ilgili çalışmaların kronolojik bir özeti aşağıda sunulmuştur.

Vaidya vd. (2006), çalışmalarında lamine yüzey tabakalarından ve alüminyum köpük çekirdekten oluşan kompozit sandviç plakaların titreşim tepkisi de serbest-serbest sınır koşulu altında incelenmiştir. Kompozit sandviç plakalar S2-cam, E-cam, aramid veya karbon fiber takviyeli vinil ester reçinesinden oluşan yüzey tabakaları ile iki farklı kalınlık ve yoğunluktaki alüminyum köpükte vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Titreşim testleri, düşük hızlı darbe testleri uygulanmış sandviç plakalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Darbeyle hasar görmüş bir numunenin %18'e kadar doğal bir frekansta azalma sağlamıştır. Titreşim tepkisi, sandviç plakaya çarpmanın bir fonksiyonu olarak bildirilmiştir. Ancak gerçekleştirilen bu çalışmada sandviç kompozitlerin döşeme olarak kullanımının sismik etkiler altındaki çelik çerçeve birleşimlerine oluşturacağı etki herhangi bir şekilde incelenmemiştir.

Banhart ve Seeliger (2008) tarafından hazırlanan bu çalışmada, alüminyum köpük sandviç panellerin üretimi, metalurjik özellikleri ve güncel uygulama potansiyelleri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Araştırmanın temel amacı, bu ileri teknoloji ürünü kompozit yapıların imalat süreçlerini karşılaştırmak ve modern hafif yapı mühendisliği disiplini için sundukları teknik avantajları literatür verileri ışığında kapsamlıca ortaya koymaktır. Elde edilen bulgular sonucunda, sandviç yapıların, geleneksel yoğun alüminyum levhalara kıyasla çok daha yüksek bir sertlik-ağırlık oranına sahip olduğu, 3B karmaşık geometrilerde üretilebildiği ve Ariane 5 roketi gibi sistemlerde başarıyla kullanılabilirdiği gözlemlenmiştir.

Crupi vd. (2013), alüminyum köpük ve petek sandviçlerin statik ve düşük hızlı dinamik tepkilerini etkileyen parametreler ile bunların enerji soğurma kapasitelerinin deneysel ve teorik olarak karşılaştırılmasını amaçlamıştır. Bu amaçla iki farklı kapalı hücreli alüminyum köpüğe sahip ticari alüminyum köpük sandviç panel ve iki farklı alüminyum petek sandviç tipolojisi incelenmiştir. Yarı-statik girinti testleri farklı şekle sahip girintiler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve iz şeklinin etkisi araştırılmıştır. Girinti direncinin, girinti geometrisine, hücre çapına ve kabuk - çekirdek yapışmasına bağlı olduğu görülmüştür. Statik girinti ve eğilme testleri, bir servo-hidrolik yük makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Statik eğilme testleri, aynı nominal büyüklükteki sandviç paneller üzerinde farklı mesnet açıklığı mesafelerinde gerçekleştirilmiş olup

çeşitli göçme modları üretilmiş ve gözlemlenen göçme modlarını açıklamak için basitleştirilmiş teorik modeller uygulanmıştır. Eğilme yüklemesi altında enerji dağıtma kapasitesi, sırasıyla çökme mekanizmasından ve ayrıca köpük ve petek paneller için yüz-çekirdek bağlantısından ve hücre boyutundan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Farklı alüminyum sandviç tipolojilerinin darbe tepkisi, enerji dengesi modeline dayalı olarak deneysel testler ve analitik yaklaşımla incelenmiş ve model parametreleri, darbeli panellerin tomografik analizleri ile elde edilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri, çoklu darbeleri ortadan kaldırabilen bir düşürme testi makinesi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Petek sandviçlerin çökmesi burkulma nedeniyle meydana gelmiştir ve hücre boyutu burkulma üzerinde büyük etkiye sahiptir. Alüminyum köpük sandviçler ise köpük kırılması gerçekleştiği çökmüştür ve bunların enerji yutma kapasiteleri köpük kalitesine bağlı olduğu görülmüştür.

Omar vd. (2015), çalışmalarında, karbon kumaş yüz tabakaları içeren bir Al alaşımı A356-alümina parçacık sözdizimsel köpük çekirdekli metal matris sandviç kompoziti deneysel olarak incelemişlerdir. Yarı statik sıkıştırma koşulları altında, numuneler düz ve kenar yönlerinde test edilmiş olup basınç dayanımı, akma mukavemeti ve plato gerilimi düz yönde daha yüksektir. Ayrıca, sandviç kompozitler için her iki yönde de tek başına köpük çekirdeğe göre daha yüksek bir özgül basınç dayanımı ve özgül akma dayanımı göstermiştir. İnceleme üzerine, sözdizimsel köpük çekirdekli metal matrisli sandviç, karşılaştırılabilir yoğunluk seviyelerinde enerji emilimi ve sıkıştırma mukavemeti açısından sözdizimsel köpüklerin çoğundan daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Lamanna vd. (2017), çalışmalarında, sözdizimsel köpük çekirdekli sandviç yapıların dinamik mekanik özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, alümina partikülleri ile doldurulmuş A356 alaşımından oluşan köpük çekirdek ve bir veya 0°/90° yöneliminde üç katmanlı karbon kumaş levhalı sandviç kullanılmıştır. Sandviç kırılgan rezonans frekansını belirlemek için serbest titreşim yöntemi kullanılarak dinamik karakterizasyon yapılmıştır. Dinamik modül, depolama modülü, kayıp modülü ve sönüm oranı test sonuçlarından hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, teorik bir modelin tahminlerini doğrulamak için kullanıldı. Bir ve üç katmanlı dokuma sandviçlerin Young modülü için deneysel değerleri sırasıyla $32,57 \pm 2,15$ ve $37,33 \pm 1,12$ GPa olarak ölçülmüştür. Sönüm oranları, tek katmanlı karbon kumaş sandviç için $0,0052 \pm 0,0036$ ve üç katmanlı sandviç için $0,0046 \pm 0,0036$ olarak elde edilmiştir.

Ma vd. (2018), zaman ortalamalı elektronik benek deseni girişimi yöntemi kullanılarak titreşim ölçümünde benek saçak deseninin temsilleri hakkında kısa bir inceleme sunmuşlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile kapalı hücreli bir alüminyum köpük konsol kirişin titreşim tepkisini SOLID186 elemanı kullanılarak ANSYS paket programı ile modellenmiştir. İlk yedi dereceli sapma titreşim modu şekilleri ve ilk dört sıra düzlem içi titreşim modu şekillerinin iki bileşeni elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar, elektronik benek deseni girişimi yöntemiyle elde edilen titreşim modu şekilleri ile iyi bir uyum içindedir.

Endut vd. (2018) tarafından yürütülen bu bilimsel çalışmada, alüminyum köpük sandviç panellerin basma altındaki mekanik davranışları ve enerji sönümlenme kapasiteleri sistematik bir çerçevede incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, otomotiv endüstrisinde güvenlik ve performans kriterlerini iyileştirmek üzere, bu hafif malzemelerin darbe yönetimi ve enerji emilim karakteristiklerini analiz ederek güvenilir deneysel veriler sunmaktır. Çalışmanın yöntem bölümünde, alüminyum köpük çekirdeklerin farklı kalınlıktaki alüminyum plakalarla epoksi reçine aracılığıyla birleştirilmesiyle sandviç yapılar imal edilmiştir. Taguchi deney tasarımı prensiplerine uygun olarak; 6,35 ve 10 mm çekirdek kalınlıkları ile 0,4, 0,6 ve 0,8 mm plaka kalınlıklarından oluşan altı farklı kombinasyon test edilmiştir. Basma testleri, 1,5 mm/dakika sabit hızda INSTRON cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş; mekanik özellikler gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerinden matematiksel formüllerle hesaplanmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular, hem çekirdek hem de yüzey tabakası kalınlığındaki artışın enerji emilim miktarını 12,74 J'den 64,42 J seviyesine kadar yükselttiğini ortaya koymuştur. En yüksek enerji sönümlenme kapasitesi, 10 mm çekirdek ve 0,8 mm plaka kalınlığına sahip numunede kaydedilmiştir. Sonuç olarak, bileşen kalınlıklarının artırılmasının sandviç panellerin darbe enerjisini soğurma yeteneğini doğrudan ve pozitif yönde etkilediği, bu yapıların otomotiv uygulamalarında kritik bir potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir.

Sun vd. (2018), çalışmasında, homojen ve aşamalı derecelendirilmiş köpük çekirdekli sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışı, ağırlık düşürme darbe testleri ve sonlu eleman simülasyonları aracılığıyla incelemiştir. Sandviç numuneler monolitik derecelendirilmemiş ve üç katmanlı derecelendirilmiş alüminyum köpük çekirdeklerden yapılmıştır ve derecelendirilmiş köpükler için dört yoğunluk gradyanı dikkate alınmıştır. Ayrıca derecelendirilmemiş maçalara sahip sandviç numuneler üzerinde üç farklı ön yüzey malzemesi test edilmiştir. Kademeli köpük çekirdeklerin yoğunluk gradyanının deformasyon ve hasar davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip

olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, homojen bir köpük çekirdek ile farklı koruyucu yüzey malzemeleri denendi ve sonuçlar, bir sandviç panelin darbe tepkisine ön yüzey kaplamasının hâkim olduğunu göstermiştir. Aynı malzemelere sahip ön yüz levhaları, arka yüz levhası malzemelerinden bağımsız olarak aynı şekilde deforme olmuş ve başarısız olmuştur. Ayrıca, penetrasyon mekanizmaları ve sandviç bileşenler tarafından emilen enerjiler hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlamak için sonlu eleman simülasyonları yapılmıştır. LS-DYNA 971 paket programı kullanılarak kademeli köpük çekirdeklerin farklı gradyan varyasyonları, oluşturucu katmanların yoğunlukları ve malzeme özellikleri değiştirilerek modellenmiştir. Ayrıca, sandviç panellerin darbe performansı, ön-arka kalınlık oranı artırılarak verimli bir şekilde iyileştirilebilirken, her iki yüzey tabakasının toplam kalınlığı aynı kalmıştır.

Guo vd. (2019), bu çalışmada, tekrarlanan darbe yüklemelerine maruz kalan alüminyum köpük sandviç levhanın mekanik davranışı incelenmiştir. İlk olarak, enerji birikiminin etkisini hesaba katan ABAQUS/Explicit kullanılarak sayısal simülasyonda alüminyum köpük sandviç levhanın tekrarlanan etkilerini elde etme yöntemi önerilmiştir. Sonlu eleman modelinin doğruluğu, tekrarlanan darbe testlerinden elde edilen dinamik tepkiler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, tekrarlanan darbeler sırasında alüminyum köpük sandviç levhanın yüklenmesi ve boşaltılması aşamaları analiz edilmiş ve geri tepme olgusu ile tekrarlanan darbeler altında enerji soğurma mekanizması incelenmiştir. Sayısal simülasyonlarda, alüminyum köpük sandviç levha, 90 mm×90 mm×15 mm boyutlarında, sabit sınır koşullarını simüle etmek için üst ve alt çevresel çevresinde kenetlenmiş dikdörtgen bir sandviç plaka olarak modellenmiş ve tekrarlanan çarpma sürecini elde etmek için çok adımlı analiz uygulanmıştır. Köpük çekirdekler, ezilebilir köpük özelliğinde modellenip lineer azaltılmış entegrasyonlu katı elemanlar (C3DR8) ile birbirine geçirilmiştir. Ön levhalar lineer azaltılmış entegrasyon kabuk elemanları (S4R) kullanılmıştır. Çekiç, R3D4 elemanı kullanılarak rijit bir yarı küre olarak basitleştirilmiştir. Sonuçlar, alüminyum köpük sandviç levhanın elastik deformasyon enerjisinin darbe sayısı ile arttığını, ancak artışın azaldığını; plastik deformasyon enerjisinin ise darbe sayısı ile azaldığını göstermektedir.

Kösedag ve Ekici (2021), köpük çekirdekli alüminyum yüzey tabakasına sahip sandviç yapıların serbest titreşim analizleri sayısal olarak incelenmiştir. Sandviç yapının doğal frekansı ve mod şekillerinin farklı kalınlıkta yüzey ve çekirdek malzemesi kullanımı ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu bağlamda Al yüzey katmanları için iki farklı kalınlık (1 ve 2 mm) ve köpük çekirdek yapısı için iki farklı kalınlık (10 ve 20 mm) kombinasyonunda SS1, SS2 ve SS3 kodlarına sahip üç farklı alüminyum köpük

çekirdekli sandviç yapısı modellenmiştir. Yapıştırıcı için sabit bir kalınlık (0,25 mm) kullanılmıştır. Alüminyum köpük çekirdekli sandviç yapıların serbest titreşim analizi ABAQUS/Standard sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alüminyum yüzey tabakası kalınlığındaki artış genel olarak doğal frekansta bir düşüşe sebep olsa da bu düşüş ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak çekirdek kalınlığındaki artış sandviç yapının doğal frekansında dikkate değer bir artış meydana getirmiştir.

Zhao vd. (2021), alüminyum köpük sandviç yapıların mekanik ve dinamik özelliklerini, hasar mekanizmaları ile enerji yutmayeneklerini araştırmak için ağırlık düşürme darbe testleri ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Dört farklı tipteki alüminyum köpük sandviç numuneler için farklı düşük hızlı darbe enerjileri altında bir dizi ağırlık düşürme deneyi yapılmıştır. Ayrıca ABAQUS/Explicit yazılımı tarafından düşük hızlı darbe tepkisini simüle etmek için karşılık gelen sayısal model oluşturuldu ve simülasyon hesaplamasının güvenilirliği, analiz ve deney verileriyle karşılaştırılarak doğrulandı. Ön yüzey kalınlığının, çekirdek yüksekliğinin ve yoğunluğun sandviç yapılar için enerji soğurma performansı üzerindeki etkileri, enerji soğurma göstergelerine göre kantitatif olarak değerlendirilmiştir. İlaveten sandviç yapıların deformasyon ve hasar modları tam olarak incelenmiştir. Araştırmalar, kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin, çeşitli düşük hızlı darbe enerjilerinden muzdarip alüminyum köpük sandviç yapılar için üç tipik model sergilediğini göstermiştir. Çekirdek yüksekliği ve yoğunluğu, sandviç yapının darbeye karşı direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve darbe enerjisi ile enerji soğurma göstergelerinin kombinasyonu, sandviç yapıların optimal tasarımında hayati bir rol oynadığı sonuçlarına varılmıştır.

Latour vd. (2021), çok katlı çelik binalardaki ana döşemeler gibi inşaat uygulamalarına yönelik modern kuru yapılarda bu tür sistemleri tanıtmak amacıyla çelik sac ve alüminyuma köpük ile oluşturulmuş sandviç panellerin eğilme davranışını araştırmak için deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 13mm ve 25 mm olmak üzere iki farklı kalınlığa sahip çekirdek ile Geolite, Sikadur ve Aralite adındaki üç farklı türdeki reçineli sandviç paneller oluşturulmuştur. Modellenen 7 adet sandviçin sonlu elemanlar analizleri C3D8R elemanı kullanılarak ABAQUS/Standard sonlu elemanlar paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, panellerinin mekanik tepkisini etkileyen ana geometrik ve mekanik parametrelerin etkisini araştırmak ve bu tip panellerin çelik binalarda döşeme olarak uygulanmasının fizibilitesini değerlendirmek için parametrik sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda test edilen daha ince alüminyum köpük panellerin, hasarlı bölgelere karşı daha kalın olanlara göre daha fazla hassasiyet sergilediği görülmüştür. Dolayısıyla

panellerinin performansını artırmak için daha kalın panellerin kullanılmasını önerilmiştir. Köpük sandviç panellerin sertliğini, akmasını ve plastik mukavemetini tahmin etmek için kullanılan basit denklemler, deneysel ve sayısal verilerle tatmin edici bir uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır. Panelin çok katlı çelik yapıların tabliyesi olarak uygulanması, tipik sabit/hareketli yükleri göz önüne alındığında, çelik cidar ve alüminyum köpük kalınlıkları arasındaki orana bağlı olarak açıklık/derinlik oranı 40 ile 80 arasında değişen döşemelerin kullanılabileceğini göstermektedir. Ek olarak, sayısal çalışma, dikkate alınan alüminyum köpüğün tipolojisi için 510 kg/m^3 ila 300 kg/m^3 aralığındaki köpük yoğunluğunun, panelin eğilme direncinde hafif bir azalmaya yol açtığını ve sertlik ve sünekliği de ihmal edilebilir bir şekilde etkilediğini göstermiştir. Çelik binalarda döşeme için sandviç panel kullanımının yapısal ağırlıkta yaklaşık %20'lik bir azalmaya yol açabileceğini böylece hem malzeme tüketimi ve yapısal maliyetler açısından daha verimli çözümlerin elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Genel olarak, elde edilen sonuçların panellerin çok katlı çelik yapıların tabliyesi olarak uygulanması yönünde cesaret verici olduğu ifade edilmiştir.

Lu ve Zhang (2022), tarafından yürütülen bu akademik çalışmada, alüminyum köpük sandviç panellerin, silindirik kabukların ve sığ kabuk yapıların darbe yükleri altındaki mekanik tepkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Toplam kalınlık sabit tutularak tasarlanan çift katmanlı yapıların, ara panelin sağladığı ilave rijitlik sayesinde temas kuvvetini ve hasarı azalttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, sandviç yapıların geometrik formunun eğrisel hale getirilmesinin ve katman sayısının artırılmasının, havacılık ve otomotiv gibi koruyucu yapı gerektiren endüstrilerde darbe direncini optimize etmek adına en etkili tasarım stratejileri olduğu vurgulanmıştır.

Huang vd. (2023) tarafından kapsamlı bu akademik özet, toz metalürjisi haddeleme yöntemiyle metalürjik bağa sahip alüminyum köpüklü paneller üretilmiş ve çekirdek mukavemetli üç noktalı eğilme performansı üzerindeki bağlantıların sistematik bir şekilde birleşmesi. Deney aşamasında, köpürme sıcaklığı ve süresi hassas şekilde manipüle edilerek farklı dağılımlar ve bölümlerde numuneler hazırlanır; mekanik stabilite ve özelliklerin belirlenmesi amacıyla yarı-statik eğilme, basma ve mikro-sertlik testleri. Yapılan analizler sonucunda, çekirdek yoğunluğundaki artışın eğilme dayanımlarını ve maksimum hasarın belirgin şekilde arttığı, ancak toplam enerji kaybı dağılımının ters orantılı bir biçimde düşürüldüğü. Düşük aralıklı örneklerde panele girmetisi ve çekirdek kopma hasarları gözlemlenirken, yüksek yoğunluklu güçlü panellerde panel akması ve ani panel kırılmalarının meydana geldiği tespit edilmiştir.

Yan vd. (2025) tarafından kalıcı olarak gerçekleştirilebilen, dağıtılan gradyanlı alüminyum köpük ve dayanıklı yapılarının yarı-statik ve dinamik yüklemeler altında mekanik performans, deformasyon modları ve yapısal olarak sistematik olarak. Araştırmanın temel amacı, farklı dağılımlarının ve yüzey levhalarının yapısal enerji emilim kapasitesinin üzerindeki varlığının belirlenmesidir. Deneysel yöntemde, çeşitli yoğunluklardaki köpük katmanları kullanılarak basma ve üç noktalı eğilme testleri uygulanmış; Elde edilen veriler ANSYS/LS-DYNA yazılımı ile kapsamlı dinamik darbe simülasyonlarıyla desteklenmiştir. Analiz sonuçları elde edilen bulgular, pozitif dağılım gradyanına sahip yoğunluk gradyanlı alüminyum köpük sandviç yapılarının, homojen veya negatif gradyanlı modellere kıyasla üç kat daha fazla enerji söndürmeye sahip olduğu gösterilmiştir. Yüzey levhasının değiştirilmesiyle hasar görmesinin plastik mafsallı oluşumuna dönüştürülmesi ve esneklik yer değiştirme kapasitesinin genişlediği belirlenmiştir. Sonuç olarak, pozitif kademeli tasarımların düşük hızlı darbelerde %97 oranında enerji emilimi verimliliği ve güvenlik açısından kritik mühendislik uygulamaları üstün koruma potansiyeli taşıdığı tespit edilmiştir.

Sun vd. (2026), kısa aramid fiber epoksi arayüzey sertleştirme tekniğinin farklı çekirdek malzemelerine sahip karbon fiber sandviç panellerin darbe direnci üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemiştir. ABAQUS ortamında geliştirilen sonlu elemanlar modelleriyle tabaka diziliminin darbe performansına etkisi detaylıca analiz edilmiştir.

Sonuç olarak sandviç kompozit paneller üzerine yapılan çalışmalar genellikle eğilme rijitliği, darbe dayanımı ve enerji sönmeme kapasitesi gibi eleman bazlı mekanik davranışlara odaklanmaktadır. Ancak literatürde bu sistemlerin çoğunlukla bağımsız eleman olarak ele alındığı, çelik çerçeve sistemlerle etkileşimi ve özellikle sismik yükler altında yapı sistemi davranışına katkısının yeterince incelenmediği görülmektedir. Bu nedenle sandviç kompozitlerin yalnızca yerel davranışı değil, global yapı performansına etkisinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması, sandviç kompozit döşemelerin çelik çerçeve sistemlerin sismik davranışına katkısını sayısal olarak inceleyerek bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

1.1.3. Alüminyum Köpük Dolgulu Tübüler Elemanlar

Alüminyum köpük, özellikle dinamik yükleme koşulları altında yüksek miktarda enerjii absorbe edebilme kapasitesi, dayanıklılığı ve hafifliği nedeniyle literatürde önemli ölçüde ilgi görmektedir. Bu metalik köpük, metallerin sahip olduğu dayanım ve süneklik özelliklerini, hücresel bir yapının düşük yoğunluk ve yüksek enerji sönmeme

kapasitesi ile birleştirerek mühendislik uygulamaları açısından oldukça avantajlı bir malzeme haline gelmektedir. Son yıllarda alüminyum köpük, tübüler yapısal elemanların mekanik performansını artırmak amacıyla dolgu malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Tüp ile köpük çekirdeği arasındaki etkileşim, elemanların yük taşıma kapasitesini, enerji yutma yeteneğini ve genel stabilitesini önemli lde artırmaktadır. Özellikle köpük dolgulu tübüler elemanlar, boş tüplere kıyasla darbe, basınç, titreşim ve patlama yükleri altında daha üstün performans sergilemektedir. Bu avantajları sayesinde alüminyum köpük dolgulu tübüler elemanlar; havacılık, otomotiv, nükleer ve inşaat mühendisliği gibi çeşitli mühendislik alanlarında giderek artan şekilde kullanılmaktadır. Literatürde yer alan ilgili çalışmaların kronolojik bir zeti aşağıda sunulmaktadır.

Santosa ve Wierzbicki (1999) tarafından yrtlen bu araştırmada, alüminyum köpük ve bal peteği gibi düşük yoğunluklu metal dolguların ince cidarlı prizmatik kolonların eğilme çökme davranışı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, metal dolgu çekirdeğinin çökmeyi geciktirerek aynı dönme açısında eğilme direncini artırdığını göstermiştir. Sayısal verilere dayanılarak çökme direnci ve enerji snlmesini ngren çeşitli basitleştirilmiş matematiksel formüller türetilmiştir. Sonuç olarak, birim kütle başına düşen enerji emilimi açısından metal dolgu kullanımının, kolon cidarını kalınlaştırma yönteminden çok daha verimli ve tercih edilebilir olduğu belirlenmiştir. Alüminyum dolguların, crashworthiness uygulamalarında kritik bölgelere yerleştirilerek önemli düzeyde ağırlık tasarrufu ve yapısal güvenlik sağladığı ortaya konulmuştur.

Seitzberger vd. (2000) tarafından gerçekleştirilen bu araştırmada, alüminyum köpükle doldurulmuş elik kolonların yarı-statik eksenel ezilme davranışları ile enerji emme performansları sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı kesit geometrilerine ve dolgu düzenlemelerine sahip tp yapıların kütle verimliliği ve enerji snleme kapasitelerini belirlemektir. Araştırma sonucunda, alüminyum köpüğün enerji emici elemanlar için etkili bir takviye malzemesi olduğu, ancak artan dolgu yoğunluğunun strok verimliliğini azalttığı vurgulanmıştır. Optimum snleme performansı için $0,3-0,6 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk aralığındaki köpüklerin kullanımı önerilmiştir.

Hanssen vd. (2000) tarafından, alüminyum köpük dolgulu kare kesitli AA6060 alüminyum ekstrzyonların yarı statik ve dinamik eksenel yükleme altındaki ezilme davranışları sistematik olarak incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı; köpük yoğunluğu, duvar kalınlığı, malzeme mukavemeti ve yükleme koşullarının enerji emilim kapasitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde analiz etmektir. Uygulanan

deneysel yöntem çerçevesinde; üç farklı duvar kalınlığı, iki farklı malzeme sertliği ve dört farklı köpük yoğunluğu kombinasyonundan oluşan toplam 144 adet test gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler, yerel deformasyon modlarını istikrarlı şekilde başlatmak amacıyla özel bir tetikleme mekanizmasıyla donatılmış ve dinamik çarpışma süreçleri titizlikle takip edilmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda, boş ekstrüzyon direnci, köpüğün tek eksenli mukavemeti ve etkileşim etkisini içeren üç parçalı bir toplamsal tasarım modeli geliştirilmiştir. Önerilen bu modelin, ortalama ezilme kuvvetlerini çoğu test örneği için %10 doğruluk payıyla tahmin edebildiği ve enerji sönmüleyici sistemlerin gelecekteki mühendislik tasarımlarında son derece güvenilir bir temel sunduğu sonucuna varılmıştır.

Hanssen vd. (2001) tarafından, alüminyum köpük dolgulu ince cidarlı kesitlerin eksenel basma yükü altındaki ezilme davranışı kapsamlı deneysel ve sayısal çalışmalar aracılığıyla sistematik bir biçimde incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı; dolgulu kolonların anlık ezilme kuvveti, ortalama ezilme kuvveti ve plastik deformasyon modlarına dair geliştirilen sayısal tahminlerin mevcut deneysel veriler kullanılarak doğrulanmasıdır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, sayısal simülasyonlara dayalı geliştirilen basit kapalı formdaki analitik çözümün, geniş bir geometri ve malzeme yelpazesinde deneysel verilerle %8'lik bir hata payı dâhilinde yüksek uyum sağladığı görülmüştür. Sayısal modelleme yaklaşımının, köpük dolgulu çarpışma bileşenlerinin tasarımında gerçek imalat ve tahribatlı testler öncesinde son derece güvenilir, ekonomik ve etkin bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Hanssen vd. (2001) çalışmasında, alüminyum köpük dolgulu kare alüminyum kolonların eksenel sıkıştırma altındaki enerji emilim performansını optimize etmek amacıyla minimum kütle tasarımı hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular, köpük dolgulu kolonların geleneksel dolgusuz tasarımlara kıyasla daha küçük kesit boyutları ile daha az ağırlık sergilediğini ortaya koymuştur. Köpük dolgunun, etkileşim etkisi sayesinde ezilme kuvveti verimliliğini artırarak enerji emilim kapasitesini yükselttiği belirlenmiştir.

Börvik vd. (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, eksenel ve eğik yarı-statik yüklemeye maruz bırakılan boş ve alüminyum köpük dolgulu dairesel tüplerin yapısal tepkileri sistematik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, yükleme açısının yapısal çarpışma güvenliği üzerindeki belirleyici etkisi doğrulanmış ve sayısal modellerin deneysel bulguları öngörmede genel olarak başarılı olduğu teyit edilmiştir. Bu çalışma, hafif malzemelerin enerji emici yapılar olarak optimizasyonu için temel bir referans niteliği taşıdığı vurgulanarak tamamlanmıştır.

Reyes vd. (2004), yarı-statik eğik yüklemeye maruz bırakılan boş ve alüminyum köpük dolgulu kare kesitli AA6060 alüminyum kolonların mekanik davranışları incelenmiştir. Köpük dolgusunun deformasyon modlarını yerelleştirdiği belirlenmiş; ancak kütle verimliliği bakımından kalın cidarlı boş kolonların, benzer ağırlıktaki tam dolgulu kolonlara kıyasla enerji emiliminde genellikle daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır.

Kobashi vd. (2006), otomotiv parçalarında kullanılmak üzere içi boş bileşenlerin gözenekli alüminyum ile doldurulması sırasındaki köpürme ve dolgu davranışlarının sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, homojen bir gözenek yapısı elde edilmesi ve süzülme etkisinin minimize edilmesi için öncül malzemelerin yüksek en-boy oranına sahip olması ve üretim sıcaklığının uygun bir aralıkta tutulması gerektiği vurgulanmıştır.

Yan vd. (2007), otomotiv mühendisliği uygulamalarında çarpışma güvenliğini artırmak amacıyla alüminyum köpük dolgulu dairesel tüplerin ezilme davranışları ve enerji emilim performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Köpük dolgulu tüplerin enerji emilim kapasitesinin boş tüplere göre önemli ölçüde daha yüksek olduğu ve toplam ezilme kuvvetinin bileşenlerin bireysel toplamından daha fazla olduğu açıkça ortaya konmuştur. Parametrik çalışmalar vasıtasıyla, tüp kalınlığı ve uzunluğu gibi geometrik değişkenlerin enerji verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığı, sürtünme katsayısının ise toplam performans üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı saptanmıştır.

Zarei ve Kröger (2008), araç çarpışma kutusu uygulamaları için köpük dolgulu alüminyum tüplerin optimizasyonu hedeflenmiştir. Optimize edilmiş köpük dolgulu bir tüpün, en uygun boş tüple aynı miktar enerjiiyi sönmölerken %19,4 oranında daha hafif olduğu belirlenmiştir.

Zhang vd. (2010) tarafından yürütölen bu araştırmada, alüminyum köpük dolgulu kare tüplerin boyuna ve enine eksenlerdeki mekanik davranışları ile enerji sönmöleme yetenekleri yarı-statik yükleme koşullarında sistemli bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuç olarak, alüminyum köpük dolgusunun özellikle boyuna ekseninde burkulma karakteristiklerini iyileştirdiği, ağırlık azaltma ve güvenlik artışı gerektiren otomotiv ile havacılık endüstrileri için bu yapıların yüksek kapasiteli darbe emiciler olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Guo ve Yu (2011), kapalı hücreli alüminyum köpük dolgulu çift silindirik tüplerin dinamik üç noktalı eğilme davranışı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Köpük dolgulu çift tüp yapısının, tekli tüplere göre çok daha yüksek özgül enerji emilim

verimliliğine ve daha stabil bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Darbe anındaki deformasyon modunun statik yükleme durumundan farklılaştığı ve dinamik koşullarda hata deplasmanının artmasıyla daha fazla enerji sönmüldüğü saptanmıştır. Ayrıca dış tüp kalınlığının ve iç tüp geometrisinin yapısal tepkiyi doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir.

Li vd. (2012) tarafından yürütülen bu çalışmada, eğik yükleme altındaki boş, alüminyum köpük dolgulu tekli ve çiftli dairesel tüplerin deformasyon ve enerji sönmüleme karakteristikleri incelenmiştir. Köpük dolgunun, tüplerin deformasyon modunu elmas modundan aksel simetrik moda kaydırduğı ve çiftli tüp yapılarının, tekli veya boş tüplere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek ezilme kuvveti ile spesifik enerji sönmüleme kapasitesine sahip olduğı saptanmıştır. Enerji sönmüleme etkinlik faktörü kullanılarak yapılan analizlerde köpük dolgulu yapıların boş tüplerden daha verimli olduğı doğrulanmıştır.

Shojaeifard vd. (2012) tarafından yürütülen bu bilimsel araştırmada, farklı enine kesitlere sahip boş ve alüminyum köpük dolgulu ince cidarlı tüplerin eğilme yükü altındaki davranışları ile enerji sönmüleme kapasiteleri sistematik olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, otomotiv endüstrisinde güvenliği artırmak adına kesit geometrisi, malzeme özellikleri ve et kalınlığının enerji emilimi üzerindeki kritik etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Sonuç olarak, eliptik geometrinin kare ve dairesel formlara kıyasla eğilme direnci açısından en üstün performansı sergilediğı görülmüştür. Bu bağlamda, hafif alüminyum dolgulu yapıların araç güvenliği ve yakıt tasarrufu için optimize edilmiş verimli çözümler sunduğı ortaya konulmuştur.

Gunawan vd. (2013) tarafından yürütülen bu bilimsel çalışmada, dinamik aksel darbe yüklemesi altındaki kare kesitli alüminyum kolonların ezilme davranışları üzerinde alüminyum köpük dolgusunun etkileri sistematik bir şekilde incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, farklı konfigürasyonlardaki ince duvarlı yapıların darbe altındaki enerji emilim kapasitelerinin köpük takviyesiyle nasıl değıştüğünü ve optimize edildiğini belirlemektir. Çalışmanın sonucunda, metal köpük dolgusunun hafif tasarımlarda pasif güvenlik ve enerji emilimi için son derece verimli bir yöntem olduğı vurgulanmış ve deneysel verilerin doğruluğı sonlu elemanlar analiz modelleriyle teyit edilmiştir.

Rajak vd. (2014) tarafından yürütülen bu çalışmada, kare kesitli yumuşak çelik profillerin alüminyum köpükle doldurulmasıyla elde edilen hibrit yapıların mekanik davranışları ve enerji sönmüleme karakteristikleri incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde düşük ağırlık ile yüksek enerji

emilimi sağlayan verimli yapısal bileşenlerin performansının sistematik olarak değerlendirilmesidir. Sonuç olarak, alüminyum köpük dolgusunun enerji sönümlene kapasitesini boş profillere kıyasla %33,45 oranında artırdığı saptanmıştır. Bu yapıların, çarpışma güvenliği ve hafif tasarım gerektiren mühendislik uygulamalarında kullanımının oldukça avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Duarte vd. (2014) tarafından yürütölen bu çalışmada, otomotiv gövde bileşenlerinde hafif yapı tasarımı ve çarpışma dayanımı için kritik öneme sahip ince duvarlı alüminyum tüplerin kapalı hücreli alüminyum köpükle güçlendirilmesi ele alınmıştır. Sonuç olarak, ince duvarlı tüplerin alüminyum köpükle doldurulmasının yapısal sertliği ve pasif güvenliği artırmada oldukça etkili bir strateji olduğu, ancak ağırlık verimliliği ve süneklik dengesinin korunması için dolgu yoğunluğu ile yapısal kusurların optimize edilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Audyshe vd. (2014) tarafından yürütölen bu çalışmada, eksenel çekme yükü altındaki alüminyum köpük dolgulu paslanmaz çelik örgü tüplerin mekanik davranışları ve enerji sönümlene özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, yapının toplam enerji sönümlene kapasitesinin 4,34 ile 10,81 kJ arasında değiştığı ve düşük yoğunluklu dolguların daha üniform bir deformasyon sağlayarak enerji emilim verimliliğini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, köpük ve tüp arasındaki etkileşimin çekirdek yoğunluğuna göre kritik değişimler sergilediği sonucuna varılmıştır.

Audyshe vd. (2014) tarafından enine yüklemeye maruz bırakılan alüminyum köpük dolgulu paslanmaz çelik örgü tüplerin mekanik tepkileri, deformasyon mekanizmaları ve hasar karakteristikleri sistematik olarak incelenmiştir. Alüminyum köpük kullanımının yapısal enerji dağılımını önemli ölçüde iyileştirdiği ve köpük yoğunluğunun halat kilitlenmesi öncesindeki davranışı doğrudan belirlediği ortaya konmuştur. Bu hibrit yapıların, havacılık ve otomotiv gibi çarpışma güvenliğinin kritik önem arz ettiği sektörlerde yüksek performanslı enerji sönümleyici bileşenler olarak uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

Yin vd. (2014), araç gövdesi güvenliğini artırmak amacıyla köpük dolgulu çok hücreli ince duvarlı yapıların çarpışma dayanımı optimizasyonunu incelemiştir. Bu akademik çalışmada, özgül enerji emme kapasitesinin maksimize edilmesi ve en yüksek ezilme kuvvetinin minimize edilmesi temel amaç olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu yöntemle optimize edilen dokuz hücreli ince duvarlı yapı tasarımının, otomotiv endüstrisinde gelecekteki araç gövdeleri için son derece etkili bir enerji sönümlene çözümü sunduğu ortaya konulmuştur.

Kılıçaslan (2015) tarafından yürütülen bu akademik çalışmada, aksel darbe yüklemesine maruz kalan alüminyum köpük dolgulu tekli ve çiftli dairesel oluklu tüplerin dinamik ezilme davranışları sayısal yöntemlerle kapsamlı şekilde incelenmiştir. Sonuç olarak, tüp yüzeylerine uygulanan sinüzoidal oluklu geometrilerin darbe güvenliğini optimize ettiği ve çift tüplü konfigürasyonların toplam köpük hacmini azaltarak hem teknik hem de ekonomik verimlilik sunduğu belirlenmiştir.

Kumar Rajak vd. (2015) tarafından yürütülen bu akademik çalışmada, oda sıcaklığında ve 0,01 ile 1/s arasındaki çeşitli deformasyon hızlarında alüminyum köpük dolgulu kare tüplerin basma davranışları ile enerji sönümlenme kapasiteleri sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, alüminyum alaşımlı köpüklerin darbe enerjisini emme konusundaki mükemmel yeteneği vurgulanmış; bu yapıların hafiflik ve yüksek güvenliğin kritik olduğu havacılık ile otomotiv endüstrilerindeki uygulamalar için oldukça elverişli olduğu ifade edilmiştir.

Uzun vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen bu akademik çalışmada, boru şeklindeki (tübüler) alüminyum köpüklerin basma ve eğilme yükleri altındaki mekanik davranışları sistematik bir çerçevede incelenmiştir. Tübüler alüminyum köpüklerin hafiflik ve enerji sönümlenme gerektiren endüstriyel uygulamalardaki yüksek potansiyelini doğrulamaktadır.

Liu vd. (2017) tarafından yürütülen bu çalışmada, farklı geometrik özelliklere sahip boş ve alüminyum köpük dolgulu dairesel tüplerin yanıl ezilme (lateral crushing) altındaki mekanik tepkileri ile enerji sönümlenme kapasiteleri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Geliştirilen analitik modelin deneysel verilerle yüksek uyum içerisinde olduğu ve hata paylarının oldukça düşük düzeyde kaldığı teyit edilmiştir. Alüminyum köpük dolgusunun, özellikle ince cidarlı tüplerde çarpışma dayanımını artırmada kritik bir rol oynadığı ve mühendislik alanındaki enerji sönümlenme sistemleri için etkili bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır.

Baroutaji vd. (2017) tarafından hazırlanan bu literatür incelemesinde, ince cidarlı enerji sönümleyicilerin çarpışma dayanımı performansındaki son on yıllık ilerlemeler sistematik olarak ele alınmıştır. Hesaplamalı optimizasyon araçlarının fiziksel prototipleme maliyetlerini düşürerek ürün geliştirme süreçlerini hızlandırdığı ve araç güvenliğini artırdığı vurgulanmıştır. Gelecekteki araştırmaların, düşük yakıt tüketimi hedefleri doğrultusunda hafif magnezyum alaşımları ve hücre malzemelerin karmaşık mikromekanik davranışları üzerine yoğunlaşması gerektiği ifade edilmiştir.

Altın vd. 2018 tarafından yürütülen bu akademik çalışmada, otomotiv endüstrisinde hafif yapıları nedeniyle yaygınlaşan alüminyum köpük dolgulu, ince

duvarlı çok tüplü dairesel kolonların çarpışma güvenliği performansının yarı-statik yükleme altında optimizasyonu hedeflenmiştir. En iyi performansın elde edilmesi için kolonların üçlü tüp yapısında, geniş et kalınlığına ve yüksek koniklik açısına sahip olması gerektiği saptanmıştır.

Yi vd. (2019) tarafından, kemiğin adaptif yeniden şekillenme mekanizmasından esinlenerek, alüminyum köpük dolgulu ince duvarlı tüplerin enerji emme kapasitesini ve hasar dayanımını artırmak amacıyla radyal yoğunluk gradyanı tasarlayan özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yoğunluk şekillendirme yönteminin, zaman alıcı iteratif hesaplamalara ihtiyaç duymadan karmaşık yapıları hasar bileşenlerinin tasarımında verimli, pratik ve zaman kazandıran bir çözüm sunduğu değerlendirilmektedir.

Garai vd. (2020) tarafından yürütülen bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde hafif yapı elemanı üretimi amacıyla ex-situ yöntemiyle hazırlanan farklı alüminyum köpük dolgulu ince cidarlı tüp üretim yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Dolgu yoğunluğu açısından 500 kg/m^3 değeri; işlenebilirlik ve özgül yük kapasitesi bakımından en ideal seçenek olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yapıştırıcı temelli dolgu yönteminin otomotiv güvenlik sistemlerinde hafiflik ve yüksek enerji sönümlenme için en etkili çözüm olduğu vurgulanmıştır.

Zhu vd. (2021) tarafından yürütülen bu bilimsel çalışmada, otomotiv endüstrisinde kritik öneme sahip köpük dolgulu çok hücreli ince cidarlı yapıların yanal darbe yükleri altındaki çarpışma dayanımı performansları ve çok amaçlı optimizasyonları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, incelenen senaryolarda 2, 3 ve 9 hücreli yapıların en başarılı çarpışma dayanımı göstergelerine sahip olduğunun ortaya konulmasını sağlamıştır.

Yang vd. (2021), alüminyum köpük dolgulu kare tüp yapıların üç noktalı eğilme altındaki mekanik performansı ve enerji sönümlenme karakteristikleri sistematik olarak incelenmiştir. Alüminyum köpük takviyesinin yapısal stabiliteyi iyileştirdiği ve önerilen teorik modellerin küçük dönme açılarında deneysel verilerle yüksek uyum sergilediği belirlenmiştir. Enerji sönümlenme verimliliği için çekirdek ile çeper arasında yapışma olmamasının tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Wang vd. (2022), farklı yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan alüminyum köpük dolgulu çelik boru elemanlarının aksel basınç özellikleri kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Oda sıcaklığından başlayarak 400°C , 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılan toplam 24 adet numune üzerinde aksel basma deneyleri yürütülmüştür. Parametrik analizler sonucunda; alüminyum köpük yoğunluğu, çelik boru et kalınlığı ve

kesit boy-en oranı gibi faktörlerin yangın direncini doğrudan etkilediği, köpük yoğunluğu arttıkça akma platformu yükünün yükseldiği belirlenmiştir.

Güler vd. (2023) tarafından alüminyum köpük dolgulu çok hücreli tüplerin enerji yutma kapasiteleri ve çarpışma güvenliği performansları sistematik bir biçimde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, otomotiv sektöründe yolcu güvenliğini artırmak amacıyla kullanılan enerji yutucuların etkinliğini yeni nesil hibrit yapılar aracılığıyla geliştirmektir. Köpük dolgulu tüplerin boş tüplere kıyasla toplam ağırlığa büyük bir yük getirmeden çok daha fazla enerji yuttuğu açıkça saptanmıştır. Yüksek sertlik-ağırlık oranına sahip olan bu çok hücreli yapıların, kaza anında araç içi yapısal hasarı ve yolculara gelebilecek zararları minimize eden kritik enerji yutma bileşenleri olarak etkin bir biçimde kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

Yan vd. (2024) tarafından geliştirilen bu bilimsel araştırmada, ince cidarlı yapıların enerji sönümleme kapasitelerini artırmak, başlangıç kuvvetini artırmak ve yük dalgalanmasını en aza indirmek amacıyla orijinal bir alüminyum köpük dolgulu oluklu tüp tasarımı literatürü önerilmiştir. Bu çalışma, bakım ve otomotiv endüstrilerinde kullanılacak enerji yutan tampon cihazlarını çeşitlendirmek için kritik bir teknik referans teşkilatı yapmaktadır.

Liu vd. (2026) tarafından yürütülen bu çalışmada, alüminyum esaslı köpük/reçine interpenetrating gözenekli kompozitlerin mekanik evrimi ile arayüz tipleri arasındaki ilişki sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı; mekanik kısıtlı, kimyasal ve metalurjik bağlara sahip farklı arayüz konfigürasyonlarının yapısal performans, enerji sönümleme kapasitesi ve hata mekanizmaları üzerindeki spesifik etkilerini belirlemektir. Yöntem aşamasında, sızdırma döküm ve 3B baskı teknikleri kullanılarak dört farklı kompozit yapısı üretilmiş; arayüz modifikasyonları için NaOH ve aseton işlemlerinden yararlanılmıştır. Sonuç olarak, arayüz tipinin yük transfer kabiliyetini ve deformasyon direncini doğrudan belirlediği, metalurjik ve sürekli kimyasal bağların çatlak ilerlemesini engelleyerek mekanik verimliliği maksimize ettiği saptanmıştır.

Kısaca, alüminyum köpük dolgulu tüp elemanlar üzerine yapılan çalışmalar, genellikle eksenel yükleme, darbe ve eğilme etkileri altında enerji sönümleme kapasitesi ve burkulma davranışı gibi eleman bazlı performans özelliklerine odaklanmaktadır. Bununla birlikte literatürde bu elemanların çerçeve sistemler içerisindeki bütünleşik davranışı ve sismik yükler altında sistem düzeyindeki etkileri yeterince ele alınmamıştır. Bu durum, köpük dolgulu elemanların yalnızca yerel güçlendirme elemanı değil, sistem davranışını etkileyen aktif bir bileşen olarak değerlendirilmesi gerekliliğini

göstermektedir. Bu tez çalışması, alüminyum köpük dolgulu kolonların çelik çerçeve sistemlerin sismik performansına etkisini sistem düzeyinde incelemeyi amaçlamaktadır.

1.1.4. Çelik Çerçeve Sistemleri ve Sismik Performans

Çelik çerçeve sistemleri, deprem mühendisliğinde yatay yükleri karşılamada en etkili ve yaygın kullanılan sistemlerden biridir; yüksek rijitlik, mukavemet ve kontrollü enerji sönmüleme kapasitesiyle öne çıkar. Çeliğin yüksek süneklik, dayanım ve hafiflik özelliklerini birleştirerek mühendislik açısından avantajlı bir çözüm sunar. Özellikle deprem ve dinamik yükler altında üstün performans gösterir; bu nedenle yüksek katlı binalar, endüstriyel yapılar ve köprüler gibi birçok projede tercih edilir. Deprem etkisinde esnek davranarak enerjiyi kontrollü dağıtır, kalıcı deformasyonları sınırlı tutar ve yapının genel sismik dayanımını artırır. Hafifliği deprem yüklerini azaltırken, yüksek elastikiyet modülü enerji absorpsiyonunu iyileştirir; böylece hasar öngörülebilir seviyede kalır ve onarım maliyetleri önemli ölçüde düşer. Literatürde bu konuda yapılan çalışmaların kronolojik bir özeti aşağıda sunulmaktadır.

Lee vd. (2005), panel bölgesi ve gövde birleşim şeklinin zayıflatılmış kiriş enkesitli çelik moment çerçevelerin sismik performansları üzerindeki etkisi ile ilgili dayanım ölçütleri oluşturmak amacıyla analitik olarak çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma sonucunda, kaynaklı zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşimler, bulonlu birleşim tiplerine göre daha sünek davranış sergilemiş olduğu belirtilmiştir. Birleşim kirişindeki zayıflatılmış kiriş enkesit bölgesinde oluşan plastik moment kullanılarak panel bölgesi için kesme kuvvetini veren eşitlik oluşturulmuş ve panel bölgesi, plastik dönme kapasitesini kirişte deformasyonlara neden olmadan arttırabilmesi için dayanım ölçütü belirlenmiştir.

Lee ve Kim (2007), kaynaklı ve/ya da bulonlu gövde birleşim türlerinin, zayıflatılmış en kesitli çelik moment çerçevelerin sismik performansları üzerindeki etkiyi araştırmak için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmaların sonucunda bulonlu zayıflatılmış kiriş enkesitli numunelerin, kiriş - kolon birleşim bölgesi civarında yüksek kopma davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir. Yalnız araştırmalarda, kaynaklı gövde bağlantılarına karşı bulonlu örneklerin hatasız olarak uygulandığı konusunda tam olarak bilgi yer almamaktadır.

Oh vd. (2007), döşemenin, zayıflatılmış kiriş enkesitli çelik moment çerçevelerin sismik performansı üzerinde etkisini incelemek ve bağlantı kirişinde pahalı olmayan berkitme elemanlar kullanarak dayanım performansını arttırmak amacıyla analitik olarak çalışmalar yapmışlar. Deneysel standart moment taşıyan çelik kiriş – kolon

birleşimi, döşeme etkisi nedeniyle kiriş alt başlığında oluşan çekme istemi nedeniyle gevrek geçmeye maruz kalmıştır. Bu çalışma sonucunda, zayıflatılmış kiriş enkesitli moment taşıyan kiriş - kolon birleşiminin betonarme döşeme ile birlikte iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Kim vd. (2007), simüle edilmiş deprem yükü altında tek açıklıklı, iki katlı bir çelik çerçeve için bazı sarsma masası deneylerini sunulmaktadır. Deney çerçevesi, deprem yükleri altında ikinci dereceden elastik olmayan davranış gösterecek ve tek bir elemanın yanal burulmalı burkulmasını önleyecek şekilde tasarlanmıştır. Test örneğinin, aletlerin, kurulum prosedürlerinin ve sonuçların açıklamaları sunulmuştur. ABAQUS programının kiriş eleman modeli kullanılarak yapılan deney ve sayısal analizden elde edilen sonuçların karşılaştırılması sağlanmaktadır. Deney, deprem yüküne maruz kalan çelik çerçevelerin elastik olmayan davranışını açıklamayı amaçlamaktadır ve sonuçları, çelik çerçevelerin ikinci dereceden elastik olmayan dinamik analiz tekniklerinin geçerliliğini doğrulamak için kullanılabilir.

Pachoumis vd. (2009), ABD’de azaltılmış kesitlerin deprem performansı üzerine çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen Avrupa’da bu konuya ilişkin yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada Avrupa’da kullanılan çelik profilleri kullanılarak azaltılmış kiriş kesitlerinin deprem yükleri altındaki performansı incelenmiştir. Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından yayımlanan FEMA-350 (Federal Emergency Management Agency, 2000a) ve FEMA-351 (Venture, 2000) dokümanları ile Eurocode 8 (European Committee for Standardization (CEN), 2004) bölüm 1-1’e göre detaylandırılmış iki ayrı numune oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda FEMA’ya (Federal Emergency Management Agency, 2000a; Venture, 2000) göre detaylandırılmış numunede beklenen plastikleşme görülürken, Eurocode 8’e (European Committee for Standardization (CEN), 2004) göre hazırlanmış numune beklenen performansı sergileyememiştir. Hatta plastikleşmenin kiriş gövdesinde oluşması beklenirken kiriş alt başlığında olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonlu eleman çalışmalarıyla desteklenmiştir.

Augusto vd. (2012), çalışmada kısmi mukavemetli alın levhalı kolon kiriş birleşimini çevrimsel yük altında incelemek amacıyla ABAQUS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sayısal analiz çalışmasında birleşim bölgesi ve T-parça kısmı incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları daha önce yapılan deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmış ve doğrulanmıştır.

Wongpakdee ve Leelataviwat (2014), bu çalışmada, farklı süneklik talep seviyelerinde farklı kiriş ve kolon plastik mukavemet dağılımlarına sahip güçlü kolon-

zayıf kirişli çerçevelerin elastik olmayan davranışını araştırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan moment çerçevelerine dayalı olarak, yaygın bir tasarım durumunda beklenen öteleme seviyesi için ω_r katsayısının 0,25 olması uygun bir değer olarak ifade edilmiştir.

Ahmady Jazany vd. (2016), mühendislik uygulamalarında olası bir şekilde ortaya çıkmasına rağmen, özel moment dirençli çerçevenin sismik performansı üzerinde, eşit olmayan kiriş derinliklerine sahip bir iç kiriş-kolon bağlantısının detaylandırılmasının etkisini ele almaktadır. En iyi bağlantı detaylandırma konfigürasyonunu belirleyerek, farklı derinliklere sahip kirişlerin bağlandığı rijit bağlantının sismik performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. İncelenen detaylandırma, bir sığ kiriş ve bir derin kirişin kolona bağlanması için alternatif olarak süreklilik levhası düzeni, guse, flanş levhası ve arka bağlantı sisteminden oluşmaktadır. Özel moment dirençli çerçeve bağlantılarında sismik performans anlayışını geliştirmek ve farklı geometriler ile bahsedilen alternatiflerin eşit olmayan kiriş derinliklerine sahip özel moment dirençli çerçevenin sismik performansı üzerindeki etkisini incelemek için koordineli analitik, nümerik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deney ve analizler, bazı detaylandırmaların %20 dayanım kaybı yaşamadan önce 0,06 rad toplam kat öteleme açısı ile sünek davranış sağlayabileceğini, diğer detaylandırmaların ise bu kriteri karşılamayacağını göstermiştir.

Wang vd. (2018), bu çalışmada nötr tuz püskürtme korozyon hasarının kaynaklı çelik bağlantıların sismik kapasitesi üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. İlk olarak, üç kaynaklı çelik birleşimlerinin hızlandırılmış korozyon testi, en fazla sekiz ay boyunca açık hava tuz püskürtme atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Farklı korozyona maruz kalma sürelerine sahip kaynaklı birleşimli çelik numunelerin yüzey morfolojisi ve mekanik özellikleri, optik yüzey ölçümü ve çekme testlerine dayalı olarak elde edilmiştir. Daha sonra, artan korozyon derecesi ile taşıma kapasitelerindeki, dönme kapasitesini, rijitliği, enerji dağıtma kapasitesini azalmayı, çevrimsel davranış ve hasar modunun değişimini değerlendirmek için farklı korozyon hasar derecelerine sahip 4 adet bozulmuş bağlantı numunesinin elastik olmayan yarı statik çevrimsel yükleme testleri yapılmıştır. Test sonuçları, kiriş ve kolonun kesit alanı kayıpları nedeniyle korozyona uğramış birleşimlerinin taşıma kapasitelerinin ve rijitliklerinin azaldığını, kaynaklı bölgede şiddetli çukurların varlığı, aşınmış kiriş flanşının gevrek kırılma hasarını hızlandırırken, süneklik ve toplam enerji dağılımında önemli düşüslere neden olduğunu göstermiştir. Sayısal analizler, katı eleman C3D8R kullanılarak ABAQUS 6.12 paket programı ile yapılmıştır. Analitik sonuçlar, mevcut birleşimlerin kalan nihai taşıma kapasitesini tahmin etmek için kiriş

flanş korozyonu ve kolon gövde korozyonundan daha büyük değerin seçilebileceğini, aşınma hasarı ve kiriş flanşındaki üniform korozyonun, deformasyon kapasitesi ve enerji dağıtma kapasitesinin bozulma derecesini etkileyen ana faktörler olarak kabul edilebileceğini göstermiştir.

Hosseini ve Rahnavard (2020), çalışmalarında, süreklilik plakalarının kaldırıldığı yenilikçi bir kısa ve büyük yaka bağlantısı önerilmişlerdir. İdeal bir yaka bağlantısı elde etmek için geometrik parametreler ve mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ve ABAQUS yazılımı kullanarak yaka bağlantısının çevrimsel davranışını incelenmiştir. Modellerin çevrimsel davranışını incelemek için 0.05 rad'a kadar tekrarlı yükleme altında genel statik analiz uygulanmıştır. Bu çelik bağlantının tüm detayları sayısal modelde kaynaklar ve civatalar dahil dikkate alınmıştır. Büyük yaka bağlantılarının sismik davranışının uygun olduğunu ve bu bağlantının özel çelik moment çerçeve sistemlerinde kullanılabileceğini göstermiştir. Derin kirişler için büyük yaka bağlantılarının sismik davranışı, 0,04 radyan dönüş üzerinde uygun bir davranış sergilemiştir. Ayrıca, kolon kayda değer bir plastisite ve yerel burkulma olmadan kalmıştır.

Lemonis vd. (2022), hem kirişlerde hem de birleşim yerlerinde dağılım bölgeleri ile tasarlanmış düzensizliklere sahip 2B çelik moment direnç çerçevelerinin sismik davranışına ilişkin bir araştırma sunmuşlardır. Plastik mafsalların oluşumunu kolaylaştıran bir tasarım yöntemi kiriş-kolon birleşimlerinde ve aynı zamanda kirişlerde, tipik olarak tasarlanmış rijit bağlantılara sahip çerçevelerle karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve yalnızca kirişlerde değil, aynı zamanda kiriş-kolon bağlantı noktalarında da enerji dağılımı potansiyelini araştırılması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, kirişlerde ve birleşimlerde eş zamanlı olarak enerji dağılımı olan çerçeveler için süneklik taleplerinde büyük bir azalma olduğunu gösterirken, katlar arası ötelenmeler ve yanal kapasite gibi sismik tepkilerinin diğer ölçütleri pratikte etkilenmeden kaldığı görülmüştür.

Imam vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, çelik moment çerçeveli yapıların sismik performansını makine öğrenmesi teknikleri kullanarak tahmin etmek amaçlanmıştır. Özellikle, sismik limit durum kapasitesinin değerlendirilmesinde kritik öneme sahip olan maksimum katlar arası öteleme oranının gelişmiş algoritmalarla öngörülmesi hedeflenmiştir. Elde edilen modeller üzerinden FEMA tarafından yayımlanan FEMA-356 (Federal Emergency Management Agency, 2000b) kılavuzuna dayalı sismik performans seviyelerini raporlayan kullanıcı dostu bir Grafiksel Kullanıcı Arayüzü geliştirilerek araştırmacıların ve mühendislerin kullanımına sunulmuştur.

Yang vd. (2025) tarafından, farklı konfigürasyonlara sahip öz-merkezlemeli çelik çerçevelerin sismik performansı ve bu konfigürasyonların genel yapısal davranış üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, sık tekrarlanan depremlerde geleneksel ve öz-merkezlemeli yapılar arasında yer değiştirme tepkisi açısından belirgin bir fark bulunmadığı saptanmıştır.

Chen vd. (2026) tarafından yürütülen bu akademik çalışmada, çok katlı çerçeve yapıların sismik güçlendirilmesinde kayma aktivasyonlu çift aşamalı çelik çapraz sistemlerin kullanım potansiyeli ve kat bazlı parametre dağılımının yapısal performans üzerindeki belirleyici rolü sistematik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir çözüm olan kayma aktivasyonlu çift aşamalı sistemlerinin, sismik güvenliği artırırken işletme sürekliliğini destekleyen pratik bir güçlendirme metodolojisi sunduğu vurgulanmıştır.

Literatür genel olarak incelendiğinde, çelik çerçeve sistemlerin sismik performansı üzerine yapılan çalışmalar, genellikle plastik mafsallı oluşumu, bağlantı davranışı, süneklik kapasitesi ve enerji dağılım mekanizmaları gibi klasik yapısal davranışlara odaklanmaktadır. Ancak literatürde bu sistemler çoğunlukla geleneksel tasarım yaklaşımları ile ele alınmış olup, yeni nesil enerji sönümleyici malzemelerin sistem davranışına etkisi yeterince incelenmemiştir. Bu durum, çelik çerçeve sistemlerin sismik performansının ileri malzemelerle birlikte yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu tez çalışması, alüminyum köpük temelli hibrit sistemlerin çelik çerçeve davranışına etkisini inceleyerek literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır.

1.1.5. Çelik Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Çevrimsel Yükler Altındaki Davranışı

Çelik çerçeve sistemleri, deprem mühendisliğinde yatay yükleri karşılamada en etkili ve yaygın kullanılan sistemlerden biridir; yüksek rijitlik, mukavemet ve kontrollü enerji sönümlenme kapasitesiyle öne çıkar. Çeliğin yüksek süneklik, dayanım ve hafiflik özelliklerini birleştirerek mühendislik açısından avantajlı bir çözüm sunar. Özellikle deprem ve dinamik yükler altında üstün performans gösterir; bu nedenle yüksek katlı binalar, endüstriyel yapılar ve köprüler gibi birçok projede tercih edilir. Deprem etkisinde esnek davranarak enerjiyi kontrollü dağıtır, kalıcı deformasyonları sınırlı tutar ve yapının genel sismik dayanımını artırır. Hafifliği deprem yüklerini azaltırken, yüksek elastikiyet modülü enerji absorpsiyonunu iyileştirir; böylece hasar öngörülebilir seviyede kalır ve onarım maliyetleri önemli ölçüde düşer. Literatürde bu konuda yapılan çalışmaların kronolojik bir özeti aşağıda sunulmaktadır.

Roeder vd. (1993), çalışmasında çelik çerçevelerin sismik yükler altındaki davranışını analitik olarak incelemiş ve sonuçları kurulan sayısal analiz modeli ile karşılaştırmışlardır. Tasarlanan modeller, sismik tasarım kuvveti için elastik izin verilen gerilme yöntemleri ile tasarlanmıştır. Eleman çeşidi olarak %2 gerinim sertleşmesine sahip olan element 2 tercih edilmiştir. Güçlü kolonlu zayıf kirişli çerçeveler ile zayıf kolonlu güçlü kirişli çerçevelerin sismik davranışını karşılaştırmak amacıyla 1940 El Centro, 1971 Pacoima Barajı ve 1979 Imperial Valley College depremlerine ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Analizler, güçlü kolon zayıf kiriş çerçevelerin, zayıf kolon güçlü kirişli çerçevelere göre çok daha küçük kat ötelemelerine ve yapıdaki elemanlar arasında daha iyi elastik olmayan deformasyon ve enerji dağılımına sebep olduğu göstermiştir.

Hong (1996), yapmış olduğu çalışmada deprem sırasındaki yer hareketinin etkisiyle çelik çerçevelerde oluşabilecek kırılma davranışı engellemeyi amaçlamıştır. Çerçevenin yapısal analizi ve eleman seçimleri için DRAIN-2DX yapısal analiz programı kullanılmıştır. DRAIN-2DX, zaman-tanım alanında analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, çerçevedeki moment dirençli birleşimlerdeki hasarı değerlendirmek için düşük çevrimli yorulma hasar modeli uygulanmıştır. Çelik çerçevelerdeki gevrek kırılmaların gözlemlendiği depremler olan El Centro (1940), Northridge (1994) ve Pacoima Dam (1971) depremlerine ait deprem kayıtları kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, kullanılan farklı tipteki birleşim elemanları ile moment taşıyan çelik çerçevelerin deprem davranışlarının iyileştiği görülmüştür.

Nakashima ve Sawaizum (1999), yapı sistemlerinin yatay yükler altında gösterdiği tepki davranışın, kolon-kiriş elemanlarının ve birleşimlerinin rijitlikleri ile ilişkisi incelemiş ve karşılıklı etkileşimlerini tartışmışlardır.

Clifton ve Butterworth (2000), moment aktaran birleşimler ile oluşturulmuş çerçeve sistemlerin yatay yükler altında gösterdikleri performans deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada sistem için performans tanımları yapmış ve bu tanımların sağlanması için bileşenlerde istenen özellikleri tartışmışlardır. Yarı statik koşullar altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda eklemlerin performansının kabul edilebilir olduğunu görülmüştür.

Shen vd. (2000), çalışmada zayıflatılmış kiriş enkesitli çelik yapıların deprem davranışına olan etkisini araştırmışlardır. Farklı zayıflatılmış kiriş enkesitli kiriş ile düzenlenmiş 8 adet çelik yapının lineer olmayan statik ve zaman tanım aralığı analizlerini yapmışlardır. Yapılan analizlerde El Centro ve Northridge deprem verileri

kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda deprem kuvveti altında en uygun başlık azaltma oranı ve yeri elde edilmiştir.

Civjan vd. (2000), çalışmasında mevcut çelik moment çerçevelerinin güçlendirilmesi üzerine farklı yöntemlerle yapılan deneysel çalışmaları ele almıştır. 6 tane tam ölçekli tipik Northridge öncesine göre tasarlanmış kolon-kiriş birleşim numuneleri, alt başlıkta azaltma veya alt başlık uçlarına ilave levha kaynatması şeklinde güçlendirmiştir. Güçlendirilen elemanlar hem döşemeli hem döşemesiz olarak denenmiştir. Kiriş alt başlık kesitinde azaltma yapılarak yapılan güçlendirmede, mevcut kaynaklarda problem oluşurken, alt başlığa guse şeklinde kaynatılan ilave levhalı birleşimlerin daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Özellikle döşemeli birleşimlerde döşemelerin üst başlığı güçlendirmesi sonucunda da oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Popov ve Takhirova (2002), bu çalışmada tam ölçek moment taşıyan 2 adet birleşimin deneysel çalışmasını yapmıştır. Çalışmada, ilk deney klasik dış kolon-kiriş birleşim sisteminin kolonları W14*283 ve kirişleri W36*264 kesitli elemanlardan teşkil edilmiştir. Kullanılan T kesitler 4 adet 28 mm çapında bulon ile kirişe bağlanmış ve kiriş ile T kesit arasına 19 mm kalınlığında köşe kaynağı yapılmıştır. Diğer birleşim bölgesinde ilave kaynak olmamakla birlikte ilk T kesitini kiriş üstündeki parçası dikdörtgen iken 2. deneydeki kesitinin kiriş üstündeki parçası U şeklindedir. Kaynak işlemi sadece U kesitin ortasına yapılmış ve 2 bulon kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda üretimi daha ucuz olan 2. deneyde kullanılan birleşimin moment taşıma kapasitesi daha yüksek çıkmıştır.

Margarian (2002), bu tez çalışmasında Northridge depremi öncesi kullanılan geleneksel kaynak tipleri ile Northridge depremi sonrası kullanılan kaynak tiplerinden oluşan çerçeveleri karşılaştırmak için 14 adet çerçeveyi dinamik yüklerle yüklemiştir. Kolon ve kirişlerde I kesitler kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda Northridge depremi öncesi kullanılan geleneksel kaynak tipleri ile üretilen çerçevelerin sismik yüklere karşı zayıf kaldıkları tespit edilmiştir. Bu birleşimler kolon-kiriş birleşim bölgelerinde başlık üzerindeki kaynaklarda ani olarak oluşan kırılmalardan dolayı ağır hasarlar görmüştür. Deneylerde oluşan hasarların Northridge depremi sonrası oluşan hasarlar ile aynı olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir. Bunun yanında Northridge depremi sonrası kullanılan kaynak tiplerinden oluşan çerçevelerin daha sünek olduğu deneyler sonucunda görülmüştür.

Bayo vd. (2005), mekanik model ile tanımlanmış birleşim davranışının dikkate alındığı bir grup analiz örnekleri ile sistem davranışının değişimini incelemişler ve

çerçevesel sistemlerin analizinde bu yaklaşımın ekonomi ve güvenlik yaklaşımlarını kuvvetlendiren uygulaması kolay bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır.

Jin ve El-Tawil (2005), 1994 yılında Kaliforniya'nın Northridge bölgesinde meydana gelen deprem sonrasında zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşimlerinin kullanımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Zayıflatılmış kiriş kesitli çerçevelerin yüksek deprem riski bulunan bölgelerde depreme karşı en iyi performansı sergilediğini tespit etmişlerdir.

Tezer (2005), çalışmada 1994 Northridge depreminden sonra meydana gelen hasarlar göz önüne alınarak yapılan araştırmalar sonucunda ortaya çıkarılan zayıflatılmış kiriş-kolon birleşimleri hakkında açıklayıcı bilgiler sunmuştur. Deprem ve etkilerinden bahsedilmiş, ortaya çıkan problemleri çözmek için geliştirilen teknikler açıklanmış ve bu tekniklerden biri olan zayıflatılmış kolon-kiriş birleşimleri tanıtılmıştır. Zayıflatmanın eleman üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir.

Seçer ve Bozdağ (2005), çalışmasında kolon-kiriş birleşimleri yarı rijit olarak modellemiş, düzlemsel çelik çerçeve davranışının incelenmesi ve çapraz elemanlar kullanılması ile meydana gelecek etkileri araştırılmıştır. Analizler sonucunda yarı rijit birleşimli çerçeve davranışının birleşim tipine bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Farklı yarı rijit birleşim tipleri için farklı yer değiştirme ve kesit tesirleri değerlerine ulaşılmıştır. Yarı rijit birleşimler kullanıldığı ve deplasmanların artması, sınır değerlerin aşılması durumunda deplasmanı sınırlamak ve yapıyı yatay yüklere karşı rijitleştirmek amacıyla diyagonal çubuk elemanların kullanılması faydalı olacağı çalışmada belirtilmiştir. Özellikle yüksek çelik yapılarda büyük mertebelerdeki kat yer değiştirmeleri diyagonal çubuklar kullanılmak suretiyle azaltılabileceği belirtilmiştir.

Aldemir ve Aydın (2005), bu çalışmada yapıların deprem ve rüzgâr gibi dinamik etkilere karşı korunması için dünyadaki en son gelişmeleri özet olarak sunmuşlardır. Kısaca tanıtımı yapılan bu sistemlerin betonarme yapılara uygulanmasında birleşim detaylarında bazı güçlükler olmakla birlikte çelik yapılara uygulanmaları çok daha kolay olduğu değinilmiştir. Özellikle ABD ve Japonya'da yaygın bir uygulama alanı bulan bu teknolojilerin büyük bir bölümü aktif deprem kuşağı içinde bulunan ülkemizde de kullanılması kaçınılmaz hale geldiği belirtilmiştir. Yazarlara göre birebir uygulamayı beklemek yerine gerekli bilgi birikimini öncelikle üniversitelerde sağlamaya çalışmak ve buna paralel olarak da bu bilgiyi mühendislerimize iletme gerekmektedir.

Alisibramulisi (2006), çalışmasında kolon ve kiriş birleşim kirişlerin birleşim bölgelerindeki elemanların yetersiz kaldığı durumlarda incelenmesi için yapılan deneysel çalışmaların maddi külfeti ve zaman problemi gibi dezavantajları sebebiyle bu

elemanların çeşitli durumlarda davranışını inceleyebilmek için sonlu elemanlar yöntemi alternatif bir yöntem olarak sunmuştur. Bunun için LUSAS paket yazılımını kullanmıştır. Program yardımı ile çeşitli kaynaklı ve bulonlu birleşimlerin davranışları incelenmiştir. Daha önceden yapılan deneysel çalışmaları bu program yardımıyla tekrar analiz etmiş ve moment-eğrilik ilişkilerini karşılaştırılmıştır. Eğriler karşılaştırıldığında gerek sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçların gerekse deneysel sonuçlardan elde edilen eğrilerin yaklaşık aynı olduğu tespit etmiştir. Ancak LUSAS'dan elde edilen momentlerin deneysel taşıma gücü momentinden 1,5 kat daha fazla olduğunu da tespit etmiştir.

Kukreti ve Zhou (2006), birçok kolon-kiriş birleşiminin yarı-rijit birleşim olarak değerlendirilmesi gerekirken, başta AISC olmak üzere, tasarım şartnamelerinde yarı rijit birleşimler için detaylı bilgi bulunmadığı ve yarı rijit birleşim kabulünün yapı çerçeve analizinde pek kullanılmadığı belirtilmektedir (AISC, 2001). 8 bulonlu rijitlik levhalı, alın levhalı bir birleşimin yarı rijit davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar çalışması ve deneysel çalışma yapılarak birleşimin $M-\phi$ davranışı tespit edilmeye çalışılmış ve birleşim modelinin kullanıldığı bir çerçeve analizi yapılmıştır. Çerçeve analizi sonucunda, birleşim özelliklerinin sistem davranışı üzerinde çok önemli etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada birleşim davranışının sınıflandırılabilmesi için bir denklem verilmiştir.

Shi vd. (2007), rijitlik levhalı, uzatmalı alın levhalı kolon- kiriş birleşiminde $M-\phi$ ilişkisini tespit etmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde alın levhalı moment birleşiminin toplam dönme kapasitesinde panel bölgesinin, bulonların, alın levhasının ve kolon başlığının katkıları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Dönmeye katkısı olan elemanlar ayrı ayrı analiz edildikten sonra bu katkılar süperpoze edilerek birleşimin $M-\phi$ ilişkisi elde edilmiştir. Analitik modeli doğrulamak amacıyla beş birleşim deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, analitik modelin alın levhalı birleşimlerde dönme davranışını temsil edebildiğini göstermiştir.

Yemez (2007), bu araştırmada I-kirişin kutu kesit kolona birleşim elemanı ile bulonlu birleşimini tek yönde ve çift yönde tekrarlı yükleme koşulları altında incelenmiştir. Bu birleşimlerin yarı rijit kısmen güçlü bileşimler olarak deprenselliği düşük olan bölgelerde moment aktaran çelik çerçevelerde veya yüksek deprensel bölgelerde çaprazlı çerçeveler ile takviyeli çelik çerçevelerde kullanılabileceği bildirilmiştir. Eurocode 3 (European Committee for Standardization (CEN), 2005) bölüm 1-8'de anlatılan birleşen metodunun önerilen tasarım yaklaşımı ile birlikte uygulanabilirliğini test sonuçları ile hem dayanım hem de eğilmezlik açısından

karşılaştırmıştır. Yaptığı karşılaştırmada deneysel sonuçların Eurocode 3 (European Committee for Standardization (CEN), 2005) çözümleri ile uyumlu olduğunu tespit etmiştir.

Yang ve Kim (2007), birleşimlerde yarı rijit davranışın sistem davranışı üzerindeki etkisi ve yarı rijit davranış kabulünün sistem analizi için olan avantajları vurgulanmıştır. Kaynaklı birleşimler ile yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerin deprem yükleri altındaki performansı incelenmiştir. 3 farklı deney numunesine tersinir yük uygulanmıştır. Bu deney numunelerinin konfigürasyonları aynı olmakla birlikte birleşim tipleri farklıdır.

Feng ve Young (2008), deneysel çalışmalarında kutu kesitli dikdörtgen ve kara profillerin aksenal yük altında kaynaklı birleşimin davranışını incelemiştir. Yapılan deneyde değişkenler birleştirme elemanı olan kaynak kalınlığı, profillerin boyutları ve bu boyutların oranları olmuştur. Deney düzeneğinde aksenal yük dikdörtgen kesitli düşey elemana verilmiştir. Düşey ve yatay elemanın birbirine kaynaklanıp birleştikleri noktaya herhangi bir kayma levhası eklenmediği durumda düşey elemanda lokal burkulmalar ve mekanizmalar gözlenmiştir. Mekanizma durumunun oluşmaması için birleşime kayma levhası düşey elemanın içine geçecek şekilde yatay elemana kaynak vasıtası ile birleştirilmiştir. Araştırmacılar deney sonucunda 4 tip davranış tespit edilmiştir. Elemanların tam temas ederek kaynaklandığı durum ile düşey elemanın boyutlarının yatay elemandan küçük olduğu durum için kriterler göz önüne alınmıştır. Buna göre veriler sayısal olarak karşılaştırılabilir hale getirilmiş ve deney sonuçları halen yürürlükte olan çeşitli ülkelerin standartlarıyla karşılaştırma yapılmıştır.

Shafei vd. (2008), çalışmalarında 1990 Manjil ve 2003 Bam depremlerinden sonra İran'da çelik yapılarda oluşan hasarların birleşim yerlerinde yoğunlaştığının tespit edilmesi ile İran'da yoğun olarak kullanılan Khorjini tipi birleşim elemanlarının iyileştirilmesine yönelik çalışmaları incelemiştir. Araştırmacılar depremlerden elde ettikleri tecrübelerle Khorjini tipi birleşim elemanlarını detaylı olarak incelemiştir. Bu birleşim tipinde oluşan hasarların kaynak kırılmalarında oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bundan dolayı Khorjini bağlantılı çerçevelerinin deprem sırasında istenilmeyen gevrek davranışlar sergilediğini belirtmişlerdir. Yazarlar bu tipik İran kolon-kiriş bağlantı tipini güçlendirmek için R plakları kullanmışlardır. Bu bağlantı elemanlarını kullanarak İran tipi çerçevelerin deprem davranışlarını geliştirmeyi amaçlamışlardır.

Mohamadi-shooreh ve Mofid (2008), taşıyıcı sistemin davranışını doğru tespit edebilmek için birleşimlerin yarı rijit davranışının ve birleşim başlangıç dönme

rijitliğinin bilinmesi gerektiği vurgulanmıştır. Sonlu elemanlar modellemesi kullanılarak bulonlu-düz alın levhalı birleşimlerin başlangıç dönme rijitliği üzerine yapılan parametrik analizlerin sonuçları sunulmuştur. Sonlu elemanlar analizinde malzeme davranışı, geometrik süreksizlikler ve büyük deplasmanlar dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları yapılan deney sonuçları ile kalibre edilmiştir.

Mirghaderi ve Renani (2008), bu çalışmada elik yapılarda depreme karşı dayanıklı yarı rijit kolon-kiriş bağlantısı çalışmışlardır. Uygulamada kirişler kolonların başlıklarına yerleştirilmektedir. Bu yeni sistemde iki kiriş kolonun yüzünden geçmekte ve kolon başlıklarına yatay plakalarla bağlanmaktadır. Çalışma iki çeşit rijit bağlantı deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda her iki çeşit bağlantıda da kat ötelenmesi kayda değer bir azalma olmadan 0,08 radyanı geçmiştir. Yapılan alışma klasik bağlantı türlerine göre bu rijit birleşim türünün eğilme dayanımının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bu bağlantıların dayanımı yüksek ve deprem dayanımlarından yüksek olduğu görölmüştür. Parametrik çalışmalarda farklı boyutlardaki kolon ve kirişler için farklı ebatlardaki bağlantı plakalarının kullanılması gerektiğini göstermiştir.

Shi vd. (2008), ön gerilmeli bulonlu alın levhalı moment birleşimleri ANSYS programı kullanılarak modellenmiştir. Deney sonuçlarıyla kıyaslandığında, sonlu eleman modellerinin gerçek malzeme davranışını doğru bir şekilde temsil ettiği görölmüştür. $M-\phi$ ilişkisi, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki temas etkileri, alın levhası davranışı, panel bölgesi davranışı, ön germeli bulon kuvveti etkisi gibi hususların yanı sıra sonlu eleman analiz sonuçlarıyla, deneysel çalışmada tespit edilmesi zor olan basınç dağılımı, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme, bulon ön gerilmesinin kolon başlığına etkisi, mesnet momenti, maksimum-minimum gerilme akışı gibi birçok etki ANSYS programı yardımıyla incelenmiştir.

Shin vd. (2008), çalışmasında 7 adet betonla doldurulmuş kutu kolonların kiriş birleşimlerinde tersinir tekrarlı yükler altında davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyde bütün birleşimler T kesitlerle bağlanmıştır. 3 seriye ayrılan deney numunelerinde ilk seri sadece T kesitle güçlendirilmiş, ikinci seride T kesitle güçlendirilmiş kesitten sonra kirişte kesit azaltılması yapılmış, üçüncü seride ise başlıklarda küçük delikler açılmıştır. Yapılan deneylerde bütün numunelerin AISC Deprem Kurallarına göre 0,03 rad dönmeyi aştığı görölmüştür (AISC, 1997).

Kozlowski vd. (2008), elik yapı birleşimleri ve kompozit birleşimler için başlangıç rijitliğinin ve moment dayanımının tespit edilmesinde kullanılabilecek ampirik formüller geliştirilmiştir. Eurocode 3 (European Committee for Standardization

(CEN), 2005) ve Eurocode-4'te (European Committee for Standardization (CEN), 2004) sunulan birleşen metodu zaman alan ve kullanımı zor bir metottur;. Bu çalışmada tavsiye edilen ampirik formüller yardımıyla, çelik yapıların ön tasarımında mühendise kolaylık sağlamak amaçlanmıştır. Çalışmada geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla kolon boyutunun, kiriş boyutunun, alın levhası kalınlığının, bulon çapının, çelik malzeme sınıfının ve bulonlar arası düşey mesafenin başlangıç rijitliği üzerindeki etkisi grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca tavsiye edilen ampirik formül, Eurocode 3 (European Committee for Standardization (CEN), 2005) hesap metodu ve deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yaklaşık %30 hata payı gözlemlenmiştir. Çeşitli birleşim tipleri için ampirik formüller tablo olarak sunulmuştur.

Del Savio vd. (2009), gerçekçi bir yapı modellemesi için yarı rijit birleşim modelinin avantajları vurgulanmış ve birleşimlerin eksenel yüklere maruz kalabileceği durumlara dikkat çekilmiştir. Yapı birleşimlerinin davranışını tespit etmek amacıyla yapılmış teorik, ampirik ve deneysel çalışmalar özet olarak sunulmuştur. Eurocode 3 (European Committee for Standardization (CEN), 2005) bölüm 1-1'de eksenel yüke maruz birleşimlerin başlangıç rijitliği ve moment kapasitesinin belirlenmesi için bir hesap metodu sunulmamıştır. Yapılan çalışmada bu eksik giderilmeye çalışılmıştır. Eğilme momenti ve eksenel yüke maruz kolon-kiriş birleşimleri için birleşim parametrelerinin genel birleşim davranışına katkısını esas alan bir metot sunulmuştur. Analitik sonuçlar ile deney sonuçları uyumludur.

Ashrafi vd. (2009), çalışmalarında zayıflatılmış ağdan faydalanılan ve özellikle planlama aşamasında ekstra faydası bulunan zayıflatılmış kiriş enkesitlerinin birleşimlerinin yeni bir türünü incelemişlerdir. Çalışma bireysel elemanlardan daha çok yapısal sistemle bütün olarak yerleştirilmiştir. 4, 8 ve 16 katlı yapıların lineer olmayan analizleri, enerji dağılımı, ekonomi ve inşa edilebilirliği en iyi şekilde kullanan zayıflatılmış kiriş enkesit bağlantılarının en etkili biçimi araştırılmıştır. Aşağı katlardaki birleşimleri üst katlara göre çok daha büyük etki sağladığı tespit edilmiştir.

Lemonis ve Gantes (2009), kolon-kiriş birleşimleri birleşenlerine ayrılarak, her bir parametre için lineer olmayan mekanik modeller oluşturulmuştur. Mekanik model ile çalışmanın, analitik ve sonlu elemanlar modeline göre avantajına dikkat çekilmiştir. Oluşturulan bu mekanik model yardımıyla birleşimin $M-\phi$ eğrisinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Birleşim çekme bölgesi T-parça kabulü yapılarak karakterize edilmiştir. Oluşturulan modelin doğruluğunu kıyaslamak için sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mekanik modelin yeterli doğrulukta sonuç verdiği görülmüştür.

Chan vd. (2009), çalışmalarında yeni bir deprem sönümleyicisi olan akma esaslı kesme paneli cihazı olarak adlandırılan akabilen kayma paneli parçasının inşaat yapılarında kullanımını üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu kayma panelleri kare kesitli ince cidarlı bir kesitinin plastik atma deformasyonu ile enerji sönümleyen bir sistemdir. Bu sistemlerin kullanıldığı 19 adet statik ve deney yapılmıştır. Deneylelerdeki performans levhanın narinliğinden etkilenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sönümleyicilerin üretimi, uygulaması ve değiştirilmesinin kolay ve ucuz olduğu görülmüştür. Akma esaslı kesme panelinin mevcut çelik çerçevede yapıların sismik güçlendirilmesinde geçerli bir alternatif olabileceği görülmüştür.

Kim ve Kim (2009), çalışmalarında, FEMA-350, FEMA-351, FEMA-356 (Federal Emergency Management Agency, 2000b, 2000a; Venture, 2000) tarafından sismik bağlantı olarak tavsiye edilen kademeli yıkılma kapasitesi dayanımı zayıflatılmış kiriş kesiti kaynaklı plaka kaplı başlık ve kaynaklı güçlendirilmemiş başlık birleşimlerinin kademeli yıkılma kapasitelerini incelemişlerdir. Bu kademeli göçme kapasitesi tasarımı için iki tip moment taşıyan çelik çerçeve dikkate alınmıştır. Üç farklı sismik bağlantıları içeren çelik moment taşıyan çerçevelerin sismik analiz sonuçlarına göre bağlantı şekilleri arasında çok az farklar gözlenmiştir. Ancak kademeli yıkılma kapasitesi dayanımının orta derece sismik yükler altında bağlantı tiplerine bağlı olarak etkilendiği gözlemlenmiştir. Zayıflatılmış kiriş kesiti bağlantıların dönme kapasitesinin diğer kaynaklı plaka kaplı başlıklı ve kaynaklı güçlendirilmemiş başlıklı bağlantılardan daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Zayıflatılmış kiriş kesitli bağlantıların süneklik kapasitesinin diğer bağlantılardan fazla olmasına rağmen süneklik kapasitesinin başlıklardaki kesit kaybından olduğu sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada; kaynaklı plaka kaplı başlıklı bağlantının özellikle orta dereceli sismik yüklerle tasarlanan sistemlerde kademeli göçme dayanımının daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Kim vd. (2010), çalışmalarında alt ve üst başlıkları köşebentli ve gövdesi de köşebentlerle tutulmuş kolon-kiriş birleşim bölgelerinin davranışlarını araştırmışlardır. Yazarlar daha önce literatürde yapılan deney sonuçları ile yapay sinir ağları modeli oluşturmuşlar ve elde edilen sonuçlara literatürde bulunan yaklaşımlarla kıyaslamışlardır.

Díaz vd. (2011), tek yönde uzatılmış alın levhalı çelik birleşim davranışlarını ANSYS programı yardımıyla incelemişlerdir. Sayısal analiz modelinde bulonda öngerme kuvvetinin uygulanması, malzeme ve geometrik olarak doğrusal olmayan durumlar, alın levhası ile kolon arasındaki temas durumu oluşturulan modele dahil

edilmiştir. Analizden elde edilen sonuçlar, birleşimin elde edilen moment-dönme eğrisi karşılaştırılarak uyumlu olduğu görülmüştür. Moment-dönme eğrisini sonlu elemanlar analizi kullanarak belirleme prosedürü, tasarım momenti direncinin ve bağlantının ilk dönme sertliğinin nasıl elde edildiğine dair kısa bir açıklama ile birlikte verilmiştir.

Feng ve Young (2011), Çalışmalarında, kare ve dikdörtgen kutu kesitli kolon ve çapraz/dikme elemanın kaynaklı T ve X tipi birleşiminin aksenal basınç kuvveti altındaki düğüm noktası davranışını incelemiştir. Çapraz eleman için çapraz eleman cidar kalınlığı ile kolon cidar kalınlığı baz alınmış bunun için sınır değerler gözden geçirilmiştir. Bu sınır değerler için burkulma modları sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Yönetmelikteki tasarım formülleri için verilen mekanizma durumları, çalışma kapsamında tanımlanan tasarım kuralları ile de karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

Brandonisio vd. (2012), bu çalışmada kiriş-kolon birleşimlerinin panel bölgesinin mekanik davranışı, tasarımı ve tasarımda kullanılan standartları incelenmiştir. Farklı geometri ve tipoloji ile karakterize edilen çelik çerçeve birleşimleri üzerinde doğrusal olmayan parametrik bir sayısal analizler gerçekleştirilmiş, bu analizler literatürde yer alan deneysel çalışma sonuçlarıyla doğrulanmıştır. İncelenen standartların, deneysel ve sayısal çalışmalarla elde edilen kayma dayanımlarını değerlendirme yeterliliği irdelenmiştir. Amerika ve Avrupa standartları arasında önemli farklar olduğu sonucuna varılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, sayısal ve deneysel sonuçların Amerikan standartları ile uyum içinde olduğunu gösterirken, Avrupa standartları ile bazı tutarsızlıkları olduğu görülmüştür. Kayma mukavemetinin %50-60 oranında yüksek hesaplanması sebebiyle Avrupa standartlarıncı öngörülen kapasite tasarımının uygulanması geçersiz olabilir. Bu sebeple birleşimlerin panel bölgesi kayma mukavemetinin daha iyi değerlendirilmesi için Avrupa standartlarının iyileştirilmesi önerilmiştir.

Dessouki vd. (2013), alın levhalı birleşimler parametrik çalışma gerçekleştirmek amacıyla ANSYS programı kullanılarak simüle edilmiş ve literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Parametre olarak kiriş derinliği, alın levhası kalınlığı, bulon çapı ve bulonlar arası mesafe incelenmiştir. Alın levhasının eğilme kapasitesini tespit etmek amacıyla akma çizgisi analiz yöntemi kullanılarak analitik hesap yöntemi sunulmuş ve bu yöntem sonlu elemanlar yöntemi ve şartnameler ile kıyaslanarak doğrulanmıştır.

Kataoka ve El Debs (2014), bu çalışmada beton dolgulu çelik borular, kirişler, cıvatalar, alın levhaları ve döşemelerden oluşan kompozit kiriş-kolon birleşimlerinin davranışını ele almışlardır. Çelik ve beton arasındaki etkileşimi iyileştirmeye ek olarak,

çok sayıda kesme bağlantı elemanı, bir binanın döngüden sonra bağlantı sertliğini ve genel davranışını da artırabileceği sonucuna varılmıştır.

Shahbaziana vd. (2015), çalışmalarında çelik kirişin kolon birleşimlerin davranışı analiz edilmiş ve farklı yaklaşımlar kullanarak analiz prosedürlerini basitleştirmek için faydalı araçların geliştirilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, çelik birleşimlerin moment-dönme tepkisini tahmin etmek için farklı yöntemler açıklanmaktadır. Özellikle yüksek sismik bölgelerde, yapıların davranışını daha iyi anlaşılmasına ve herhangi bir çökmenin önlenmesi amacıyla birleşimlerinin monoton ve çevrimsel yükleme altında moment-dönme tepkisini simüle edebilen sonlu elemanlar araçları geliştirilmiştir.

Hu ve Xue (2016) tarafından çelik kutu kolonlar ve kirişler arasındaki düzensiz birleşimlerin mekanik davranışı plastik mafsallara dayalı olarak deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Ayrıca panel bölgesinin gerilim durumuna bağlı olarak kayma direncini hesaplamak için bir formül önerilmiştir. Deneysel ve teorik çalışma sonunda, JD20 ve JD27 serisi numuneler, iyi sünekliğe ve daha sonra deformasyon kapasitesine sahip olduğu ve çelik kutu kolonlar ve kirişler arasındaki düzensiz birleşimlerinin iyi sismik performansa ve enerji dağıtma kapasitesine sahip olduğu ifade edilmiştir.

Bai vd. (2017), bu çalışmada, düşük devirli yorulma yüklemesine maruz kalan çelik kiriş-kolon birleşimlerinin çatlak ilerlemesini ve hasar mekanizmasını analitik ve deneysel olarak değerlendirmektedir. Kiriş ve kolon mafsallarında tam kopma göçmesi meydana gelene kadar kırılma hasarlarının boyutunu tahmin etmek için yığılı hasar mekaniğine dayalı hasar modeli geliştirilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi çerçevesinde uygulanmıştır. Bir çelik kirişin yorulma ömrü üzerindeki bileşik hareketin etkilerini dikkate alma yeteneğinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Mou vd. (2018), T-şekilli bir konektörle bağlanan eşit olmayan derinlikteki kiriş-kolon bağlantılarının çevrimsel davranışlarını ve göçme mekanizmalarını araştırmak ve sismik performanslarını değerlendirilmesi sunmuşlardır. T-şekilli bir bağlantı elemanı ile bağlanan eşit olmayan derinlikte kiriş-kolon bağlantılarının panel bölgesi kesme mukavemeti, aynı koşullar altında benzer eşit olmayan derinlikte kiriş-kolon bağlantılarından %20 daha yüksek olduğu görülmüştür. Kiriş derinliği oranının, T şeklinde bir bağlayıcı ile bağlanan eşit olmayan derinliğe sahip kiriş-kolon bağlantılarının panel bölgesi kesme dayanımı üzerindeki etkisi sınırlı ve T-şekilli bağlantı gövdesinin tüm kirişin eğilme momentine katkısının %3'ten az olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca T şeklindeki konektör için bir tasarım yöntemi önerilmiş ve hesaplama formülleri çıkarılmıştır.

Doung ve Sasaki (2019), diyaframların davranışları da dahil olmak üzere birleşimlerin statik ve çevrimsel performanslarının araştırılmasını amaçlamışlardır. Bu çalışma, diyafram deliği çapı ve kalınlığı, plaka-kolon genişlik oranı ve kolon genişlik-kalınlık oranı gibi çeşitli etki parametrelerini göz önünde bulundurarak plakadan kolon bağlantılarına ilişkin sayısal ve teorik olarak parametrik çalışmaların bir değerlendirmesini içermektedir. Sayısal ve analitik çalışmalar sonucunda, bağlantıların performansını ve sertliğini artırmak için diyaframların temel unsur olduğu görülmüştür.

Özyurt ve Das (2019), çalışmalarında çelik çaprazların aksenal basınç yüküne maruz kalan takviyesiz, yaka levhası takviyeli ve çift levha takviyeli kare içi boş kesitli T-birleşimleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçlarını sunmuşlardır. Bu birleşimlerin kapasitesini tahmin etmek için yeni bir tasarım denklemi geliştirilmiş ve sunulmuştur. Parametrik çalışma sonucunda, hem yaka hem de çift plaka takviyesi kullanımının kare içi boş kesitli T-birleşimlerinin nihai kapasitesini önemli ölçüde artırdığını gözlemlenmiştir.

Sağiroğlu vd. (2020), tarafından, IPE standart profilleri kullanılarak tasarlanan yarı rijit gövde korniyerli birleşimlerin moment-rotasyon özellikleri incelenmiştir. Eurocode 3 (European Committee for Standardization (CEN), 2005) standartlarının iyileştirilmesi için teknik veri sağlamak ve atık profillerin ekonomiye kazandırılma potansiyelini değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Üç farklı profil grubundan teşkil edilen dokuz adet tam ölçekli numune statik yükleme altında test edilmiş; moment, rotasyon ve gerinim değerleri hassas cihazlarla kaydedilmiştir. Gövde korniyer oranının artırılmasının plastik eğilme dayanımını %36'ya, maksimum moment kapasitesini ise %31'e kadar yükselttiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, birleşim kalınlığındaki artışın rijitlik oranlarını %93'e varan düzeylerde pozitif etkilediği görülmüştür. Gövde korniyer oranı yükseldikçe dayanımın arttığı ancak rotasyon kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Temel göçme modunun cıvataların aşırı yüklenmesi olduğu saptanmış ve Hav modelinin en ideal konfigürasyon olduğu sonucuna varılmıştır.

Huang vd. (2021), kaynaklı kutu-kolon ile I-kiriş bağlantılarının aşırı derece düşük döngülü yorulma hasarı davranışını araştırmayı amaçlamaktadır. Şiddetli sismik uyarıya maruz kalan çelik kiriş-kolon bağlantılarının aşırı derece düşük döngülü göçme davranışını incelemek için çevrimsel yükleme testleri gerçekleştirilerek yorulma kırılma davranışı incelenmiştir.

Maali vd. (2022), tarafından, soğukta şekillendirilmiş çelik kolon-kiriş birleşimlerinde kullanılan yeni bulonlu ve kaynaklı birleşim tiplerinin yapısal davranışları ve rotasyon kapasiteleri deneysel olarak incelenmiştir. Eurocode 3

(European Committee for Standardization (CEN), 2005) standartlarının iyileştirilmesine yönelik teknik veri sağlamak amacıyla tam ölçekli statik yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 1 mm ile 2 mm arasında değişen farklı kiriş ve guse levhası kalınlıklarına sahip altı numune, kaynaklı ve bulonlu olmak üzere iki ana grup altında sistematik olarak test edilmiştir. Kaynaklı birleşimlerin daha yüksek moment direnci ve başlangıç rijitliği sergilediğini, ancak rotasyon kapasitelerinin bulonlu birleşimlere kıyasla daha düşük kaldığını göstermiştir. Bulonlu birleşimlerin ise daha yüksek enerji sönümleme kapasitesi sunarak yarı-rijit bir davranış sergilediği saptanmıştır. Sonuç olarak, birleşim tipinin göçme modları üzerinde belirleyici olduğu; bulonlu sistemlerde guse levhası yırtılması, kaynaklı sistemlerde ise profil burkulması görüldüğü saptanmıştır.

Ru vd. (2022), çalışmalarında momente dayanıklı çelik çerçevelerin sismik direncini artırmak için, eğimli konik çelik levha sönümleyicilerle donatılmış yeni bir tip kendinden merkezlemeli kiriş-kolon birleşimi tanıtmışlardır. Basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında konik çelik levhanın çekme dayanımı bağlantının taşıma gücünde önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Konik çelik plakaların boyutunu ve sayısını ayarlayarak birleşimin histeretik davranışı kolaylıkla tasarlanabileceği ifade edilmiştir.

Sun vd. (2022), deprem sonrası yapısal işlevselliğin hızla restorasyonunu sağlamak amacıyla geliştirilen, değiştirilebilir takviyeli korniyer çeliğine sahip yenilikçi bir kiriş-kolon birleşim sistemi incelenmiştir. Deprem sonrası gerçekleştirilen parça değişimi ve halatların yeniden gerilmesiyle sismik performansın başarılı bir şekilde geri kazanıldığı tespit edilmiştir. Sistemin, hasar sonrası hızlı ve düşük maliyetli onarım imkânı sağlayarak yapısal direnci artırdığı sonucuna varılmıştır.

Zhong vd. (2023) tarafından, birleştirilmiş çelik çubuk enerji sönümleyiciler ile donatılmış yenilikçi bir çelik kiriş-kolon birleşiminin sismik performansı ve onarılabilirliği sistematik olarak incelenmiştir. Hasarlı birleşimlerin, sadece sönümleyici elemanların değiştirilmesiyle orijinal mekanik özelliklerini tam olarak geri kazandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, önerilen bu sistemin sismik dirençli ve düşük maliyetli onarılabilirliğe sahip binalar için uygulanabilir bir çözüm sunduğu, geliştirilen teorik tahmin yöntemlerinin deneysel verilerle yüksek uyum sergilediği ortaya konulmuştur.

Kılıç vd. (2023), tarafından, IPE standart profilleri kullanılarak oluşturulan ve üçgen berkitmelerle desteklenen üst ve alt T-kesitli birleşimlerin yarı-rijit davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kaynaklı birleşimlerdeki yapısal sorunların giderilmesi ve atık profillerin verimli kullanımı amaçlanmıştır. Statik yükleme altında 24 laboratuvar deneyi yürütülmüş; sonuçlar ANSYS-Workbench yazılımı ve Frye-

Morris modeli kullanılarak doğrulanmıştır. Flanş/gövde kalınlık oranı ile berkitme kalınlığındaki artışın moment kapasitesini ve enerji sönümlenme değerlerini genelde yükselttiğini göstermiştir. Çift sıralı cıvatalı sistemlerin, tek sıralı olanlara kıyasla belirgin şekilde daha yüksek enerji emilimi sağladığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kaynaklı T-birleşimlerin yapısal yeterliliği kanıtlanmış ve kiriş boyutlarına göre uygulanması gereken minimum birleşim uzunluğu ile berkitme kalınlığına dair özgün tasarım kriterleri sunulmuştur.

Maali vd. (2023), tarafından, soğukta şekillendirilmiş çelik ile altıgen takviye levhalı ve vidalı kiriş-kolon birleşimlerinin yapısal davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Kiriş ve levha kalınlıkları ile berkitme kullanımının moment-rotasyon karakteristiği ve enerji sönümlenme kapasitesi üzerindeki etkilerinin saptanması amaçlanmıştır. 15 adet tam ölçekli konsol numunesi statik yükleme altında test edilmiş ve veriler Eurocode 3 (European Committee for Standardization (CEN), 2005) standartlarına göre değerlendirilmiştir. Kiriş kalınlığı artışının moment direncini artırdığını, berkitme kullanımının ise enerji sönümlenmesini iyileştirdiğini ancak göçme modlarını değiştirmediğini göstermiştir. Göçme şekillerinin büyük oranda kiriş/levha kalınlığı oranına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, vidalı birleşimlerinin kaynaklı birleşimlere kıyasla daha sünek ve ekonomik olduğu belirlenmiştir. İdeal performans için oranının 1'den küçük, levha kalınlığının ise en az 1,5 mm olması gerektiği vurgulanmıştır.

Liu vd. (2024) tarafından depreme dayanıklı çelik çerçeveler için geliştirilen hasar toleranslı ve değiştirilebilir bir kiriş-kolon birleşiminin sismik performansı incelenmiştir. Optimize edilmiş tasarım parametreleriyle, ana yapısal elemanlar korunurken istenilen dayanım ve enerji sönümlenme kapasitelerine güvenle ulaşabileceği bilimsel olarak ortaya konulmuştur.

Shi vd. (2025) tarafından, çelik kirişler ile yapma kutu kolonlar arasındaki çift taraflı levha takviyeli birleşimlerin sismik performansı sistemli bir şekilde incelenmiştir. Flanş levhalı birleşimlerde kaynak erişim deliklerinin kullanımının gereksiz olduğu sonucuna varılarak tasarım iyileştirmeleri önerilmiştir.

Maali vd. (2025), tarafından, sismik uygulamalar için soğukta şekillendirilmiş çelik kiriş-kolon vidalı birleşimlerinin yapısal davranışı araştırılmıştır. Profil ve gövde plakası kalınlıkları ile takviye levhası kullanımının; süneklik ve enerji sönümlenme gibi sismik parametreler üzerindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Sekiz adet tam ölçekli numune FEMA-350 (Federal Emergency Management Agency, 2000b) protokolü takip edilerek çevrimsel yükleme altında test

edilmiş ve ABAQUS yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri yürütülmüştür. Kiriş kalınlığı artışının taşıma kapasitesini artırdığı, ancak takviye levhası kullanımının enerji sönümlenme kapasitesini bazı konfigürasyonlarda düşürebildiği saptanmıştır. En ideal sismik performansın 1,5 mm profil ve gövde plakası kalınlığına sahip modelde elde edildiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, birleşim rijitliğinde kiriş/levha kalınlığı oranının hayati önem taşıdığı ve geliştirilen sayısal modellerin deneysel verilerle %10'un altında bir varyasyonla yüksek korelasyon gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca statik yüklemenin çevrimsel yüklemeye kıyasla daha fazla enerji sönümü sağladığı saptanmıştır.

Özetle, çelik kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel yükler altındaki davranışı üzerine yapılan çalışmalar, genellikle moment-rotasyon ilişkisi, plastik mafsalsal gelişimi, enerji sönümlenme kapasitesi ve göçme mekanizmaları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ancak literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı, bağlantı davranışını tekil eleman düzeyinde ele almakta olup, bu birleşimlerin alüminyum köpük malzemelerle etkileşimi yeterince incelenmemiştir. Özellikle sismik yükler altında sistem düzeyinde oluşan etkileşimlerin göz ardı edilmesi önemli bir eksikliktir. Bu tez çalışması, birleşim davranışını alüminyum köpük malzeme bileşenleriyle birlikte değerlendirerek bir sismik performans analizi sunmayı amaçlamaktadır.

1.2. Tezin Konusu ve Amacı

Bu tez çalışmasının konusu, çelik çerçeve yapı sistemlerinde deprem etkileri altında enerji sönümlenme kapasitesini artırmaya yönelik yenilikçi bir yapısal yaklaşımın sayısal olarak incelenmesidir. Çalışma kapsamında, alüminyum köpüklerin hem sandviç kompozit döşeme sistemlerinde çekirdek malzemesi olarak hem de kutu kesitli çelik kolonlarda dolgu malzemesi olarak kullanıldığı bütünleşik bir yapı sistemi ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, yapı elemanlarının yalnızca taşıyıcı değil, aynı zamanda deprem enerjisini kontrollü biçimde sönümleyebilen bileşenler olarak çalışması hedeflenmektedir.

Tezin temel amacı, alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozit döşemelerin ve alüminyum köpük dolgulu çelik kolonların, çelik çerçeve yapıların sismik davranışı üzerindeki etkilerini sayısal analizler aracılığıyla değerlendirmektir. Bu doğrultuda, yenilikçi ve geleneksel sistemler arasındaki sismik performans, başlıca doğal frekansları, yanal yer değiştirme-zaman eğrileri, görelî kat ötelemeleri, Von Mises gerilme değerleri ve dağılımları, histeretik yük-yerdeğiştirme eğrileri, süneklik, histeretik enerji yutma kapasitesi ve monotonik enerji yutma kapasitesi potansiyeli

olmak üzere ele alınmıştır. Özellikle, deprem sırasında oluşan enerjinin, yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip alüminyum köpük içeren döşeme ve kolon elemanları aracılığıyla kontrollü bir şekilde dağıtılması hedeflenmiştir.

Bu bağlamda, sandviç kompozit döşemelerin sismik yükler altında çelik çerçeve birleşimlerinde, kirişlerde ve kolonlarda oluşabilecek plastik deformasyon taleplerini azaltma potansiyeli; alüminyum köpük dolgu kolonların ise burkulma davranışı, süneklik ve döngüsel yükler altındaki kararlılığı iyileştirme potansiyeli birlikte ele alınmıştır. Bu tez kapsamında yürütülen sayısal çalışmalar, alüminyum köpüğün, sandviç kompozit döşeme sistemlerinde çekirdek katmanı ve kutu kesitli çelik kolonlarda dolgu malzemesi olarak ayrı ayrı ve birlikte kullanımının, çelik çerçeve yapıların genel sismik davranışı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez, alüminyum köpüğün farklı yapısal rollerde, sandviç kompozit döşeme sistemlerinde çekirdek katman ve kutu kesitli çelik kolonlarda dolgu malzemesi olarak, birlikte ve ayrı ayrı kullanıldığı bir sistem yaklaşımı çerçevesinde çelik yapıların sismik performansındaki iyileşmenin nicel bir değerlendirmesini sunmayı amaçlamaktadır.

1.3. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında, çelik çerçeve yapı sistemlerinde sismik davranışın iyileştirilmesine yönelik olarak, alüminyum köpük esaslı sandviç kompozit döşemeler ve alüminyum köpük dolgu çelik kolonlardan oluşan bütünleşik bir yapısal sistem ele alınmıştır. Çalışmada, geleneksel çelik yapı sistemlerinden farklı olarak, yapı elemanlarının yalnızca taşıyıcı işlev görmesi değil, aynı zamanda deprem enerjisini kontrollü biçimde sönümleyebilen bileşenler olarak davranması hedeflenmiştir.

Bu kapsamda öncelikle, çekirdeği alüminyum köpükten ve yüzey levhaları alüminyum sacdan oluşan sandviç kompozit paneller döşeme elemanı olarak modellenmiştir. Sandviç kompozit döşemelerde, yüzey levhalarının eğilme rijitliğine katkısı ile alüminyum köpük çekirdeğin kesme rijitliği ve enerji yutma kapasitesi birlikte değerlendirilmiştir. Döşeme sisteminin çelik çerçeve birleşimlerinde ve taşıyıcı elemanlarda oluşan gerilme değerleri ve dağılımları üzerindeki etkisi sayısal analizler aracılığıyla incelenmiştir.

Tez kapsamında ayrıca, alüminyum köpüklerin kutu kesitli çelik kolonlar içerisinde dolgu malzemesi olarak kullanımını ele alınmıştır. Bu bağlamda, köpük dolgunun kolonların aksenal yük, eğilme momenti ve döngüsel yükler altındaki davranışına etkileri sayısal olarak değerlendirilmiştir. Özellikle kolonların burkulma

davranışı, rijitlik kaybı ve yük–yerdeğiştirme tepkileri, boş kesitli kolonlar ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bu incelemelerde, alüminyum köpüğün çelik kabuk ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan davranış değişimleri dikkate alınmıştır.

Sandviç kompozit döşeme sistemleri ile alüminyum köpük dolgulu kolonların birlikte kullanıldığı çelik çerçeve modelleri oluşturularak, bu bütünleşik sistemin deprem etkileri altındaki yapısal davranışı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen sayısal modeller aracılığıyla; yapı rijitliği, iç kuvvet dağılımları, kat ötelenmeleri ve enerji sönümlenme mekanizmaları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler, farklı sistem konfigürasyonlarının karşılaştırılmasına olanak sağlayacak şekilde yürütölmüştür.

Tezde yer alan tüm analizler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekteşirilmiş; doğrusal olmayan malzeme davranışı ve geometrik etkiler dikkate alınmıştır. Sandviç kompozit döşemeler ve köpük dolgulu kolonlar, yapı sistemi içerisindeki etkileşimleriyle birlikte ele alınmış; eleman bazlı değerlendirmelerin ötesinde, sistem düzeyinde bir davranış incelemesi yapılmıştır. Böylece, alüminyum köpüklerin farklı yapısal rollerde kullanımının çelik çerçeve yapıların sismik tepkisi üzerindeki etkileri kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır.

1.4. Tezin Önemi ve Literatüre Katkısı

Deprem mühendisliği alanında yürütölen güncel çalışmalar, çelik yapı sistemlerinin süneklik ve dayanım açısından önemli avantajlara sahip olduğunu ortaya koymakla birlikte, bu sistemlerin enerji sönümlenme kapasitesinin artırılmasına yönelik yeni yaklaşımlara duyulan ihtiyacı da açıkça göstermektedir. Bu bağlamda, hücre metal malzemeler arasında yer alan alüminyum köpükler, düşük yoğunlukları, yüksek özgül rijitlikleri ve üstün enerji yutma özellikleri nedeniyle son yıllarda yapı mühendisliği araştırmalarında dikkat çeken bir malzeme grubu hâline gelmiştir. Ancak yapılan kapsamlı literatür taraması kapsamında, alüminyum köpüklerin taşıyıcı sistem ölçeğinde, bütünleşik bir yapısal çözüm içerisinde ele alındığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle çalışmanın literatüre özgün bir katkı sunması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasının temel önemi, alüminyum köpüklerin çelik çerçeve yapılarda yalnızca sandviç kompozit döşemelerin çekirdek malzemesi olarak değil, aynı zamanda kutu kesitli çelik kolonların dolgu malzemesi olarak da kullanıldığı bütöncöl bir yapısal sistem önermesidir. Literatürde alüminyum köpük dolgulu çelik elemanlar veya sandviç panel uygulamaları çoğunlukla birbirinden bağımsız olarak incelenmiş; bu iki

yaklaşımın aynı yapı sistemi içerisinde birlikte değerlendirilmesine yönelik çalışmalar bulunmamaktadır. Bu yönüyle tez, alüminyum köpüğün farklı yapısal rollerde eş zamanlı kullanımını ele alarak literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın literatüre katkılarından biri, alüminyum köpük esaslı sandviç kompozit döşemelerin çelik çerçeve sistemlerinin genel sismik davranışı üzerindeki etkilerinin sistem düzeyinde incelenmiş olmasıdır. Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, sandviç panellerin yalnızca eleman bazlı mekanik davranışına odaklanmakta; taşıyıcı sistem içerisindeki etkileri sınırlı biçimde ele almaktadır (Garg ve Chalak, 2019; Yang vd., 2023; Akour ve Akour, 2025; Zhang vd., 2025; Roberts ve Davies, 2023; Zhao vd., 2024). Bu tezde ise döşeme sisteminin yapı rijitliğine, sistem elemanlarındaki kuvvet uyumuna ve enerji sönümlenme mekanizmalarına olan katkısı bütüncül olarak değerlendirilmiştir.

Bir diğer özgün katkı, alüminyum köpük dolgu kutu kesitli kolonların doğrusal olmayan davranışının, boş kesitli kolonlarla karşılaştırmalı biçimde incelenmesidir. Bu karşılaştırmalar sayesinde, köpük dolgunun kolon stabilitesi, rijitlik kaybı ve döngüsel yükler altındaki performansa etkileri nicel olarak ortaya konmuştur. Böylece, alüminyum köpük dolgunun yalnızca yerel bir güçlendirme unsuru değil, sistem davranışını etkileyen aktif bir bileşen olduğu gösterilmiştir.

Son olarak, bu tez, alüminyum köpük esaslı yapısal bileşenlerin çelik çerçeve sistemlerde kullanımına yönelik sayısal bir modelleme yaklaşımı sunmakta olup, gelecekte gerçekleştirilecek deneysel ve analitik çalışmalara referans teşkil edecek bir çerçeve oluşturmakta ve daha yüksek sismik performansa sahip, yapısal olarak verimli ve hafif sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulguların, enerji sönümlenme kapasitesi yüksek, hafif ve yenilikçi çelik yapı sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı ve bu alandaki akademik literatüre özgün bir perspektif kazandıracağı değerlendirilmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

Depremler, dünya genelinde insan hayatı, yapı güvenliği ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından en yıkıcı doğal afetler arasında yer almaktadır. Küresel istatistikler, depremlerin her yıl binlerce can kaybına ve milyarlarca dolarlık doğrudan ve dolaylı ekonomik kayba yol açtığını göstermektedir. Özellikle Pasifik Ateş Çemberi, Alp–Himalaya kuşağı ve Akdeniz–Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alan Türkiye gibi ülkelerde, yapıların deprem etkileri altındaki davranışı hayati önem taşımaktadır. 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri, 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık-Elbistan, Türkiye), 1994 Northridge (ABD) ve 1995 Kobe (Hyogoken–Nanbu, Japonya) depremleri gibi büyük ölçekli sismik olaylar, modern mühendislik prensiplerine göre tasarlanmış yapılarda dahi ciddi hasarların ve işlev kayıplarının meydana gelebildiğini açıkça ortaya koymuştur (Nayir vd., 2026; Youssef vd., 1995; Yön vd., 2025; Bayraktar vd., 2013; Altıok et al., 2025). Şekil 1’de, Kobe (1995) ve Northridge (1994) depremlerinde çelik yapılarda meydana gelen hasar örnekleri sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 1. Kobe (1995) (a) ve Northridge (1994) (b) depremlerinde çelik yapı hasar örnekleri (Elkholy ve Meguro, 2004; Degenkolb Engineers, 2019)

Deprem mühendisliğinin temel amacı, yapıların deprem sırasında tamamen hasarsız kalmasını sağlamak değil; göçmenin önlenmesi, can güvenliğinin korunması ve mümkün olduğunca onarılabilir hasar seviyelerinin sağlanmasıdır (Haselton vd., 2007; Majhi ve Shrikhande, 2021; Wang ve Sun, 2022). Bu yaklaşım, performans esaslı tasarım kavramının temelini oluşturmaktadır olup, FEMA-356 (Federal Emergency Management Agency, 2000a), Eurocode 8 (European Committee for Standardization

(CEN), 2004) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) gibi modern sismik yönetmeliklerde açıkça vurgulanmaktadır (European Committee for Standardization (CEN), 2005). Bu bağlamda, taşıyıcı sistemlerin yalnızca yeterli dayanım kapasitesine sahip olması değil, aynı zamanda yeterli süneklik ve enerji sönmleme yeteneği göstermesi de zorunlu hâle gelmiştir.

Çelik çerçeve yapılar, yüksek mukavemet/ağırlık oranları, belirgin süneklik kapasiteleri, prefabrikasyona uygunlukları ve hızlı inşa avantajları nedeniyle deprem mühendisliğinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Çeliğin elastik-plastik davranış karakteristiği, deprem sırasında büyük şekil değiştirmelere izin vererek ani ve gevrek göçme mekanizmalarının önlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle çelik yapılar, özellikle deprem tehlikesi yüksek bölgelerde güvenilir bir taşıyıcı sistem alternatifi olarak kabul edilmektedir. Ancak geçmiş depremlerden elde edilen saha gözlemleri ve hasar incelemeleri, çelik yapıların deprem performansının yalnızca çelik malzemenin sünekliği ile açıklanamayacağını açıkça göstermiştir.

Özellikle 1994 Northridge depreminde, o dönemin yönetmeliklerine uygun şekilde tasarlanmış çok sayıda moment aktaran çelik çerçevede, kiriş-kolon birleşimlerinde beklenmedik ve yaygın gevrek kırılmalar meydana gelmiştir (Federal Emergency Management Agency, 2000c). Benzer şekilde, 1995 Kobe depreminde kolon burkulmaları, taban plakası hasarları ve birleşim bölgelerinde ciddi performans kayıpları gözlemlenmiştir (Hitaka vd., 2003; Horikawa ve Sakino, 1996). Bu hasar türleri; birleşim bölgelerinde gerilme yığılmaları, kolonlarda yerel ve genel burkulma mekanizmaları ve yetersiz enerji sönmleme kapasitesi gibi yapısal zafiyetlere işaret etmektedir (Roeder vd., 2002). Bu deneyimler, çelik yapıların deprem davranışının yalnızca eleman dayanımı temelinde değil, sistem düzeyinde ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Geleneksel çelik çerçeve sistemlerde döşeme elemanları çoğunlukla ikincil taşıyıcı olarak değerlendirilmekte ve ana taşıyıcı sistem davranışına katkıları sınırlı şekilde dikkate alınmaktadır. Oysa döşeme sistemleri, hem yatay diyafram davranışı hem de kiriş-kolon birleşimlerine aktardıkları kuvvetler nedeniyle, yapının gerçek dinamik davranışında belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle trapez sac üzerine beton dökülerek oluşturulan geleneksel kompozit döşemeler, önemli bir diyafram rijitliği sağlamakla birlikte, yapıya eklenen yüksek kütle nedeniyle deprem sırasında oluşan atalet kuvvetlerini artırmaktadır. Bu durum, birleşim bölgelerinde tasarımda öngörülenden daha yüksek moment ve kesme kuvvetlerinin oluşmasına neden olabilmektedir.

Bu noktada, çelik yapıların deprem performansının; taşıyıcı elemanların kesit özellikleri, birleşim detayları ve döşeme sistemlerinin birlikte değerlendirilmesi gereken bütüncül bir problem olduğu kabul edilmektedir. Yapı sisteminin genel sünekliliği ve enerji sönümleme kapasitesi, yalnızca çelik malzemenin doğasına değil; kolonların burkulma davranışına, birleşim bölgelerindeki moment–dönme ilişkisine ve döşeme–kiriş etkileşimine de doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, geleneksel sistemlerin ötesinde, yapısal elemanlara enerji yutma ve hasar kontrolü fonksiyonları kazandıran yenilikçi malzeme ve sistemlere olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Son yıllarda, modern deprem mühendisliği yaklaşımı, yapıyı tamamen rijitleştirmek yerine, deprem enerjisinin yapı içerisinde kontrollü biçimde sönümlenmesini hedeflemektedir. Bu yaklaşımda amaç, hasarın belirli ve öngörülebilir bölgelerde toplanması, yapının genel stabilitesinin korunması ve deprem sonrası işlevselliğin mümkün olduğunca sürdürülmesidir. Bu doğrultuda, yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip malzemelerin ve yapısal sistemlerin kullanımı, güncel araştırmaların odak noktalarından biri hâline gelmiştir.

Bu bağlamda, sandviç kompozit sistemler ve metalik köpükler, yapı mühendisliği literatüründe giderek artan bir ilgi görmektedir (Gibson ve Ashby, 2014; Zenkert, 1995). Sandviç kompozit sistemler, rijit dış yüzey tabakaları ile hafif ve enerji yutucu bir çekirdek malzemenin birleşiminden oluşmakta; yüksek özgül rijitlik, düşük ağırlık ve üstün eğilme performansı sunmaktadır (Daniel ve Ishai, 2005; Vincent, 2012). Alüminyum köpükler ise hücreli yapıları sayesinde düşük yoğunluk ile yüksek enerji yutma kapasitesini bir arada sağlayan ileri mühendislik malzemeleri olarak öne çıkmaktadır (Banhart, 2001; Ashby vd., 2000). Alüminyum köpüğün izotropiye yakın mekanik davranışı, uzun plato gerilmesi sergileyen gerilme–şekil değiştirme karakteristiği ve yangına karşı dayanımı, bu malzemeyi sismik uygulamalar açısından cazip kılmaktadır (Gibson ve Ashby, 2014; Banhart, 2001).

Literatürde, alüminyum köpük dolgulu sandviç panellerin darbe, üç nokta eğilme ve quasi-statik yükler altındaki davranışı üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Vaidya vd., 2006; Crupi vd., 2013; Endut vd., 2018; G. Sun vd., 2018; Guo vd., 2019; Zhao vd., 2021; Lu ve Zhang, 2022; Yan vd., 2025; W. Sun vd., 2026; Latour vd., 2021; Huang vd., 2023; Yaseer Omar vd., 2015). Benzer şekilde, köpük dolgulu çelik tüp elemanların aksenal basınç ve burkulma davranışı da eleman ölçeğinde detaylı biçimde incelenmiştir (Wang vd., 2022; Güler vd., 2023; Zhang vd., 2010; Børvik vd., 2003; Yan vd., 2007). Bu çalışmalar, metalik köpüklerin enerji yutma kapasitesini ve burkulma davranışı üzerindeki olumlu etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak bu

elemanların, gerçek bir taşıyıcı sistem içerisinde birlikte kullanıldığında, yapının genel sismik davranışını nasıl etkilediği sorusu büyük ölçüde yanıtız kalmıştır.

Özellikle alüminyum köpük dolgulu sandviç döşemelerin çelik çerçeve yapılarda rijitlik dağılımı, kat ötelenmeleri ve enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkileri; köpük dolgulu çelik kolonların ise burkulma davranışı, hasar yayılımı ve birleşim bölgelerindeki moment–dönme ilişkileri üzerindeki katkıları, literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır (Yu vd., 2024; Vidwans vd., 2023; Yan vd., 2020; Lu ve Wang, 2023; Cui vd., 2022; Qiaovd., 2022). Döşeme, kolon ve birleşim bölgelerinin birlikte değerlendirilmediği yaklaşımlar, sistem davranışının tam olarak anlaşılmasını zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, alüminyum köpük dolgulu sandviç döşemeler ile köpük dolgulu çelik kolonların, çelik çerçeve yapıların sismik davranışı üzerindeki etkilerini bütüncül bir taşıyıcı sistem perspektifiyle incelemektir. Bu kapsamda, söz konusu sistemlerin rijitlik, enerji sönümleme kapasitesi ve kat ötelenmeleri üzerindeki etkileri değerlendirilmekte; geleneksel trapez sac ile betonarme döşemelerden ve metalik köpük dolgulu kutu kolonlar ile içi boş çelik kolonlardan oluşan sistemlerle karşılaştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca, birleşim bölgelerinde moment–dönme ilişkileri, histeretik davranış ve kümülatif enerji sönümleme kapasitesi detaylı olarak analiz edilerek, alüminyum köpük kullanımının çelik yapıların deprem performansını iyileştirme potansiyeli ortaya konulmaktadır.

Bu yönüyle çalışma, literatürde çoğunlukla ayrı ayrı ele alınmış olan metalik köpükler, sandviç kompozit sistemler ve çelik çerçeve yapıların sismik davranışı konularını, tek bir bütüncül çerçevede bir araya getirmekte ve yapı ölçeğinde yeni bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır.

2.1. Çelik Çerçeve Yapıların Sismik Davranışı

Bir yapının deprem etkisi altındaki davranışı, esas olarak yapının kütle dağılımı, rijitlik özellikleri, doğal titreşim periyotları ve sönüm kapasitesi tarafından belirlenmektedir. Deprem yer hareketi sırasında zeminde oluşan ivmeler, yapının kütlesi ile orantılı atalet kuvvetlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu kuvvetler, taşıyıcı sistem boyunca dağılarak kolonlar, kirişler, birleşim bölgeleri ve döşeme sistemleri üzerinde iç kuvvetler ve şekil değiştirmeler oluşturur.

Çelik çerçeve yapılarda yatay yüklerin taşınması genellikle moment aktaran birleşimler aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sistemlerde, deprem enerjisinin büyük bir bölümü kiriş uçlarında ve birleşim bölgelerinde meydana gelen plastik şekil

değiştirmeler yoluyla sönümlenir. Geleneksel kapasite tasarımı yaklaşımı, plastik mafsallaşmanın kiriş uçlarında yoğunlaşmasını, kolonların ise mümkün olduğunca elastik sınırlar içerisinde kalmasını hedeflemektedir. Bu yaklaşım, güçlü kolon–zayıf kiriş prensibi olarak tanımlanmakta ve ani göçme mekanizmalarının önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Ancak gerçek yapı davranışı, idealize edilmiş bu varsayımlardan önemli ölçüde sapabilmektedir (Chopra, 2017). Döşeme sistemleri, cephe elemanları ve dolgu duvarları gibi ikincil olarak kabul edilen bileşenler, yapının yatay rijitliğini ve kuvvet dağılımını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Verma vd., 2021; FEMA., 2002). Özellikle kompozit döşeme sistemleri, kirişlerle birlikte çalışarak birleşim bölgelerinde beklenenden daha yüksek moment ve kesme kuvvetlerinin oluşmasına neden olabilmektedir (Priestley vd., 2007). Bu durum, plastikleşmenin öngörülen bölgeler dışında gelişmesine ve birleşim hasarlarının artmasına yol açmaktadır.

Çelik çerçeve yapılarda kolon elemanlarının davranışı da yapının performansı açısından kritik öneme sahiptir. Kolonlar, eksenel basınç kuvveti ile birlikte eğilme momentlerine maruz kalmakta ve bu birleşik etki altında yerel ya da genel burkulma gösterebilmektedir. Özellikle ince cidarlı çelik kutu kesitlerde yerel burkulma, kolonun taşıma kapasitesinde ani düşüşlere neden olmakta ve hasarın hızlı biçimde yayılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu tür burkulma mekanizmaları, yapının sünek davranış kapasitesini sınırlandıran önemli faktörler arasında yer almaktadır.

2.1.1. Rijitlik, Süneklik ve Enerji Sönümleme Kavramları

Sismik tasarımda yapı performansını tanımlayan temel parametreler rijitlik, süneklik ve enerji sönümleme kapasitesi olarak öne çıkmaktadır. Rijitlik, yapının yatay yükler altındaki yer değiştirme direncini ifade etmekte olup, kat ötelenmelerinin kontrol altına alınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ancak aşırı rijit sistemler, deprem sırasında yapısal elemanlarda daha büyük atalet kuvvetlerinin oluşmasına sebebiyet vererek gerilmeleri artırabilmektedir.

Süneklik, yapının dayanım kaybı yaşamadan büyük plastik şekil değiştirmeler yapabilme yeteneğini tanımlamaktadır. Yüksek sünekliğe sahip sistemler, deprem enerjisini daha geniş bir deformasyon aralığında dağıtarak ani göçme riskini azaltmaktadır. Çelik malzeme doğası gereği sünek bir davranış sergilemekle birlikte, sistemin genel sünekliği yalnızca malzeme özelliklerine değil; birleşim detaylarına, eleman geometrilerine ve yük aktarım mekanizmalarına da bağlıdır.

Enerji sönümleme kapasitesi ise deprem sırasında yapıya giren enerjinin ne kadarının geri kazanılamaz biçimde dağıtılabildiğini göstermektedir. Bu enerji; plastik şekil değiştirmeler, içsel malzeme sönümü, sürtünme ve hasar mekanizmaları yoluyla sönümlenmektedir. Geleneksel çelik çerçeve sistemlerde enerji sönümleme büyük ölçüde plastik mafsallık bölgeleri ile sınırlı kalmakta, bu da hasarın belirli noktalarda yoğunlaşmasına neden olmaktadır.

Bu bağlamda, taşıyıcı sistem elemanlarına ek enerji yutma kapasitesi kazandıran yenilikçi malzemelerin kullanımı, sistem davranışının iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Alüminyum köpük gibi hücreli metalik malzemeler, uzun plato gerilmesi sergileyen mekanik davranışları sayesinde tekrarlı yükler altında yüksek enerji sönümleme kapasitesi sunmaktadır. Bu tür malzemelerin döşeme ve kolon sistemlerine entegre edilmesi, rijitlik-süneklik-enerji sönümleme dengesi açısından çelik çerçeve yapıların sismik performansını olumlu yönde etkileyebilecek potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

2.1.2. Enerji Sönümleme ve Yeni Yapı Malzemeleri İhtiyacı

Deprem mühendisliğinin temel prensiplerinden biri, yapıların sismik güvenliğinin yalnızca taşıma kapasitesiyle değil, aynı zamanda deprem sırasında yapıya aktarılan enerjiyi sönümleyebilme yeteneğiyle doğrudan ilişkili olmasıdır. Deprem yer hareketi, yapıya önemli miktarda kinetik enerji aktarır ve bu enerjinin yapı sistemi içerisinde kontrollü biçimde emilmesi, dağıtılması veya dönüştürülmesi gerekir. Aksi hâlde söz konusu enerji, birleşim bölgelerinde yoğunlaşan hasar ve ani göçme mekanizmaları şeklinde açığa çıkar.

Geleneksel çelik çerçeve sistemlerinde enerji sönümleme mekanizması, büyük ölçüde çelik elemanların plastik şekil değiştirme kapasitesine dayanmaktadır. Güçlü kolon-zayıf kiriş tasarım felsefesi doğrultusunda, deprem enerjisinin kontrollü bir biçimde kiriş uçlarında oluşan plastik mafsallar aracılığıyla tüketilmesi hedeflenmektedir. Bu yaklaşım göçmenin önlenmesi açısından etkili olmakla birlikte, enerji sönümlemenin doğrudan ana taşıyıcı elemanlarda kalıcı hasar oluşturması önemli bir dezavantajdır. Plastik mafsallar, deprem sonrası onarımı güç, maliyetli ve zaman alıcı hasar türlerini temsil etmekte; yapıların uzun süre hizmet dışı kalmasına neden olmaktadır.

Buna ek olarak, geleneksel sistemlerde yaygın olarak kullanılan boş çelik kolonlar birleşik aksenal yük ve eğilme etkisi altında burkulmaya yatkın davranış sergilerken, geleneksel trapez sac-betonarme kompozit döşemeler yüksek rijitlik sağlamakla birlikte

yapının toplam kütlesini artırarak sismik atalet kuvvetlerini büyötmektedir. Bu durum, özellikle birleşim bölgelerinde yüksek moment ve kesme taleplerine yol açmakta ve gevrek hasar riskini artırmaktadır. Dolayısıyla, yalnızca eleman bazlı tasarım yaklaşımları, çelik çerçeve yapıların gerçek deprem davranışını tam olarak temsil etmekte yetersiz kalmaktadır.

Bu nedenlerle modern deprem mühendisliği, yapıyı tamamen rijitleştirmek yerine, deprem enerjisini yapı genelinde kontrollü ve öngörülebilir biçimde sönümleyebilen sistemlerin geliştirilmesine yönelmiştir. Bu yaklaşımda amaç; hasarın yapı boyunca dağıtılması, sünek davranışın artırılması ve hasarın onarılabilir seviyelerde tutulmasıdır. Bu nedenle enerji sönümlene kapasitesi yüksek yeni yapı malzemeleri ve yapısal sistemler, güncel araştırmaların odağında yer almaktadır.

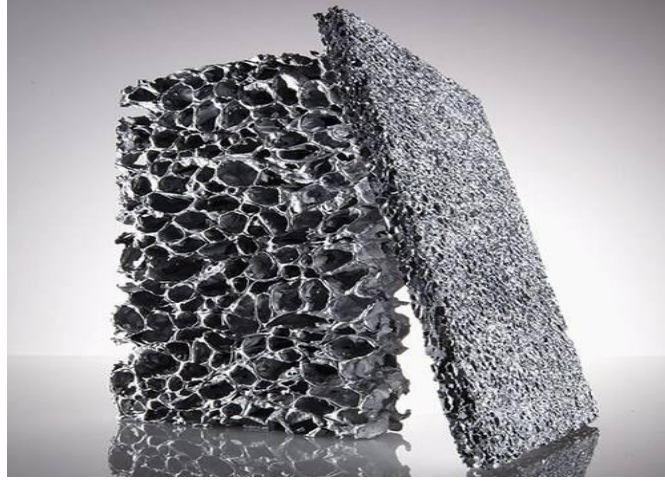
Bu doğrultuda geliştirilen sismik sönümleyiciler, taban izolatörleri ve özel enerji yutucu birleşimler yapı performansını artırabilmektedir; ancak bu sistemler çoğu zaman ek maliyet, tasarım karmaşıklığı ve bakım gereksinimi gibi dezavantajlar da beraberinde getirmektedir. Son yıllarda araştırmacıların ilgisi, yapının kendi taşıyıcı bileşenlerini aynı zamanda doğal enerji sönümleyiciler hâline getirebilecek ileri yapı malzemelerine yönelmiştir. Bu yaklaşımda amaç, deprem enerjisinin belirli birleşim bölgelerinde yoğunlaşmasını önleyerek yapı geneline dağıtılması ve kalıcı hasarın minimize edilmesidir.

Bu çerçevede kolon ve döşeme gibi birincil taşıyıcı elemanların yalnızca yük taşıyan değil, aynı zamanda enerji yutma kapasitesine sahip bileşenler olarak tasarlanması önem kazanmaktadır. Özellikle kolonlarda burkulma davranışının iyileştirilmesi, plastik şekil değiştirme kapasitesinin artırılması ve hasar yayılımının geciktirilmesi; yapı bütünlüğünün korunması ve deprem sonrası işlevselliğin sürdürülebilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu yaklaşım, metalik köpükler ve sandviç kompozit sistemler gibi ileri malzemelerin sismik tasarımda kullanılmasına yönelik araştırmaların temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

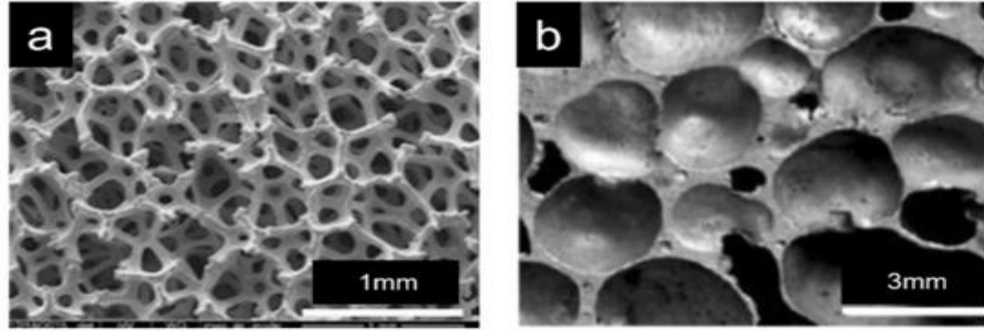
2.2. Alüminyum Metalik Köpük Çekirdekli Kompozit Sistemler

Metalik köpükler, kontrollü biçimde oluşturulmuş açık veya kapalı gözenekli hücreli iç yapıları sayesinde düşük yoğunluk ile birlikte yüksek özgül rijitlik, belirgin enerji sönümlene kapasitesi ve çok işlevli fiziksel özellikler sunan ileri mühendislik malzemeleri sınıfında yer almaktadır (Gibson ve Ashby, 2014; Ashby vd., 2000). Kapalı hücreli alüminyum köpüğün karakteristik hücreli mimarisi Şekil 2’de gösterilmiştir (Filter Elements, 2026). Açık hücreli ve kapalı hücreli metalik köpüklerin mikro yapısal

özellikleri, her bir türün farklı gözenek bağlantısı ve hücre duvarı konfigürasyonlarını vurgulayarak Şekil 3’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Parveez vd., 2022).



Şekil 2. Kapalı hücreli alüminyum köpüğün hücresel yapısı (Filter Elements, 2026).



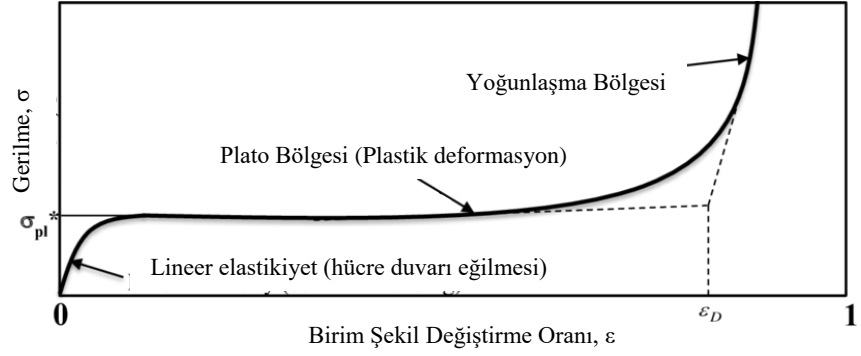
Şekil 3. Açık hücreli metal köpüğün (a) ve kapalı hücreli metal köpüğün (b) mikroyapısının optik mikrografları (Parveez vd., 2022).

Gözenek hacim oranının genellikle %70–90 aralığında olması, metalik köpüklerin yoğunluğunu katı metal muadillerinin yaklaşık %5–25’i seviyelerine düşürmekte; bu durum, özellikle yapı mühendisliği uygulamalarında kütle azaltımı açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Metalik köpükler, hücre morfolojisine bağlı olarak açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Açık hücreli köpükler; filtrasyon, akışkan geçirgenliği ve akustik uygulamalar açısından avantaj sağlarken, kapalı hücreli köpükler izole gözenek yapıları sayesinde daha yüksek mekanik dayanım, düşük su emilimi ve çevresel etkilere karşı daha kararlı bir davranış sunmaktadır. Bu nedenle kapalı hücreli metalik köpükler, taşıyıcı sistemlerde kullanılmaya daha elverişli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

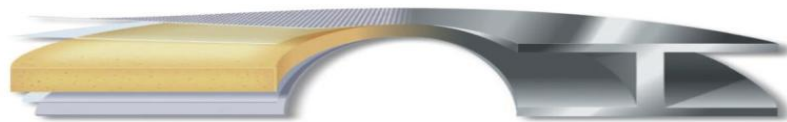
Metalik köpükler; nikel, bakır, çelik, titanyum ve alüminyum gibi farklı metallerden üretilebilmekle birlikte, alüminyum köpükler üretim kolaylığı, korozyon

direnci, geri dönüştürülebilirlik ve geniş bir yoğunluk aralığında üretilebilme olanakları sayesinde yapısal uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Banhart, 2001). Tipik olarak $0,2-1,0 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk aralığında üretilebilen alüminyum köpükler, göreceli yoğunluğa bağlı olarak değişen mekanik özellikler sergileyebilmekte ve bu özellikler, dinamik yükler altındaki davranış açısından önemli bir tasarım parametresi oluşturmaktadır. Şekil 4’de metalik köpükler için tipik bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi sunulmuştur (Haidar vd., 2016).



Şekil 4. Metalik köpükler için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (Haidar vd., 2016).

Yapısal mühendislikte metalik ve özellikle alüminyum köpüklerin en yaygın kullanım biçimlerinden biri, çekirdeği metalik köpük olan sandviç kompozit sistemlerdir. Bu sistemler; iki rijit yüzey levhası ile bu levhalar arasında yer alan hafif fakat enerji yutma kapasitesi yüksek bir çekirdekten oluşmaktadır. Sandviç kompozitlerin temel çalışma prensibi, yüzey levhalarını birbirinden ayırarak eğilme rijitliğini ağırlıkta önemli bir artış olmaksızın artırmak ve çekirdek aracılığıyla kesme kuvvetlerini taşımaktır. Bu yönüyle sandviç kompozit davranışı, klasik I-kiriş mekanizmasına benzer bir yük taşıma düzeni sergilemektedir. Sandviç kompozitlerin bu I-kiriş benzeri yük taşıma mekanizması Şekil 5’te şematik olarak gösterilmektedir (Saab, 2026).

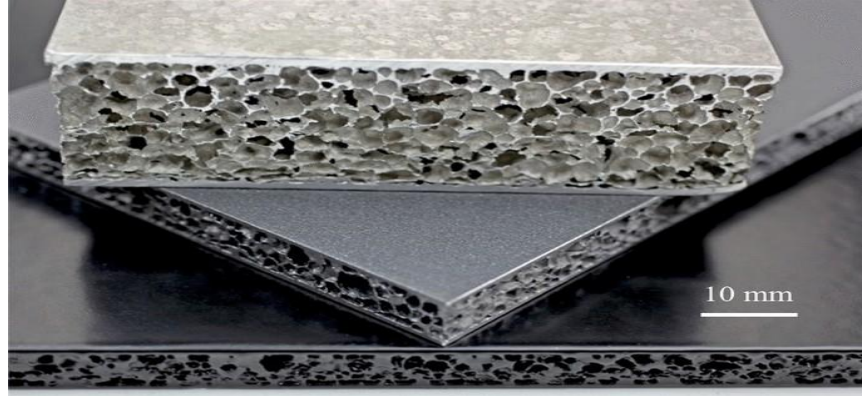


Şekil 5. I-kiriş benzeri yapısal konfigürasyon sergileyen alüminyum köpüklü sandviç kompozit panel (Saab, 2026).

Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozit sistemler, düşük kütleleri ile sismik atalet kuvvetlerinin azaltılmasına katkı sağlarken, çekirdeğin kademeli ezilme davranışı sayesinde dinamik yükler altında enerji sönümlenme potansiyeli sunmaktadır. Bu özellikler, alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin, özellikle sismik etkilerin belirleyici olduğu yapısal sistemlerde araştırılmasını teşvik eden temel motivasyonlar arasında yer almaktadır.

2.2.1. Alüminyum Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Yapısal Davranışı

Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitlerde yük aktarımı, yüzey levhaları ile çekirdek arasındaki etkileşim üzerinden tanımlanmaktadır. Eğilme etkisi altında üst ve alt yüzey levhaları sırasıyla basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalırken, alüminyum köpük çekirdek esas olarak kesme gerilmeleri taşımakta ve hücreli yapısı sayesinde deformasyon sürecine aktif olarak katılmaktadır. Alüminyum köpük sandviç kompozit panel Şekil 6'da gösterilmektedir (Neu vd., 2024).



Şekil 6. Alüminyum köpük sandviç kompozit panel (Neu vd., 2024).

Alüminyum köpüklerin mekanik davranışı, sıkıştırma altında sergiledikleri karakteristik gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile açıklanmaktadır (Gibson ve Ashby, 2014; Banhart, 2001). Bu davranış; başlangıçtaki elastik bölge, hücre duvarlarının kademeli olarak çökmesiyle tanımlanan plato bölgesi ve son aşamada yoğunlaşma (densification) evresi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır (Gibson ve Ashby, 2014; Banhart, 2001). Sandviç sistem içerisinde bu kademeli hücre çökmesi, çekirdeğin kesme deformasyonları sırasında mikro ölçekte enerji yutmasını mümkün kılmakta ve sistemin ani rijitlik kayıpları göstermeden deformasyon geliştirmesine katkı sağlamaktadır (Ashby vd., 2000).

Literatürde, alüminyum köpük çekirdekli sandviç panellerin eğilme, darbe ve tekrarlı yükler altındaki davranışlarının; klasik dolu çekirdekli veya polimer esaslı çekirdekli sistemlere kıyasla daha dengeli bir hasar dağılımı sunduğu rapor edilmiştir (Banhart, 2001; Ashby vd., 2000). Özellikle değişken genlikli ve tekrarlı yüklemeler altında, köpük çekirdeğin kademeli ezilme mekanizması, hasarın tekil bölgelerde yoğunlaşmasını geciktirmekte ve sistemin sünekliğini artırmaktadır (Gibson ve Ashby, 2014; Banhart, 2001).

Bu bağlamda, alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin sismik etkiler altındaki davranışı, literatürde çoğunlukla dolaylı göstergeler üzerinden değerlendirilmiş olup, doğrudan tam ölçekli taşıyıcı sistem uygulamaları hâlen sınırlıdır. Ancak mevcut deneysel ve sayısal çalışmalar, bu sistemlerin düşük kütle, enerji yutma kapasitesi ve kontrollü deformasyon karakteri sayesinde, sismik performansın iyileştirilmesine yönelik bir potansiyel taşıyıcı çözüm sunduğunu göstermektedir.

2.2.2. Alüminyum Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Döşeme Elemanı Olarak Kullanımı

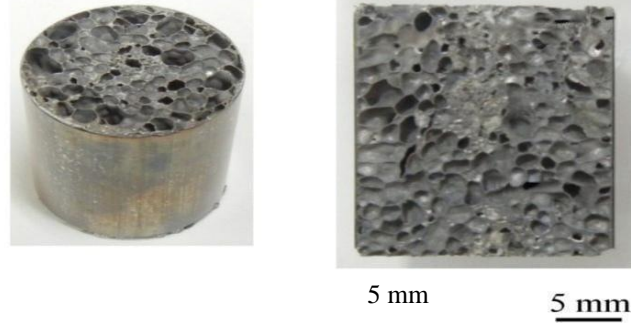
Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitler, bu yapısal avantajları nedeniyle döşeme sistemlerinde alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel çelik–beton kompozit döşemeler, yüksek kütleleri nedeniyle deprem yükleri altında önemli atalet kuvvetleri oluşturur. Buna karşılık, alüminyum köpük çekirdekli sandviç döşemeler, benzer eğilme rijitliği sağlarken toplam kütleyi önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Bu çalışmada ele alınan döşeme sistemi, çekirdek katmanı alüminyum köpükten oluşan bir sandviç kompozit panelin çelik çerçeve sistemine entegre edilmesi esasına dayanmaktadır. Döşeme elemanı olarak kullanıldığında, alüminyum köpük çekirdek katmanı; düşey yükler altında sehim kontrolüne katkı sağlarken, yatay deprem etkileri altında döşemenin diyafram davranışını destekleyen enerji yutucu bir bileşen olarak işlev görebilir. Ayrıca, hasarın büyük ölçüde köpük çekirdekte yoğunlaşması, yüzey levhalarının ve bağlantı detaylarının korunmasına olanak tanıyabilir.

2.2.3. Alüminyum Köpüklerin Çelik Kolonlarda Dolgu Olarak Kullanımı

Alüminyum köpüğün bir başka potansiyel yapısal uygulaması, çelik kolonlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmasıdır. Deneysel ve analitik çalışmalarda, alüminyum köpük, yapısal performanslarını artırmak için kare veya dairesel çelik kesitlerin içine yerleştirilen bir çekirdek malzeme olarak incelenmiştir.

Köpük dolgunun varlığının, çelik borunun yerel burkulmasını geciktirdiği ve aksenal ve eğilme davranışının stabilitesini artırdığı gösterilmiştir. Çelik kabuğa iç destek sağlayarak, köpük ani yerel kırılma yerine daha kademeli ve sünek bir kırılma moduna katkıda bulunabilir. Alüminyum köpük dolgululu dairesel ve kare tüpler Şekil 7’de gösterilmektedir (Hangai vd., 2014).



Şekil 7. Alüminyum köpük dolgululu tüpler (Hangai vd., 2014).

Döngüsel veya sismik yükleme koşulları altında, köpük dolgululu çelik kolonlar, alüminyum köpük çekirdeğin aşamalı ezilme davranışı nedeniyle gelişmiş enerji dağıtım kapasitesi göstermiştir (Banhart, 2001; Ashby vd., 2000). Köpük deformasyonu ile ilişkili histerezis enerji emilimi, rijitlik ve mukavemetin daha kontrollü bir şekilde bozulmasını sağlar. Bu özellikler, alüminyum köpük dolgunun, özellikle kolon performansının kritik olduğu moment dirençli çerçeve sistemlerinde, kolon elemanlarının sismik direncini artırmada avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir.

2.2.4. Döşeme ve Kolonlarda Eş zamanlı Kullanımın Sismik Sinerjisi

Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin döşeme sistemlerinde ve alüminyum köpük dolgululu çelik kolonların düşey taşıyıcı elemanlarda birlikte kullanılması, yapısal sistem düzeyinde belirgin bir sismik sinerji yaratmaktadır. Yapı kütlelerinin azalması deprem talebini düşürürken, hem döşeme hem de kolon seviyesinde devreye giren köpük ezilmesi mekanizmaları etkin bir enerji sönümlenme sağlayabilir. Ayrıca, hasarın büyük ölçüde değiştirilebilir veya ikincil bileşenlerde lokalize olması, ana taşıyıcı sistemin ve özellikle kiriş-kolon birleşimlerinin korunmasına katkıda bulunabilir.

Bu bütüncül yaklaşım, alüminyum köpüğün yalnızca tekil bir malzeme çözümü değil, çok bileşenli ve çok ölçekli bir sismik tasarım stratejisinin temel unsuru olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozit döşemelerin ve alüminyum köpük dolgulu kutu profil çelik kolonların, çelik çerçeve yapıların sismik davranışı üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Yapı sistemlerinin deprem etkileri altındaki doğrusal olmayan davranışının değerlendirilmesinde, sonlu elemanlar yöntemi yaygın olarak kullanılan ve doğrulanmış bir yaklaşım olup, özellikle karmaşık malzeme davranışlarının ve temas problemlerinin modellenmesine olanak sağlamaktadır (Chopra, 2012; Bathe, 1996). Bu kapsamda analizler, gelişmiş doğrusal olmayan çözüm kabiliyetlerine sahip ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Dassault Systèmes, 2024).

Sayısal modelleme sürecinde, çelik, alüminyum köpük, beton ve yapıştırıcı gibi farklı malzemelerin mekanik davranışları, literatürde önerilen ve deneysel çalışmalarla desteklenen uygun malzeme modelleri ile temsil edilmiştir. Geometrik doğrusal olmama durumu, malzeme plastisitesi ve elemanlar arası etkileşimler dikkate alınarak, yapı sistemlerinin sismik yükler altındaki gerçekçi davranışı yakalanmaya çalışılmıştır.

3.1. Sonlu Elemanlar Modelleme Yöntemi

Çelik çerçeve yapıların modellenmesinde üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Kiriş ve kolon elemanları, yerel burkulma ve plastikleşme davranışlarını temsil edebilecek şekilde kabuk veya katı elemanlarla modellenmiştir. Sandviç kompozit döşemeler, yüzey levhaları ve alüminyum köpük çekirdekten oluşan çok katmanlı bir yapı olarak ele alınmıştır. Benzer yaklaşım, sandviç panellerin yapısal davranışını inceleyen çok sayıda çalışmada da benimsenmiştir (Allen, 1969; Zenkert, 1995).

Kutu profil kolonlarda, çelik dış cidar ile alüminyum köpük dolgu arasındaki etkileşim, temas tanımları aracılığıyla modellenmiştir. Literatürde, köpük dolgulu metal elemanların davranışının doğru şekilde temsil edilebilmesi için bu tür temas tanımlarının kritik olduğu vurgulanmaktadır (Hanssen vd., 2000; Seitzberger vd., 2000). Analizlerde büyük yer değiştirme etkileri dikkate alınmış ve çözüm sürecinde doğrusal olmayan artımlı–iteratif algoritmalar kullanılmıştır.

3.2. Malzeme Modelleri ve Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik davranışları, deneysel verilerle uyumlu ve literatürde yaygın olarak kabul gören malzeme modelleri ile tanımlanmıştır. Malzeme parametreleri, ilgili standartlar ve önceki araştırmalardan elde edilen değerler esas alınarak belirlenmiştir.

3.2.1. Çelik Malzeme Modeli

Çelik elemanlar için izotropik elastik–plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Elastik davranış Hooke kanununa göre tanımlanırken, akma sonrası davranış izotropik pekleşme varsayımı altında modellenmiştir. Bu yaklaşım, çelik çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan sismik analizlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve plastik mafsal oluşumunun gerçekçi biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır (Engelhardt ve Sabol, 1998; Federal Emergency Management Agency, 2000a). Malzeme parametreleri, yapı çeliği için önerilen standart değerlere göre belirlenmiştir.

3.2.2. Alüminyum Köpük Malzeme Modeli

Alüminyum köpük, düşük yoğunluğu ve belirgin enerji yutma kapasitesi nedeniyle bu çalışmada hem sandviç kompozit döşemelerin çekirdek malzemesi hem de kutu profil kolonlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Alüminyum köpüklerin mekanik davranışı, literatürde ayrıntılı biçimde tanımlanan karakteristik ezilme (crushing) davranışı ile ifade edilmektedir (Gibson ve Ashby, 2014; Ashby vd., 2000).

Bu çalışmada alüminyum köpük, doğrusal olmayan sıkışma davranışını temsil edebilen ezilebilir köpük (crushable foam) esaslı bir malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Modelde elastik bölge, plato gerilmesi ve yoğunlaşma (densification) aşamaları dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım, alüminyum köpüklerin darbe ve döngüsel yükler altındaki davranışını inceleyen çok sayıda sayısal çalışmada önerilmektedir (Banhart, 2001; Deshpande ve Fleck, 2000). Bu modelleme ile alüminyum köpüğün sismik etkiler altında potansiyel enerji sönmeme katkısı değerlendirilmiştir.

3.2.3. Beton ve Yapıştırıcı Malzeme Modelleri

Geleneksel kompozit döşemelerde kullanılan beton için, betonun basınç ve çekme davranışını ve hasar gelişimini temsil edebilen beton hasar plastikliği (Concrete Damage Plasticity – CDP) modeli tercih edilmiştir. Bu model, betonarme yapıların sismik analizlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve çatlama, ezilme ve rijitlik kaybı mekanizmalarını başarılı bir şekilde temsil etmektedir vd. 1989).

Sandviç kompozit döşemelerde yüzey levhaları ile alüminyum köpük çekirdek arasındaki bağ, yapıştırıcı tabaka ile sağlanmıştır. Yapıştırıcı malzeme, literatürde sandviç yapıların modellenmesinde yaygın olarak uygulanan elastik veya elastik–plastik sürekli ortam yaklaşımı ile temsil edilmiştir (Adams vd., 2004). Bu yaklaşım, arayüz davranışının sandviç sistemin genel rijitliği ve enerji sönümlenme özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.3 Sayısal Analizlerin Doğrulanması

Sonlu elemanlar analizi ile yapılan araştırmalarda, yapılan bir modellemenin/oluşturulan modelin sonraki karşılaştırmalarda doğru sonuç verip vermediğinin araştırılması gerekmektedir. Deneysel sonuçlar ile bilgisayar modelleme ve analiz sonuçlarını karşılaştırmak, bu hedefi elde etmek için en iyi yöntemlerden biridir. Bu yüzden benzer numuneler üzerinde laboratuvarında yapılan araştırma sonuçları, sayısal sonuçların doğrulanması ve programın uygunluğunun denetlenmesi için kullanılabilir.

Bu alışmada ABAQUS/CAE 2024 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. ABAQUS, neredeyse tüm mühendislik alanlarında kullanılan fonksiyonel bir yazılım programıdır. Yapı analizleri, elektromanyetik analizler, termal analizler, statik analizler, dinamik analizler, burkulma analizleri,  zdeğer analizleri gibi birçok farklı analiz türünde çözümlenmeye imkan sağlamaktadır. Yapı analizlerinde gerilme-şekil değiştirme, kuvvet, yer değiştirme büyüklüklerinin kolaylıkla belirlenebilmesine olanak vermektedir.

Bu alışma kapsamında, incelenen problemin sayısal modelinin doğrulanması amacıyla Latour vd. (2021), Li vd. (2023), Li ve Young (2021) tarafından gerçekleştirilen deneysel veriler kullanılmıştır. Söz konusu çalışmalarda yer alan malzeme parametreleri ile model kurularak analiz gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sayısal modellerin analiz sonuçları literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarıyla moment-yerdeğiştirme eğrileri, göreceli yerdeğiştirme değerleri ve zaman tanım alanı tepkileri bakımlarından karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır.

3.3.1. Latour vd. (2021) Tarafından Gerçekleştirilen alışmanın Doğrulanması

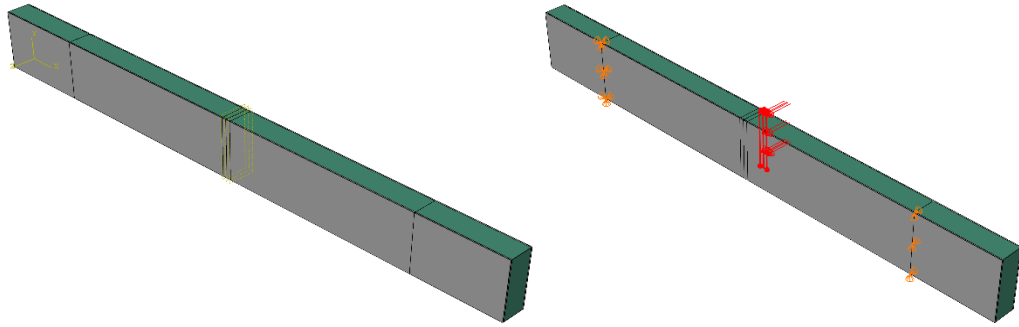
Deneysel metodolojiler, yapı elemanlarının davranışını anlamak için en güvenilir yaklaşımı sunar. Ancak, deneylerde kullanılan parametrelerin artması, deney sayısının artırılmasını gerektirir. Bu durum, ekonomi ve zaman açısından ciddi güçlüklere yol

açabilir. Bu nedenle, bu sorunları aşmak amacıyla doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yapabilen yazılımların kullanımı önem kazanmaktadır.

Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yöntemi yapı elemanlarının gerçek davranışını daha hassas bir şekilde modellemek ve gerçek koşulları yansıtmak için kullanılır. Bu bağlamda Latour ve diğer araştırmacıların 2021 tarihli çalışması çift cidarlı alüminyum köpük sandviç panellerin 3 noktada eğilme testlerinin son eleman analizi ile doğrulandığını göstermektedir (Latour vd. 2021). Bu doğrulama çalışması için ABAQUS/CAE 2024 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır (Dassault Systèmes, 2024). Bu program yapısal analizlerde güvenilir bir araç olarak kabul edilir ve karmaşık davranışları doğru bir şekilde simüle etmeye yardımcı olur.

Sonuç olarak, deneysel metotların yanı sıra doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerinin kullanımı, yapı elemanlarının davranışlarını anlamak ve optimize etmek için etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemler maliyet ve zaman gibi zorlukları aşarak daha gerçekçi sonuçlar elde etmeye yardımcı olur.

Doğrulama çalışmalarında ilgili deneysel ve sayısal çalışmaya olabildiğince sadık kalarak modellemeler gerçekleştirilmiştir. Modellerin 3 boyutlu geometrisi Şekil 8’de gösterilmektedir ve üst ve alt çelik levhalar ve alüminyum köpük çekirdek olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır.



Şekil 8. Alüminyum köpük sandviçin sonlu elemanlar modeli

Latour vd. (2021)’in çalışmalarında 13mm ve 25 mm olmak üzere iki farklı kalınlığa sahip çekirdek ile Geolite, Sikadur ve Aralite adındaki üç farklı türdeki reçineli sandviç paneller oluşturulmuştur. Tablo 1’de test numunelerinin tüm geometrik özellikleri sunulmaktadır. Bu yüzden testlerde kullanılan tüm geometrik ve malzeme özellikleri aynı şekilde sayısal modellemelerde kullanılmıştır. Bu örneklerin üç noktada eğilme test sonuçları sayısal analizlerin doğrulanmasında kullanılmıştır. Modellenen 7 adet sandviçin sonlu elemanlar analizleri ABAQUS/Standard sonlu elemanlar paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum köpük sandviçin test numuneleri (Latour vd., 2021)

Köpük Panel Üzerindeki Test Tipi	Model No	Model Ölçüleri (mm)
3-Nokta Eğilme Deneyi	C1/25-SAS-GEO	650 × 75 × 28,8
3-Nokta Eğilme Deneyi	C2/25-SAS-GEO	650 × 74,22 × 27,85
3-Nokta Eğilme Deneyi	C3/13-SAS-GEO	650 × 75,8 × 16,96
3-Nokta Eğilme Deneyi	C4/13-SAS-GEO	650 × 75 × 16,7
3-Nokta Eğilme Deneyi	C5/25-SAS-SIK	650 × 75,6 × 27,36
3-Nokta Eğilme Deneyi	C6/25-SAS-ARA	650 × 74 × 28,45
3-Nokta Eğilme Deneyi	C7/25-SAS-ARA	650 × 73,4 × 27,57

Çelik kaplamalar, nominal kalınlığı 1,2 mm'ye eşit olan S280GD çeliğinden yapılmıştır. Bu malzemenin elastisite modülü 210 GPa, akma dayanımı 280 MPa, çekme dayanımı 290 MPa ve birim hacim ağırlığı (γ_s) 78,5 kN/m³ olarak kullanılmıştır. S280GD sınıfı çeliğin malzeme özellikleri Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. S280GD sınıfı çeliğin malzeme özellikleri.

Malzeme	S280GD
Elastisite modülü, E_s (GPa)	210
Poisson oranı, ν_s	0,3
Birim hacim ağırlık, γ_s (kN/m ³)	78,5
Akma gerilmesi, f_y (MPa)	280
Çekme gerilmesi, f_u (MPa)	290

Alüminyum köpük numuneleri, her biri farklı kalınlıkta, yani 13 mm ve 25 mm olan iki set alüminyum köpük panelinden çıkarılmıştır. Bu paneller Cymat Technologies Ltd. tarafından sağlanmıştır ve 510 kg/m³ nominal yoğunluğa sahip orta/yüksek yoğunluklu bir alüminyum köpüktür. Bu tip köpük, alüminyum alaşımı ve seramik parçacıklardan oluşan bir metal matris kompozitinden başlayan patentli bir üretim sürecine göre üretilir. Alüminyum köpüğün sayısal modellerde kullanılan mekanik özellikleri Tablo 3'de belirtilmiştir.

Tablo 3. Alüminyum köpüğün mekanik özellikleri (Latour vd., 2021)

Plastik parametreler		Gevrek hasar parametreleri			Hasar başlangıcı
Gerilme [MPa]	Birim şekil değişirme	Kırılma birim şekil değişirmesi	Üç eksenli gerilme	Birim şekil değişirme oranı	Hasarda yerdeğiştirme [mm]
7,37	0	0,0104	0,33	0,001	0,15
12	0,0035				
12	1				

Çelik kaplamalar ve alüminyum köpük çekirdeği arasındaki arayüzdeki üst ve alt yapışkan katmanları, elastik-kırılgan tepkili sıfır kalınlıkta kohezyonlu temas elemanları

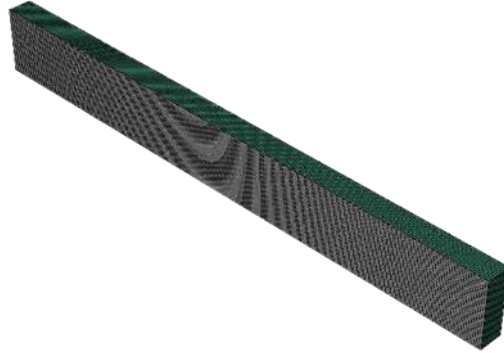
aracılığıyla modellenmiştir. Tablo 4’de, test edilen üç tip yapıştırıcının tepkisini simüle etmek için benimsenen tüm mekanik parametreleri özetlemektedir.

Bu testler, Geolite Gel ile yapıştırılan numune grubu için kullanılan çelik sacların ortalama 330 MPa’ya eşit akma gerilmesine sahip olduğunu göstermiştir. Sikadur-30 ve Araldite 2015 ile yapıştırılan SAS panel grubu için kullanılan kaplamaların akma gerilimi yaklaşık 300 MPa idi. Alüminyum köpük çekirdek ve çelik kaplamalar, elastik-plastik izotropik bir modelle modellenmiştir.

Tablo 4. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri (Latour vd., 2021)

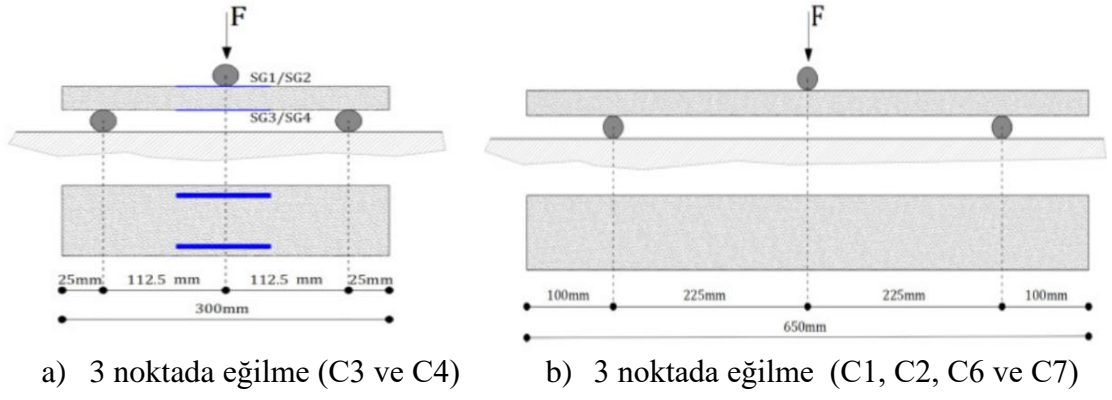
Geolite gel		Sikadur-30		Araldite 2015	
Kayma modülü [MPa]	Kayma mukavemeti [MPa]	Kayma modülü [MPa]	Kayma mukavemeti [MPa]	Kayma modülü [MPa]	Kayma mukavemeti [MPa]
1100	2,5	5500	3,5	1000	7,6

Simülasyonlarda kullanılan geometriler, azaltılmış entegrasyon ve kararsızlık ağı ile 8 düğümlü doğrusal katı elemanlar (C3D8R) aracılığıyla ağlara bölünmüştür. Bu elemanın (C3D8R) seçimi, ince bir mesh boyutunun benimsenmesi şartıyla, hesaplama kolaylığı sağlamak amacıyla. Doğru sonuçlar ve makul analiz süresi elde etmek için, modelin parçaları en az 2,5 mm boyutunda parçalara ayrılmıştır. Ek olarak, çelik kaplamalar, plaka kalınlığı içinde en az iki elemana sahip olacak şekilde bölünmüştür. Şekil 9, sayısal modelin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş hallerini sunmaktadır.



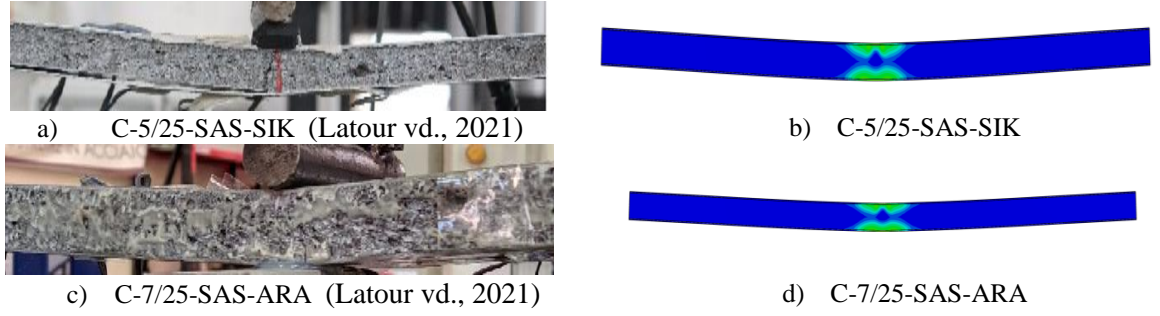
Şekil 9. Modelin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş halleri

Latour vd., 2021’in yapmış olduğu deneysel çalışmalara ait sınır şart ve yükleme koşulları, Şekil 10’de gösterilmektedir. Bu koşullar, sayısal modellere uygulanmıştır.

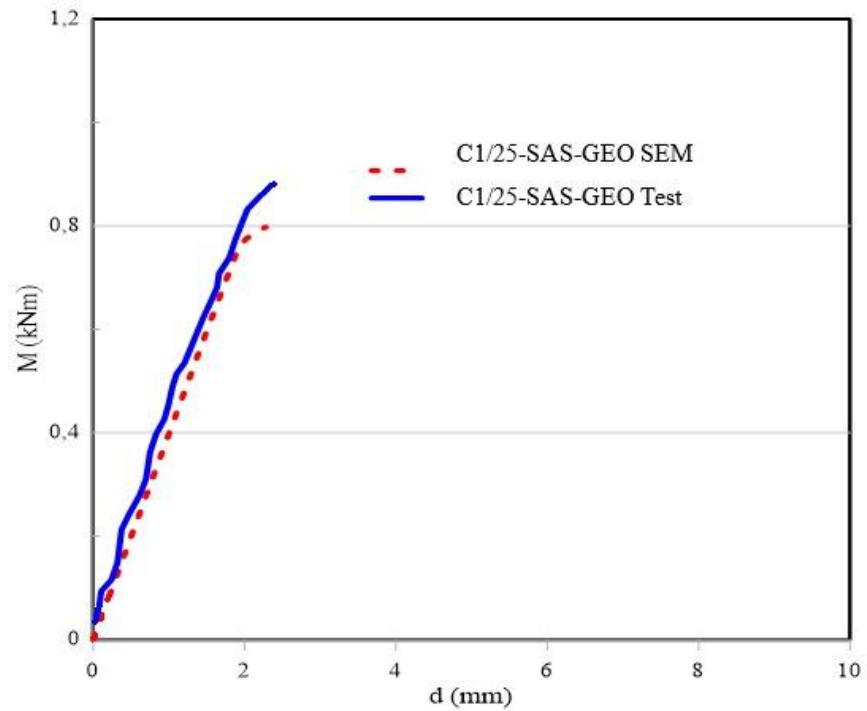


Şekil 10. Modelin sınır şart ve yükleme koşulları (Latour vd., 2021)

Şekil 11’da Latour vd.’nin testlerden elde etmiş oldukları göçme modları ile bu tez çalışması kapsamındaki sayısal analizlerden elde edilen plastik şekil değiştirmeleri göstermektedir.



Şekil 11. Göçme modlarının karşılaştırılması



Şekil 12. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin karşılaştırılması

Şekil 12 ve Tablo 5’de de görüleceği üzere Latour vd. (2021) yaptığı test sonuçları ile sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş sayısal modelin doğrulama sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

Tablo 5. Pik eğilme momenti - yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması

Model Adı	Eğilme Momenti Deneysel (kNm)	Eğilme Momenti ABAQUS (kNm)	Hata (%)
C-1/25-SAS-GEO	0,881112	0,797861	9,44
C-2/25-SAS-GEO	0,81188	0,788914	2,82
C-3/13-SAS-GEO	0,146049	0,13212	9,54
C-4/13-SAS-GEO	0,131880	0,12886	2,29
C-5/25-SAS-SIK	0,928920	0,89778	3,35
C-6/25-SAS-ARA	0,718390	0,69837	2,79
C-7/25-SAS-ARA	0,706896	0,68810	2,66

Bu sonuçlar, sonlu eleman modeliyle elde edilen analizlerin deneysel verilerle tutarlı olduğunu ve kompozit panellerinin mekanik davranışının ve dayanımlarının güvenilir bir şekilde simüle edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu doğrulama çalışması, sandviç panellerin çok katlı çelik çerçevelerde döşeme olarak kullanılabilirliğini desteklemekte ve parametrik çalışmalar için sağlam bir temel sağlamaktadır.

3.3.2. Li vd. (2023) Tarafından Gerçekleştirilen Çalışmanın Doğrulanması

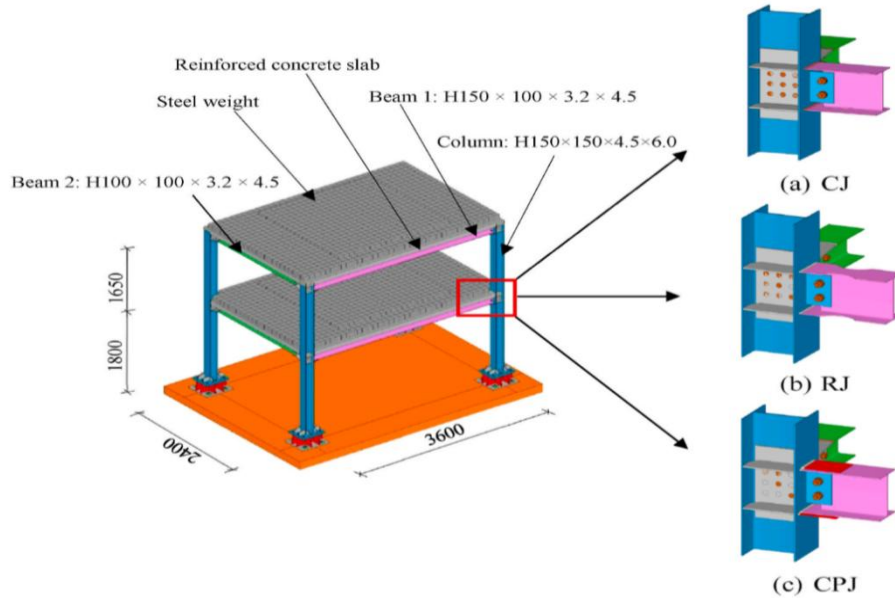
Bu çalışma kapsamında sismik yükler altındaki çelik yapılar için kullanılacak olan eleman ve malzeme tanımları, eleman tipleri, yüzey etkileşimleri gibi modelleme esaslarının doğruluğunu göstermek amacıyla, Li ve diğer araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen iki katlı çelik çerçeveye ait sallama tablası test sonuçları doğrulanmıştır.

Li vd. (2023)’nin çalışmalarında farklı birleşim türlerinin çelik çerçevelerin sismik davranışı üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Farklı birleşimlere sahip üç çelik çerçeve (1/2 ölçekli) sarsma masası altında test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda El Centro deprem kaydı kullanılmış olup çelik çerçevelerin hasar modları, yerdeğiştirme, birim şekil değiştirme ve ivme değerleri elde edilmiştir. Çelik çerçevelerin sismik performansı ve hasar modları hakkında ayrıntılı bilgi vermek için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sayısal analizler güvenilir sonuçlar sunan ABAQUS/CAE 2024 sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir (Dassault Systèmes, 2024). Doğrulama çalışmalarında ilgili deneysel çalışma esas alınarak sonlu eleman modellemeleri yapılmıştır. Çelik çerçevelere ait plan 7,2 m × 4,8 m olup, birinci ve ikinci kat sırasıyla 3,6 m ve 3,3 m yüksekliğindedir. Sarsma tablası 4,86 m × 3,36 m (uzunluk × genişlik)

boyutundadır. Sarsma tablasının sınırlı kapasitesi nedeniyle farklı birleşim tiplerine sahip 1:2 ölçekli çelik çerçeveler üretilmiştir.

1/2 ölçekli üretilen çelik çerçeve numuneleri 3,6 m × 2,4 m (uzunluk × genişlik) boyutunda ve birinci ve ikinci katların yüksekliği sırasıyla 1,8 m ve 1,65 m'dir. Kolon, kiriş ve döşemeler olmak üzere üç ana parçadan oluşan modellerin 3 boyutlu geometrisi Şekil 13'de sunulmuştur.

Kirişlerde, 150 × 100 × 3,2 × 4,5 mm (gövde yüksekliği × flanş genişliği × gövde kalınlığı × flanş kalınlığı) ve 100 × 100 × 3,2 × 4,5 mm (gövde yüksekliği × flanş genişliği × gövde kalınlığı × flanş kalınlığı) olmak üzere iki tip (Kiriş 1 ve Kiriş 2) H kesitli profil kullanılmıştır. Ayrıca kolonlarda kullanılan H kesitli profil, 150 × 150 × 4,5 × 6,0 mm (gövde yüksekliği × flanş genişliği × gövde kalınlığı × flanş kalınlığı) ölçülerindedir.



Şekil 13. 1/2 Ölçekle küçültülmüş model (Birimler: mm) Li vd. (2023).

Numunelerin tamamı Q235B çeliğinden ($\sigma_y \geq 235$ MPa) üretilmiş olup kiriş ve kolonların malzeme özelliklerini elde etmek için çekme testleri yapıldı (Tablo 6). Döşemelerde kullanılan betonun 28 günlük mekanik özellikleri basınç dayanımı ve elastisite modülü testleri yoluyla belirlenmiştir. Testlerden önce 150×150×150 mm standart küp numunelerden oluşan üç grup ve 150×150×300 mm prizmatik numunelerden oluşan altı grup hazırlanmıştır. Test sonuçlarının ortalama değeri betonun nihai malzeme özellikleri olarak kullanılmıştır (Tablo 7). Sayısal modellemelerde testlerden elde edilen malzeme özellikleri (Tablo 6 ve Tablo 7) uygulanmıştır. Tüm

çelikler Von Mises akma kriterini izleyip Poisson oranı 0,3 olmuştur. Döşemelerde C30 sınıfı beton kullanılmış olup Poisson oranı 0,2'dir.

Tablo 6. Çeliğe ait malzeme özellikleri

Parça	Tip	Kalınlık t (mm)	Elastisite modülü E (GPa)	Akma gerilmesi f_y (MPa)	Akma birim şekil değiştirmesi ϵ ($\mu\epsilon$)	Çekme gerilmesi f_u (MPa)	Akma oranı %	Kopma uzaması δ (%)
Kiriş 1	Başlık	4,49	205,02	350	1707	467	75	31,12
	Gövde	3,02	206,06	423	2053	540	78	23,23
Kiriş 2	Başlık	4,81	205,89	302	1466	420	72	34,58
	Gövde	3,30	205,89	361	1753	463	78	22,67
Kolon	Başlık	5,95	206,08	330	1602	419	79	34,74
	Gövde	4,72	205,96	320	1554	438	73	24,56

Tablo 7. Betona ait malzeme özellikleri

Malzeme	σ_{cu} (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	ϵ_c (%)	E_c (N/mm ²)
C30 Sınıfı Beton	33,7	23,6	0,17	30900

Yapının dinamik özelliklerini belirlemek için öncelikle modal analiz yapılmıştır. ABAQUS'ta kullanılan sönümlenme Rayleigh sönümlenmesidir ve sönümlenme matrisi şu şekildedir:

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \quad (1)$$

Burada $[M]$, $[K]$, α ve β sırasıyla kütle matrisi, rijitlik matrisi, kütle orantılı sönüm ve rijitlik orantılı sönümdür. Her iki doğal titreşim modunun da aynı sönüm oranına (ξ) sahip olduğu varsayılarak, ω_1 ve ω_2 çelik çerçevenin sırasıyla birinci ve ikinci modları olmak üzere,

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1+\omega_2}, \quad \beta = \xi \frac{2}{\omega_1+\omega_2} \quad (2)$$

Tablo 8. Çelik çerçeveye ait dinamik özellikler

Birinci mod ω_1	İkinci mod ω_2	Sönüm oranı ζ	Kütle orantılı sönüm α	Rijitlik orantılı sönüm β
0,697	0,484	0,02	0,011426	0,03387

Döşeme hareketli yükü 2,0 kN/m² ve duvar yükü 5,5 kN/m'dir. Duvar yükü, 100 mm başlık genişliğine sahip kirişlere 55 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Döşemelerde kullanılan donatı kütlesi 11.47 ton olarak hesaplanmıştır. Bu donatılar, 2,4x10⁻⁸ ton/mm³ olan beton yoğunluğuna 1,31x10⁻⁸ ton/mm³ olarak eklenerek dikkate alınmıştır.

Sonlu elemanlar modelinin yükleme ve sınır koşulları deneysel testlerle tamamen tutarlıdır. Sismik yükler sonlu eleman modelinin dört kolon tabanına x yönü boyunca uygulanmıştır (Şekil 14). Testte kolon tabanı ile sarsma tablası arasındaki sabit birleşimi simüle etmek için kolonun taban ötelenmesi ve dönmesi sonlu elemanlar analizinde x, y ve z yönlerinde sınırlandırılmıştır.

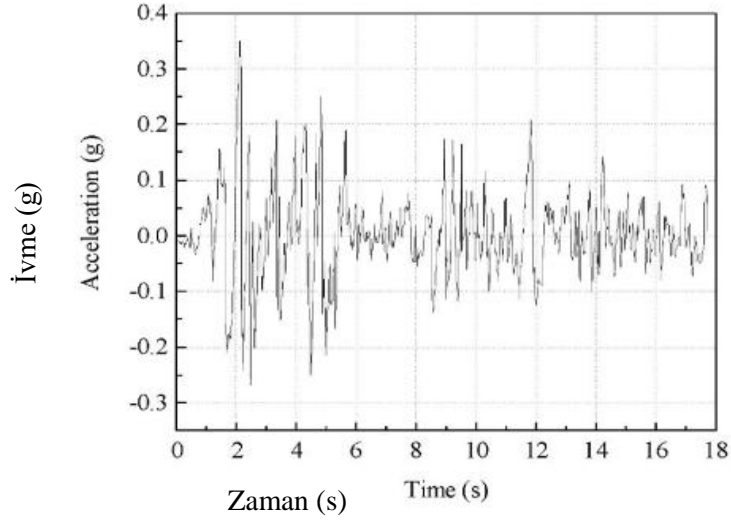


Şekil 14. Li vd.'nin deney düzeneğinin şematik görünümü (Li vd., 2023)

Deneysel çalışmalarda El Centro deprem kaydı kullanılmıştır. Şekil 15’de bu depremlere ait ivme kayıtları yer almaktadır. El Centro dalgası, X yönü boyunca en yüksek beş yer ivmesiyle (0,11 g, 0,30 g, 0,51 g, 0,62 g ve 0,72 g) yüklenen SEM modellerine uygulanmıştır. El Centro sismik dalgasının en yüksek ivmesi Denklem (5) ile ayarlanmıştır.

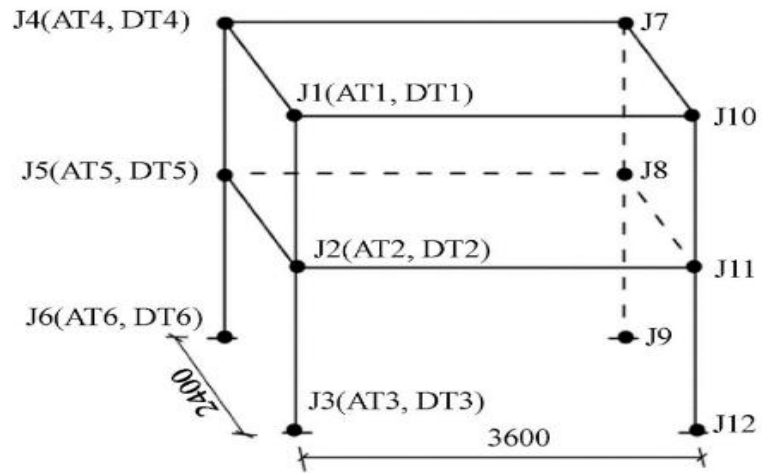
$$a'(t) = \frac{A'_{max}}{A_{max}} a(t) \quad (3)$$

Burada $a(t)$ ve $a'(t)$ sırasıyla orijinal sismik dalganın ve genlik modülasyonlu sismik dalganın t zamanındaki ivmesidir; ve A_{max} ve A'_{max} sırasıyla orijinal sismik dalganın ve genlik modülasyonlu sismik dalganın en yüksek ivmesidir.



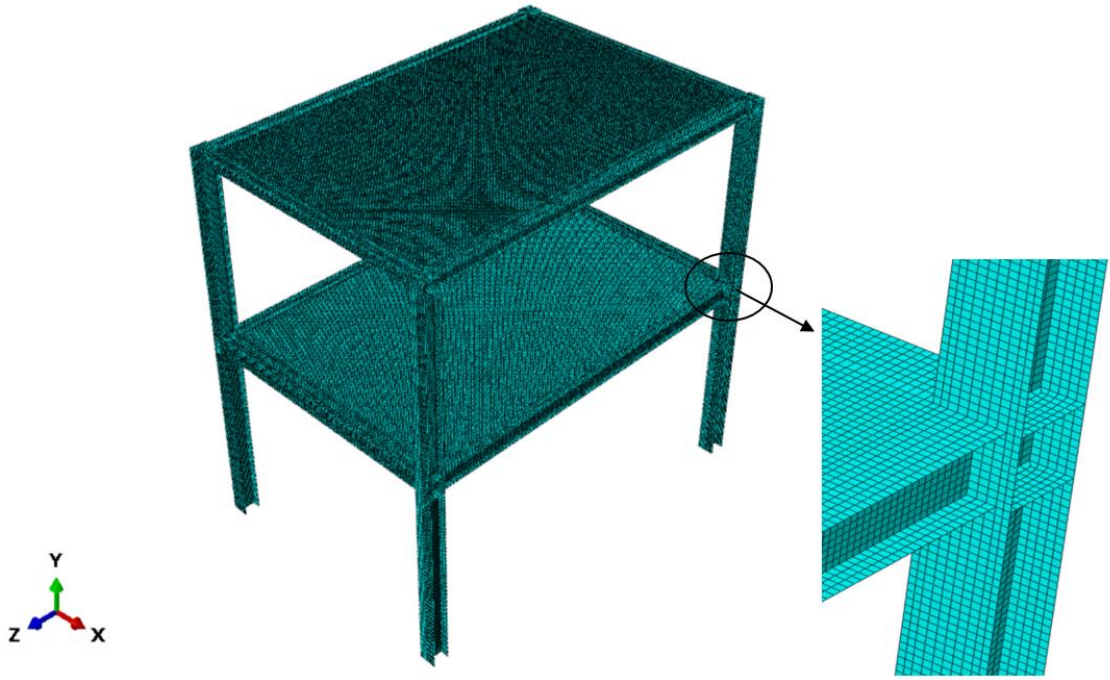
Şekil 15. El Centro depremi ivme kaydı

Test edilen çelik çerçevenin her katında toplam altı ivme dönüştürücüsü (AT1'den AT6'ya) ve altı yerdeğiştirme dönüştürücüsü (DT1'den DT6'ya) uygulanmıştır. Bu dönüştürücüler birinci ve ikinci katların çelik çerçeve birleşim yerlerine (J1, J2, J4 ve J5) ve kolon taban birleşim yerlerine (J3 ve J6) yerleştirilmiştir (Şekil 16).

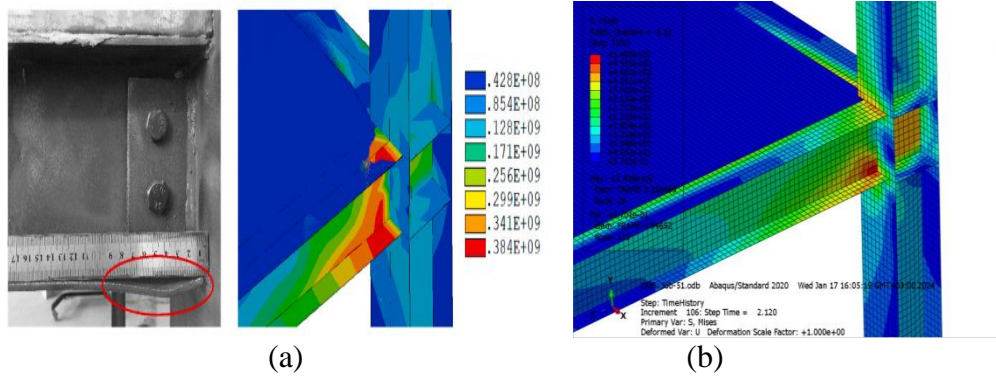


Şekil 16. İvme (AT1-6) ve yerdeğiştirme (DT1-6) dönüştürücü düzeni (Birimler: mm) (Li vd., 2023)

Sonlu elemanlar modeli, lineer azaltılmış entegrasyona sahip üç boyutlu dört düğümlü çift eğimli kabuk elemanı (S4R) ile parçalara ayrılmıştır. Doğru sonuçlar ve makul analiz süresi elde etmek için, modelin parçaları 15 mm boyutunda parçalara bölünmüştür (Şekil 17). Kat döşemesi ile kiriş arasında rijit bağlantılar ile birleşim gerçekleştirilmiştir. Li vd. (2023) ve SEM'e ait hasar modu benzer şekilde kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kiriş alt başlığında yerel burkulma meydana gelmiştir (Şekil 18).



Şekil 17. Modelin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş hâli



Şekil 18. Sonlu eleman modelinin hasar modu (a) Li vd. (2023), (b) SEM

Tablo 9’da 0,51 g ve 0,62 g değerindeki en yüksek yer ivmesine sahip El Centro deprem kayıtları etkililmiş modellerde birinci ve ikinci katta meydana gelen ivme değerleri gösterilmektedir. PGA=0,51 g için birinci ve ikinci katta ivme değerlerindeki hatalar sırasıyla 3,54 ve 1,61’dir. PGA=0,62 g için ise birinci ve ikinci katta ivme değerlerindeki hatalar sırasıyla 7,02 ve 0,80’dir.

Tablo 9. Maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması

PGA	J2 (İlk kat)			J1 (ikinci kat)						
	Deney	SEM (Li vd., 2023)	Hata (%)	SEM (Abaqus)	Hata (%)	Deney	SEM (Li vd., 2023)	Hata (%)	SEM (Abaqus)	Hata (%)
0,51g	5,93	6,11	3,03	6,14	3,54	12,39	12,86	3,79	12,59	1,61
0,62g	6,73	6,98	3,71	7,02	4,3	9,94	10,43	4,69	10,02	0,80

Tablo 10’da 0,51 g ve 0,62 g değerindeki en yüksek yer ivmesine sahip El Centro deprem kayıtları için modellerde birinci ve ikinci katta meydana gelen göreceli yerdeğiştirme değerleri sunulmuştur. PGA=0,51 g için birinci ve ikinci katta göreceli yerdeğiştirme değerlerindeki hatalar sırasıyla 7,54 ve 7,93’tür. PGA=0,62 g için ise birinci ve ikinci katta göreceli yerdeğiştirme değerlerindeki hatalar sırasıyla 6,25 ve 4,07’dir.

Tablo 10. Maksimum yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması

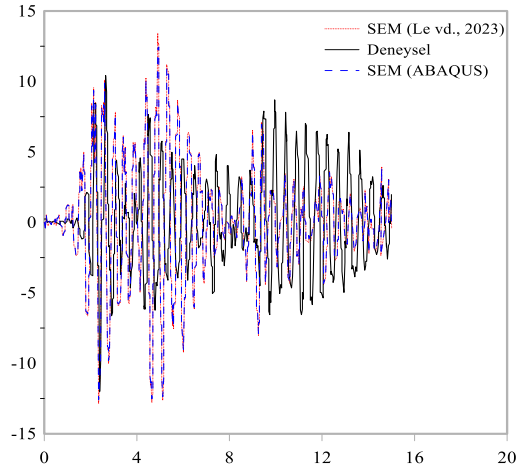
PGA	J2 (İlk kat)					J1 (ikinci kat)				
	Deney	SEM (Li vd., 2023)	Hata (%)	SEM (Abaqus)	Hata (%)	Deney	SEM (Li vd., 2023)	Hata (%)	SEM (Abaqus)	Hata (%)
0,51g	20,82	21,66	4,04	22,39	7,54	31,92	34,74	8,84	29,39	7,93
0,62g	28,13	29,58	5,16	29,89	6,25	40,32	42,59	5,63	41,96	4,07

Tablo 11’de ise birinci kattaki 1-1 ve 2-2 kesiti için maksimum birim Şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. En yüksek ivme değeri 0,51 g için 1-1 ve 2-2 kesitindeki maksimum birim Şekil değiştirme değerleri sırasıyla 2,62 ve 13,01’dir. En yüksek ivme değeri 0,62 g için 1-1 ve 2-2 kesitindeki maksimum birim Şekil değiştirme değerleri ise sırasıyla 4,73 ve 4,17’dir.

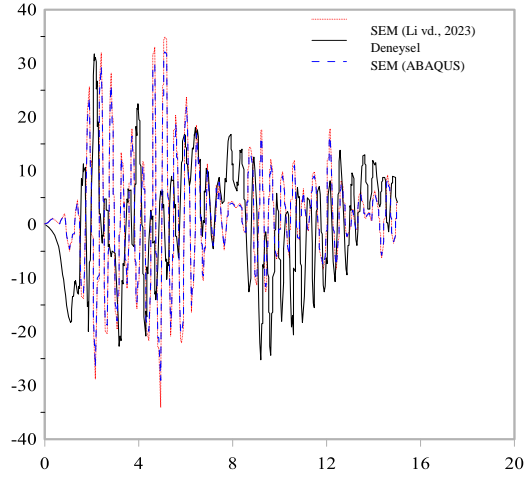
Tablo 11. Maksimum birim Şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

PGA	J2 (1-1 kesiti)					J2 (2-2 kesiti)				
	Deney	SEM (Li vd., 2023)	Hata (%)	SEM (Abaqus)	Hata (%)	Deney	SEM (Li vd., 2023)	Hata (%)	SEM (Abaqus)	Hata (%)
0,51g	2780	2839	2,12	2853	2,62	2073	2125	2,51	2344	13,01
0,62g	3594	3702	3,00	3764	4,73	2322	2413	3,92	2419	4,17

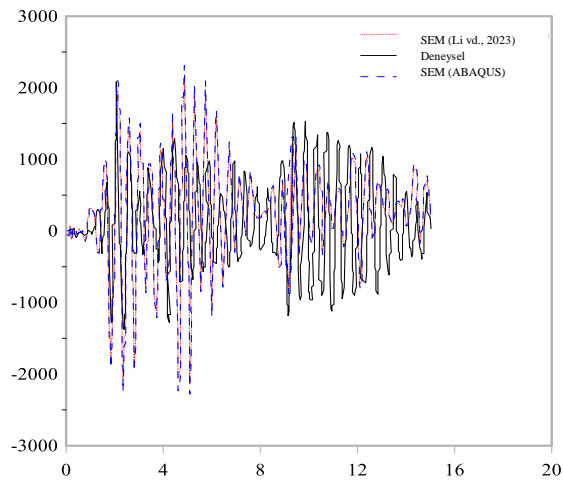
Sonlu elemanlar ve test sonuçları arasındaki karşılaştırma; sırasıyla, ivme ve birim Şekil değiştirme ve yer değiştirme için Şekil 19, Şekil 20 ve Şekil 21’de sunulmuştur. Sayısal analiz sonuçları, yer değiştirme değerlerinin zaman içinde deneysel testlerle tutarlı olduğunu göstermiştir. Bu yüzden, sonlu elemanlar modellerinin, ilgili deneysel çalışmalarda gözlemlenenlere uygun gerilme dağılımları ve hasar modlarının gelişimi de dâhil olmak üzere, sismik koşullar altında yapısal davranışı doğru bir Şekilde simüle edebildiği sonucuna varılabilir.



Şekil 19. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin J1'deki ivme değerlerinin karşılaştırılması (PGA = 0,51 g)



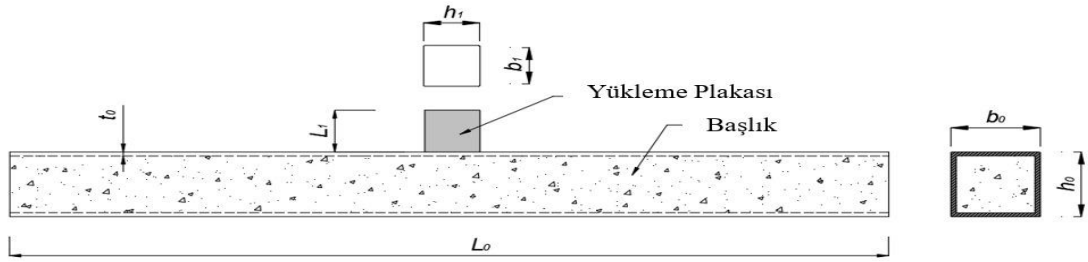
Şekil 20. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin J1'deki birim şekil değıştirme değerlerinin karşılaştırılması (PGA = 0,51 g)



Şekil 21. Deneysel sonuçla sonlu elemanlar analizinin J2'nin 2-2 kesitindeki yerdeğıştirme değerlerinin karşılaştırılması (PGA = 0,51 g)

3.3.3. Li ve Young (2021) Deneyinin Doğrulanması (T-Birleşimler)

Li ve Young'un (2021), beton dolgulu başlık elemanına sahip toplam 28 adet paslanmaz çelik tübüler T ve X tipi birleşimi deneysel olarak incelemiştir. Bu doğrulama çalışması kapsamında, mevcut araştırmanın içeriği ile doğrudan ilişkili olan ve başlık elemanında C35 beton dayanımına sahip kare kesitli T-birleşimlerden oluşan toplam 7 adet numune dikkate alınmıştır. Tipik bir T-birleşim konfigürasyonu Şekil 22'de gösterilmiştir. Li ve Young (2021) tarafından test edilen birleşimlere ait geometrik boyutlar Tablo 12'de özetlenmiştir.



Şekil 22. Li ve Young'a (2021) ait tipik birleşim konfigürasyonu

Tablo 12. Li ve Young (2021) tarafından test edilen tübüler T-birleşimlerin geometrik boyutları ve taşıma kapasiteleri

Numune kodu	Başlık elemanı			Yükleme plakası			Test (kN)	SE (kN)	SE/Test	
	h_0	b_0	t_0	L_0	h_1	b_1				L_1
T1	50,1	50,2	3,82	300	50,0	29,9	40	331,4	308,2	0,93
T2	80,0	80,0	2,79	440	39,6	59,9	40	398,8	416,4	1,04
T3	79,9	80,0	2,77	481	79,9	39,7	40	480,3	424,2	0,88
T4	39,9	59,9	2,73	251	50,0	29,9	40	414,7	450,2	1,09
T5	40,0	60,0	2,79	281	79,9	39,7	40	703,8	664,6	0,94
T6	79,9	120,0	2,80	450	50,0	29,9	40	396,0	367,8	0,92
T7	79,9	120,0	2,79	501	100,0	79,9	40	1209,3	1250,9	1,03
T8	99,8	40,2	1,93	540	40,0	24,9	40	116,4	110,1	0,94
T9	99,8	40,2	1,92	559	59,9	24,9	40	152,7	166,3	1,09

Tablo 13'de, birleşimlerde kullanılan çelik elemanlara ait malzeme özellikleri sunulmaktadır. Sayısal modelde, çelik elemanların gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, Gardner vd., (2024) tarafından önerilen sayısal yaklaşıma uygun olarak, eleman köşe bölgelerinde tanımlanmış ve bu bölgeler düz yüzeylere doğru eleman kalınlığının iki katı kadar uzatılmıştır.

Dolgu betonu olarak kullanılan C30 sınıfı beton için, deney anındaki silindir basınç dayanımı ve elastisite modülünün ortalama değerleri sırasıyla 38,2 MPa ve 24,7 GPa olarak rapor edilmiştir. Dolgu betonunun sayısal malzeme modelinde Beton Hasar Plastikliği (Concrete Damage Plasticity – CDP) modeli kullanılmıştır.

Bu modelde;

- genleşme açısı (dilation angle) 40° ,
- akma potansiyeli eksantrikliği 0,1,
- iki eksenli basınç dayanımının tek eksenli basınç dayanımına oranı 1,16,
- çekme ve basınç meridyenlerindeki ikinci gerilme invarianti oranı 0,6 olarak alınmıştır.

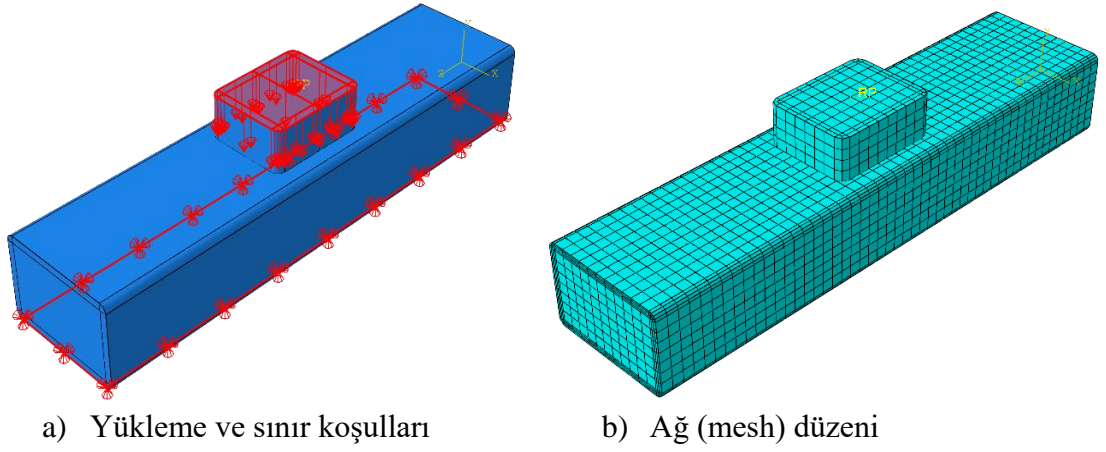
Tablo 13. Li ve Young'un (2021) deneylerinde kullanılan çelik numunelere ait malzeme özellikleri

Numune	Düz yüzey bölgesi			Köşe bölgesi		
	E_0	f_{vo}	f_{uo}	E_0	f_{vo}	f_{uo}
50x50x4	196,4	459	500	190,7	557	592
80x80x3	195,0	417	455	196,3	552	600
40x60x3	204,4	401	435	200,5	531	579
80x120x3	201,6	385	445	212,8	564	606
100x40x2	200,5	426	452	209,8	544	592

Deneylerde, T-birleşimlerin bağlantı yapılmayan başlık yüzeyleri rijit bir taban üzerine oturtulmuş ve yükleme, rijit bir katı elemanın üst yüzeyinden basınç yükü uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelde ise çelik yüzeyin alt kısmı mafsallı (pinned) olarak kabul edilmiş ve düşey yer değiştirmeler, Şekil 23 (a)'de gösterildiği üzere rijit katı yüzey üzerinden uygulanmıştır. Yükleme, ABAQUS Explicit analiz yöntemi kullanılarak $1E-6$ aralığındaki küçük artımlarla gerçekleştirilmiştir.

Çelik elemanlar ve beton dolgu için C3D8R katı elemanları kullanılmıştır. Yükleme plakası için rijit katı elemanlar tercih edilmiştir. Çelik elemanların köşe bölgeleri ve düz yüzeyleri ile beton dolgu için uygun ağ boyutları sırasıyla 4 mm ve 10 mm olarak seçilmiştir. T7 birleşimine ait örnek ağ düzeni Şekil 23 (b)'de gösterilmiştir.

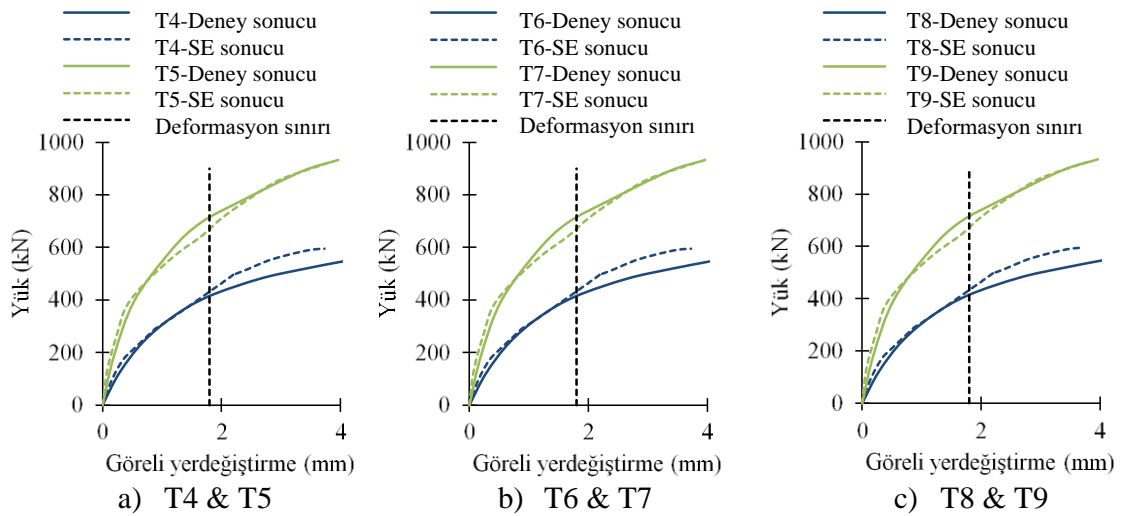
Çelik eleman ile beton dolgu arasındaki temas özellikleri için, sürtünme katsayısı 0,5 olan ceza esaslı teğetsel temas tanımlanmış; normal yönde ise hard contact koşulu kullanılmıştır. Aynı temas özellikleri, yükleme plakası ile çelik eleman arasındaki etkileşim için de uygulanmıştır.



Şekil 23. T7 birleşimine ait yükleme ve sınır koşulları ile ağ (mesh) düzeni

Sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük–yer değiştirme eğrileri, taşıma kapasiteleri ve göçme modları; Li ve Young (2021) tarafından rapor edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 24’de görüldüğü üzere, deneysel sonuçlar ile sayısal analizlerden elde edilen yük–görelî yerdeğiştirme eğrileri arasında yüksek düzeyde benzerlik gözlemlenmiştir. Bu durum, sayısal modelin birleşimin uygulanan yük altındaki genel davranışını başarıyla yakaladığını göstermektedir.

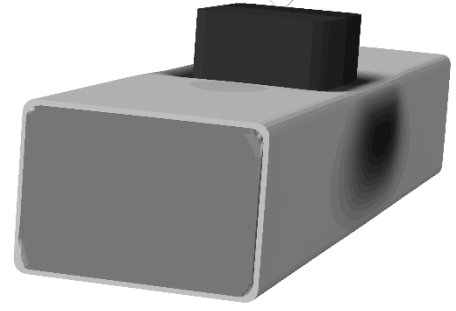
Ayrıca, sayısal model tarafından elde edilen göçme modunun, deneysel gözlemlerle uyumlu olduğu Şekil 25’de sunulmuştur. Başlık genişliğinin %3’ü kadar deformasyon sınırı esas alınarak belirlenen birleşim taşıma kapasiteleri incelendiğinde, sayısal sonuçların deneysel dayanım değerleriyle oldukça tutarlı olduğu görülmüştür (Tablo 13). Sayısal sonuçların deney sonuçlarına oranı üzerinden hesaplanan standart sapma ve varyasyon katsayısı sırasıyla 7,86 ve 7,98 olarak elde edilmiştir.



Şekil 24. Li ve Young'un (2021) deney sonuçları ile SE sonuçları arasındaki yük–görelî yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması



a) Li ve Young'un deney sonuçları



b) SE sonuçları

Şekil 25. T7 numunesinin göçme modunun karşılaştırılması

Bu doğrulama çalışmaları, sonlu eleman modellerinin hem sismik etkiler altındaki çelik çerçevelerin davranışını hem de kompozit birleşimlerin mekanik tepkisini güvenilir ve doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir. Sayısal modellerin güvenilirliği doğrulandıktan sonra, bu modeller alüminyum köpük entegrasyonunun ve farklı geometrik parametrelerin sismik yükler altındaki yapısal performans üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda kullanılmıştır.

3.4. Parametrik Çalışma Kapsamında Oluşturulan Modeller

Bu bölümde, alüminyum köpük sandviç panellerin ve kolon içi köpük dolgusunun çelik çerçeve sistemlerin sismik performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla oluşturulan sonlu eleman modelleri ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Parametrik çalışma kapsamında farklı kat sayıları, açıklık konfigürasyonları, döşeme türleri ve birleşim geometrileri dikkate alınarak çok sayıda model geliştirilmiştir.

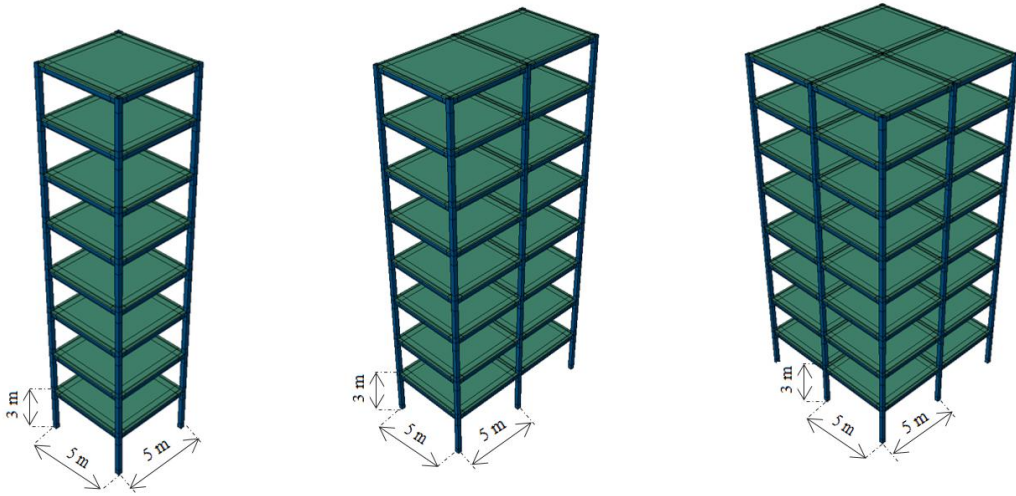
Modeller, doğrusal olmayan malzeme ve geometrik davranışları içerecek şekilde ABAQUS/Standard ortamında oluşturulmuş olup, hem genel çerçeve davranışı hem de yerel birleşim performansı değerlendirilmiştir.

3.4.1. Çok Katlı Çelik Çerçeve Sistemlerinin Modellenmesi

Bu bölümde, parametrik çalışma kapsamında tasarlanan çok katlı çelik çerçeve sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesine ilişkin esaslar sunulmaktadır. Modeller, farklı kat sayıları, açıklık düzenleri, döşeme tipleri ve kolon içi alüminyum köpük dolgu durumları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Amaç, bu parametrelerin yapıların sismik davranışı üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Analizler, doğrusal olmayan malzeme ve geometrik davranış göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiş olup, sistemlerin dinamik özellikleri ve deprem altındaki performansları değerlendirilmiştir.

3.4.1.1 Yapı Sistemi

Alüminyum köpük sandviç panellerin ve alüminyum köpük dolgusunun sismik performans üzerine olan etkilerini araştırmak için farklı yapısal konfigürasyonlara sahip çelik çerçeveler tasarlanmıştır. Her iki doğrultuda süneklik düzeyi yüksek çelik çerçevelerden oluşan yapıların tipik kat yüksekliği 3 metredir. 2, 4, 6 ve 8 katlı çerçeve sistemler, x ve y yönlerinde 5 metre açıklığa sahip olacak şekilde, 1 ve 2 açıklıklı konfigürasyonlarla modellenmiştir. Şekil 26'da 8 katlı çerçeve modellerine ait üç boyutlu görünüşler yer almaktadır.



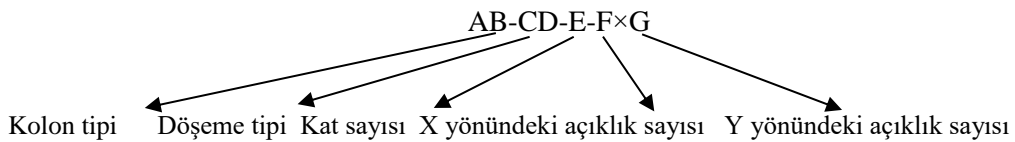
1x1 Açıklıklı 8 Katlı Çerçeve

2x1 Açıklıklı 8 Katlı Çerçeve

2x2 Açıklıklı 8 Katlı Çerçeve

Şekil 26. 8 Katlı çelik çerçeve modellerine ait üç boyutlu görünüşler

Çalışma kapsamındaki tüm çerçeveler Şekil 27'de verilen şemaya göre etiketlenmiştir. Sonlu elemanlar modellerinde ilk 2 harf kolonda köpük dolgunun bulunup bulunmadığını, tirden sonraki 2 harf ise döşeme tipini belirtir. Harflerden ve tirden sonraki ilk rakam yapının kat sayısını, son iki rakam ise x ve y yönlerindeki açıklık sayısını belirtir. Örneğin BK-GD-6-2×1, köpük dolgusuz kare kesitli kutu kolon ve geleneksel kompozit döşeme ile tasarlanmış; x yönünde 1 ve y yönünde 2 açıklığa sahip 6 katlı yapı modelini belirtmektedir. Benzer şekilde KK-KD-8-1×1, köpük dolgulu kare kesitli kutu kolon ve sandviç kompozit panel döşeme ile tasarlanmış; x ve y yönünde 1 açıklığa sahip 8 katlı yapı modelini temsil etmektedir.



Şekil 27. Çelik çerçevelerin model kodu

Çalışma kapsamındaki çerçevelerin, bir konut binasını temsil ettiği varsayılmıştır. Yerel zemin sınıfı, Eurocode 8 (European Committee for Standardization (CEN), 2004) kapsamında tanımlanan sınıflandırmaya uygun olacak şekilde orta sert zemin karakteristiğine sahip “C” zemin grubu olarak belirlenmiştir. Eurocode 3’e (European Committee for Standardization (CEN), 2005) uygun olacak şekilde kolonlar için 260×14,2mm ölçülerinde kare kesitler, kirişler için ise IPE270 kesitler seçilmiştir. Hem geleneksel kompozit döşemenin hem de sandviç kompozit panellerle oluşturulmuş döşemelerin kalınlığı 100 mm olarak varsayılmıştır. Çelik çerçevelerde döşeme olarak kullanılan sandviç kompozit yapı, birbirine paralel yerleştirilmiş 3 mm kalınlıktaki iki çelik tabaka arasında konumlandırılmış bir alüminyum köpük çekirdekten meydana gelmektedir.

3.4.1.2. Malzeme Özellikleri

ABAQUS'ta kullanılacak malzeme özellikleri için aşağıda verilen Denklem 6 ve 7’den elde edilen dönüşüm işlemi sonucunda gerçek gerilme ve logaritmik plastik şekil değiştirme değerleri elde edilebilmektedir (Boresi ve Schmidt, 2003).

Bu dönüştürme işlemi, ABAQUS kullanılarak doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi ve yüksek deformasyonların elde edilmesi açısından önemlidir.

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - (\sigma_{true}/E) \quad (4)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} \times (1 + \epsilon_{nom}) \quad (5)$$

Burada σ_{true} , σ_{nom} , ϵ_{ln}^{pl} , and ϵ_{nom} sırasıyla gerçek gerilim, nominal gerilim, logaritmik plastik gerilim ve nominal gerilimdir. Hesaplanan değerleri, ele alınan çerçevelerin analizinde kullanılmıştır. Malzeme modelinde kullanılan Poisson oranı 0,3’tür.

Öncelikle yapının dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla modal analiz yapılmıştır. Test çerçevesinin öteleme modlarına ve burulma moduna karşılık gelen birçok titreşim modu bulunmuştur. Ancak burada uygulanan deprem yönüne göre yalnızca ilk iki titreşim modu dikkate alınmıştır. Analizlerde 0,02’lik hedef sönümlenme oranı (ξ) temel alınarak Rayleigh sönümlenmesi kullanılmıştır.

Çeliğin Malzeme Özellikleri: Çelik çerçeve modellerinde S235 yapı çeliği kullanılmıştır. S235 sınıfı çeliğin, elastisite modülü (E_s) 200 GPa, Poisson oranı (ν_s) 0,30, akma dayanımı (f_y) 235 MPa, çekme dayanımı (f_u) 360 MPa ve birim hacim

ağırlığı (γ_s) 78,5 kN/m³ olarak kullanılmıştır. S235 sınıfı çeliğin tasarım ve hesaplarda kullanılan mekanik değerleri ilgili bilgi Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. S235 sınıfı çeliğin malzeme özellikleri

Malzeme	S235
Elastisite modülü, E (GPa)	200
Poisson oranı, ν_s	0,3
Birim hacim ağırlık, γ_s (kN/m ³)	78,5
Akma gerilmesi, f_y (MPa)	235
Çekme gerilmesi, f_u (MPa)	360

Betonun Malzeme Özellikleri: Geleneksel kompozit döşemelerde beton sınıfı olarak C30 seçilmiştir. C30 sınıfı betonun, elastisite modülü (E_c) 32000 MPa, Poisson oranı (ν_c) 0,20, birim hacim ağırlığı (γ_c) 25 kN/m³, karakteristik basınç dayanımı (f_{ck}) 30 MPa olarak kullanılmıştır. C30 betonunun malzeme özellikleri Tablo 15'de belirtilmiştir.

Bu döşeme sistemin sayısal modellemesini sadeleştirmek ve hesaplama yükünü azaltmak amacıyla donatılı beton ve trapez sacdan oluşan geleneksel kompozit döşeme, homojen bir düz beton plaka olarak idealize edilmiştir. Bu plakanın tanımlanmasında yalnızca betonun elastisite modülü, Poisson oranı ve birim hacim ağırlığı gibi temel mekanik özellikleri kullanılmıştır. Ancak donatıların da yapısal sisteme kütleli katkısı olduğu göz önünde bulundurularak, toplam donatı ağırlığı hesaplanmış ve bu değer betonun birim hacim ağırlığına eklenmiştir. Böylece, donatıların kütle etkisi modele herhangi bir ek geometri veya parça tanımı yapılmadan, yalnızca malzeme tanımı üzerinden entegre edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde hem modeldeki eleman sayısı sınırlı tutulmuş hem de kütle temelli dinamik etkiler daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmiştir.

Tablo 15. C30 sınıfı betonun malzeme özellikleri.

Malzeme	C30
Elastisite modülü, E_c (N/mm ²)	32000
Poisson oranı, ν_c	0,2
Birim hacim ağırlık, γ_c (kN/m ³)	25
Nihai dayanımı, σ_{cu} (N/mm ²)	37
Nihai kopma dayanımı, σ_c (N/mm ²)	30
Kopma uzaması, ϵ_c (%)	0,17

Sandviç Kompozit Bileşenlerinin Malzeme Özellikleri: Çelik çerçevelerde döşeme olarak kullanılan sandviç kompozit yapı, birbirine paralel yerleştirilmiş iki çelik tabaka arasında konumlandırılmış bir alüminyum köpük çekirdekten meydana gelmektedir.

Alüminyum köpük sandviç panellerin çelik plakaların tanımlanmasında, doğrulama analizinde kullanılan S280GD çeliğin mekanik karakteristikleri temel alınmış ve izotropik elastik-plastik modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu malzemenin elastisite modülü 210 GPa, akma dayanımı 280 MPa, çekme dayanımı 290 MPa ve birim hacim ağırlığı (γ_s) 78,5 kN/m³ olarak kullanılmıştır. S280GD sınıfı çeliğin malzeme özellikleri Tablo 16’de belirtilmiştir.

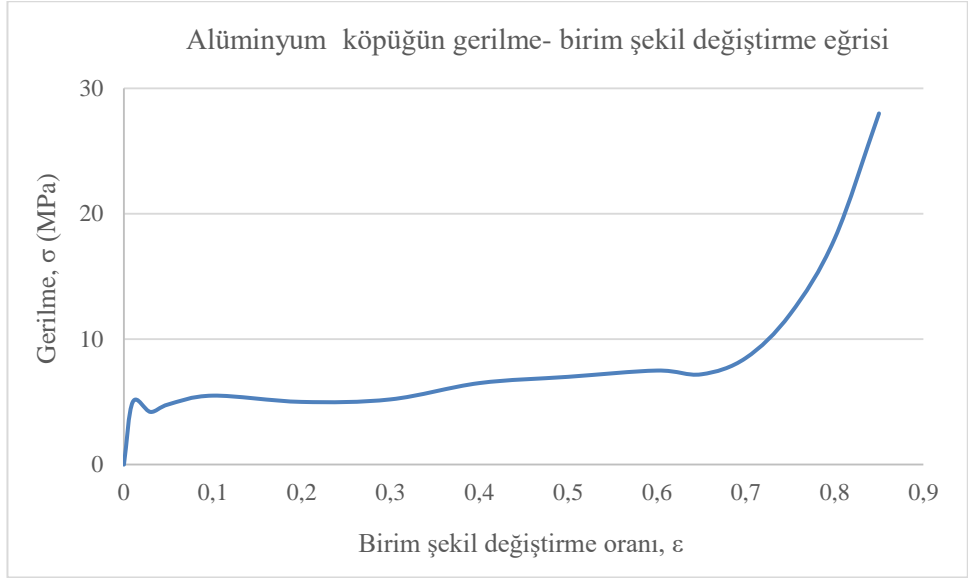
Tablo 16. S280GD sınıfı çeliğin malzeme özellikleri.

Malzeme	S280GD
Elastisite modülü, E_s (GPa)	210
Poisson oranı, ν_s	0,3
Birim hacim ağırlık, γ_s (kN/m ³)	78,5
Akma gerilmesi, f_y (MPa)	280
Çekme gerilmesi, f_u (MPa)	290

Sandviç kompozit döşemelerde çekirdek ve kolonlarda dolgu olarak yer alan metalik köpük çekirdek ise Cymat Technologies Ltd tarafından üretilmiştir. 7,652 GPa elastisite modülüne ve 510 kg/m³ nominal yoğunluğa sahip orta/yüksek yoğunluklu bir alüminyum köpüktür. Alüminyum köpük çekirdeklerin modellenmesinde, izotropik ezilebilir köpük (crushable foam) malzeme modeli esas alınmış; ayrıca plastikleşme sonrası oluşan hasarın daha doğru yansıtılması amacıyla sünek hasar başlatma (ductile damage initiation) ve hasar oluşumu (damage evolution) tanımları modele dahil edilmiştir. Bu model, gözenekli yapıların çökme ve enerji yutma davranışını tanımlayan iler düzey bir malzeme modelidir. Alüminyum köpüğün sayısal modellerde kullanılan mekanik özellikleri Tablo 17’de belirtilmiştir. Şekil 28’te ise alüminyum köpüğe ait gerilme–şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.

Tablo 17. Alüminyum köpüğün malzeme özellikleri.

Plastik parametreler		Sünek hasar parametreleri			Hasar başlangıcı
Gerilme [MPa]	Birim şekil değiştirme	Kırılma birim şekil değiştirmesi	Üç eksenli gerilme	Birim şekil değiştirme oranı	Hasarda yerdeğiştirme [mm]
7,37	0	0,0104	0,33	0,001	0,15
12	0,0035				
12	1				



Şekil 28. Alüminyum köpüğe ait mühendislik gerilmesi- birim şekil değiştirme eğrisi

Alüminyum köpüğe ait mühendislik gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi, literatürde yer alan deneysel grafiklerden sayısallaştırma (digitization) yöntemi ile elde edilmiş ve daha düzgün bir temsil için ara değerler lineer enterpolasyon ile oluşturulmuştur. Alüminyum köpüğe ait mühendislik gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi, malzemenin düşük gerilme seviyelerinde elastik davranış sergilediğini, ardından geniş bir plato bölgesinde hücre çökmesi ile kontrollü deformasyon gerçekleştirdiğini göstermektedir. Yüksek şekil değiştirme değerlerinde ise yoğunlaşma etkisi nedeniyle gerilmelerde belirgin bir artış gözlenmektedir.

Alüminyum köpük sandviç paneli oluşturan çelik kaplamalar ve alüminyum köpük çekirdek arayüzdeki yapışkan katmanı olarak doğrulama analizinde kullanılan Geolite Gel tercih edilmiştir. Tablo 18’de, Geolite Gel yapıştırıcının tepkisini simüle etmek için benimsenen tüm mekanik parametreleri özetlemektedir. Bu yapışkan katmanlar, elastik-kırılgan tepkili sıfır kalınlıkta kohezyonlu temas elemanları aracılığıyla modellenmiştir.

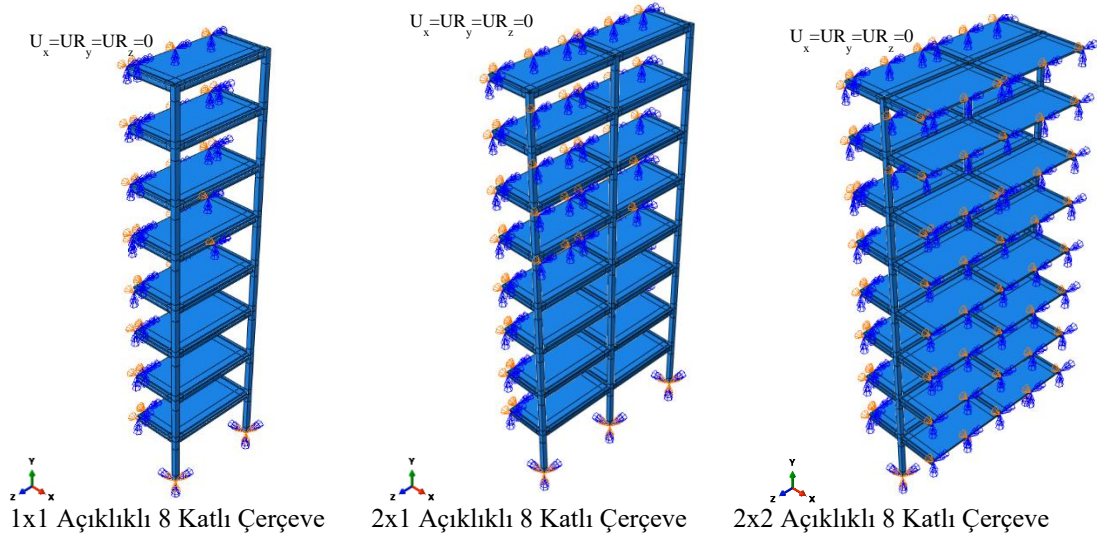
Tablo 18. Geolite gel yapıştırıcının mekanik özellikleri

Malzeme	Geolite Gel
Kayma modülü [MPa]	1100
Kayma mukavemeti [MPa]	2,5

3.4.1.3. Sınır Şartları ve Yüklemeler

Sonlu elemanlar yönteminde aksenal simetrik numuneler için, çözümün daha kolay ve daha kısa sürede gerçekleşmesi için numunelerin simetri eksenlerine göre 1/2’lik, hatta 1/4’lük kısmı modellenmektedir. Tasarlanan çelik çerçevelerin simetrisi

nedeniyle sayısal analizlerde aksenal simetrik modelleme dikkate alınmıştır. Yapısal sistemin ve yüklemenin simetrik olması nedeniyle, simetri eksenini boyunca simetri sınır şartları tanımlanmıştır. Bu kapsamda, x doğrultusundaki ötelenme (U_x) ile y ve z eksenleri etrafındaki dönme serbestlik dereceleri (UR_y , UR_z) kısıtlanmış, böylece simetri koşulu sağlanarak simetri ekseninin yatay hareketi engellenmiştir. Birinci kat kolonlarının zemine sabitlendiği varsayılmıştır. 1/2 ölçekle modellenen 8 katlı çelik çerçevelere ait sonlu eleman modeli Şekil 29’da yer almaktadır.



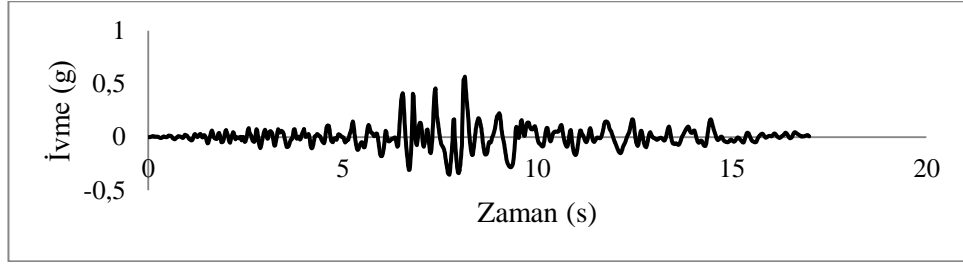
Şekil 29. 8 Katlı çelik çerçeve modellerinin sınır şartları

Yapının dinamik özelliklerini belirlemek için öncelikle modal analiz yapılmıştır. Modal analizden sonra sonlu elemanlar modelleri için *Dynamic Implicit seçeneği kullanılarak doğrusal olmayan elastik olmayan dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

Dinamik analizde Northridge deprem kaydı kullanılmıştır. 0,01 sn.lik zaman adımıyla tutulan bu kayıta maksimum ivme değeri 8,14. saniyede oluşmuş olup yaklaşık 17 saniyelik olan bu kaydın bütünü dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kayıta maksimum ivme değeri yaklaşık $5,57 \text{ m/s}^2$ 'dir. Northridge deprem kaydının en büyük yer ivmesi (PGA) ve zaman adımı Tablo 19’de listelenmiştir. Sismik dalgalar Şekil 30’de gösterildiği gibi z-ekseni doğrultusunda uygulanmıştır.

Tablo 19. Deprem yüklerinin en büyük yer ivmesi ve buna karşılık gelen zaman adım(lar)ı

Deprem kaydı	PGA (g)	Zaman adım(lar)ı (s)
Northridge	0,57	0,01



Şekil 30. Northridge sismik dalgası

Sonlu eleman modellerini yer çekimi alanı içerisinde tutmak için düşey ivme uygulanmıştır. Döşemelerde hareketli yük $2,0 \text{ kN/m}^2$, duvar yükü ise $3,0 \text{ kN/m}$ olarak kabul edilmiştir.

3.4.1.4. Temas Özellikleri

Sonlu elemanlar modellerinin düğüm noktası bağlantıları rijit bağlantılar olarak modellenmiştir. Sandviç paneli oluşturan çelik levhalar ve köpük çekirdek arasındaki bağlantı özellikleri çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Bu nedenle çelik levhalar ve köpük çekirdek arasındaki arayüz rijit özellik taşımaktadır.

Yapısal uygulamalarda, geleneksel kompozit döşeme ile kirişler arasında güvenli bir bağlantı sağlanması için genellikle kayma çivisi ve donatı kullanımı gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında ise, temel modelleme varsayımı olarak, bu ayrıntılı bağlantı elemanları sayısal modele dâhil edilmemiştir. Onun yerine, hem geleneksel döşeme modeli hem de sandviç kompozit döşeme elemanları, SE yazılımındaki “tie” komutu kullanılarak çelik kirişlere sabitlenmiştir.

Bu basitleştirilmiş yaklaşım, geleneksel sistemlerle önerilen alüminyum köpük entegre sistemler arasında, söz konusu sonlu eleman varsayımları kapsamında doğrudan karşılaştırma yapılmasına olanak tanımakta olup, tam kompozit etkiyi sağlayan fiziksel bağlantı detaylarının modellenmesini kapsamamaktadır. Alüminyum köpük dolgular ile kolon yüzeyleri arasındaki temas etkileşimi, yatay yönde $0,3$ 'lük bir sürtünme katsayısıyla temsil edilmiştir. Normal doğrultudaki temas koşulları ise, temas yüzeylerinin ayrılmasına olanak tanıyan “Sert Temas” (Hard Contact) özelliği ile sağlanmıştır.

3.4.1.5. Sonlu Eleman Tipi ve Ağ Yapısı

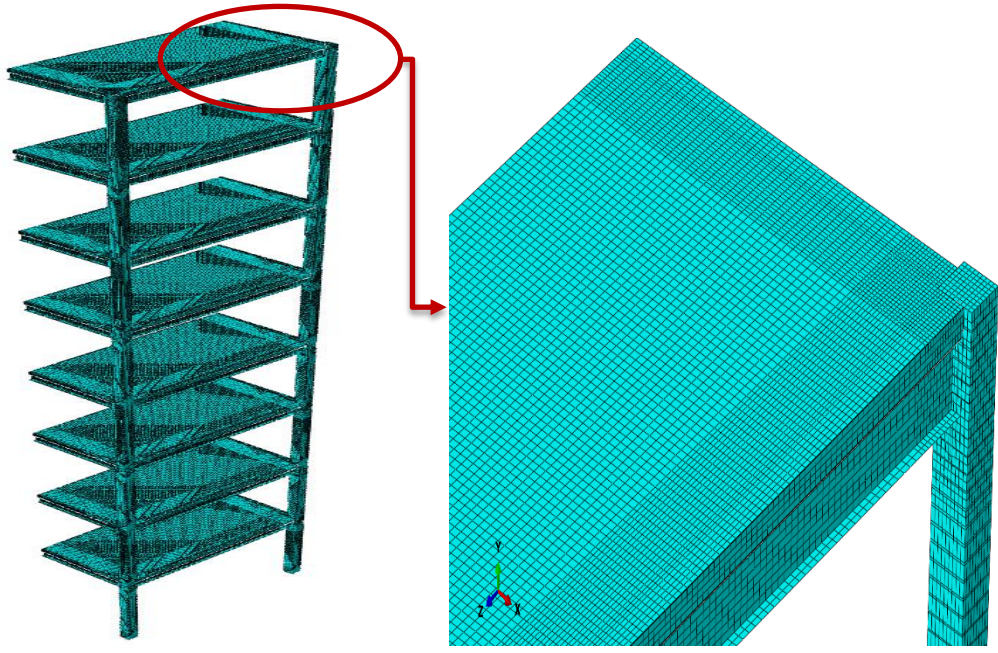
Etkili ve hassas bir sonlu elemanlar yaklaşımı elde etmek için inceleme ABAQUS/Standart modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çelik çerçevelere ait SEM

oluşturulurken hem malzeme hem de geometrik doğrusal olmayan durumlar dikkate alınmıştır.

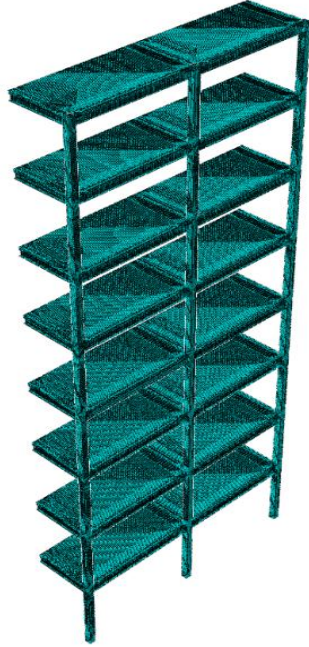
elik çerçevelerde döşeme olarak sandviç kompozit kullanımının yapının sismik davranışı üzerindeki etkisini görmek için farklı eleman tipleri kullanılmış/uygulanmıştır. Sandviç kompozitin modellenmesinde katı elemanlar, elik çerçevenin modellenmesinde ise kabuk elemanlar kullanılmıştır. Sandviç kompozitin her bir bileşeni için C3D8R elemanı ve elik çerçevedeki kirişler ile kolonlar için S4R elemanı kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde hem doğru sonuçlar sağlayan hem de hesaplama süresini azaltan en uygun ağı bulmak için farklı ağ boyutları denenmiştir. elik kaplamalar, plakanın kalınlığı boyunca en az iki elemanın olmasını sağlayacak şekilde bölünmüştür.

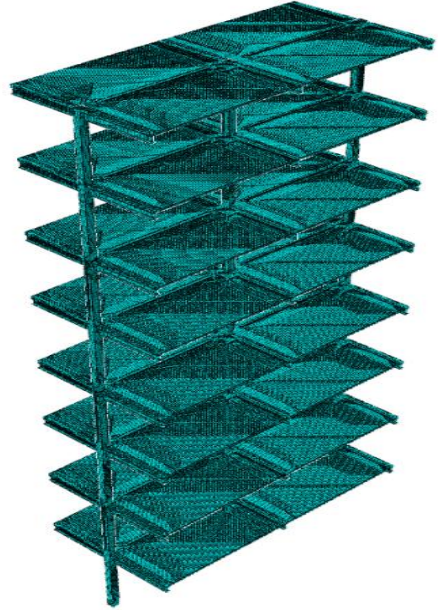
elik çerçevede kiriş ve kolonların uçları ile kiriş-kolon birleşimlerinden itibaren 576 mm'lik alanların ağ boyutu 25 mm, döşemelerin kenarlarından itibaren 576 mm'lik alanların ağ boyutu 25 mm diğer alanlar ise 50 mm olarak modellenmiştir. şekil 31'de elik çerçevelerin ağlara bölünmüş sonlu elemanlar modelleri yer almaktadır.



1×1 Açıklıklı 8 Katlı Çerçeve



2×1 Açıklıklı 8 Katlı Çerçeve



2×2 Açıklıklı 8 Katlı Çerçeve

Şekil 31. 8 Katlı çelik çerçeve modellerinin ağlara bölünmüş sonlu elemanlar modelleri

3.4.2. Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Modellenmesi

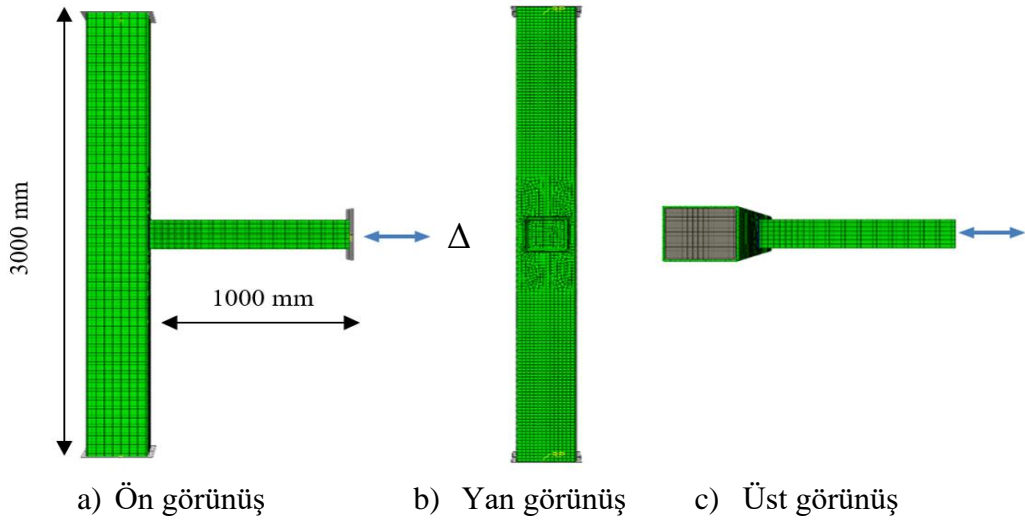
Bu bölümde, kiriş-kolon genişlik oranı (β) ve kolon genişliğinin kalınlığına oranı (γ) gibi geometrik parametrelerin, çevrimsel aksenal yükler altında kolon-kiriş birleşimlerinin sismik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Alüminyum köpük dolgusu olmayan birleşimler referans birleşimler olarak kabul edilerek analiz edilmiş ve performansları köpük dolgulu kolon-kiriş birleşimleriyle karşılaştırılmıştır. Tablo 20, kiriş-kolon birleşimlerinin geometrik boyutlarını özetlemektedir. K modelleri, alüminyum köpük dolgulu çelik birleşimlerini ifade ederken; B modelleri, dolgusuz

çelik birleşimlerini ifade etmektedir. Sonlu eleman modellerinde, alüminyum köpük dolgusu yalnızca kolonlarda kullanılmış ve kirişlerde köpük dolgusu yoktur. Bu bölümün temel amacı, farklı β ve γ oranlarına sahip birleşimlerde alüminyum köpük dolgusunun süneklik ve enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkisini ortaya koymaktır.

Tablo 20. Kiriş-kolon birleşimlerinin geometrik parametreleri

Kısaltma Kodu	Kiriş	Kolon	β	γ
B1 & K1	100×100×10	200×200×10	0,50	20
B2 & K2	100×100×8	200×200×8	0,50	25
B3 & K3	100×100×5	200×200×5	0,50	40
B4 & K4	150×150×8	200×200×8	0,75	25
B5 & K5	60×60×8	200×200×8	0,30	25

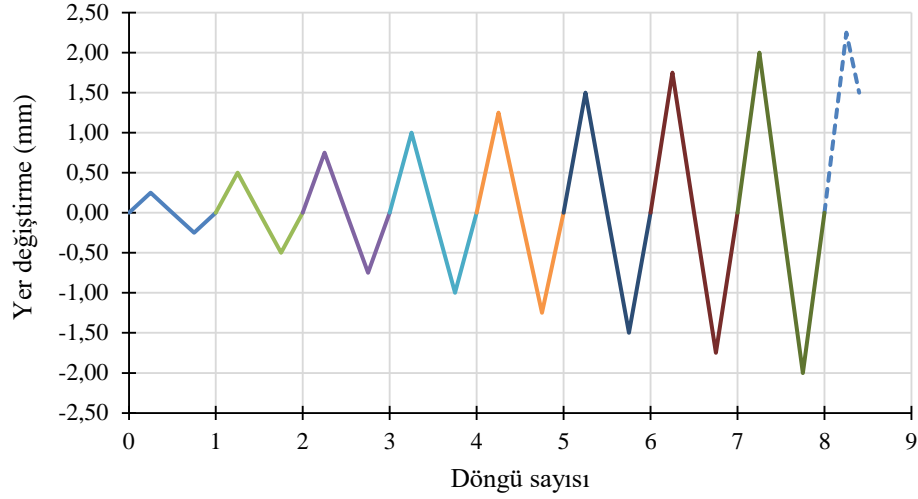
Şekil 32, tüm kiriş-kolon birleşimlerinin geometrik boyutlarını, sonlu elemanlar ağ yapısını ve yükün uygulama noktası ile doğrultusu göstermektedir. Her birleşimdeki kolon uzunluğu 3000 mm’de sabit tutulur. Kolon uçları sabitlenir. Yükleme ve sınır koşulları, kolon ve kiriş uçlarına rijit plakalar eklenerek uygulanır.



Şekil 32. Kiriş-kolon birleşimlerinin sonlu elemanlar ağ yapısı ve yükleme noktası

Sonlu elemanlar analizinde yerdeğiştirme kontrollü yarı-statik çevrimsel yükleme protokolü kullanılmıştır. Bu protokol, kiriş elemanının merkezindeki yerdeğiştirmeler (Δ) ile tanımlanılır ve birleşimler hasar alıncaya kadar 0,25 mm artışlarla yerdeğiştirme genlikleri kullanılarak uygulanır. Yükleme protokolü, B5 modelinde elde edilen akma yerdeğiştirmesine ($\Delta_y = 1,41$ mm) göre belirlenmişti ve artış oranı akma yerdeğiştirmesinin beşte birine yakın olacak şekilde ayarlanmıştır. Birleşimlerde kullanılan yükleme protokolü Şekil 33’de gösterilmiştir.

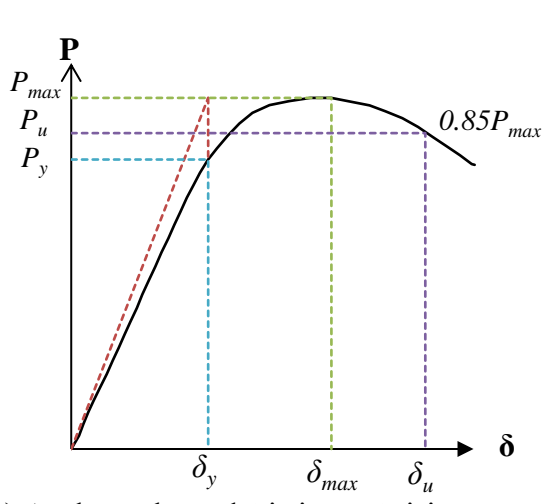
İlk döngü, B5 modelinin akma yer değiştirmesine uyum sağlamak için $\pm 0,25$ mm genlikle başlatılmıştır. Sonraki döngüler $\pm 0,50$ mm, $\pm 0,75$ mm, $\pm 1,00$ mm, vb. yer değiştirme genliği artışlarıyla devam etmiştir. Her bir birleşim modeli için aynı yüklenme protokolü kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu yöntemde, yüklenme koşullarını standartlaştırmayı, farklı β ve γ oranlarına sahip köpük dolgulu bağlantıların sismik performansını değerlendirirken güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlanır.



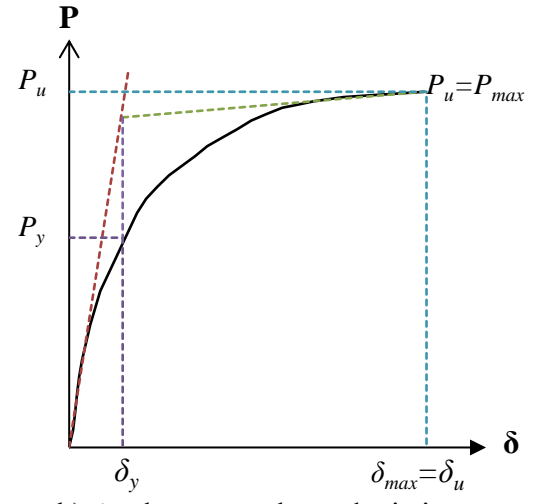
Şekil 33. Yükleme protokolü

Her birleşimin akma yerdeğiştirmesi (δ_y) ve nihai yer değiştirmesi (δ_u), Şekil 34'de belirtilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir.

Yük, maksimum değerine (P_{max}) ulaştıktan sonra azalmaya başladığı durumda, akma ve nihai yer değiştirmeler Şekil 34 (a)'da belirtilen yöntemle göre belirlenir. P_{max} elde edildiğinde, bu birleşimler için nominal nihai yük $P_u = 0,85P_{max}$ olarak alınır ve bu yüke karşılık gelen yer değiştirme δ_u olarak tanımlanır. Şekil 34 (b)'de gösterildiği gibi, alçalan kısmı olmayan yük-yerdeğiştirme eğrilerinde, P_u , P_{max} 'a eşit olarak alınır ve karşılık gelen yer değiştirme δ_u olarak tanımlanır. Bu yöntem, çevrimsel yüklenme altında birleşimlerin akma ve nihai yerdeğiştirmelerini elde eder.



a) Azalan yük-yerdeğiştirme eğrisi



b) Azalmayan yük-yerdeğiştirme

Şekil 34. Yük-yerdeğiştirme eğrilerinde akma ve nihai yerdeğiştirmenin belirlenmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çok Katlı Çelik Çerçevelerin Sismik Performans Analiz Sonuçları

Bu çalışmada, analiz sonuçlarını değerlendirmek için deprem ivmesi doğrultusundaki en büyük normal ve eşdeğer gerilmeler ile en büyük mutlak kat ötelemeleri dikkate alınmıştır. Tüm sistemler için, deprem ivmesi doğrultusunda kat döşemelerinde meydana gelen en büyük mutlak yatay yer değiştirmenin zamanla değişim grafiği, görelî kat öteleme oranı ve en büyük yer değiştirmenin gerçekleştiği zaman dilimindeki Von Misses gerilme dağılımı grafiği sunulmuştur. Bu değerlere ilişkin grafikler ve tablolar sunulmuştur. Benzer şekilde tüm sonlu elemanlar modelleri için mod şekilleri, dikkate alınan açısâl frakans değerlerine ilişkin tablolar verilmiştir.

4.1.1. Doğal Frekanslar

Tablo 21, çeşitli kat seviyeleri (2, 4, 6 ve 8 kat), üç açıklık konfigürasyonu (1×1, 2×1 ve 2×2) ve dört farklı sistem tipi (BK-GD, BK-KD, KK-GD ve KK-KD) dahil olmak üzere geliştirilen 48 çerçeve modelinin tamamı için birinci (ω_1) ve ikinci (ω_2) doğal frekansları özetlemektedir. Sonlu elemanlar analizinde, çerçevenin birinci ve ikinci doğal frekansları (ω_1 ve ω_2) için 0,02'lik hedef sönümlenme oranına (ξ) dayalı olarak hesaplanan kütle orantılı ve sertlik orantılı sönümlenme katsayıları kullanılarak Rayleigh sönümlenmesi uygulanmıştır.

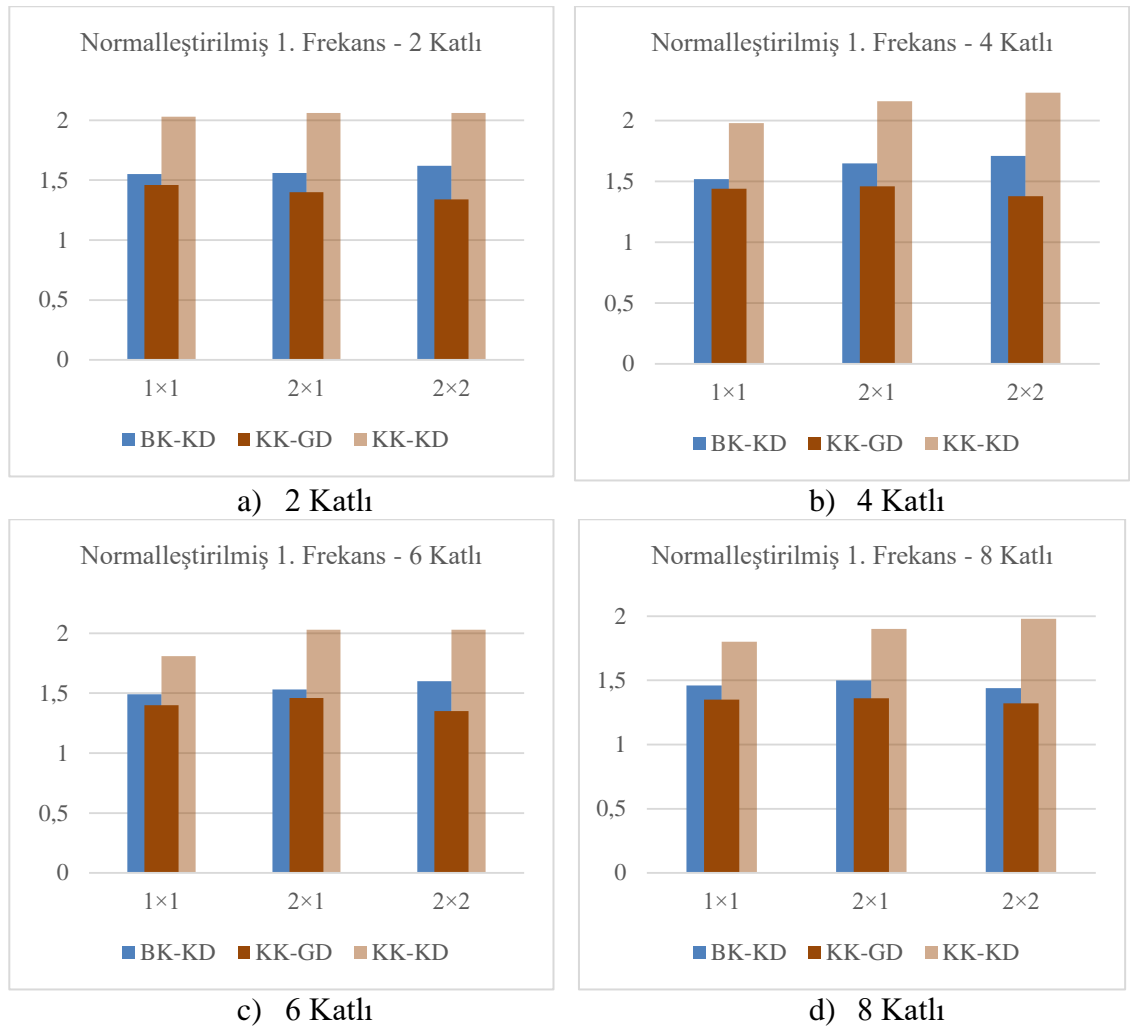
Tablo 21'de görüldüğü gibi, tüm çerçeve konfigürasyonları ve sistem tiplerinde kat sayısındaki artışla birlikte hem birinci hem de ikinci doğal frekanslarda tutarlı ve önemli bir azalma kaydedilmiştir. Ayrıca, alüminyum köpük dolgulu kolonların dahil edilmesi, geleneksel kare kutu kesitli kolonlu çerçevelere kıyasla genellikle doğal frekanslarda bir artışa yol açar. Benzer şekilde, alüminyum köpük sandviç panel döşeme içeren çerçeveler, geleneksel kompozit döşemeli çerçevelere kıyasla daha yüksek doğal frekanslar sergileme eğilimindedir.

Her iki yenilikçi bileşeni de birleştiren KK-KD çerçeve sistemi, belirli bir kat seviyesi ve açıklık için tüm konfigürasyonlar arasında sürekli olarak en yüksek doğal frekansları göstermektedir. Ayrıca, açıklık konfigürasyonu da önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle, açıklık sayısı arttıkça (örneğin, 1×1'den 2×1'e ve 2×2'ye), doğal frekanslar azalma eğilimindedir. Bu eğilim, tüm sistem tiplerinde ve kat seviyelerinde tutarlıdır.

Özetle, doğal frekansların analizi, alüminyum köpük bileşenlerinin dahil edilmesinin, geleneksel kompozit döşemeli ilgili modellere kıyasla daha yüksek frekanslar sergilediğini açıkça göstermektedir. Bu sonuçlar, KK-KD sisteminin sürekli olarak en yüksek doğal frekansları sağladığını göstermektedir.

Tablo 21. Çelik çerçevelerin 1. ve 2. doğal frekansları

Kat Sayısı	Açıklık Konfigürasyonu	Çerçeve Türü	1. Doğal Frekans (Hz)	2. Doğal Frekans (Hz)	BK-GD ile oranı (1. Doğal Frekans)	BK-GD ile oranı (2. Doğal Frekans)	
2-Katlı	1×1	BK-GD	3,125	13,940	1,00	1,00	
		BK-KD	4,832	20,385	1,55	1,46	
		KK-GD	4,551	17,224	1,46	1,24	
		KK-KD	6,344	24,266	2,03	1,74	
	2×1	BK-GD	2,811	12,224	1,00	1,00	
		BK-KD	4,393	17,896	1,56	1,46	
		KK-GD	3,949	14,111	1,40	1,15	
		KK-KD	5,800	20,318	2,06	1,66	
		2×2	BK-GD	2,340	9,173	1,00	1,00
			BK-KD	3,801	14,218	1,62	1,55
			KK-GD	3,144	10,490	1,34	1,14
			KK-KD	4,812	16,075	2,06	1,75
4-Katlı	1×1	BK-GD	1,440	5,532	1,00	1,00	
		BK-KD	2,195	8,185	1,52	1,48	
		KK-GD	2,079	7,332	1,44	1,33	
		KK-KD	2,846	9,969	1,98	1,80	
	2×1	BK-GD	1,306	4,853	1,00	1,00	
		BK-KD	2,150	7,793	1,65	1,61	
		KK-GD	1,907	6,396	1,46	1,32	
		KK-KD	2,817	9,521	2,16	1,96	
	2×2	BK-GD	1,129	3,971	1,00	1,00	
		BK-KD	1,928	6,647	1,71	1,67	
		KK-GD	1,553	5,080	1,38	1,28	
		KK-KD	2,520	8,438	2,23	2,12	
	6-Katlı	1×1	BK-GD	0,962	3,376	1,00	1,00
			BK-KD	1,436	4,965	1,49	1,47
			KK-GD	1,346	4,508	1,40	1,34
			KK-KD	1,739	5,802	1,81	1,72
2×1		BK-GD	0,885	3,031	1,00	1,00	
		BK-KD	1,351	4,575	1,53	1,51	
		KK-GD	1,291	4,191	1,46	1,38	
		KK-KD	1,798	5,804	2,03	1,91	
2×2		BK-GD	0,771	2,553	1,00	1,00	
		BK-KD	1,237	4,048	1,60	1,59	
		KK-GD	1,041	3,309	1,35	1,30	
		KK-KD	1,563	4,966	2,03	1,95	
8-Katlı		1×1	BK-GD	0,738	2,476	1,00	1,00
			BK-KD	1,081	3,592	1,46	1,45
			KK-GD	0,994	3,241	1,35	1,31
			KK-KD	1,329	4,303	1,80	1,74
	2×1	BK-GD	0,691	2,270	1,00	1,00	
		BK-KD	1,036	3,385	1,50	1,49	
		KK-GD	0,939	3,007	1,36	1,32	
		KK-KD	1,315	4,211	1,90	1,86	
	2×2	BK-GD	0,603	1,934	1,00	1,00	
		BK-KD	0,868	2,800	1,44	1,45	
		KK-GD	0,795	2,505	1,32	1,30	
		KK-KD	1,196	3,760	1,98	1,94	



Şekil 35. Geleneksel çelik çerçeveler ile normalleştirilmiş ilk doğal frekansların karşılaştırılması

Şekil 35’de geleneksel çelik çerçeveler ile normalleştirilmiş ilk doğal frekanslarının karşılaştırılması sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen doğal frekans sonuçları, hem kolon ve döşeme gibi yapısal bileşenlerin hem de kat sayısı ve açıklık konfigürasyonu geometrik parametrelerin yapıların dinamik karakteristiği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

Öncelikle, köpük dolgulu kolonların (KK) ve köpük dolgulu döşeme sistemlerinin (KD) kullanılmasıyla sistem rijitliğinde önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Referans sisteme (BK-GD) kıyasla, KK-KD modellerinde doğal frekanslarda neredeyse iki kat artışa neden olmaktadır. Bu durum, köpük dolgusunun sadece yerel eleman davranışını etkilemekle kalmayıp, aynı zamanda yapısal sistemin genel rijitlik matrisini de önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir. Özellikle, yapısal analizde genellikle ikincil bir bileşen olarak kabul edilen döşeme sisteminin, bu çalışmada genel dinamik tepki üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Kat sayısı arttıkça, tüm yapısal sistemlerde hem birinci hem de ikinci doğal frekanslarda önemli bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, yapı yüksekliği arttıkça eğilme deformasyonlarının baskın hale gelmesi ve etkin rijitliğin azalması ile açıklanabilir. Özellikle, 2 katlı sistemlerden 8 katlı sistemlere geçiş, doğal frekanslarda yaklaşık 3 ila 5 katlık bir azalmaya yol açmaktadır. Bu davranış, daha yüksek yapıların daha esnek dinamik özellikler sergilediğini ve bu nedenle sismik yük altında daha büyük yer değiştirmelere maruz kalabileceğini göstermektedir.

Açıklık konfigürasyonunun etkisi incelendiğinde, açıklığın artırılması (1×1 'den 2×2 'ye), kiriş açıklıkları sabit kalmasına rağmen, plan boyutu değiştikçe doğal frekansların azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, plan boyutunun artmasıyla birlikte toplam kütlenin artması ve sistemin genel deformasyon modlarının daha baskın hale gelmesi ile açıklanabilir. Yapısal elemanların eklenmesi nedeniyle genel rijitlik de artarken, kütle artışının daha baskın olması nedeniyle genel frekans değerlerinde bir azalmaya ve daha esnek bir dinamik tepkiye yol açar.

Bununla birlikte, köpük dolgulı sistemlerin sağladığı rijitlik artışının farklı kat sayıları ve açıklık konfigürasyonlarında büyük ölçüde korunduğu dikkat çekmektedir. Bu, köpük dolgusunun yararlı etkilerinin ölçeklenebilir olduğunu ve belirli yapısal geometrilerle sınırlı olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, mühendislik açısından, artan rijitliğin doğal periyotların azalmasına yol açtığını ve bunun da daha yüksek sismik kuvvet taleplerine neden olabileceğini belirtmek önemlidir. Bu nedenle, elde edilen rijitlik artışının enerji sönmüleme kapasitesi ve plastikleşme davranışı ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, ikinci doğal frekanstaki artış oranlarının birinci moda kıyasla daha sınırlı kalması, rijitlik değişimlerinin özellikle birinci mod üzerinde daha baskın etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu durum, düşük katlı ve orta katlı yapılarda birinci modun dinamik davranış üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir.

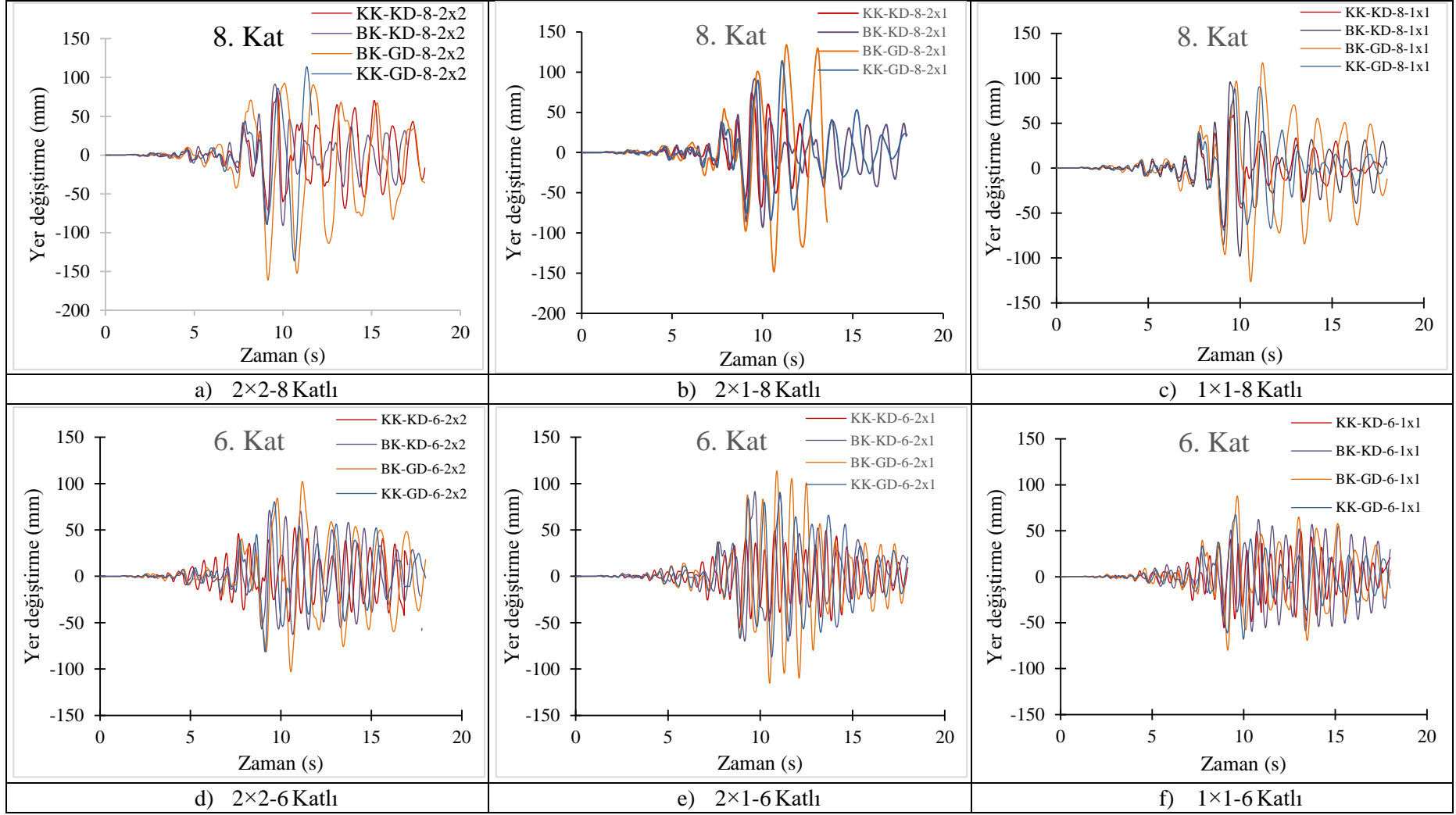
Sonuç olarak, köpük dolgulı kolon ve döşeme sistemlerinin birlikte kullanımı, yapısal sistemin dinamik rijitliğini önemli ölçüde artırmakta ve bu etkinin farklı geometrik parametreler altında tutarlı şekilde sürdüğü görülmektedir. Ancak bu artışın deprem performansına etkisinin tam olarak değerlendirilebilmesi için yer değiştirme talepleri, iç kuvvet dağılımları ve enerji sönmüleme kapasitesinin birlikte incelendiği ileri analizlere ihtiyaç vardır.

4.1.2. Yer Değiştirme Tepkileri

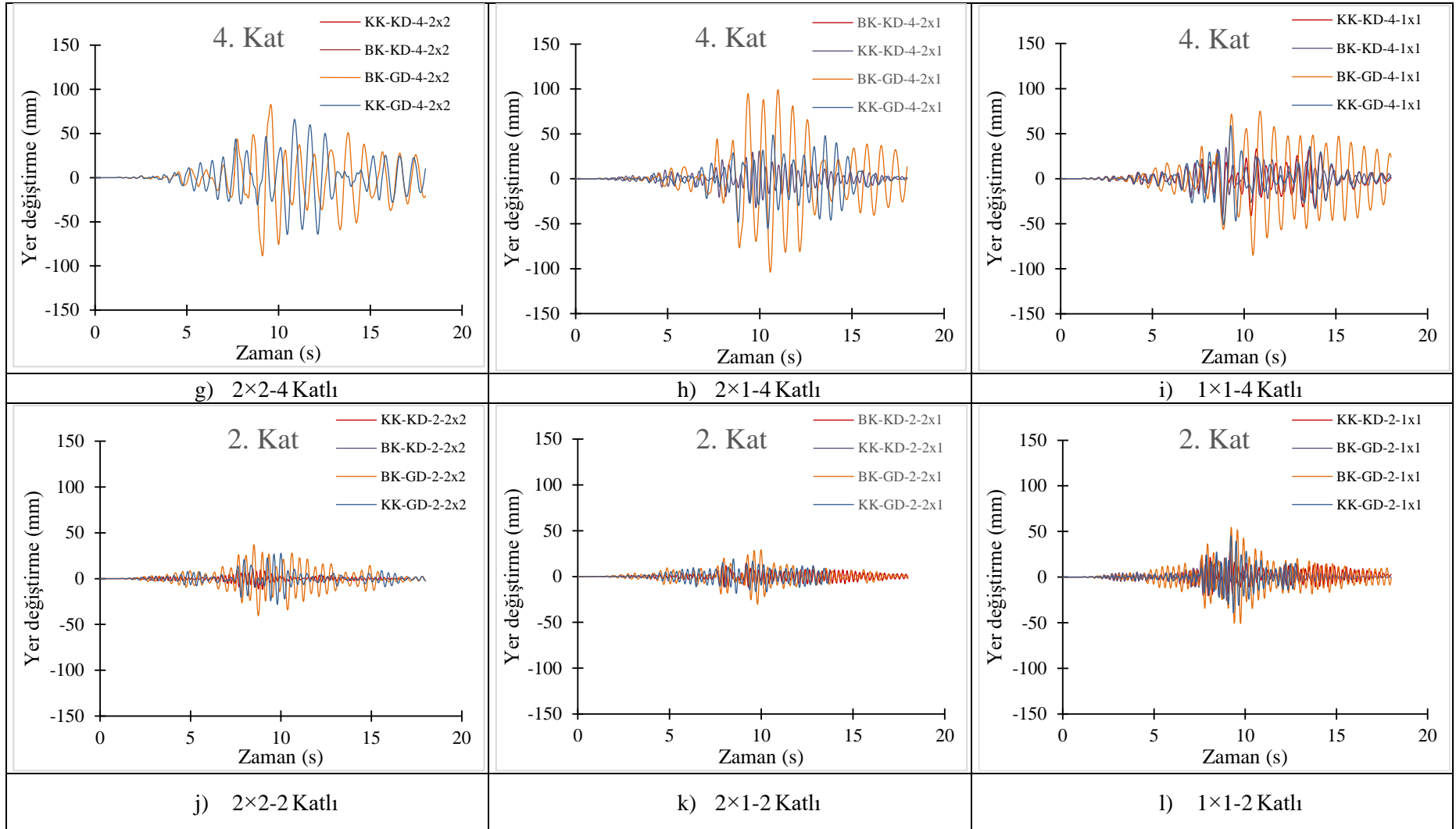
Bu bölüm, Şekil 36'da gösterildiği gibi, çeşitli çerçeve sistemleri için yanal yer değiştirme-zaman eğrilerinin bir analizini sunmakta ve Northridge depremi yer hareketi kaydı altında seçili modellerin en üst kat yanal yer değiştirmelerini karşılaştırmaktadır.

Şekiller, kat seviyesinin, açıklık konfigürasyonunun ve farklı yenilikçi sistem tiplerinin yer değiştirme tepkisi üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Tüm alt şekillerde gözlenen genel bir eğilim, maksimum yanal yer değiştirmelerin, geleneksel BK-GD çerçevelere kıyasla alüminyum köpük bileşenlerin (alüminyum köpük sandviç panel döşeme ve/veya alüminyum köpük dolgulu kolonlar) eklenmesiyle azalma eğiliminde olmasıdır. Bu, yer değiştirme kontrolü açısından sismik performansta bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Ayrıca, daha çok katlı çerçeveler (örneğin, Şekil 36 (a), (b), (c)'deki 8 katlı çerçeveler), aynı sismik uyarma altında daha kısa çerçevelere (örneğin, Şekil 36 (j), (k), (l)'deki 2 katlı çerçeveler) kıyasla önemli ölçüde daha büyük yanal yer değiştirmeler sergilemektedir. 8 katlı çerçeveler için (Şekil 36 (a), (b), (c)), tepe yer değiştirmeleri belirgin şekilde daha yüksektir ve BK-GD sistemi için yaklaşık 160 mm'ye kadar büyüklüklere ulaşırken, KK-KD sistemi sürekli olarak daha düşük yer değiştirmeler göstermektedir (örneğin, Şekil 36 (a)'daki 2×2-8. kat için 80 mm'nin altında).



Şekil 36. Çerçeve sistemlerinin yanal yer değiştirme-zaman eğrilerinin karşılaştırılması

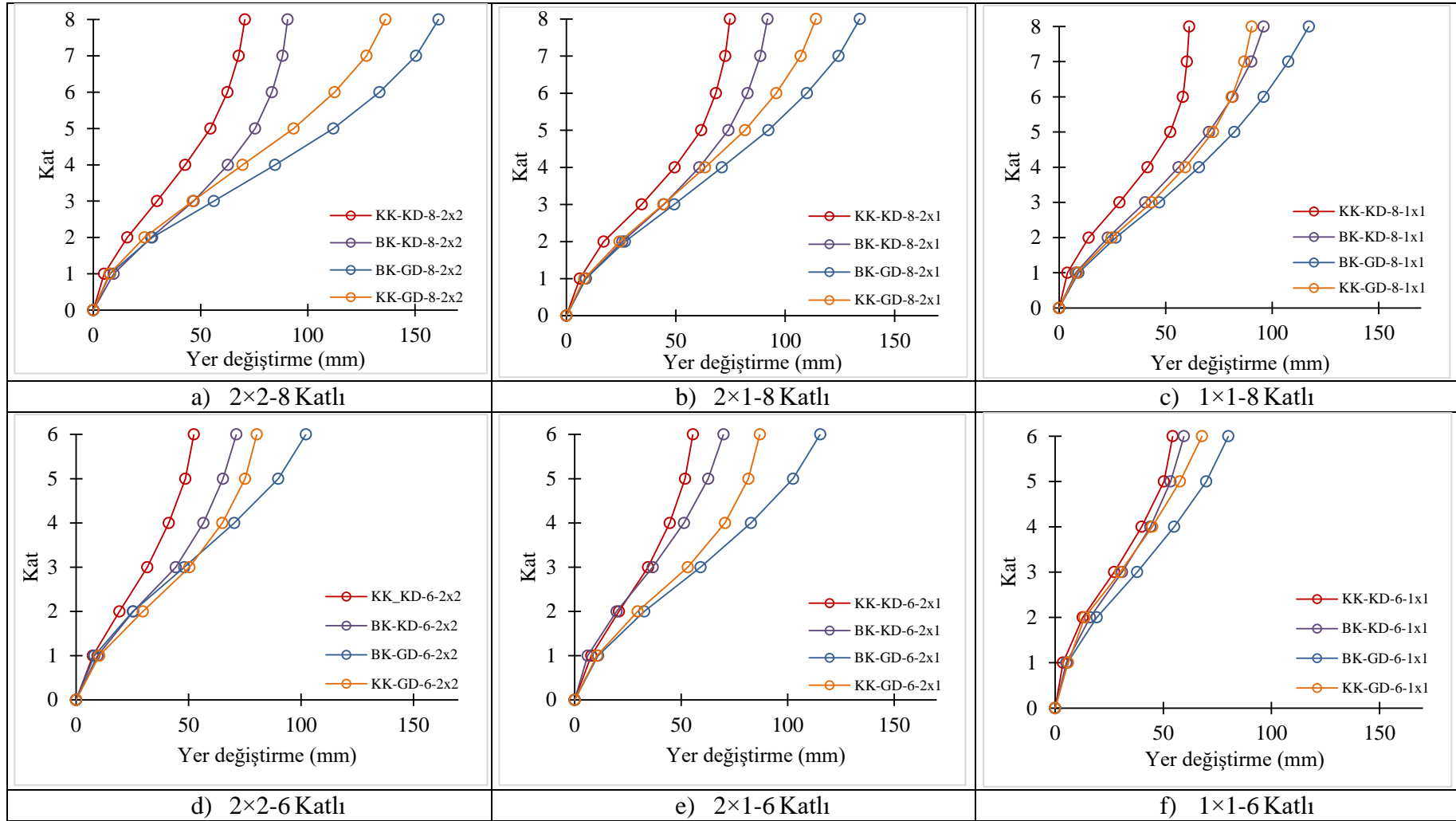


şekil 36. (Devamı)

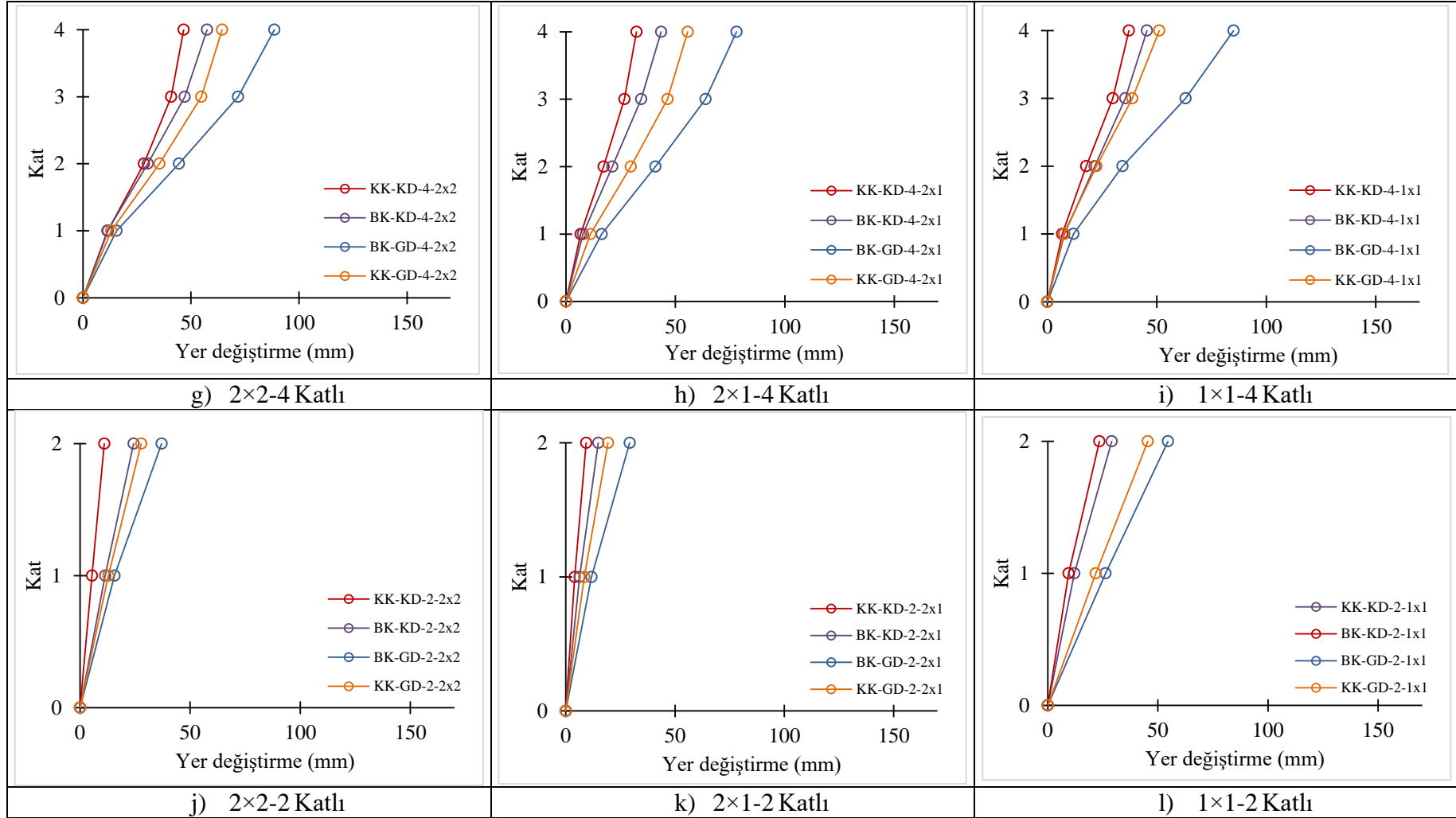
Aynı kat seviyesine sahip ancak farklı açıklık konfigürasyonlarına sahip çerçeveler karşılaştırıldığında (örneğin, 8 katlı çerçeveler: Şekil 36 (a)'da 2×2 , Şekil 36 (b)'de 2×1 , Şekil 36 (c)'de 1×1), daha büyük açıklıkların genellikle daha düşük yanal rijitlik ve dolayısıyla geleneksel BK- GD çerçeveleri için daha büyük yanal yer değiştirmelere yol açtığı açıktır. alüminyum köpük dolgulu sistemlerin yer değiştirmeleri azaltmadaki etkinliği farklı açıklıklarda tutarlıdır. Örneğin, tüm 8 katlı konfigürasyonlarda, KK-KD sürekli olarak en küçük tepe yer değiştirmelerini göstermektedir. Ayrıca, KK-KD çerçeveleri, ana sismik olaydan sonra tepe yer değiştirmelerinin ötesinde genellikle yer değiştirme değerlerinin zaman içinde daha hızlı düşüşünü göstermektedir ve bu da gelişmiş sönümlenme ve enerji dağılım kabiliyetlerini ortaya koymaktadır. Alüminyum köpük dolgulu sistemlerin tepkisi, özellikle tepe yer ivmesinden sonra, geleneksel çerçevelere kıyasla daha kararlı görünmektedir.

Şekil 37, her çerçeve sistemlerinin her kat seviyesindeki en büyük yer değiştirmelerini karşılaştırmaktadır. Tüm kat seviyeleri ve açıklık konfigürasyonlarında, alüminyum köpük bileşenleri (BK-KD, KK-GD ve özellikle KK-KD) içeren çerçeveler, geleneksel BK-GD çerçevelerine kıyasla sürekli olarak daha düşük yanal yer değiştirmeleri sergilemektedir. Bu azalma, alüminyum köpüğün gelişmiş sismik performansın doğrudan bir göstergesidir. Ayrıca, BK-GD çerçeveleri KK-GD çerçeveleriyle (örneğin, 2×2 -8. kat, Şekil 37 (a)'da BK-GD yaklaşık 160 mm tepe yer değiştirmesi gösterirken, KK-GD yaklaşık 135 mm) karşılaştırıldığında, alüminyum köpük dolgulu kolonların yapının önemli ölçüde yanal rijitliğini arttırdığı ve daha küçük tepe yer değiştirmelerine yol açtığı açıktır. Bu artırılmış yanal rijitlik, çerçevenin yanal deformasyona daha etkili bir şekilde direnmesine yardımcı olur. Benzer şekilde, BK-GD çerçeveleri BK-KD çerçeveleriyle (örneğin, 2×2 -8. kat, Şekil 37 (a)'da BK-KD yaklaşık 90 mm tepe yer değiştirmesi gösterir) karşılaştırıldığında, sandviç kompozit döşeme de tepe yer değiştirmelerinde bir azalmaya katkıda bulunur.

Ayrıca, tepe yer değiştirmelerinde en önemli azalmalar KK-KD çerçevelerinde gözlenmektedir. Hem sandviç kompozit döşeme hem de alüminyum köpük dolgulu kolonları birleştiren bu sistem, incelenen tüm senaryolarda tutarlı bir şekilde en düşük tepe yer değiştirmelerini göstermektedir. KK-KD sistemi, tepe yer değiştirmelerini sınırlamada üstün bir performans sunarak, çok katlı çerçeve yapıların sismik dayanıklılığını ve güvenliğini önemli ölçüde artırır.



Şekil 37. Çerçeve sistemlerinin yanal yer değiştirme-zaman eğrilerinin karşılaştırılması



şekil 37. (Devamı)

Tablo 22, Tablo 23 ve Tablo 24, tüm çerçeve sistemleri için en yüksek yer değiştirme değerlerini ve bu değerlerin geleneksel çerçeve sistemlerine oranlarını karşılaştırmaktadır. 2 katlı çerçevelerde alüminyum köpük dolgusunun hem döşemelerde hem de çelik kutu kolonlarda kullanıldığında, yanal yer değiştirme değeri 2×2, 2×1 ve 1×1 açıklıklı çerçeveler için sırasıyla %30, %32 ve %43 oranında azalmaktadır. Alüminyum köpük sadece döşemelerde kullanıldığında, yanal yer değiştirmeler %51 oranında azalmakta ve bu etki yapının kütledeki azalmaya bağlanmaktadır. Alüminyum köpük sadece kutu kolonlarda kullanıldığında, bu oran %60'a ulaşmaktadır bu durum hem yanal rijitliğin hem de sönümlenmenin artmasından kaynaklanmaktadır. Kat sayısının artması yanal yer değiştirmeleri artırsa da, genel olarak geleneksel sistemlerde karşılaştırıldığı oranlarda büyük farklılıklar gözlemlenmemiştir.

Tablo 22. 2x2 Çerçevelerin maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması

Çerçeve Türü	2×2							
	8.kat (mm)	BK-GD-8 ile oranı	6.kat (mm)	BK-GD-6 ile oranı	4.kat (mm)	BK-GD-4 ile oranı	2.kat (mm)	BK-GD-2 ile oranı
KK-KD	70,6	0,44	48,8	0,47	46,6	0,53	11,0	0,30
BK-KD	90,6	0,56	62,8	0,61	57,4	0,65	24,3	0,66
KK-GD	136,1	0,85	81,4	0,79	64,4	0,73	27,8	0,75
BK-GD	161,0	1,00	103,0	1,00	88,5	1,00	37,0	1,00

Tablo 23. 2x1 Çerçevelerin maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması

Çerçeve Türü	2×1							
	8.kat (mm)	BK-GD-8 ile oranı	6.kat (mm)	BK-GD-6 ile oranı	4.kat (mm)	BK-GD-4 ile oranı	2.kat (mm)	BK-GD-2 ile oranı
KK-KD	74,7	0,56	55,6	0,48	32,3	0,41	9,3	0,32
BK-KD	91,9	0,69	69,8	0,61	43,5	0,56	14,8	0,51
KK-GD	114,1	0,85	87,0	0,75	55,6	0,71	19,3	0,66
BK-GD	134,1	1,00	115,3	1,00	77,9	1,00	29,3	1,00

Tablo 24. 1x1 Çerçevelerin maksimum kat yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması

Çerçeve Türü	1×1							
	8.kat (mm)	BK-GD-8 ile oranı	6.kat (mm)	BK-GD-6 ile oranı	4.kat (mm)	BK-GD-4 ile oranı	2.kat (mm)	BK-GD-2 ile oranı
KK-KD	61,1	0,48	54,0	0,67	37,3	0,44	23,4	0,43
BK-KD	90,5	0,77	59,6	0,74	45,5	0,53	29,1	0,53
KK-GD	96,0	0,82	67,9	0,85	51,1	0,60	45,5	0,83
BK-GD	117,3	1,00	80,1	1,00	85,1	1,00	54,6	1,00

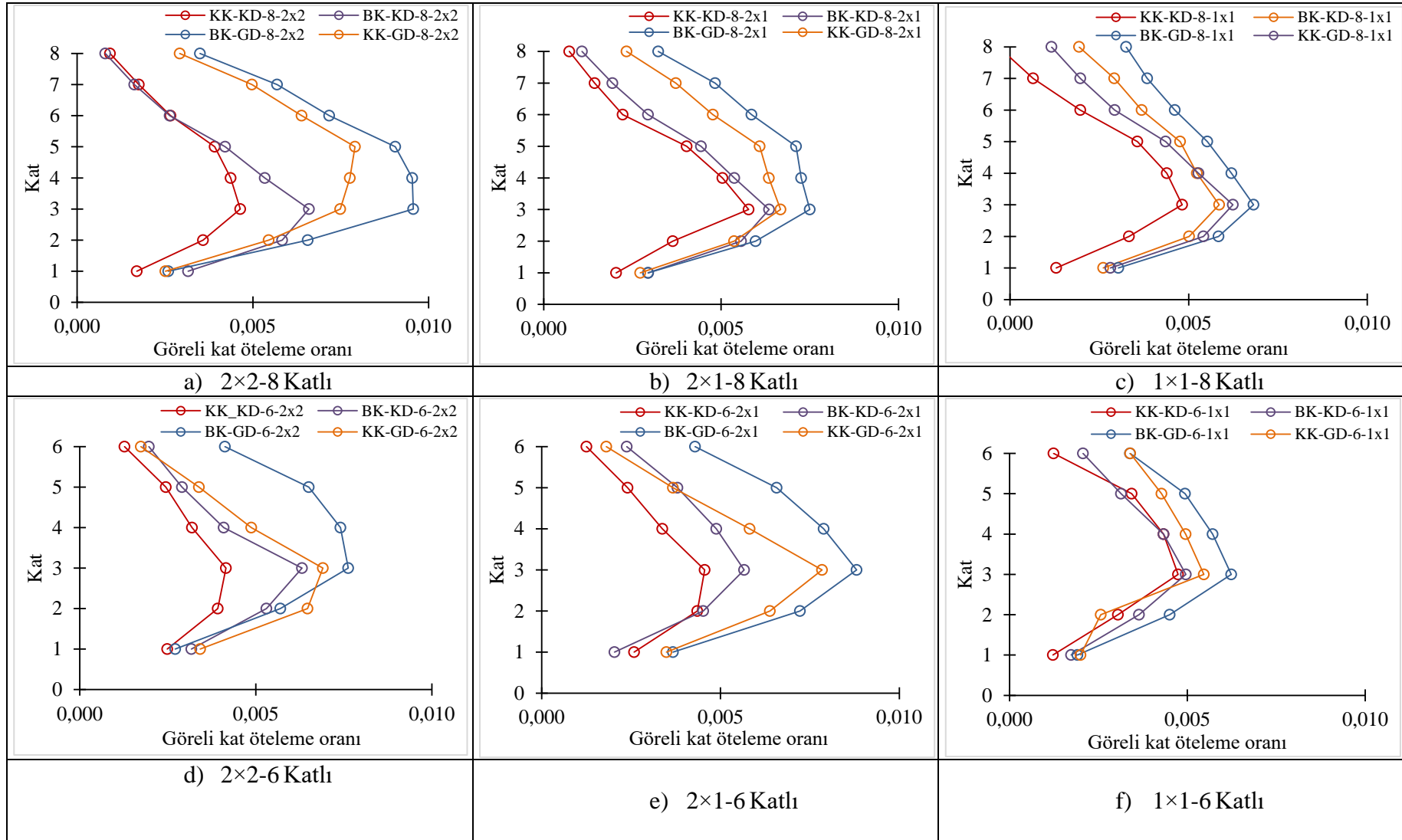
4.1.3. Göreli Kat Ötelemeleri

Bu bölüm, bitişik katlar arasındaki bağıl yanal yer değiştirmenin kat yüksekliğine bölünmesiyle elde edilen göreli kat öteleme oranının sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 38, aynı sismik etki altında çeşitli çerçeve sistemlerinin yüksekliği boyunca maksimum

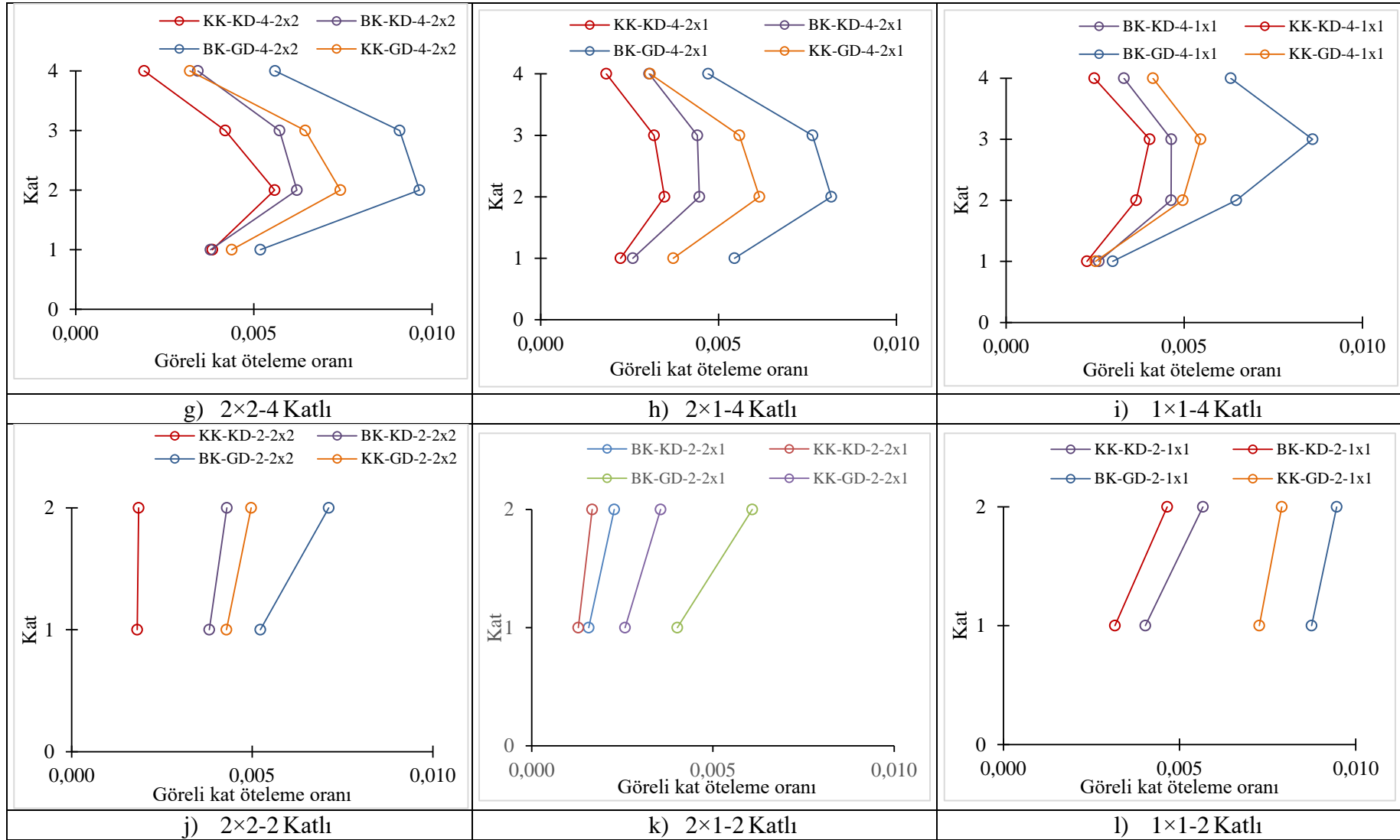
görelî kat ötelemeleri dağılımını göstermektedir. Tüm alt şekillerde tutarlı ve önemli bir eğilim, alüminyum köpük bileşenleri (BK-KD, KK-GD ve özellikle KK-KD) içeren çerçeve sistemlerindeki katlar arası kayma oranlarının, geleneksel BK-GD çerçevelere kıyasla azalmasıdır.

Daha çok katlı çerçeveler için (örneğin, Şekil 38 (a), (b), (c)'deki 8 katlı çerçeveler), görelî kat ötelemeleri genellikle daha az katlı çerçevelerdekenden (örneğin, Şekil 38 (j), (k), (l)'deki 2 katlı çerçeveler) daha yüksektir. Ayrıca, yenilikçi sistemler sayesinde katlar arası ötelenme oranlarındaki azalma tüm yüksekliklerde belirgindir. Örneğin, 8 katlı çerçevelerde (Şekil 38 (a), (b), (c)), BK-GD sistemi, hasar açısından kritik olabilecek 0,010 değerine yaklaşan veya aşan tepe görelî kat öteleme oranı değerini sergilemektedir. Bunun aksine, KK-KD sistemi, görelî kat öteleme oranlarının sürekli olarak bu sınırın oldukça altında tutarak, daha yüksek yapılarda görelî kat ötelemesi sınırlamadaki etkinliğini vurgulamaktadır.

Ayrıca, aynı kat seviyesinde ancak farklı açıklık konfigürasyonlarına sahip çerçeveler karşılaştırıldığında (örneğin, 8 katlı çerçeveler: 2×2, 2×1, 1×1), daha büyük açıklıklara sahip çerçevelerin (örneğin, 2×2), azalan yanal rijitlik nedeniyle geleneksel BK-GD çerçevelerine göre biraz daha yüksek görelî kat öteleme değerleri sergileme eğiliminde olduğu görülmektedir. Çoğu konfigürasyonda olduğu gibi, görelî kat ötelemeleri yükseklikle birlikte artma eğilimindedir ve genellikle orta ve üst katlarda maksimumlara ulaşır, en üstte ise hafifçe azalır. KK-KD sistemleri, ötelenmelerin büyüklüğünü azaltmakla kalmaz, aynı zamanda yükseklik boyunca daha düzgün veya kontrollü bir ötelenme profili sağlar; bu da genel yapısal performans ve yerel hasarları en aza indirmek için oldukça önemlidir.



Şekil 38. Çerçeve sistemlerinin görelü kat öteleme oranları üzerindeki alüminyum köpük etkilerinin



Şekil 38. (Devamı)

4.1.4. Von Misses Gerilme Dağılımları

Elde edilen Von Mises gerilme değerleri ve gerilme konturları, farklı açıklık konfigürasyonları, kat sayıları ve yapısal sistem türleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 39, farklı kat sayıları, açıklık konfigürasyonları ve sistem tipleri dikkate alınarak seçilen çerçeve sistemleri için en büyük yer değiştirmeler anındaki Von Misses gerilme dağılımlarını göstermektedir. Şekillerde kırmızı daireler maksimum gerilme yoğunlaşma bölgelerini temsil göstermektedir.

Genel olarak, maksimum gerilmelerin özellikle orta ve alt katlarda, kiriş-kolon birleşim bölgelerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu bölgeler, enerji aktarımı ve potansiyel plastik mafsalları oluşumu açısından kritik öneme sahiptir. Gerilme büyüklüğü ve dağılımı; çerçeve sistemi, kat sayısı ve açıklık konfigürasyonuna bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir.

Açıklık konfigürasyonunun etkisi sayısal olarak incelendiğinde, aynı kat sayısı ve sistem türüne sahip modeller karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, 8 katlı köpük dolgu kolon-köpük dolgu döşeme (KK-KD) sistemine ait değerler Şekil 39 (a), (b) ve (c) aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu modellerde 2×2, 2×1 ve 1×1 açıklık konfigürasyonları için Von Mises gerilme değerleri sırasıyla 384.7 MPa, 287.6 MPa ve 280.6 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 39 (a), (b) ve (c) ile uyumlu olarak, açıklık küçüldükçe maksimum gerilme değerlerinde azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Bu davranış, plan boyutunun büyümesinin genel deformasyonları artırması ve iç kuvvet taleplerini yükseltmesi ile ilişkilidir.

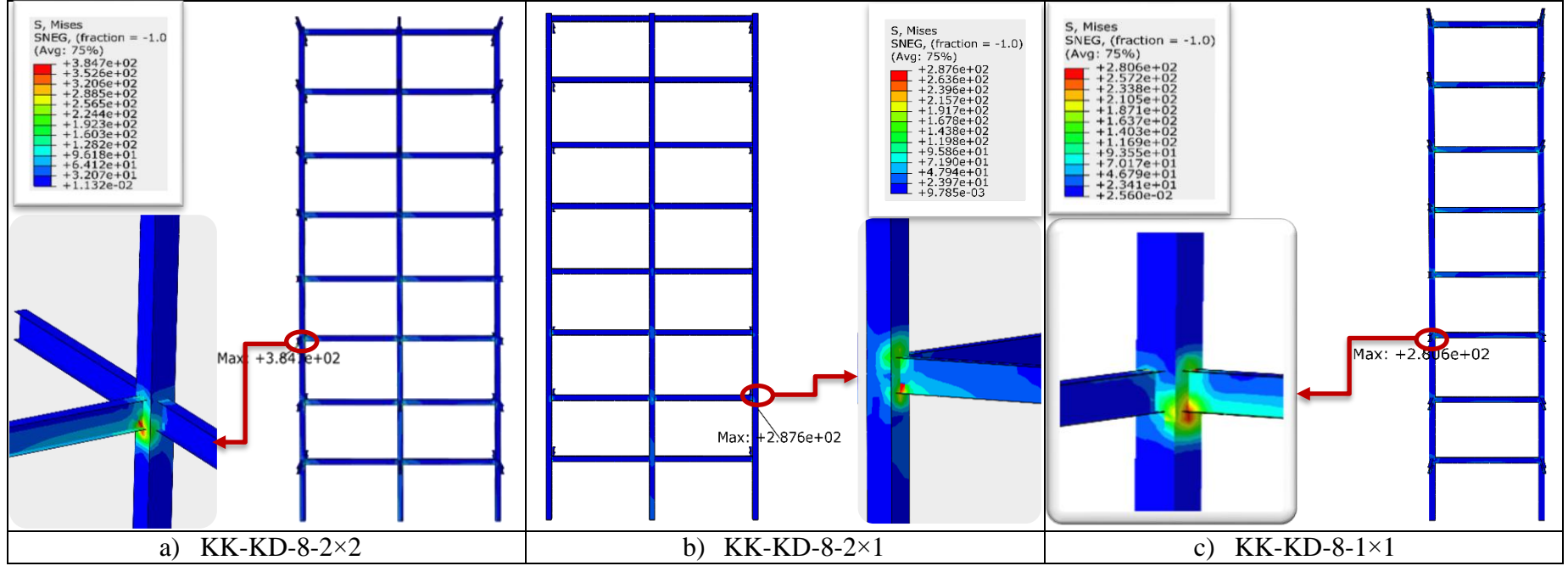
Kat sayısının etkisi, aynı sistem türü ve açıklık konfigürasyonuna sahip modeller üzerinden değerlendirilmiştir. Bu amaçla 2×2 açıklığa sahip KK-KD sistemi Şekil 39 (a), (d), (e) ve (f) ile farklı kat sayıları için incelenmiştir. 2, 4, 6 ve 8 katlı sistemler için Von Mises gerilme değerleri sırasıyla 251.6 MPa, 303.8 MPa, 467.2 MPa ve 384.7 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, gerilme değerlerinin 2 kattan 6 kata kadar arttığını, ancak 8 katlı sistemde bir azalma olduğunu göstermektedir. Şekil 39 (d), (e), (f) ve (a) ile birlikte değerlendirildiğinde, belirli bir kat seviyesinden sonra yük dağılımının daha homojen hale geldiği ve gerilme yığılmalarının azaldığı görülmektedir.

Yapı sistem türlerinin etkisi, aynı kat sayısı ve açıklık konfigürasyonuna sahip modeller üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda 8 katlı ve 2×2 açıklık konfigürasyonuna sahip modeller Şekil 39 (a), (g), (h) ve (i) aracılığıyla değerlendirilmiştir. Von Mises gerilme değerleri sırasıyla KK-KD için 384.7 MPa, KK-GD için 418.7 MPa, BK-KD için 267.2 MPa ve BK-GD için 467.2 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 39 (a), (g), (h) ve (i) ile birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek gerilme

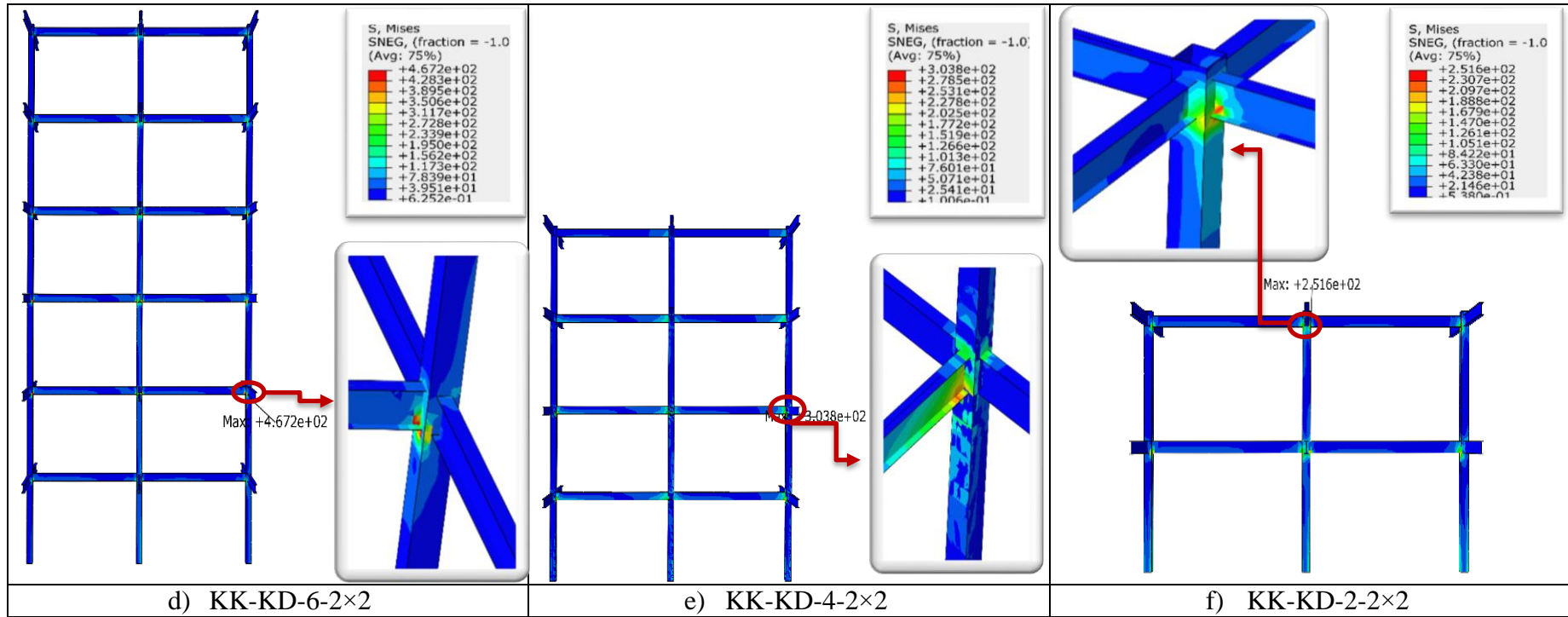
değerlerinin BK-GD sisteminde, en düşük değerlerin ise BK-KD sisteminde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, döşeme sisteminin gerilme dağılımı üzerindeki etkisinin oldukça belirgin olduğunu ve bazı durumlarda kolon sisteminden daha baskın bir rol oynayabildiğini göstermektedir.

Şekil 39’da sunulan kontur sonuçları, alüminyum köpük bileşenlerinin yapısal davranış üzerindeki etkisini de doğrulamaktadır. Sistem türünden bağımsız olarak, maksimum gerilme konsantrasyonlarının sürekli olarak kiriş-kolon birleşimlerinde ve özellikle alt kat seviyelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, köpük dolgulu kolon ve döşeme elemanlarının kullanımı, yalnızca yanal rijitliği artırmakla kalmamakta, aynı zamanda gerilme dağılımını değiştirerek maksimum gerilme bölgelerinin alt katlardan orta katlara doğru kısmen yayılmasına neden olmaktadır. Bu durum, yapı içerisinde hasarın daha dengeli bir şekilde dağıtılmasına katkı sağlamaktadır.

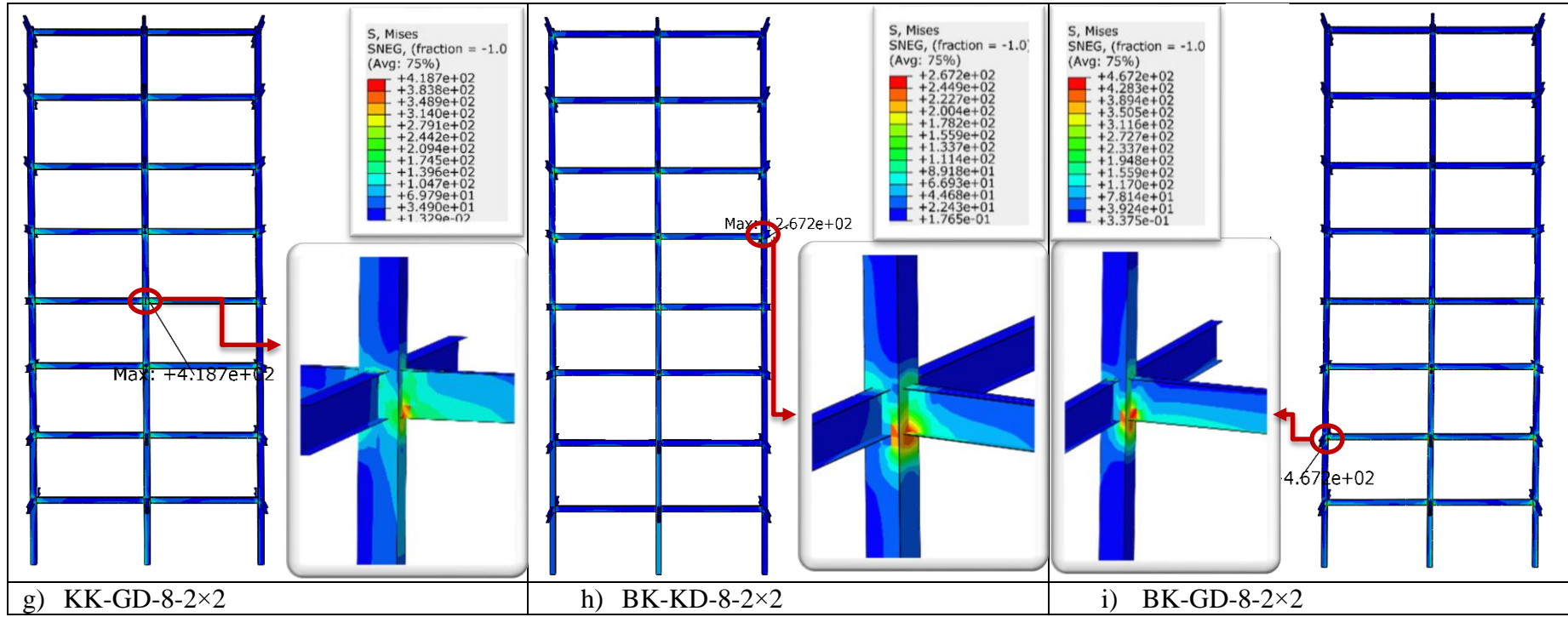
Elde edilen sonuçlar, ilk bakışta sezgisel beklentilerle çelişen bir davranışa işaret etmektedir. Rijitliği daha yüksek olan sistemlerin her zaman daha düşük gerilme değerleri üretmesi beklenirken, bu çalışmada bazı durumlarda daha rijit sistemlerde daha yüksek Von Mises gerilmeleri elde edilmiştir. Bu durum, rijitlik artışının yalnızca deformasyonları azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda yapı içerisindeki yük aktarım mekanizmalarını değiştirdiğini göstermektedir. Artan rijitlik, iç kuvvetlerin farklı elemanlara yeniden dağıtılmasına neden olmakta ve bu da belirli bölgelerde gerilme yığılmalarına yol açabilmektedir. Dolayısıyla, yapısal performansın değerlendirilmesinde yalnızca rijitlik artışına odaklanmak yeterli olmayıp, gerilme dağılımı ve yük iletim mekanizmalarının birlikte ele alınması gerekmektedir.



Şekil 39. Çerçeve sistemlerinin Von Mises gerilme dağılımlarının karşılaştırmalar



Şekil 39. (Devamı)



Şekil 39. (Devamı)

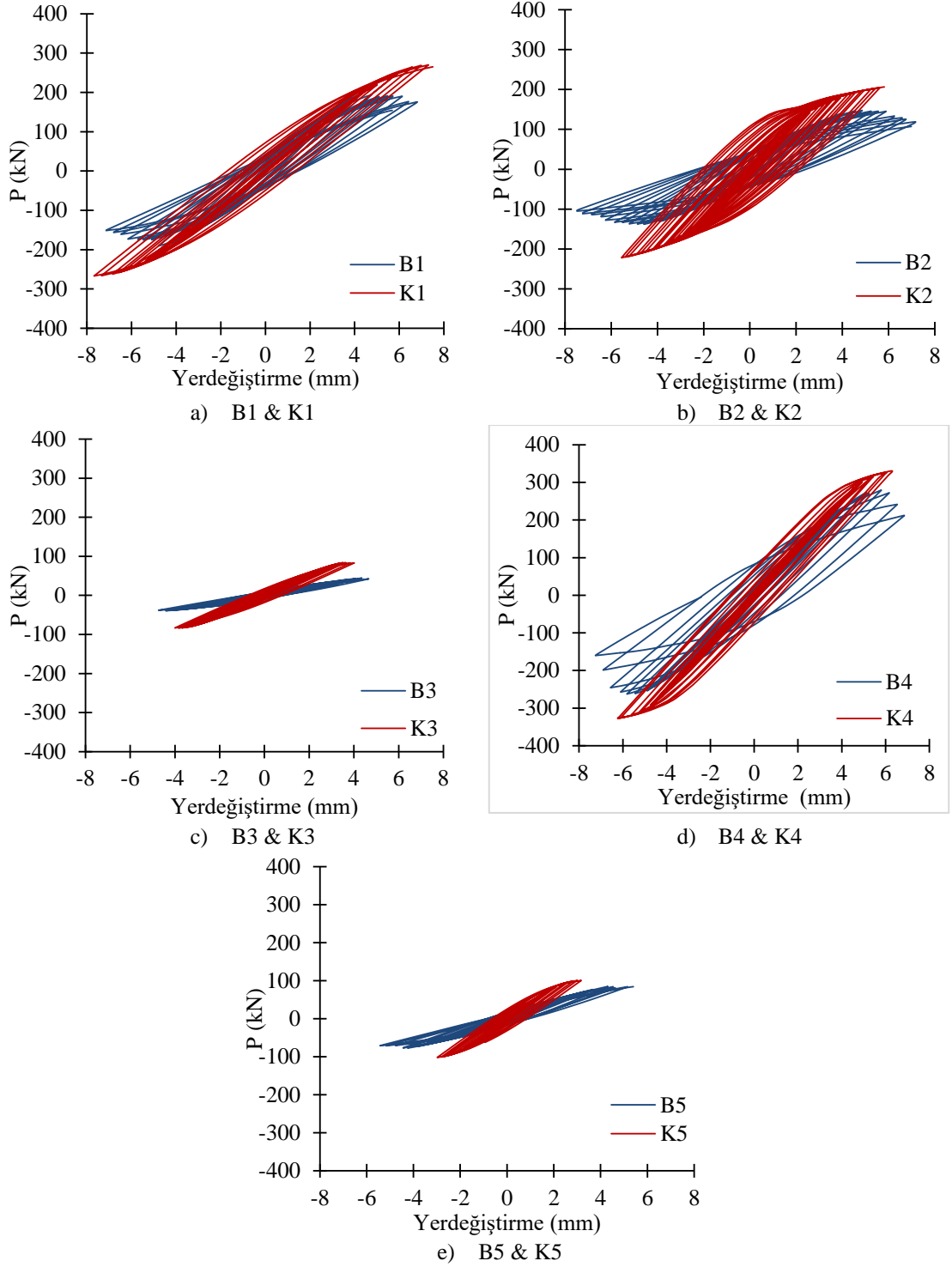
4.2. Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Çevrimsel Davranış Analizi Sonuçları

Bu bölümde, farklı β ve γ değerlerine sahip alüminyum köpük dolgulu (kompozit) ve dolgusuz (yalın çelik) birleşimlerin çevrimsel yükler altındaki histeretik performansı incelenmiştir. Tüm birleşim türleri için yük-yerdeğiştirme eğrileri elde edilmiş; süneklik ve enerji yutma kapasiteleri dikkate alınarak sismik davranışlar değerlendirilmiştir. Analizi gerçekleştirilen tüm sonlu eleman modellerine ait histeretik sonuçlar, ilgili grafikler ve tablolar aracılığıyla sunulmuştur.

4.2.1. Yük-Yerdeğiştirme İlişkileri

Alüminyum köpük dolgulu ve dolgusuz birleşimlerin çevrimsel yükler altındaki yük-yerdeğiştirme histeretik eğrileri analiz edilmiş, her iki birleşim tipinin sismik performansları ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 40'de, B ve K tipi birleşimlerin yük-yerdeğiştirme histeretik eğrileri sunulmaktadır. Her birleşim tipinin histeretik performansı, Tablo 20'de özetlenen spesifik geometrik parametreler (β ve γ) açısından incelenmiştir. Şekil 40 (a), (b) ve (c)'den de görülebileceği üzere, kolon enkesit narinliğindeki (γ) artış, alüminyum köpük dolgusu bulunmayan B tipi birleşimlerde histeretik performansın K tipi birleşimlere kıyasla daha düşük kalmasına neden olmuştur. Buna karşın, kolonlarda alüminyum köpük dolgusu kullanılması sistemin sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Kiriş-kolon genişlik oranı (β) azaldıkça dolgusuz birleşimler daha zayıf bir sismik performans sergilemiş; ancak alüminyum köpük dolgusunun varlığı, düşük β oranına sahip bu birleşimlerde dahi histeretik davranışı iyileştirerek enerji yutma kapasitesine olumlu yönde katkı sağlamıştır.



Şekil 40. Alüminyum köpük dolgusuz ve dolgulu birleşimlerin çevrimsel yük-yerdeğiştirme eğrileri

Genel olarak, alüminyum köpük dolgulu birleşimlerin dolgusuz referans birleşimlere kıyasla daha geniş histeretik eğriler sergilediği ve kolonun yanal rijitliğini artırarak birleşim kapasitesini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu durum, daha yüksek histeretik performansa, artan enerji yutma kapasitesine ve gelişmiş sünekliliğe doğrudan katkıda bulunmuştur. Elde edilen bulgular ışığında, alüminyum köpük dolgusunun çelik

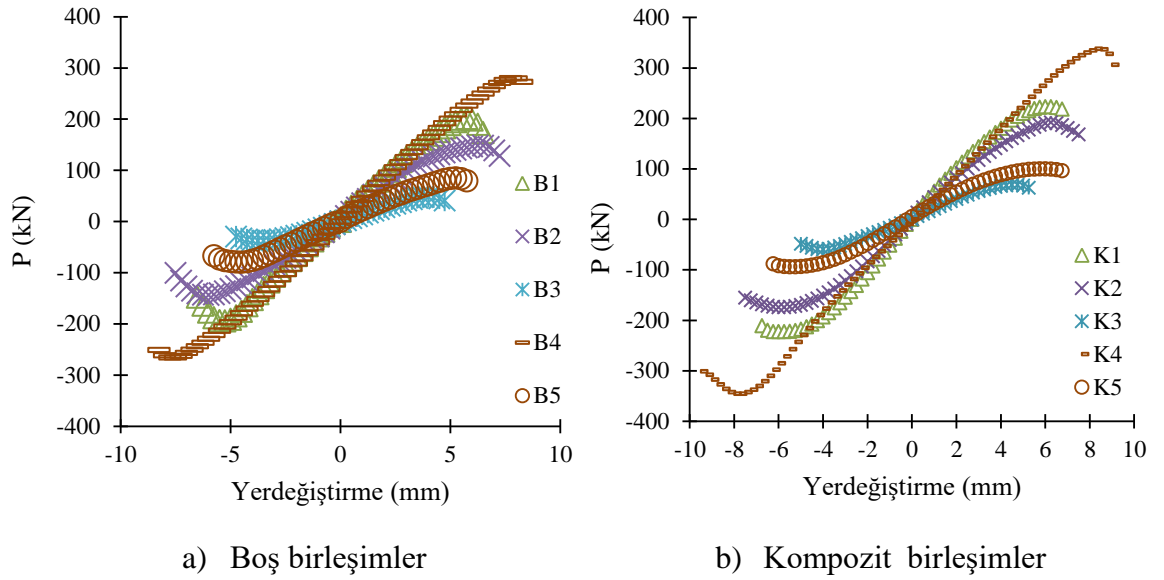
çerçevelerin sismik yükler altındaki dinamik davranışını belirgin biçimde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

4.2.2. Süneklik

Bu bölümde, B ve K tipi birleşimlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri ile süneklik oranları karşılaştırılarak, geometrik parametrelerin birleşimlerin histeretik performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 41’de, B ve K tipi kiriş-kolon birleşimlerine ait yük-yerdeğiştirme zarf eğrileri karşılaştırılmaktadır. B1, B2, B3, B4 ve B5 birleşimlerine ait eğrilerin kendi içlerinde belirgin farklılıklar ve geniş bir saçılım gösterdiği görülmektedir. Bu durum, birleşimlerin sahip olduğu geometrik özelliklerin histeretik performansı doğrudan etkilediğini kanıtlamaktadır. Dolgusuz birleşimlerin yük taşıma kapasitesi, kompozit birleşimlerin gerisinde kalarak %11 ile %41 oranında daha düşük gerçekleşmiştir. Kendi içlerinde incelendiğinde de zarf eğrileri arasında önemli farklılıklar göze çarpmaktadır; örneğin, B4 tipi birleşim B5 birleşiminden üç kattan daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu farklılıklar, kolon-kiriş birleşimlerindeki β ve γ oranlarının taşıma kapasitesi üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir. Alüminyum köpük dolgulu K tipi birleşimlerde ise yük taşıma kapasitelerinde belirgin bir artış elde edilmiştir. K tipi modeller arasında, özellikle yüksek β ve düşük γ değerine sahip K4 birleşiminin en yüksek yük taşıma kapasitesine (337,87 kN) ulaştığı görülmüştür.

Analiz sonuçları, alüminyum köpük dolgunun daha düşük β oranlarına sahip (dar kirişli) birleşimlerde bile çevrimsel performansı olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Örneğin, daha düşük β oranına sahip K5 tipi kompozit birleşim modeli, köpük dolgusu bulunmayan B5 modeline göre %18 oranında daha yüksek bir kapasiteye sahiptir. Narin enkesitli kolonlardan oluşan birleşimlerde ($\gamma=40$ için) ise kompozit etkinin sağladığı bu kapasite artış oranı %41’lere kadar ulaşmaktadır.



Şekil 41. Alüminyum köpük dolgunsuz ve dolgulu birleşimler için yük-yerdeğiştirme eğrileri

Tablo 25’te, B ve K tipi kiriş-kolon birleşimlerine ait akma ve nihai yerdeğiştirmeleri, süneklik oranları ve kümülatif süneklik değerleri özetlenmektedir. Her bir birleşimin pozitif ve negatif yöndeki akma yerdeğiştirmesi (δ_{y+} ve δ_{y-}) ile nihai yerdeğiştirmesi (δ_{u+} ve δ_{u-}), Şekil 34’de belirtilen yöntem kullanılarak yük-yerdeğiştirme eğrileri üzerinden belirlenmiştir.

Süneklik oranı (μ), nihai yerdeğiştirmenin (δ_u) akma yerdeğiştirmesine (δ_y) oranı olarak hesaplanmaktadır. Yarı-statik analizler sırasında birleşimin maruz kaldığı toplam yük çevrimi sayısına bağlı olarak hesaplanan kümülatif süneklik oranı (μ_a) ise, $\sum_1^n (\mu_i^+ + \mu_i^-)$ şeklinde tanımlanmıştır. Bu oran, birleşimin farklı yük seviyeleri altındaki sünek davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirir ve çevrimsel yükler altındaki enerji yutma kapasitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Tablo 25. Alüminyum köpük dolgunsuz ve dolgulu birleşimlerin süneklik oranları

Kısaltma Kodu	δ_{y+}	δ_{y-}	δ_{u+}	δ_{u-}	μ^+	μ^-	μ_a
B1	3,51	-3,91	6,74	-6,73	1,92	1,72	47,69
B2	4,41	-4,36	6,71	-6,68	1,52	1,51	39,70
B3	3,71	-3,63	4,75	-4,73	1,28	1,30	24,31
B4	4,95	-5,22	8,49	-8,49	1,71	1,63	52,69
B5	3,41	-3,31	5,90	-5,97	1,73	1,72	42,01
K1	3,50	-3,64	7,45	-7,88	2,13	2,16	57,75
K2	4,87	-4,87	6,74	-6,58	1,50	1,44	41,82
K3	3,63	-3,75	4,75	-4,72	1,31	1,26	25,39
K4	5,28	-5,34	9,05	-9,55	1,71	1,79	56,36
K5	3,42	-3,49	7,59	-6,88	1,97	1,97	41,53

Tablo 25 incelendiğinde, alüminyum köpük dolgulu K tipi birleşimlerin, dolgunsuz B tipi birleşimlere kıyasla genel olarak daha yüksek süneklik oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Narinlik oranının et kalınlığına etkisi incelendiğinde; $\gamma=40$ gibi ince cidarlı yüksek narinliğe sahip birleşimler (örneğin K3) alüminyum köpük ile doldurulduğunda süneklik oranında belirgin bir artış (1,25 kat iyileşme) sergilerken, daha düşük narinlikli ($\gamma=20$) nispeten kalın cidarlı kesitlere sahip birleşimlerde (örneğin K1) bu iyileşme 1,15 kat seviyesinde kalmıştır. Bu bulgu, alüminyum köpük dolgununun özellikle ince cidarlı kesitlerin sünekliğini artırmada ve lokal burkulmayı geciktirmede çok daha etkili olduğunu kanıtlamaktadır. K4 modeli (yüksek β oranına sahip) kendi başına yüksek bir süneklik gösterse de, alüminyum köpüğün bu modele sağladığı iyileştirme oranı (1,05 kat), diğer kompozit modellere göre daha düşük kalmıştır. Bu durum; geniş kirişli birleşimlerin doğal olarak zaten sünek bir davranış sergilediği, alüminyum köpük dolgunun süneklik kapasitesine olan asıl göreceli faydasının ise doğal sünekliği düşük olan veya narinlik kaynaklı erken göçme riski taşıyan birleşimlerde çok daha kritik bir rol oynadığı anlamına gelmektedir.

4.2.3. Histeretik Enerji Yutma Kapasitesi

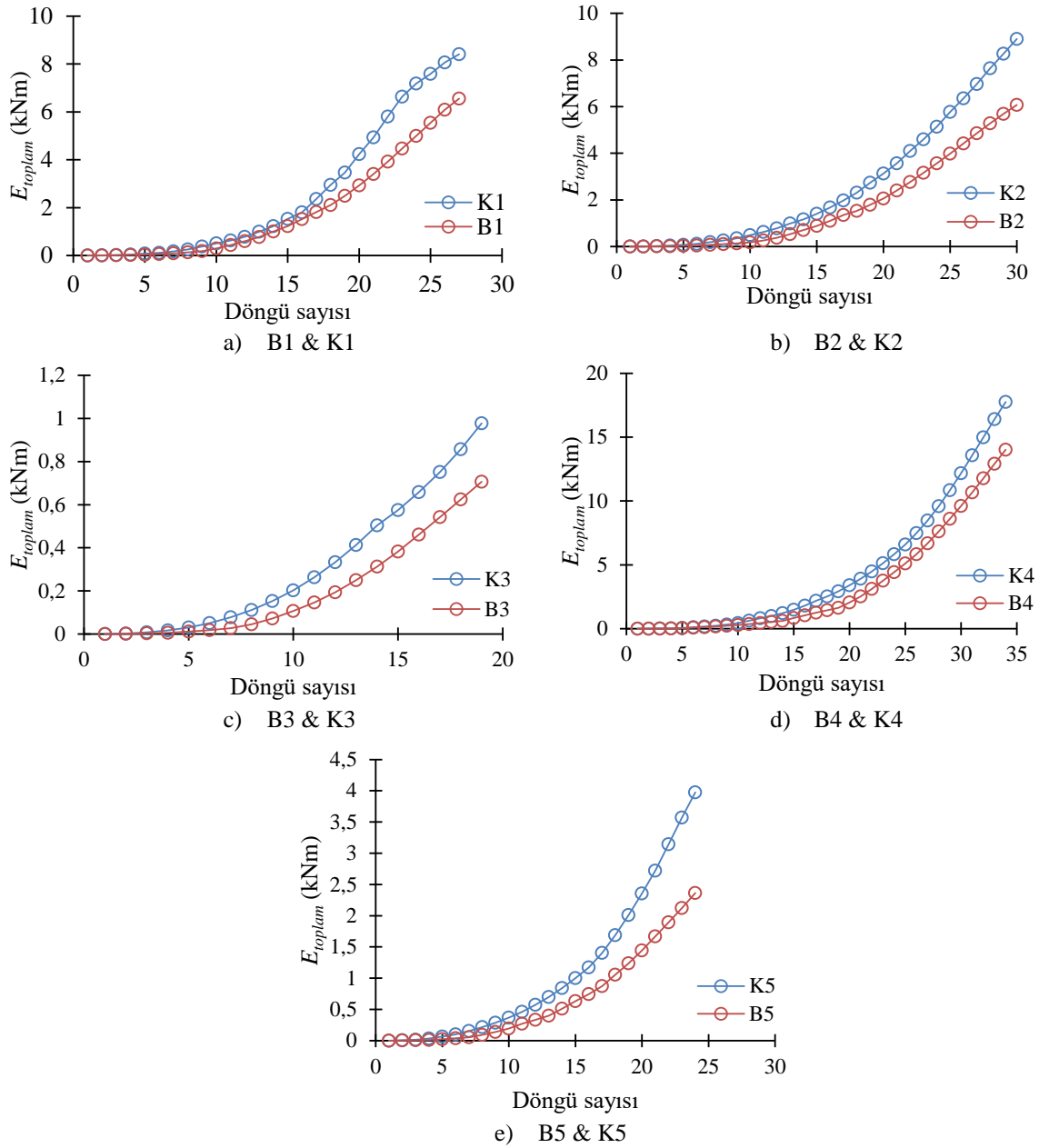
Enerji yutma kapasitesi, sismik yükler altında yapısal elemanların sismik performansını belirleyen en temel göstergelerden biridir. Bu bölümde, B ve K tipi birleşimlerin kümülatif enerji yutma kapasiteleri incelenmiş ve γ ile β oranlarının bu kapasite üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Enerji dağılımı, birleşimlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri altındaki alanın hesaplanmasıyla belirlenir. Toplam kümülatif enerji dağılımı $E_{toplam} = \sum E_i$ olarak ifade edilirken, kümülatif enerji dağılım oranı (η_a), E_{toplam} 'in E_y 'ye oranı olarak tanımlanır. Burada, E_i , yük-yerdeğiştirme ($P-\delta$) eğrisinin i'inci eğrisinin altındaki enerji dağılım alanını temsil eder. E_y , $(P_y * \delta_y) / 2$ bağıntısı ile hesaplanır; burada P_y , histeretik egriden gelen ilk akma yüküdür ve δ_y , P_y 'ye karşılık gelen yerdeğiştirme değeridir. Ayrıca, doğrusal kümülatif enerji dağılımı ($E_{ytoplam}$), birleşimlerdeki ilk akma noktasına kadar yük-yerdeğiştirme ($P-\delta$) eğrilerinin kapalı alanlarının toplamı olarak tanımlanır.

Şekil 42, döngüsel yükleme protokolü boyunca bağlantılar için kümülatif enerji dağılım eğrilerinin karşılaştırmalarını sunmaktadır. Açık bir eğilim ortaya çıkmaktadır: alüminyum köpük dolgulu bağlantılar, içi boş muadillerine göre sürekli olarak önemli ölçüde daha yüksek kümülatif enerji dağılımı göstermektedir. Bu belirgin enerji yutma kapasitesi, alüminyum köpük kullanımının sismik performansı artırmadaki etkinliğini vurgulamaktadır. Zira malzemenin sismik enerjiyi sönmüleme ve tüketme konusundaki

üstün yeteneği, ana taşıyıcı çerçevenin ciddi hasarlardan korunmasına olanak tanımaktadır. Alüminyum köpük dolgusu, sahip olduğu gözenekli yapı ve çelik profil cidarlarıyla girdiği etkileşim sayesinde deformasyonlara direnç göstererek, birleşimin genel histeretik sönümlene davranışına katkı sağlayan bir iç mekanizma görevi görmektedir.

Geometrik parametrelerin enerji dağılımı üzerindeki etkisi açıktır. K4 ($\beta=0,75$) gibi daha büyük β oranına sahip bağlantılar, daha küçük β değerlerine sahip olanlara (örneğin, $\beta=0,50$ olan K2 ve $\beta=0,30$ olan K5) kıyasla dikkat çekici bir kümülatif enerji dağılımı sergiler. Bu, daha geniş kirişlerin bağlantı içinde daha etkili enerji transferi ve dağılımını kolaylaştırdığını göstermektedir. Aksine, daha ince kesitlere karşılık gelen γ oranındaki artış, genellikle enerji dağılım kapasitesinde bir azalmaya yol açar (örneğin, $\gamma=20$ olan K1'den $\gamma=40$ olan K3'e). Bununla birlikte, alüminyum köpük dolgusunun bu azalmayı hafifletmede önemli bir rol oynadığını vurgulamak önemlidir. K3 gibi bağlantılar, doğal inceliklerine rağmen, içi boş eşdeğeri B3'e göre önemli ölçüde daha fazla enerji dağıtır. Bu önemli fark, alüminyum köpük dolgulu kolonların, aksi takdirde erken yerel plastikleşmeye eğilimli kesitlerin enerji dağıtım özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmedeki önemini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, alüminyum köpük dolgusu sünek davranışı artırır ve yapı sisteminin genel deprem direncine önemli ölçüde katkıda bulunur.



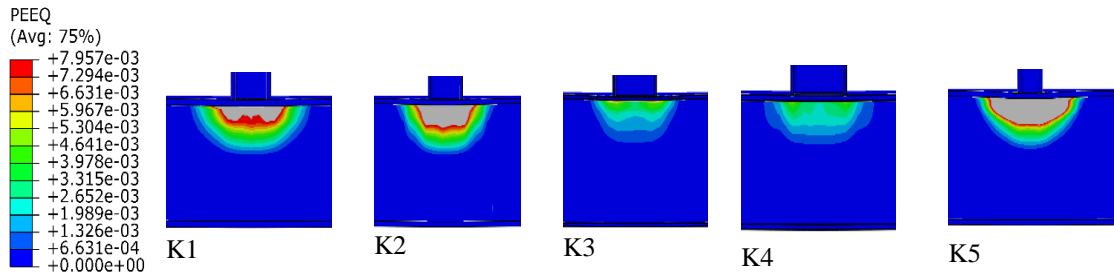
Şekil 42. Birleşimler kümülatif enerji kaybının karşılaştırılması

Tablo 26'deki nicel veriler, geometrik parametrelerin E_{toplam} üzerindeki etkisini daha da doğrulamaktadır. Kompozit ve içi boş birleşimlerin E_{toplam} oranlarının 1,27 ile 1,68 arasında değişmesi, alüminyum köpük dolgululu numunelerin içi boş muadillerine kıyasla sürekli olarak daha yüksek enerji tüketim kapasitesi sergilediğini göstermekte ve dolgunun sağladığı avantajı pekiştirmektedir. Özellikle $\beta=0,75$ oranına sahip K4 birleşimi, 17,76 kNm ile tüm kompozit numuneler arasında en yüksek E_{toplam} değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, kolona kıyasla daha geniş bir kiriş kullanmanın, birleşimin genel enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını vurgulamaktadır. Bu durum, K4 numunesinin daha geniş bir plastikleşme bölgesine sahip olduğunu gösteren Şekil 43 ile görsel olarak da desteklenmektedir. Elde edilen bulgular, artan kiriş genişliğinin,

birleşim malzemesinin enerji tüketim mekanizmasına daha etkin ve yaygın bir şekilde katılımını sağladığını ortaya koymaktadır.

Tablo 26. Birleşimler kümülatif enerji dağılımının karşılaştırılması

Örnek no	İçi boş birleşimler (kNm)	Alüminyum köpük dolgulu birleşimler (kNm)	K/B
B1/K1	6,54	8,40	1,28
B2/K2	4,85	6,96	1,43
B3/K3	0,71	0,97	1,37
B4/K4	14,02	17,76	1,27
B5/K5	2,36	3,97	1,68



Şekil 43. Aynı yükleme döngüsünde kompozit birleşimler eşdeğer plastik gerinim dağılımları

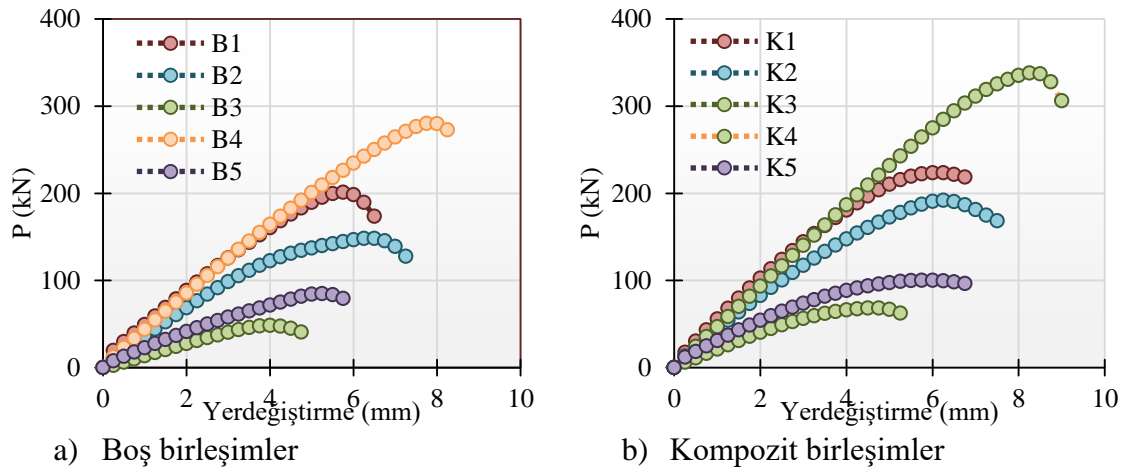
γ parametresinin etkisine bakıldığında, K3 ($\gamma=40$) gibi yüksek narinlik oranına sahip birleşimler, 0.97 kNm ile kompozit modeller arasında en düşük $E_{toplaml}$ değerini sergileyerek artan enkesit inceliğinin sismik enerji sönümlemesi üzerindeki olumsuz etkisini yansıtmaktadır. Ancak, K3 modelinde alüminyum köpüğün varlığı, dolgunsuz B3 modeline kıyasla $E_{toplaml}$ kapasitesinde %37'lik bir artış sağlamıştır. Bu durum, alüminyum köpüğün çelik yüzeyin içeri doğru göçmesini engelleyip yerel plastikleşmeyi geciktirerek ve daha kararlı bir plastik deformasyon sağlayarak ince kesitlerin enerji yutma kapasitesini korumadaki kritik rolünü açıkça göstermektedir. Bu mekanizma, alüminyum köpük çekirdeğin yığılan gerilmeleri çelik yüzeye dağıtmaya yardımcı olduğunu gösteren plastik şekil değiştirme dağılımlarıyla da doğrulanmaktadır. Küçük kiriş-kolon genişlik oranına (β) ve narin enkesite (γ) sahip en zayıf kombinasyon olan K5 modeli bile kendi referans modeline kıyasla 1.68 gibi son derece yüksek bir göreceli $E_{toplaml}$ artış oranı yakalamıştır. Bu oran, zayıf geometrik konfigürasyonlarda bile alüminyum köpüğün enerji yutma kapasitesini iyileştirmedeki yapısal katkısını gözler önüne sermektedir.

4.2.3. Monotonik Enerji Yutma Kapasitesi

Bu bölümde, B ve K tipi birleşimlerin hem dayanım hem de süneklik açısından toplam yapısal direnci değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, yük-yerdeğiştirme zarf eğrilerinin altında kalan alanlardan hesaplanan enerji yutma kapasiteleri incelenmiş ve γ ile β oranlarının bu kapasite üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Şekil 44, B ve K tipi birleşimlere ait yük-yerdeğiştirme zarf eğrilerini göstermektedir. Her bir eğrinin altında kalan alan, ardışık çevrimlerin tepe noktası verileri kullanılarak yamuk yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu hesaplama ile her bir birleşimin göçme anına kadar sahip olduğu monotonik enerji yutma kapasitesi elde edilmiştir. Tablo 27’de, B ve K tipi kompozit ve çelik birleşimlerin enerji yutma kapasiteleri ile bu kapasitelerin birbirine oranları sunulmaktadır. Bulgulara göre, alüminyum köpük dolgululu tüm birleşimlerin enerji yutma kapasiteleri, çelik birleşimlere kıyasla %20 ile %68 arasında artış göstermiştir. Kolonun enkesit narinliği arttıkça ($\gamma=20$ ’den $\gamma=40$ ’a), kompozit birleşimlerin enerji yutma kapasitesindeki artış oranının da %20’den %68’e çıktığı görülmüştür. Bu durum, narin enkesitli kolonlarda kompozit etkinin çok daha belirgin hale gelerek birleşim bölgelerinin sismik yükler altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini kanıtlamaktadır.

Kiriş genişliğinin kolon genişliğine oranının (β) etkisi incelendiğinde; β parametresine bağlı olarak kompozit birleşimlerin mutlak enerji yutma kapasiteleri 47,3 Nm ile 178,6 Nm arasında (yaklaşık dört kat) büyük bir farklılık gösterse de bu modellerin çelik modellere göre sağladığı kapasite artış oranlarının %31 ile %58 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum, küçük β oranına sahip birleşimlerde dahi kompozit etkinin devreye girerek enerji yutma kapasitesini %50’nin üzerinde artırabildiğini açıkça göstermektedir.



Şekil 44. Yük-yerdeğiştirme zarf eğrilerinin karşılaştırılması

Tablo 27. Zarf eğrileri üzerinden hesaplanan enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

Örnek no	B-serisi (Nm)	K-serisi (Nm)	K/B
B1/K1	81,5	97,7	1,20
B2/K2	71,8	93,9	1,31
B3/K3	14,1	23,6	1,68
B4/K4	133,2	178,6	1,34
B5/K5	30,0	47,3	1,58

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, alüminyum köpük dolgulu kare kesitli kolonlar ve alüminyum köpük dolgulu sandviç panel döşemelerin çelik çerçeve yapıların sismik performansı üzerindeki etkilerini ve kiriş-kolon birleşimlerinin histeretik davranışına geometrik parametrelerin etkisini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışma kapsamında hem genel yapı davranışı hem de yerel birleşim davranışı birlikte değerlendirilerek alüminyum köpüğün yapısal performans etkisi ele alınmıştır.

İlk aşamada, geleneksel kompozit döşemeli çelik çerçeve sistemleri ile alüminyum köpük dolgulu kolonlar ve sandviç kompozit döşemeler içeren yenilikçi sistemlerin sismik davranışı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri ile incelenmiştir. Sayısal modelin doğruluğu sağlandıktan sonra ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak kapsamlı bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kat sayısı, açıklık düzeni ve taşıyıcı sistem tipleri gibi değişkenler dikkate alınmıştır.

Yapılan karşılaştırmalı analizlerde doğal titreşim karakteristikleri, maksimum yatay yer değiştirme talepleri, görelî kat ötelemeleri ve Von Misses gerilme dağılımları temel performans göstergeleri olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, alüminyum köpük malzemelerin yapı sisteminin genel yatay rijitliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu artış, köpük dolgunun sağladığı yerel stabilite, burkulmanın geciktirilmesi ve çelik-köpük kompozit etkileşiminin güçlenmesi ile açıklanabilir.

Alüminyum köpük dolgulu kolonlar ve sandviç panel döşemeler içeren sistemler, geleneksel sistemlere kıyasla daha yüksek doğal frekans değerleri üretmiş ve bu durum sistemin daha rijit bir dinamik davranış sergilediğini göstermiştir. Kat sayısı arttıkça, tüm çerçeve konfigürasyonlarında ve sistem tiplerinde hem birinci hem de ikinci doğal frekanslarda önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Özellikle, alüminyum köpük dolgu malzemesinin yalnızca kolonlara entegre edilmesi, içi boş çelik kolon çerçevelerine kıyasla doğal frekanslarda ortalama %40'lık bir artışa neden olmaktadır. Alüminyum köpük dolgu malzemesi yalnızca döşemelerde kullanıldığında artış ortalama %55 olurken, hem döşemelerde hem de kolonlarda alüminyum köpüğün kullanılması toplamda %100'ün üzerinde bir artışa yol açmaktadır. Açıklığın frekans üzerindeki etkisine gelince, doğal frekanslar 1x1, 2x1, 2x2 çerçeveler sırasıyla azalma eğilimindedir.

Sismik yer değiştirme talepleri açısından bakıldığında, alüminyum köpük dolgu malzemesinin döşemelere veya kolonlara entegre edilmesinin maksimum çatı deplasmanlarında yaklaşık %50 oranında azalma elde edilmiştir. Bu dolgu malzemesi hem döşemelerde hem de kolonlarda kullanıldığında ise birleşik etkiler, geleneksel çerçeve sistemlerine kıyasla yanal yer değiştirmeleri %80'e kadar azaltmıştır. Bu durum, sistemin yalnızca rijitliğinin arttığını değil, aynı zamanda deprem etkisi altında daha kontrollü ve dengeli bir davranış sergilediğini göstermektedir. Rijitlik ve süneklik arasındaki dengenin iyileşmesi, sismik performans açısından önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, kat sayısı arttıkça daha büyük yanal yer değiştirmeler meydana gelmiş olsa da, bunlar yarıya indirilebilmiştir. Açıklık konfigürasyonu açısından, yanal yer değiştirme değeri 2x2, 2x1 ve 1x1 açıklıklı çerçeveler için sırasıyla %30, %32 ve %43 oranında azalmıştır.

Alüminyum köpük entegre çerçeveler, tepe yer değiştirmesinden sonra zaman-yanal yer değiştirme eğrilerinin büyüklüğünde daha hızlı bir azalma sergileyerek sönümlemeyi ve enerji dağılımını iyileştirmiştir.

Görelilik kat ötelemeleri incelendiğinde, alüminyum köpük dolgulu sistemlerin tüm kat seviyelerinde yönetmelik sınır değerlerinin altında kaldığı görülmüştür. Aynı kat sayısına sahip ancak daha büyük açıklıkları olan referans çerçevelerde, çerçevenin yanal rijitliği açıklık sayısı ile orantılı olarak artmadığı için katlar arası yer değiştirme oranları biraz daha yüksek olmuştur. Bununla birlikte, alüminyum köpük dolgulu çerçevelerde bu eğilim tersine dönmüş ve daha düşük yatay yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Bunun nedeni, alüminyum köpüğün sadece çerçevenin yanal rijitliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sismik enerjiyi de dağıtarak katlar arası yer değiştirme oranlarını azaltmasıdır. Çoğu konfigürasyonda olduğu gibi, görelilik kat öteleme oranları genellikle çerçevenin yüksekliği ile birlikte artar ve genellikle orta ve alt katlarda zirveye ulaştıktan sonra üst katlarda hafifçe azalır. KK-KD sistemleri sadece deplasman miktarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda yükseklik boyunca daha düzgün ve kontrollü bir deplasman profili sunarak genel yapısal performans ve yerel hasarı en aza indirme açısından fayda sağlar.

Gerilme dağılımı analizleri, maksimum Von Mises gerilmelerinin genellikle alt ve orta katlardaki kiriş-kolon birleşim bölgelerinde yoğunlaştığını göstermektedir. Ancak alüminyum köpük dolgulu sistemlerde bu gerilme yığılımlarının belirgin şekilde azaldığı ve daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, iç kuvvet aktarımının daha dengeli hale geldiğini ve yerel hasar riskinin azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte bazı durumlarda rijitlik artışı nedeniyle iç kuvvetlerin

yeniden dağıldığı ve belirli elemanlarda gerilme artışlarının oluşabileceği de görülmüştür.

Kiriş-kolon bağlantılarının sonuçlarına bakıldığında, alüminyum köpük dolgulu bağlantıların dayanımı, karşılık gelen içi boş bağlantılara göre 1,89 kat daha fazlaydı. Bu artış, en yüksek γ oranına sahip bağlantıyla ilişkilendirildi. β oranındaki değişim, bağlantı dayanımını 1,40 kata kadar artırdı. Ayrıca, bağlantıların başlangıç rijitliği ve dayanımının β oranıyla doğru orantılı, γ oranıyla ters orantılı olarak arttığı gözlemlendi.

Kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel davranışı incelendiğinde, alüminyum köpük dolgulu birleşimlerin referans çelik birleşimlere göre daha geniş histeretik çevrimler oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum, enerji sönümlenme kapasitesinin arttığını ve çevrimsel yükler altında daha stabil bir davranış elde edildiğini göstermektedir. Bu iyileşme, özellikle yerel burkulmanın geciktirilmesi ve plastik deformasyon kapasitesinin artması ile ilişkilidir.

Geometrik parametreler açısından değerlendirildiğinde, β oranının artması birleşim rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini artırırken, yüksek γ değerleri ince kesitli kolonlarda dayanım kaybına neden olmuştur. Ancak alüminyum köpük dolgusu, özellikle ince kesitli elemanlarda bu olumsuz etkileri önemli ölçüde azaltmıştır. Alüminyum köpük dolgu, yerel burkulmayı geciktirerek hem sünekliği hem de taşıma kapasitesini artırmış ve göçme mekanizmalarını daha gecikmeli ve kontrollü hale getirmiştir.

Enerji sönümlenme kapasitesi açısından, alüminyum köpük dolgulu birleşimlerin referans sistemlere göre yaklaşık %20 ile %68 arasında daha yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle yüksek narinlik oranına sahip ($\gamma=40$) kesitlerde bu artış daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, alüminyum köpüğün ince cidarlı elemanlarda çok daha etkin bir performans iyileştirmesi sağladığını göstermektedir. Genel olarak β oranının artması ve γ oranının azalması hem dolgusuz hem de dolgulu sistemlerde enerji performansını olumlu yönde etkilemiştir.

Sonuç olarak, alüminyum köpük dolgulu sandviç paneller ve alüminyum köpük dolgulu kolon sistemleri, çelik çerçeve yapıların sismik performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu sistemler; yatay rijitliği artırmakta, deformasyon taleplerini azaltmakta, gerilme yığılmalarını sınırlandırmakta ve enerji sönümlenme kapasitesini önemli ölçüde yükseltmektedir.

Hafiflik, yüksek enerji yutma kapasitesi ve stabil çevrimsel davranış özellikleri sayesinde alüminyum köpük dolgulu sistemler, özellikle deprem etkilerine karşı

geliştirilmiş yeni nesil çelik yapı sistemleri için oldukça güçlü ve umut vadeden bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

5.1. Sınırlamalar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, alüminyum köpük dolgulu çelik çerçeve sistemlerinin dinamik davranışı ve gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemektedir. Ancak elde edilen sonuçlar, belirli varsayımlar ve modelleme kabulleri çerçevesinde değerlendirilmelidir.

Öncelikle, analizler belirli idealizasyonlar altında gerçekleştirilmiştir. Döşeme-kiriş birleşimleri basitleştirilmiş şekilde modellenmiş; kayma çivileri, yapıstırıcı katmanlar ve arayüz davranışları detaylı olarak temsil edilmemiştir. Bu durum, kompozit etkileşimin ve yük aktarım mekanizmalarının tam anlamıyla yansıtılmasını sınırlayabilir. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalarda bağlantı detaylarının; aderans, kayma aktarımı ve olası ayrılma davranışlarını içerecek şekilde gelişmiş temas ve hasar modelleri ile ele alınması önerilmektedir.

Kullanılan analizler, doğrusal olmayan davranışları sınırlı düzeyde temsil etmekte olup, malzeme hasarı, yorulma ve ilerleyici göçme mekanizmaları kapsam dışı bırakılmıştır. Özellikle alüminyum köpük malzemenin ezilme davranışı, enerji sönmüleme kapasitesi ve hasar ilerleme özelliklerinin daha gelişmiş malzeme modelleri ile incelenmesi gerekmektedir.

Sismik etkiler, zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerde gerçek deprem kaydı kullanılarak değerlendirilmiş ve bu kapsamda Northridge depremine ait yer hareketi kayıtları dikkate alınmıştır. Buna karşılık, itme analizlerinde yöntemin doğası gereği yapı üzerine önceden tanımlanmış artan yer değiştirme dağılımı uygulanmıştır.

Ancak yalnızca tek bir deprem kaydına dayalı değerlendirme, sonuçların genellenebilirliğini sınırlayabilir. Bu nedenle, farklı frekans içeriklerine ve zemin koşullarına sahip çoklu yer hareketi kayıtları ile zaman tanım alanı analizlerinin genişletilmesi önerilmektedir. Ayrıca, iki yönlü deprem etkileri ile düşey bileşenlerin de dikkate alınması, sistem davranışının daha gerçekçi değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Çalışmada alüminyum köpük dolgu, tek bir yoğunluk ve malzeme parametresi üzerinden ele alınmıştır. Gelecek çalışmalarda, farklı yoğunluklara, gözenek yapılarına ve mekanik özelliklere sahip köpük malzemelerin sistem davranışı üzerindeki etkisinin parametrik olarak incelenmesi önerilmektedir.

Sayısal sonuçların doğrulanması açısından deneysel çalışmalar kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, özellikle kiriş-kolon birleşimleri ve köpük dolgulu elemanlar üzerinde gerçekleştirilecek tam ölçekli veya yarı ölçekli deneysel çalışmalar ile model doğrulaması yapılmalıdır.

Son olarak, bu çalışma üç boyutlu çerçeve sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, modellemeler düzenli geometrilere sahip idealize yapı sistemleri ile sınırlıdır. Gelecek çalışmalarda, plan ve düşey düzensizlikler içeren daha karmaşık bina modelleri ile farklı taşıyıcı sistem türlerinin (örneğin perde-çerçeve sistemleri, tüp sistemler vb.) incelenmesi önerilmektedir. Bu tür çalışmalar, alüminyum köpük dolgunun gerçek yapı davranışı üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu bağlamda, alüminyum köpük dolgunun yapısal davranış üzerindeki etkilerine ilişkin önemli bulgular sunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin sismik performansının kapsamlı biçimde değerlendirilebilmesi için çoklu deprem kayıtları, gelişmiş malzeme modelleri ve deneysel doğrulama içeren çok ölçekli çalışmaların birlikte yürütülmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Adams, B. L., Lyon, M. ve Henrie, B. (2004). Microstructures by design: linear problems in elastic–plastic design. *International Journal of Plasticity*, 20(8–9), 1577–1602. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2003.11.008>
- Ahmady Jazany, R., Esmaeily, A., Hosseini Hashemi, B. ve Kayhani, H. (2016). Analytical investigation on performance of special moment-resisting connections with unequal beam depths. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(8), 375–393. <https://doi.org/10.1002/tal.1263>
- AISC (1997). Seismic Provisions for Structural Steel Build-ings, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL.
- AISC (2001). Seismic Provisions for Structural Steel Build-ings (1997), Supplement No. 2, AISC, Chicago, IL.
- Akour, S. N. ve Akour, W. S. (2025). Effect of face sheet stacking on sandwich panel loaded beyond the yield limit. *Discover Applied Sciences* 2025 7:10, 7(10), 1103-. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07777-6>
- Aldemir, Ü. ve Aydın, E. (2005). Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 435(1), 81–89.
- Alisibramulisi, A. (2006). *Analysis of corrugated web beam to column extended end plate connection using LUSAS software* [Yayımlanmış doktora tezi, Universiti Teknologi Malaysia]. ProQuest Dissertations Publishing. https://www.researchgate.net/publication/49909919_Analysis_of_corrugated_web_beam_to_column_extended_end_plate_connection_using_LUSAS_software#read
- Allen, H. G. (1969). *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-02134-2>
- Altin, M., Acar, E. ve Güler, M. A. (2018). Foam filling options for crashworthiness optimization of thin-walled multi-tubular circular columns. *Thin-Walled Structures*, 131, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.043>
- Altıok, T. Y., Şevik, M. ve Demir, A. (2025). Seismic performance of retrofitted and non-retrofitted RC school buildings after the February 6th, 2023, Kahramanmaraş earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(3), 1017–1052. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01941-w>

- An, Y., Yang, S., Wu, H., Zhao, E. ve Wang, Z. (2017). Investigating the internal structure and mechanical properties of graphene nanoflakes enhanced aluminum foam. *Materials & Design*, 134, 44–53.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.031>
- Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson L. J., Hutchinson J. W. ve Wadley H. N. G. (2000). *Metal foams : a design guide*. Butterworth-Heinemann.
- Ashrafi, Y., Rafezy, B. ve Howson, W. P. (2009). Evaluation of the performance of reduced beam section (RBS) connections in steel moment frames subjected to cyclic loading. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2, (ss. 1–3).
- Audyshe, R., Smith, R. ve Altenhof, W. (2014). Mechanical assessment and deformation mechanisms of aluminum foam filled stainless steel braided tubes subjected to transverse loading. *Thin-Walled Structures*, 79, 95–107.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.02.011>
- Audyshe, R., Smith, R., Altenhof, W. ve Patel, K. (2014). Aluminum foam core density and geometry influences on the deformation mechanisms of foam filled braided tubular structures in tension. *Materials & Design (1980-2015)*, 54, 394–413.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.030>
- Augusto, H., Rebelo, C., Simões da Silva, L. S. ve Castro, J. M. (2012). Modeling of the Dissipative Behavior of Partial-Strength Beam-to-Column Steel Connections. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Bai, Y., Guan, S. ve Flórez-López, J. (2017). Development of a damage model for assessing fracture failure of steel beam-to-column connections subjected to extremely low-cycle fatigue. *Engineering Failure Analysis*, 82, 823–834.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.032>
- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 559–632.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- Banhart, J. ve Seeliger, H. -W. (2008). Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications. *Advanced Engineering Materials*, 10(9), 793–802. <https://doi.org/10.1002/adem.200800091>
- Baroutaji, A., Sajjia, M. ve Olabi, A.-G. (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*, 118, 137–163.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>
- Bathe, K. -J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.

- Baumeister, J., Banhart, J. ve Weber, M. (1997). Aluminium foams for transport industry. *Materials & Design*, 18(4–6), 217–220.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(97\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00050-2)
- Bayo, E., Cabrero, J. M. ve Gil, B. (2006). An effective component-based method to model semi-rigid connections for the global analysis of steel and composite structures. *Engineering Structures*, 28(1), 97–108.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.08.001>
- Bayraktar, A., Altunişik, A. C. ve Pehlivan, M. (2013). Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 49–72.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.06.004>
- Boresi, A. P. ve Schmidt, R. J. (2003). *Advanced mechanics of materials*. John Wiley & Sons.
- Børvik, T., Hopperstad, O. S., Reyes, A., Langseth, M., Solomos, G. ve Dyngeland, T. (2003). Empty and foam-filled circular aluminium tubes subjected to axial and oblique quasistatic loading. *International Journal of Crashworthiness*, 8(5), 481–494.
<https://doi.org/10.1533/ijcr.2003.0254>
- Brandonisio, G., De Luca, A. ve Mele, E. (2012). Shear strength of panel zone in beam-to-column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 71, 129–142.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.11.004>
- Bryant, J. D., Wilhelmy, D., Kallivayalil, J. ve Wang, W. (2006). Development of Aluminium Foam Processes and Products. *Materials Science Forum*, 519–521, 1193–1200.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.1193>
- Castellano, M. G., Infanti, S. ve Colato, G. P. (2009). The experience of FIP industriale in the retrofit of bridges trough seismic isolation and energy dissipation. *Buletinul AGIR*, 2, 266-278.
- Chan, R. W. K., Albermani, F. ve Williams, M. S. (2009). Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 260–268.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.017>
- Chen, Y., Lu, X. ve Xu, L. (2026). A slip-activated dual-stage brace for enhanced seismic resilience: mechanism and parametric analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 236, 110037.

<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.110037>

- Cheng, S., Qiao, P., Chen, F., Fan, W. ve Zhu, Z. (2016). Free vibration analysis of fiber-reinforced polymer honeycomb sandwich beams with a refined sandwich beam theory. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 18(2), 242–260.
<https://doi.org/10.1177/1099636215619841>
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.)*. Pearson.
- Civjan, S. A., Engelhardt, M. D. ve Gross, J. L. (2000). Retrofit of Pre-Northridge Moment-Resisting Connections. *Journal of Structural Engineering*, 126(4), 445–452.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:4\(445\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:4(445))
- Clifton, G. C. ve Butterworth, J. W. (2000). Moment-resisting steel framed seismic-resisting systems with semi-rigid connections. Proceedings of the 12th World Conf. on Earthq. Eng, 1–8.
- Crupi, V., Epasto, G. ve Guglielmino, E. (2013). Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam. *Marine Structures*, 30, 74–96.
<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2012.11.002>
- Cui, G., Meng, L. ve Zhai, X. (2022). Buckling behaviors of aluminum foam-filled aluminum alloy composite columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 177, 109399.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109399>
- Daniel, I. M. ve Ishai, O. (2005). *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford University Press.
- Dassault Systèmes. (2024). Abaqus/CAE (2024). Dassault Systèmes.
- Degenkolb Engineers. (2019, January 17). 25 years since the Northridge earthquake.
<https://degenkolb.com/insights/25-years-since-the-northridge-earthquake/>
- Del Savio, A. A., Nethercot, D. A., Vellasco, P. C. G. S., Andrade, S. A. L. ve Martha, L. F. (2009). Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8–9), 1876–1895.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.02.011>
- Demirağ, Ö.ve Öztekin, E. (2026). Comparison of Aluminum Composite Sandwich and Traditional Reinforced Concrete Slab Frame Systems in Terms of Dynamic and Global Behavior. *Buildings*, 16(4), 702.

<https://doi.org/10.3390/buildings16040702>

Deshpande, V. S. ve Fleck, N. A. (2000). High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams. *International Journal of Impact Engineering*, 24(3), 277–298.

[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00153-0)

Dessouki, A. K., Youssef, A. H. ve Ibrahim, M. M. (2013). Behavior of I-beam bolted extended end-plate moment connections. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 685–699.

<https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.004>

Díaz, C., Victoria, M., Martí, P. ve Querin, O. M. (2011). FE model of beam-to-column extended end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1578–1590.

<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.002>

Dineshkumar, J., Jesudas, T. ve Elayaraja, R. (2021). Characteristics, applications and processing of aluminium foams – A Review. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1773–1776.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.176>

Doung, P. ve Sasaki, E. (2019). Load-deformation characteristics and performance of internal diaphragm connections to box columns. *Thin-Walled Structures*, 143, 106221.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106221>

Duarte, I., Vesenjaj, M. ve Krstulović-Opara, L. (2014). Dynamic and quasi-static bending behaviour of thin-walled aluminium tubes filled with aluminium foam. *Composite Structures*, 109, 48–56.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.040>

Elkholy, S. ve Meguro, K. (2004, Ağustos 1–6). Numerical simulation of high-rise steel buildings using improved applied element method. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada. (Paper No. 930)

Endut, N. A., Al Hazza, M. H. F., Sidek, A. A., Adesta, E. T. Y. ve Ibrahim, N. A. (2018). Compressive Behaviour and Energy Absorption of Aluminium Foam Sandwich. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 290, 012084. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/290/1/012084>

Engelhardt, M. D. ve Sabol, T. A. (1998). Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations. *Engineering Structures*, 20(4–6), 510–520. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00038-2)

- European Committee for Standardization (CEN). (2004). EN 1998-1: Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance: Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- European Committee for Standardization (CEN). (2005). EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Design of steel structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- European Committee for Standardization (CEN). (2004). EN 1994-1-1: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- Federal Emergency Management Agency. (2002). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards FEMA P-154.
- Federal Emergency Management Agency. (2000a). Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings (FEMA 350).
- Federal Emergency Management Agency. (2000b). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356).
- Federal Emergency Management Agency. (2000c). State of the art report on connection performance, FEMA 355D.
- Feng, R. ve Young, B. (2008). Tests of concrete-filled stainless steel tubular T-joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1283–1293. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.04.011>
- Feng, R. ve Young, B. (2011). Design of cold-formed stainless steel tubular T- and X-joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 421–436. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.09.011>
- Filter Elements. (2026). Metallic foams. <https://www.filter-elements.org/filter-elements/metallic-foams.html>
- Fleck, N. A. ve Deshpande, V. S. (2004). The Resistance of Clamped Sandwich Beams to Shock Loading. *Journal of Applied Mechanics*, 71(3), 386–401. <https://doi.org/10.1115/1.1629109>
- Fu, W. ve Li, Y. (2024). Fabrication, Processing, Properties, and Applications of Closed-Cell Aluminum Foams: A Review. *Materials*, 17(3), 560. <https://doi.org/10.3390/ma17030560>
- Garai, F., Béres, G. ve Weltsch, Z. (2020). Development of tubes filled with aluminium foams for lightweight vehicle manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 790, 139743. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139743>
- Gardner, L. ve Nethercot, D. A. (2004). Numerical Modeling of Stainless Steel

- Structural Components—A Consistent Approach. *Journal of Structural Engineering*, 130(10), 1586–1601.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:10\(1586\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:10(1586))
- Garg, A. ve Chalak, H. D. (2019). A review on analysis of laminated composite and sandwich structures under hygrothermal conditions. *Thin-Walled Structures*, 142, 205–226.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.05.005>
- Gibson, L. J. (2000). Mechanical Behavior of Metallic Foams. *Annual Review of Materials Science*, 30(1), 191–227.
<https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.30.1.191>
- Gibson, L. J. (2001). Metallic Foams: Structure, Properties, and Applications. *Mechanics for a New Millennium*, 57–74.
https://doi.org/10.1007/0-306-46956-1_4
- Gibson, L. J. (2005). Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics*, 38(3), 377–399.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.09.027>
- Gibson, L. J. ve Ashby, M. F. (2014). *Cellular Solids*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Güler, M. A., Mert, S. K., Altin, M. ve Acar, E. (2023). An investigation on the energy absorption capability of aluminum foam-filled multi-cell tubes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(10), 541.
<https://doi.org/10.1007/s40430-023-04463-9>
- Gunawan, L., Jusuf, A., Dirgantara, T. ve Putra, I. S. (2013). Experimental study of foam filled aluminum columns under axial impact loading. *Journal of KONES*, 20(2), 149–157.
- Guo, K., Zhu, L., Li, Y. ve Yu, T. X. (2019). Numerical study on mechanical behavior of foam core sandwich plates under repeated impact loadings. *Composite Structures*, 224, 111030.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111030>
- Guo, L. ve Yu, J. (2011). Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam. *International Journal of Impact Engineering*, 38(2–3), 85–94.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.10.004>
- Gupta, A. ve Pradyumna, S. (2022). Geometrically nonlinear dynamic analysis of variable stiffness composite laminated and sandwich shell panels. *Thin-Walled*

Structures, 173, 109021.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109021>

Haidar, S., Ansary, S. ve Rahman, A. (2016). Production and compressive characterization of aluminium MMC foam manufactured using dual foaming agent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 115(1), 012030.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/115/1/012030>

Hangai, Y., Saito, M., Utsunomiya, T., Kitahara, S., Kuwazuru, O. ve Yoshikawa, N. (2014). Fabrication of Aluminum Foam-Filled Thin-Wall Steel Tube by Friction Welding and Its Compression Properties. *Materials*, 7(9), 6796–6810.

<https://doi.org/10.3390/ma7096796>

Hanssen, A. ., Langseth, M. ve Hopperstad, O. . (2001). Optimum design for energy absorption of square aluminium columns with aluminium foam filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(1), 153–176.

[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00108-3)

Hanssen, A. G., Hopperstad, O. S. ve Langseth, M. (2001). Design of aluminium foam-filled crash boxes of square and circular cross-sections. *International Journal of Crashworthiness*, 6(2), 177–188.

<https://doi.org/10.1533/cras.2001.0171>

Hanssen, A. G., Langseth, M. ve Hopperstad, O. S. (2000). Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering*, 24(4), 347–383.

[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00169-4](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00169-4)

Haselton, C. B., Liel, A. B., Dean, B. S., Chou, J. H. ve Deierlein, G. G. (2007). Seismic Collapse Safety and Behavior of Modern Reinforced Concrete Moment Frame Buildings. *Structural Engineering Research Frontiers*, 1–14.

[https://doi.org/10.1061/40944\(249\)22](https://doi.org/10.1061/40944(249)22)

Hassan, A. ve Alnaser, I. A. (2026). Influence of CaCO₃ and Al₂O₃ on the Mechanical Properties of Aluminum Foam for Lightweight Structural Applications. *ACS Omega*, 11(2), 3336–3353.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.5c10363>

Hitaka, T., Suita, K. ve Kato, M. (2003, Ekim). CFT column base design and practice in Japan. *Proceedings of the International Workshop on Steel and Concrete Composite Construction (IWSCCC-2003)*, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, ss. 35–45. (Report No. NCREE-03-026)

- Hong, L. (1996). *Seismic design and damage evaluation of buildings with steel moment resisting frames* [Yayımlanmış doktora tezi, Clemson University]. ProQuest Dissertations Publishing.
<https://www.proquest.com/docview/304241475?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>
- Horikawa, K. ve Sakino, Y. (1996). Damages to Steel Structures Caused by the 1995 Kobe Earthquake. *Structural Engineering International*, 6(3), 181–182.
<https://doi.org/10.2749/101686696780495617>
- Hosseini, S. M. ve Rahnavard, R. (2020). Numerical study of steel rigid collar connection affecting cyclic loading. *Engineering Structures*, 208, 110314.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110314>
- Hu, Z. ve Xue, J. (2016). Analysis on the shear capacity of irregular joints between steel box columns and beams. *International Journal of Steel Structures*, 16(2), 517–530.
<https://doi.org/10.1007/s13296-016-6021-1>
- Huang, L., Qu, W. ve Wu, C. (2021). Extremely Low Cycle Fatigue Failure Behavior of Box-column to I-beam Welded Joints. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 636(1), 012012.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/636/1/012012>
- Huang, P., Gao, Q., Su, X., Feng, Z., Sun, X. ve Zu, G. (2023). Effect of Core Density on the Three-Point Bending Performance of Aluminum Foam Sandwich Panels. *Materials*, 16(22), 7091.
<https://doi.org/10.3390/ma16227091>
- Imam, M. H., Mohiuddin, M., Shuman, N. M., Oyshi, T. I., Debnath, B. ve ve Liham, M. I. M. H. (2024). Prediction of seismic performance of steel frame structures: A machine learning approach. *Structures*, 69, 107547.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107547>
- Islam, M. A., Escobedo, J. P., Hazell, P. J., Appleby-Thomas, G. J. ve Quadir, M. Z. (2015). Characterization of Closed-Cell Aluminium Foams Subjected to Compressive Loading. *In Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015* (ss. 167–174). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48191-3_21
- Jin, J. ve El-Tawil, S. (2005). Seismic performance of steel frames with reduced beam section connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(4), 453–471.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.10.006>

- Kataoka, M. N. ve El Debs, A. L. H. C. (2014). Parametric study of composite beam-column connections using 3D finite element modelling. *Journal of Constructional Steel Research*, 102, 136–149.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.07.006>
- Kenny, L. D. (1996). Mechanical Properties of Particle Stabilized Aluminum Foam. *Materials Science Forum*, 217–222, 1883–1890.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.217-222.1883>
- Kim, J., Ghaboussi, J. ve Elnashai, A. S. (2010). Mechanical and informational modeling of steel beam-to-column connections. *Engineering Structures*, 32(2), 449–458. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.10.007>
- Kim, S.-E., Lee, D.-H. ve Ngo-Huu, C. (2007). Shaking table tests of a two-story unbraced steel frame. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(3), 412–421.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.04.009>
- Kim, T. ve Kim, J. (2009). Collapse analysis of steel moment frames with various seismic connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(6), 1316–1322.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.11.006>
- Kishimoto, S., Wang, Q., Tanaka, Y. ve Kagawa, Y. (2014). Compressive mechanical properties of closed-cell aluminum foam–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 64, 43–49.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.009>
- Kılıç, M., Sagirolu Maali, M., Maali, M. ve Cüneyt Aydın, A. (2023). Experimental and numerical investigation of semi-rigid behavior top and seat T-Section connections with different triangular designed stiffener thicknesses. *Engineering Structures*, 289, 116216.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116216>
- Kılıçaslan, C. (2015). Numerical crushing analysis of aluminum foam-filled corrugated single- and double-circular tubes subjected to axial impact loading. *Thin-Walled Structures*, 96, 82–94.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.08.009>
- Kobashi, M., Sato, R. ve Kanetake, N. (2006). Foaming and Filling-in Behavior of Porous Aluminum in Hollow Components. *Materials Transactions*, 47(9), 2178–2182.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.47.2178>
- Kovács, N. ve Leon, R. T. (2008). Eurocode based studies on bolted T-stub moment resistant beam-to-column joints. Eurosteel 2008, European Convention for

Constructional Steelwork, Brussels, Belgium.

Kösedağ, E. ve Ekici, R. (2021). Free Vibration Analysis of Foam-Core Sandwich Structures. *Politeknik Dergisi*, 24(1), 69–74.

<https://doi.org/10.2339/politeknik.571396>

Kozłowski, A., Kowalczyk, R. ve Gizejowski, M. (2008, March 3-5). Estimation of the initial stiffness and moment resistance of steel and composite joints. CTBUH 8th World Congress.

Kukreti, A. R. ve Zhou, F.-F. (2006). Eight-bolt endplate connection and its influence on frame behavior. *Engineering Structures*, 28(11), 1483–1493.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.021>

Kumar Rajak, D., A. Kumaraswamidhas, L. ve Das, S. (2015). Energy Absorption Capacity Of Empty And Foam Filled Mild Steel Tube Under Low Strain Rate At Room temperature. *Advanced Materials Letters*, 6(6), 548–553.

<https://doi.org/10.5185/amlett.2015.5784>

Lamanna, E., Gupta, N., Cappa, P., Strbik, O. M. ve Cho, K. (2017). Evaluation of the dynamic properties of an aluminum syntactic foam core sandwich. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 2987–2994.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.361>

Latour, M., D’Aniello, M., Landolfo, R. ve Rizzano, G. (2021). Experimental and numerical study of double-skin aluminium foam sandwich panels in bending. *Thin-Walled Structures*, 164, 107894.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107894>

Lee, C.-H., Jeon, S.-W., Kim, J.-H. ve Uang, C.-M. (2005). Effects of Panel Zone Strength and Beam Web Connection Method on Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connections. *Journal of Structural Engineering*, 131(12), 1854–1865.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:12\(1854\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:12(1854))

Lee, C.-H. ve Kim, J.-H. (2007). Seismic design of reduced beam section steel moment connections with bolted web attachment. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(4), 522–531.

<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.030>

Lee, J. ve Fenves, G. L. (1998). Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892–900.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))

Lemonis, M. E. ve Gantes, C. J. (2009). Mechanical modeling of the nonlinear response

- of beam-to-column joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 879–890.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.11.007>
- Lemonis, M. E., Hatzigeorgiou, G. D. ve Asteris, P. G. (2022). Seismic behaviour of irregular steel frames with beam and joint energy dissipation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 107052.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107052>
- Li, H.-T. ve Young, B. (2021). Behaviour of concrete-filled ferritic stainless steel tubular joints: Experimental investigation, numerical modelling and design. *Engineering Structures*, 247, 113109.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113109>
- Li, J., Wang, Y., Zhang, Z. ve Mou, B. (2023). Seismic behavior of steel frames with different joints: Shaking table test and finite element analysis. *Journal of Building Engineering*, 70, 106377.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106377>
- Li, Z., Qian, Y., Li, T., Zhou, X., Zhang, Y., Yang, Z. ve Lu, Z. (2024). The mechanical responses of SiC-coated carbon-bonded carbon fiber composites under quasi-static cyclic compressive loading. *Composites Part B: Engineering*, 283, 111642.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111642>
- Li, Z., Yu, J. ve Guo, L. (2012). Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(1), 48–56.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.09.006>
- Liu, E., Li, H., Li, Z., Li, J., Hao, H. ve Su, M. (2026). Mechanical properties of Al based-aluminum foam/resin interpenetrating porous composites with different interface types. *Composite Structures*, 380, 120030.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.120030>
- Liu, R., Zhu, Y., Yan, G., Zheng, L., Wu, J. ve Lai, Q. (2024). Behavior of the damage-tolerant beam-column connection for earthquake-resilient steel frame: Experimental and numerical study. *Structures*, 67, 106985.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106985>
- Liu, Z., Huang, Z. ve Qin, Q. (2017). Experimental and theoretical investigations on lateral crushing of aluminum foam-filled circular tubes. *Composite Structures*, 175, 19–27.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.004>

- Lu, J. ve Wang, Y. (2023). Behaviors of steel–concrete-steel sandwich panel with aluminum foam-filled energy absorbing supports under low-velocity impact. *Engineering Structures*, 292, 116540.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116540>
- Lu, W. ve Zhang, J. (2022). Mechanical response of aluminum foam sandwich structure under impact load. *Materials Research Express*, 9(1), 016515.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac493e>
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. ve Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299–326.
[https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- Ma, Y. H., Tao, N., Dai, M. L., Yang, F. J. ve He, X. Y. (2018). Investigation on Vibration Response of Aluminum Foam Beams Using Speckle Interferometry. *Experimental Techniques*, 42(1), 69–77.
<https://doi.org/10.1007/s40799-017-0222-1>
- Maali, M. S., Maali, M. ve Yazici, C. (2023). Experimental investigation of screwed beam-column connection using cold-formed steel back-to-back sections with gusset-plate. *Structures*, 47, 2025–2036.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.030>
- Maali, M. S., Tavlaşoğlu, M. E. ve Maali, M. (2025). Experimental study on the cold-formed steel beam-to-column screw connections for seismic application. *Structures*, 72, 108173.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108173>
- Maali, M., Sağıroğlu, M., Kılıç, M. ve Aydın, A. C. (2022). Experimental study on the rotation capacity of bolted and welded beam-column connection using cold-formed steel sections. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 8(4), 133.
<https://doi.org/10.20528/cjsmec.2022.04.001>
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. ve Gemi, L. (2020). Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses. *Composite Structures*, 242, 112162.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112162>
- Madgule, M., Sreenivasa, C. G. ve Borgaonkar, A. V. (2023). Aluminium metal foam production methods, properties and applications- a review. *Materials Today: Proceedings*, 77, 673–679.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.287>
- Mahto, R. P., Bhadauria, A., Bandhu, D. ve Karmkar, S. (2025). A study on porosity

- and mechanical properties of the open aluminum metal foam through spark plasma sintering SDP technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136(10), 4407–4417.
<https://doi.org/10.1007/s00170-025-15077-x>
- Majhi, D. R. ve Shrikhande, M. (2021). Residual life of earthquake damaged structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 145, 106694.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106694>
- Margarian, A. (2002). *Seismic behavior of unreinforced steel beam-to-column moment connections* [Yayımlanmış doktora tezi, The University of Michigan]. ProQuest Dissertations Publishing.
<https://www.proquest.com/docview/305537753?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>
- Mirghaderi, S. R. ve Dehghani Renani, M. (2008). The rigid seismic connection of continuous beams to column. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(12), 1516–1529.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.015>
- Mohamadi-shooreh, M. R. ve Mofid, M. (2008). Parametric analyses on the initial stiffness of flush end-plate splice connections using FEM. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(10), 1129–1141.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.09.010>
- Mondal, D. P., Goel, M. D. ve Das, S. (2009). Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behaviour of closed cell aluminum–fly ash composite foam. *Materials & Design*, 30(4), 1268–1274.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.059>
- Mou, B., Pang, L., Qiao, Q. ve Yang, Y. (2018). Experimental investigation of unequal-depth-beam-to-column joints with t-shape connector. *Engineering Structures*, 174, 663–674.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.010>
- Nakashima, M. ve Sawaizumi, S. (1999). Effect of Column-to-Beam Strength Ratio on Earthquake Responses of Steel Moment Frames (Part 1: Column-to-Beam Strength Ratio Required for Ensuring Beam-Hinging Responses). *Steel Construction Engineering*, 6, 117–132.
https://doi.org/10.11273/jssc1994.6.23_117
- Nayir, S., Altunişik, A. C., Atmaca, B., Başağa, H. B., Atmaca, E. E., Bahadır, Ü.,

- Şimşek, S., Şahin, M. C., Akbulut, Y. E., Yakak, B., Temel, B. A., Ören, S., Şen, D., Karahasan, A. K., Sunca, F. ve Okur, F. Y. (2026). Structural material evaluation of 400 collapsed RC buildings after February 6, 2023 Kahramanmaraş double earthquakes in Türkiye. *Natural Hazards*, 122(4), 137.
<https://doi.org/10.1007/s11069-025-07774-3>
- Neu, T. R., Heim, K., Seeliger, W., Kamm, P. H. ve García-Moreno, F. (2024). Aluminum Foam Sandwiches: A Lighter Future for Car Bodies. *JOM*, 76(5), 2619–2630. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06460-2>
- Nguyen, N.-D., Vo, T. P. ve Nguyen, T.-K. (2020). An improved shear deformable theory for bending and buckling response of thin-walled FG sandwich I-beams resting on the elastic foundation. *Composite Structures*, 254, 112823. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112823>
- Oh, S.-H., Kim, Y.-J. ve Moon, T.-S. (2007). Cyclic performance of existing moment connections in steel retrofitted with a reduced beam section and bottom flange reinforcements. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(2), 199–209. <https://doi.org/10.1139/106-125>
- Omar, M. Y., Xiang, C., Gupta, N., Strbik, O. M. ve Cho, K. (2015). Syntactic foam core metal matrix sandwich composite: Compressive properties and strain rate effects. *Materials Science and Engineering: A*, 643, 156–168.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.033>
- Ozyurt, E. ve Das, S. (2019). Experimental and numerical studies on axially loaded reinforced square hollow section T-joints. *Engineering Structures*, 192, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.012>
- Pachoumis, D. T., Galoussis, E. G., Kalfas, C. N. ve Christitsas, A. D. (2009). Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: Experimental analysis and FEM simulation. *Engineering Structures*, 31(1), 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.08.007>
- Parveez, B., Jamal, N. A., Anuar, H., Ahmad, Y., Aabid, A. ve Baig, M. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review. *Materials*, 15(15), 5302. <https://doi.org/10.3390/ma15155302>
- Popov, E. P. ve Takhirov, S. M. (2002). Bolted large seismic steel beam-to-column connections Part 1: experimental study. *Engineering Structures*, 24(12), 1523–1534.
[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00086-X)

- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M. ve Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.
- Qiao, W.-T., Liu, H.-W., Zhang, X., Wang, D. ve Tian, W.-Y. (2022). Experimental study on seismic behavior of dense-steel-column sandwich wall. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107162.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107162>
- Rajak, D. K., Kumaraswamidhas, L. A. ve Das, S. (2014). An Energy Absorption Behaviour of Foam Filled Structures. *Procedia Materials Science*, 5, 164–172.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.254>
- Reyes, A., Hopperstad, O. S. ve Langseth, M. (2004). Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study. *International Journal of Solids and Structures*, 41(5–6), 1645–1675.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2003.09.053>
- Roberts, M. J. ve Davies, J. M. (2023). Structure cladding interaction in sandwich panel roofs. *Structures*, 57(2), 105064.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105064>
- Roeder, C.W., Graff, R., Soderstrom, J. L. ve Yoo, J. H. (2002). Seismic Performance of Pier-Wharf Connections, PEER Report 2002-07. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Roeder, C. W., Schneider, S. P. ve Carpenter, J. E. (1993). Seismic Behavior of Moment-Resisting Steel Frames: Analytical Study. *Journal of Structural Engineering*, 119(6), 1866–1884.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:6\(1866\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:6(1866))
- Ru, Y., He, L. ve Jiang, H. (2022). Investigation on a self-centering beam-column joint with tapered steel plate dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 197, 107479.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107479>
- Saab. (2018, 25 Ekim). Materiais compósitos: a inovação está aí, mas é quase invisível. <https://www.saab.com/markets/brazil/stories/2018/materiais-compositos-a-inovacao-esta-ai-mas-e-quase-invisivel>
- Sağiroğlu, M., Maali, M., Aydın, A. C. ve Kılıç, M. (2020). Moment-rotation behavior of semi-rigid web cleat connections. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 6(3), 110.
<https://doi.org/10.20528/cjsmec.2020.03.002>
- Santosa, S. ve Wierzbicki, T. (1999). Effect of an ultralight metal filler on the bending

- collapse behavior of thin-walled prismatic columns. *International Journal of Mechanical Sciences*, 41(8), 995–1019.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(98\)00066-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00066-6)
- Seçer, M. ve Bozdağ, Ö. (2005, Mart 23–25). Yarı rijit birleşimli çaprazlı çelik çerçeve davranışının incelenmesi. Kocaeli 2005 Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 616–618.
- Seitzberger, M., Rammerstorfer, F. G., Gradinger, R., Degischer, H. P., Blaimschein, M. ve Walch, C. (2000). Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam. *International Journal of Solids and Structures*, 37(30), 4125–4147.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00136-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00136-5)
- Shahbaziana, A., Gentilia, F., Costaa, R. ve Rebeloa, C. (2015, November 26–27). Advanced tools for simulating monotonic and cyclic response of beam to column steel joints. X Congresso de Construção Metálica e Mista Conference, Coimbra.
- Shafei, B., Motavalli, M., Lestuzzi, P., Shafei, B., Motavalli, M. ve Lestuzzi, P. (2008). Seismic Retrofit Of Typical Iranian Steel Buildings Using A New Approach For Upgrading The Existing Connections. 2008 FRF's International Student Paper Competition in Honor of Professor Mehdi Ghalibafian. 28 Aralık tarihinde [https://www.semanticscholar.org/paper/SEISMIC-RETROFIT-OF-TYPICAL-IRANIAN-STEEL-BUILDINGS-Shafei-Motavalli/4f79b48f60167b3fa2b91aa60744a6b008f1d642#ci](https://www.semanticscholar.org/paper/SEISMIC-RETROFIT-OF-TYPICAL-IRANIAN-STEEL-BUILDINGS-Shafei-Motavalli/4f79b48f60167b3fa2b91aa60744a6b008f1d642#citation-papers) ting-papers adresinden erişilmiştir.
- Shen, J., Kitjasateanphun, T. ve Srivanich, W. (2000). Seismic performance of steel moment frames with reduced beam sections. *Engineering Structures*, 22(8), 968–983. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00048-6)
- Shi, G., Jiang, S., Zhang, N., Hou, L. ve Zhao, H. (2025). Seismic performance of double-sided plate-reinforced connections between steel beams and built-up box columns. *Thin-Walled Structures*, 208, 112872.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112872>
- Shi, G., Shi, Y., Wang, Y. ve Bradford, M. A. (2008). Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details. *Engineering Structures*, 30(10), 2677–2686.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.02.013>
- Shi, Y., Shi, G. ve Wang, Y. (2007). Experimental and theoretical analysis of the moment–rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(9), 1279–1293.

- <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.008>
- Shin, K.-J., Kim, Y.-J. ve Oh, Y.-S. (2008). Seismic behaviour of composite concrete-filled tube column-to-beam moment connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(1), 118–127.
- <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.04.001>
- Shojaeifard, M. H., Zarei, H. R., Talebitooti, R. ve Mehdikhanlo, M. (2012). Bending behavior of empty and foam-filled aluminum tubes with different cross-sections. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 25(6), 616–626.
- [https://doi.org/10.1016/S0894-9166\(12\)60057-3](https://doi.org/10.1016/S0894-9166(12)60057-3)
- Sun, D. X. ve Zhao, Y. Y. (2003). Static and dynamic energy absorption of Al foams produced by the sintering and dissolution process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 34(1), 69–74.
- <https://doi.org/10.1007/s11663-003-0056-3>
- Sun, D., Yang, Y., Ma, Y., Xue, Y., Yu, Y. ve Feng, S. (2022). Seismic performance of resilient beam-column connection using replaceable stiffener angle steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107370.
- <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107370>
- Sun, G., Wang, E., Wang, H., Xiao, Z. ve Li, Q. (2018). Low-velocity impact behaviour of sandwich panels with homogeneous and stepwise graded foam cores. *Materials & Design*, 160, 1117–1136.
- <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.047>
- Sun, W., Liu, F., Wang, G., Shi, S., Wen, Z. ve Chen, B. (2026). Improving the impact resistance of carbon fiber sandwich panels with short aramid fiber epoxy (SAFE). *Structures*, 84, 111058.
- <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111058>
- Tezer, Ö. (2005). Zayıflatılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 425, 23–39.
- TBDY, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar.
- <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>
- Uzun, A., Karakoc, H., Gokmen, U., Cinici, H. ve Turker, M. (2016). Investigation of mechanical properties of tubular aluminum foams. *International Journal of Materials Research*, 107(11), 996–1004.
- <https://doi.org/10.3139/146.111430>
- Vaidya, U. K., Pillay, S., Bartus, S., Ulven, C. A., Grow, D. T. ve Mathew, B. (2006).

- Impact and post-impact vibration response of protective metal foam composite sandwich plates. *Materials Science and Engineering: A*, 428(1–2), 59–66.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.114>
- Venture, S. A. C. J. (2000). Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Welded Steel Moment Frame Buildings, Report No. FEMA 351. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Verma, S. K., Kumar, K. ve Dogra, S. (2020, February). Effect of masonry infills on seismic response of RC framed buildings. In International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development (ss. 231–250). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-51485-3_15
- Vidwans, A., Trovalusci, P., Fantuzzi, N. ve Correia, J. A. F. O. (2023). Application of column buckling theory to steel aluminium foam sandwich panels. *Structures*, 54, 607–617.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.112>
- Vincent, J. F. V. (2012). *Structural biomaterials*. Princeton University Press.
- Wang, H., Xu, S., Li, A. ve Kang, K. (2018). Experimental and numerical investigation on seismic performance of corroded welded steel connections. *Engineering Structures*, 174, 10–25.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.057>
- Wang, J. H. ve Sun, Y. P. (2022). Seismic fragility and post-earthquake reparability of concrete frame with low-bond high-strength reinforced concrete column. *Structures*, 37, 185–202.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.001>
- Wang, T., Shao, J., Xu, T. ve Wang, Z. (2022). Study on Axial Compression Properties of Aluminum Foam-filled Steel Tube Members After High Temperature. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 883–900.
<https://doi.org/10.1007/s40996-021-00685-w>
- Wongpakdee, N. ve Leelataviwat, S. (2014). Effects of column capacity on the seismic behavior of mid-rise strong-column-weak-beam moment frames. Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering Seismology, 1–10.
- Yan, C., Zhao, J., Cai, J., Zhang, X., Zhao, J., Wang, Z., Hu, W. ve Fang, C. (2025). Mechanical characteristics and failure modes of density gradient aluminum foam and its sandwich structures under quasi-static and impact conditions. *Journal of*

- Alloys and Compounds*, 1039, 182900.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182900>
- Yan, L., Su, P., Han, Y. ve Han, B. (2020). Effects of Aluminum Foam Filling on Compressive Strength and Energy Absorption of Metallic Y-Shape Cored Sandwich Panel. *Metals*, 10(12), 1670.
<https://doi.org/10.3390/met10121670>
- Yan, S., Jiang, Y., Deng, Y. ve Cai, Y. (2024). Energy absorption characteristics of aluminum foam-filled corrugated tube under axial compression loading. *Thin-Walled Structures*, 195, 111333.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111333>
- Yan, W., Durif, E., Yamada, Y. ve Wen, C. (2007). Crushing Simulation of Foam-Filled Aluminium Tubes. *Materials Transactions*, 48(7), 1901–1906.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2007071>
- Yang, C. M. ve Kim, Y. M. (2007). Cyclic behavior of bolted and welded beam-to-column joints. *International Journal of Mechanical Sciences*, 49(5), 635–649.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.09.022>
- Yang, K., SHA, Y. ve YU, T. (2021). Research on Three-point Bending Mechanical Performance of Square Tube Structure Filled with Foam Aluminum. *Mechanics*, 27(6), 442–450.
<https://doi.org/10.5755/j02.mech.28613>
- Yang, T., Zhu, D. ve Chen, C. (2023). Mechanical properties and failure patterns of sandwich panels with AR-glass textile reinforced concrete face sheets subjected to quasi-static load. *Thin-Walled Structures*, 193, 111286.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111286>
- Yang, Y., Yang, P., Zhu, X., Cui, J. ve Liu, X. (2025). Seismic performance of steel frames with different configurations of self-centering joints. *Structures*, 74, 108480. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108480>
- Yazman, Ş. (2021). The effects of back-up on drilling machinability of filament wound GFRP composite pipes: Mechanical characterization and drilling tests. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1535–1552.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.054>
- Yemez, K. (2007). *Experimental Study on the Behaviour of an I-Beam to SHS-Column by T-Stub Bolted Connection*. [Yayımlanmış doktora tezi, Boğaziçi Üniversitesi] YÖK Tez Merkezi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

- Yi, Z., Si-yuan, H., Jia-gui, L., Wei, Z., Xiao-lu, G. ve Jin, Y. (2019). Density gradient tailoring of aluminum foam-filled tube. *Composite Structures*, 220, 451–459. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.026>
- Yin, H., Wen, G., Liu, Z. ve Qing, Q. (2014). Crashworthiness optimization design for foam-filled multi-cell thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 75, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.022>
- Yön, B., Dedeoğlu, İ. Ö., Yetkin, M., Erkek, H. ve Calayır, Y. (2025). Evaluation of the seismic response of reinforced concrete buildings in the light of lessons learned from the February 6, 2023, Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequences. *Natural Hazards*, 121(1), 873–909. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06859-9>
- Youssef, N. F., Bonowitz, D. ve Gross, J. L. (1995). *A survey of steel moment-resisting frame buildings affected by the 1994 Northridge earthquake*. U.S. National Institute of Standards and Technology.
- Yu, J., Yang, Z., Zhao, C. ve Zhang, T. (2024). Seismic performance of aluminum honeycomb sandwich panel buckling-restrained steel plate shear wall. *Journal of Constructional Steel Research*, 215, 108528. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108528>
- Zarei, H. R. ve Kröger, M. (2008). Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application. *Thin-Walled Structures*, 46(2), 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.07.016>
- Zenkert, D. (1995). *An Introduction to Sandwich Construction*. Engineering Materials Advisory Services.
- Zhang, C., Feng, Y. ve Zhang, X. (2010). Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(8), 1380–1386. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60308-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60308-3)
- Zhang, S., Zhang, P., Wang, S. ve Ghasvand, A. (2025). Numerical study on the cyclic behavior of the stiffened steel plate shear walls containing sandwich panels with corrugated core. *Scientific Reports 2025 15:1*, 15(1), 4832-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87709-x>
- Zhao, B., Du, L., Chen, G., Yue, L., Cui, C. ve Ge, M. (2024). Experimental and numerical study on the shear performance of stainless steel-GFRP connectors for use in precast concrete sandwich panels. *Scientific Reports 2024 14:1*, 14(1), 13814-.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-64543-1>

Zhao, Y., Ma, C., Xin, D. ve Sun, M. (2020). Dynamic mechanical properties of closed-cell aluminum foams with uniform and graded densities. *Journal of Materials Research*, 35(19), 2575–2586.

<https://doi.org/10.1557/jmr.2020.157>

Zhao, Y., Yang, Z., Yu, T. ve Xin, D. (2021). Mechanical properties and energy absorption capabilities of aluminium foam sandwich structure subjected to low-velocity impact. *Construction and Building Materials*, 273, 121996.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121996>

Zhong, Y.-L., Li, G.-Q., Xiang, Y. ve Wang, Y.-B. (2023). Seismic behavior of steel beam-column connection with assembled steel rod energy dissipaters. *Journal of Building Engineering*, 76, 107037.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107037>

Zhu, X., Yin, Y., Wang, R. ve Kang, M. (2021). Energy absorption performance of thin-wall aluminum alloy multi-cell and single-cell components filled with aluminum foam. *Engineering Mechanics*, 38(5), 247–256.

<https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0428>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Özgül DEMİRAG

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :Gümüşhane Üniversitesi

Yüksek Lisans Öğrenimi :Gümüşhane Üniversitesi

Bildiği Yabancı Diller :İngilizce

Bilimsel Faaliyetler ve Yayınlar¹ :Demirağ, Ö., ve Öztekin, E. (2026). Comparison of Aluminum Composite Sandwich and Traditional Reinforced Concrete Slab Frame Systems in Terms of Dynamic and Global Behavior. Buildings, 16(4), 702.

İş Deneyimi

Stajlar :Gümüşhane Bayındırlık ve İskan İl Müdürlüğü

Projeler :

Çalıştığı Kurumlar :Gümüşhane Üniversitesi

Tarih :05.03.2026