

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LİFLİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERDEN YAPILMIŞ
KAFES SİSTEMLERİN STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep DEĞERMENCİ

EKİM 2019
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Zeynep DEĞERMENCİ Tarafından Hazırlanan**

**LİFLİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERDEN YAPILMIŞ KAFES
SİSTEMLERİN STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2019 gün ve 1806 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Şevket ATEŞ

Üye : Prof. Dr. Süleyman ADANUR

Üye : Doç. Dr. Özlem ÇAVDAR







Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

“Lifli Polimer Kompozit Malzemelerden Yapılmış Kafes Sistemlerin Statik ve Dinamik Analizi” konulu bu araştırmayı bana öneren ve konu üzerinde çalışma fırsatını veren, bilimsel düşünce, bilgi birikimi ve tecrübelerinden yararlandığım danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Süleyman ADANUR başta olmak üzere, Prof. Dr. Şevket ATEŞ'e, Dr. Öğretim Üyesi Murat GÜNAYDIN'a ve Araş. Gör. Fezayil SUNCA'ya ve öğrenimim boyunca emeği geçen bütün hocalarıma sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam ve yüksek lisans eğitimi süresince, bilgi ve deneyimlerimizi paylaştığım ve her daim paylaşacağımıza inandığım değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Zeynep DEĞERMENÇİ

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Lifli Polimer Kompozit Malzemelerden Yapılmış Kafes Sistemlerin Statik ve Dinamik Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanın Prof. Dr. Suleyman ADANUR’ un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gosterdığımı, çalışma suresinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her trl yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 30/10/2019

Zeynep DEĞERMENÇİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Çalışması	3
1.2.1. Kafes Sistemler ile İlgili Çalışmalar	3
1.2.2. Lifli Polimer Kompozit Malzemeler ile İlgili Çalışmalar	4
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği.....	8
1.4. Kafes Sistemler.....	8
1.4.1. Düzlem Kafes Sistemler	10
1.4.2. Uzay Kafes Sistemler	11
1.5. Lifli Polimer (LP) Kompozit Malzemeler.....	13
1.5.1. Lifler.....	16
1.5.1.1. Karbon Lifler.....	17
1.5.1.2. Cam Lifler	19
1.5.1.3. Aramid Lifler.....	20
1.5.2. Matris.....	20
1.6. LP Kompozit Malzeme ile Mevcut Yapılarda Onarım ve Güçlendirme.....	22
1.7. LP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	23
1.8. Pultrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş LP Kompozit Malzemelerin Özellikleri	25
1.9. Pultrüzyonik LP Kompozitlerin İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı	28

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	30
2.1.	Giriş	30
2.2.	Düzlem Kafes ve Uzak Kafes Sistem Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması	30
2.3.	Lifli Polimer Kompozit Malzeme Kesit Alanlarının Belirlenmesi	32
2.3.1.	Eşdeğer Rijitlik Yöntemi	32
2.3.2.	Eşdeğer Dayanım Yöntemi	33
2.3.3.	Seçilen Profil Tabloları	35
2.3.4.	Statik Analiz Denklemi	36
2.3.5.	Dinamik Analiz Denklemi	37
2.4.	Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	37
2.4.1.	Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	37
2.4.2.	Uzak Kafes Sistem İçin Elde Edilen Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	38
2.5.	Statik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	61
2.5.1.	Yerdeğiştirmeler	61
2.5.1.1.	Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Yerdeğiştirmeler	61
2.5.1.2.	Uzak Kafes Sistem İçin Elde Edilen Yerdeğiştirmeler	61
2.5.2.	Eksenel Kuvvetler	64
2.5.2.1.	Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler	64
2.5.2.2.	Uzak Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler	64
2.6.	Dinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	67
2.6.1.	Yerdeğiştirmeler	67
2.6.1.1.	Düzlem Kafes Sistemde Elde Edilen Yerdeğiştirmeler	67
2.6.1.2.	Uzak Kafes Sistem İçin Elde Edilen Yerdeğiştirmeler	71
2.6.2.	Eksenel Kuvvetler	75
2.6.2.1.	Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler	75
2.6.2.2.	Uzak Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler	79
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
4.	KAYNAKLAR	87
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

LİFLİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERDEN YAPILMIŞ KAFES SİSTEMLERİN STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Zeynep DEĞERMENCİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Süleyman ADANUR
2019, 91 Sayfa

Bu çalışmada, pultrüzyonik lifli polimer kompozit malzemelerden yapılmış kafes sistemlerin statik ve dinamik analizi incelenmiştir. Çelik, cam lifli polimer, karbon lifli polimer ve aramid lifli polimer malzeme kullanılarak inşa edilmiş düzlem kafes ve uzay kafes sistemlerin statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Cam lifli polimer, karbon lifli polimer ve aramid lifli polimer malzemelerin kesit alanları; çelik kesit alanları kullanılarak Eşdeğer Rijitlik yöntemine ve Eşdeğer Dayanım yöntemine göre elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kafes Sistem, Pultrüzyon Lifli Polimer Kompozit, Çelik, Cam Lifli Polimer, Karbon Lifli Polimer, Aramid Lifli Polimer, Statik Analiz, Dinamik Analiz, Eşdeğer Rijitlik, Eşdeğer Dayanım

Master Thesis

SUMMARY

**STATIC AND DYNAMIC ANALYSES OF TRUSS STRUCTURES MADE ON
FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

Zeynep DEĞERMENÇİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Süleyman ADANUR
2019, 91 Pages

In this study, static and dynamic analyses of truss systems made of pultruded fiber reinforced polymer composite materials were investigated. Static and dynamic analyses of plane truss and space truss systems constructed using steel, glass fiber reinforced polymer, carbon fiber reinforced polymer and aramid fiber reinforced polymer material were performed. The results obtained from the analyses are given comparatively. The cross-sectional areas of the glass fiber reinforced polymer, the carbon fiber reinforced polymer and the aramid fiber reinforced polymer materials were obtained using the steel cross-sectional area to the Equivalent Stiffness method and Equivalent-Strength method.

Key Words: Truss System, Pultruded Fiber Reinforced Polymer Composite, Steel, Glass Fiber Reinforced Polymer, Carbon Fiber Reinforced Polymer, Aramid Fiber Reinforced Polymer, Static Analysis, Dynamic Analysis, Equivalent-Stiffness, Equivalent-Strength

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. LP kompozit malzeme ve çeliğin gerilme - şekildeğiştirme diyagramı (Courtesy of ACI 440R-07).....	2
Şekil 1.2. Çok bilinen bazı kafes sistem türleri ve bunların kullanıldığı yerler	9
Şekil 1.3. Birim düzlem kafes sistem (Duranoğlu, 2019)	10
Şekil 1.4. Uzay kafes sistem modülü (Duranoğlu, 2019).....	12
Şekil 1.5. Uzay kafes sistem düğüm noktası detayı (Duranoğlu, 2019).....	13
Şekil 1.6. Lifli polimer kompozit yapısı.....	14
Şekil 1.7. Cam, karbon ve aramid lif örnekleri (Caggegi, 2013)	16
Şekil 1.8 Farklı türdeki lifler için gerilme-şekil değiştirme diyagramları (Caggegi, 2013).....	17
Şekil 1. 9. Kolonlarda LP ile güçlendirme teknikleri.....	23
Şekil 1.10. Pultrüzyonik profil örnekleri.....	26
Şekil 1.11. Pultrüzyonik I-profiller. (Courtesy of Racquel Hagan.)	26
Şekil 1.12. Pultrüzyon süreci.....	27
Şekil 1.13. Pultrüzyon LP malzemeli yaya köprüsü (ET Techtonics.) (Akıncı, 2010) 29	
Şekil 2.1. Düzlem kafes sistem sonlu eleman modeli	31
Şekil 2.2. Uzay kafes sonlu eleman modeli.....	31
Şekil 2.3. Düzlem kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri.....	43
Şekil 2.4. Düzlem kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri	44
Şekil 2.5. Düzlem kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri	46
Şekil 2.6. Düzlem kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri.....	47
Şekil 2.7. Uzay kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri.....	49

Şekil 2.8.	Uzay kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri.....	52
Şekil 2.9.	Uzay kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri.....	55
Şekil 2. 10.	Uzay kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri.....	58
Şekil 2.11.	Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler	62
Şekil 2.12.	Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler	62
Şekil 2.13.	Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler	63
Şekil 2.14.	Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler	63
Şekil 2.15.	Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen eksenel kuvvetler	65
Şekil 2. 16.	Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen eksenel kuvvetler	65
Şekil 2. 17.	Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen eksenel kuvvetler	66
Şekil 2.18.	Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen eksenel kuvvetler	66
Şekil 2.19.	1992 Erzincan depreminin Erzincan İstasyonundan kaydedilen ivme kaydının ivme-zaman grafiği	67
Şekil 2.20.	Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	68
Şekil 2.21.	Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	68
Şekil 2.22.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	69
Şekil 2.23.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	69
Şekil 2.24.	Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	70

Şekil 2.25.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	70
Şekil 2.26.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	71
Şekil 2.27.	Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	72
Şekil 2.28.	Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	72
Şekil 2.29.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	73
Şekil 2.30.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	73
Şekil 2.31.	Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	74
Şekil 2.32.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	74
Şekil 2.33.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	75
Şekil 2.34.	Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi.....	76
Şekil 2.35.	Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi.....	76
Şekil 2. 36.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi.....	77
Şekil 2.37.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi.....	77
Şekil 2.38.	Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi.....	78

Şekil 2.39.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	78
Şekil 2.40.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	79
Şekil 2.41	Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	80
Şekil 2.42.	Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	80
Şekil 2.43.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	81
Şekil 2.44.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	81
Şekil 2.45.	Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	82
Şekil 2.46.	Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	82
Şekil 2.47.	Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum aksenal kuvvetin zamanla değişimi.....	83

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Genel karbon lifi sınıflarının yaklaşık özellikleri (Akıncı, 2010).....	18
Tablo 1.2. Lifli polimer ve çeliğin malzeme özelliklerinin karşılaştırılması (Caggegi, 2013).....	20
Tablo 1.3. Seçilen bazı termosetlerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Günaydın, 2016).....	21
Tablo 1.4. LP kompozit malzemelerin birim ağırlık değerleri (kN/m^3).....	24
Tablo 1.5. LP kompozitler için ısıl genleşme katsayılarının değerleri.....	24
Tablo 2.1. Cam, karbon, aramid LP kompozit malzeme özellikleri (URL-1).....	32
Tablo 2.2. Düzlem kafes sistem için eşdeğer rijitlik yöntemi ile hesaplanan kesit alanları.....	33
Tablo 2.3. Uzay kafes sistem için eşdeğer rijitlik yöntemi ile hesaplanan kesit alanları.....	33
Tablo 2. 4. Düzlem kafes sistem için eşdeğer dayanım yöntemi ile hesaplanan kesit alanları.....	34
Tablo 2. 5. Uzay kafes sistem için eşdeğer dayanım yöntemi ile hesaplanan kesit alanları.....	34
Tablo 2.6. Eşit kollu L profil tablosu (URL-3).....	35
Tablo 2.7. Boru kesit için profil tablosu (URL-3).....	36
Tablo 2.8. Kutu kesit için profil tablosu (URL-4).....	36
Tablo 2.9. Düzlem kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - Eşdeğer rijitlik yöntemine göre periyot ve frekans değerleri.....	39
Tablo 2.10. Düzlem kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - Eşdeğer dayanım yöntemine göre frekans ve periyot değerleri.....	40
Tablo 2.11. Uzay kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - eşdeğer rijitlik yöntemine göre periyot ve frekans değerleri.....	41
Tablo 2.12. Uzay kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - eşdeğer dayanım yöntemine göre periyot ve frekans değerleri.....	42

SEMBOLLER DİZİNİ

$E_{\text{çelik}}$: Çelik elastisite modülü
$A_{\text{çelik}}$: Çelik kesit alanı
E_{cam}	: Cam elastisite modülü
A_{cam}	: Cam kesit alanı
E_{karbon}	: Karbon elastisite modülü
A_{karbon}	: Karbon kesit alanı
E_{aramid}	: Çelik elastisite modülü
A_{aramid}	: Aramid kesit alanı
E_{LP}	: Lifli polimer elastisite modülü
E_m	: Matris elastisite modülü
V_f	: Lif hacimsel oranı
V_m	: Matris hacimsel oranı
G	: Kayma modülü
ν	: Poisson oranı
α_t	: Isıl genişleme katsayısı
ρ	: Yoğunluk
LP	: Lifli polimer
D	: Boru enkesitin dış çapı
d	: Boru enkesitin iç çapı
t	: Boru ve kutu enkesitli elemanların et (cidar) kalınlığı
$[M]$: Kütle matrisi
$[C]$: Sönüm matrisi
$[K]$: Rijitlik matrisi
$\{\ddot{U}\}$: İvme vektörü
$\{\dot{U}\}$: Hız vektörü
$\{U\}$: Yerdeğiştirme vektörü
$\{F\}$: Yük vektörü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

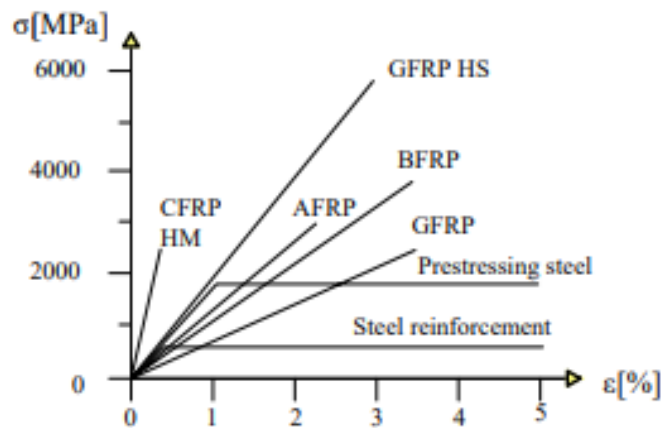
Çeliğin yapı mühendisliğine girmesi ile yapıların şekilleri büyük bir değişime uğramıştır. Daha önce hayal bile edilemeyen, geniş açıklıklara sahip yapıları üretmek mümkün olmuştur. Bu başarıyı, günümüzde çok büyük açıklıklı köprüler, çatı makasları ve uzay kafes gibi sistemlerde görmekteyiz. Özellikle çelik uzay kafes sistemler ile mimari projede, mümkün olduğunca kolonsuz, yüksek ve geniş açıklıklı mekanlar veya alanlar inşaa etmek ve bu alanların üstünü kapatma arayışının en başarılı örnekleri görülmektedir.

Bununla beraber yapılarda kullanılacak malzemeler, sağlam olmalı ve yüksek mukavemete sahip olmalıdır. Malzemenin mukavemet değeri, yük ile deformasyon arasındaki orantı ile belirlenir. Bundan dolayı yüksek mukavemetli ürünler tercih edilmelidir. Yapıda kullanılacak malzemeye yük uygulanıp sonra kaldırıldığında, yüklenme durumunda gözlenen deformasyon ortadan kalkıyorsa bu tip malzemeler genel olarak elastik yapıli malzeme olarak tanımlanırlar. Elastik malzemede, yüklenme durumunda yük ile deformasyon arasında eğer sabit bir oran varsa, bu tip malzemeye lineer elastik malzeme denir. Ayrıca, malzeme hafif yani, yoğunluğu düşük olmalıdır. Hafif malzemeler yapıya büyük bir avantaj sağlamaktadır. Hafif malzemelere hareketli yükler karşısında daha az kuvvet gelmektedir. Bu durumun anlattığı gibi yapıda ağırlık önemli bir faktör olmakla birlikte yaygın olarak kullanılan çeliğin, aşınmaya eğilimli olduğu ve çeliğin özelliklerinin korunabilmesi için alınacak önlemlerin maliyet açısından büyük yükler getirdiği fark edilmiştir. Çeliğin yoğunluğunun fazla olması da diğer bir dezavantajdır. Örneğin; yeni tür malzemeler sayesinde 20.yüzyılda geliştirilmeye başlanan uçakların, sadece yüksek kuvvetlere dayanmayıp, aynı zamanda hafifliklerine de şahit olunmuştur. Buradan çıkarılacak sonuç, yapılarda da kullanılacak malzeme çelikten daha az yoğunluğa sahip fakat onun kadar yüksek dayanım ve mukavemete sahip olmalıdır. Bu amaçla, 19.yüzyılın sonlarından itibaren yapılarda kullanılmak amacıyla çeşitli malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Bunlardan biri olan alüminyum yoğunluk bakımından çeliğin dörtte biri olmasına rağmen mukavemeti de aynı oranda düşüktür. Bu yüzden yapıda taşıyıcı olarak kullanılmamaktadır. Alüminyumun tersine, titanyum ve bakır çeşitli yapılarda kullanılmıştır (Yıldırım, 2011).

Bu nedenlerden dolayı beton ve çelik gibi yapı malzemelerine alternatif olarak kullanılacak olan lifli polimer kompozit malzemeler Amerika Birleşik Devletleri'nde 1940'larda polimer tipi takviyeli reçine malzemesi geliştirilerek yaygınlaşmaya başlamıştır. II. Dünya Savaşı'ndan sonra, elyaf polimerlerinin uygulanması askeri ve havacılık endüstrisi ile sınırlı kalmıştır. 1960 yılında, fiber polimer endüstrisindeki gelişme hızla ilerlemiştir. Yapısal endüstrinin gerektirdiği temel özellik olan aşındırıcı olmayan malzemeler üretilmiştir. Bu sebeple 1960'lı yıllardan itibaren yapı endüstrisinde, köprülerde, deniz duvarları gibi agresif kimyasal ortamlara maruz kalan yapı elemanlarında elyaf takviyeli lifli polimer kompozit malzemeler kullanılmıştır.

Lifli polimer kompozit malzemelerin dayanımı yüksek dayanımlı çelik malzemenin çekme dayanımına göre 2 kat daha fazladır. Elastisite modülü, çeliğin % 80'i kadardır. Ağırlığı ise çeliğin ağırlığının %20'sidir. Lifli polimer kompozit malzemelerin yorulmaya ve korozyona karşı direnç özelliği ile termal etkilere karşı gösterdiği dayanım önemli özellikleri arasındadır. Lifli polimer kompozit malzemeler, özellikle aşındırıcı ortamlarda, yüksek korozyon direncinden dolayı çelik takviyeye alternatif olmaktadır. Lifli polimer kompozit liflerinin avantajları yüksek mukavemet ve hafif korozyon direnci, boyutsal stabilite, düşük ısı iletkenliği, iletkenliğin olmaması, elektromanyetik şeffaflık, darbe dayanımı ve düşük kullanım ömrü maliyetleridir.

İnşaat mühendisliği yapılarında baskın olan kompozit lifler; karbon lifli polimer, cam lifli polimer, aramid lifli polimer ve bazalt lifli polimer olarak sıralanabilir. Farklı kompozit liflerin ve çeliğin gerilme şekildeğiştirme diyagramı Şekil 1.1' de verilmiştir.



Şekil 1.1. LP kompozit malzeme ve çeliğin gerilme – şekil değiştirme diyagramı (Courtesy of ACI 440R-07)

1.2. Literatür Çalışması

1.2.1. Kafes Sistemler ile İlgili Çalışmalar

Ayhün (2006) “Uzay Kafes Sistemlerin Farklı Bölge Koşullarında Davranışının İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Proje Çözümleri” adlı yüksek lisans tez çalışmasında, bir çelik yapı projesini farklı çözüm yöntemleri kullanarak yapıya etkisini incelemiştir. Türkiye’nin farklı on bölgesini seçerek, belirlediği projeyi bu bölgelere uyarlayarak analizlerini yapmıştır.

Ülker (2007), çift katmanlı uzay kafes sistemlerinin, statik, dinamik analizini ve tasarımını yaparak uzay kafes sistemlerin statik ve teorik özellikleri ile ilgili detaylı çalışma yapmıştır.

Eşsizoglu (2008), “Uzay Kafes Sistemlerinin Sayısal Yöntemle Analizi” adlı yüksek lisans tez çalışmasında, SAP2000 programında modelleme yaparak küçük çaplı profiller kullanarak maliyeti ve ölü yükü azaltmaya çalışmıştır. Ölü yükün azalmasına rağmen kar ve rüzgar yüklerinden dolayı, sistemin analizinde kolon ile çubukların yapıyı taşıyamadığını belirlemiştir. Maliyeti düşürmek için çubuk ve kolon değerlerini arttırarak en güvenli ve en ekonomik boru ebatlarını belirlemeye çalışmıştır.

Vural (2012), “Uzay Kafes Sistemlerinin Kar Yükleri Yönünden İncelenmesi: Stadyum Çatısı Örneği” adlı yüksek lisans tez çalışmasında, Doğu Karadeniz Bölgesinde uygulanmış uzay kafes çatı sistemini mevcut projesine uyararak analizini yapmış ve düşey yükler altında kesit yeterliliklerini araştırmıştır.

Demirlek (2014), “Sıcaklık etkisi altındaki düzlem kafes sistemlerin optimum tasarımı” adlı yüksek lisans tez çalışmasında, düzlem kafes sistemlerde sıcaklık etkilerinin altında optimum tasarımını çalışmıştır. Çubuk elemanların kesitleri tasarım değişkeni olarak seçilmiş ve toplam maliyetin bir göstergesi olarak çubuk kesit alanlarının toplamı seçilmiştir.

Alçıçek ve Vatansever (2015), “Uzay kafes çatı sistemlerinin artan düşey yükler altında doğrusal olmayan davranışı” adlı çalışmalarında, çelik uzay kafes sistemlerde yağmur yükü, kar yükü gibi yüklerin tahliye edilememesinin ve belli bölgelerde birikmesinin sistemlerin göçmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çubuk eleman narinliklerinin ve çubuk eleman başlangıç kusurunun da çubuk eksenel basınç dayanımlarının belirlenmesinde etkin olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, plan boyutu 15mx15m olan bir uzay kafes çatı sistemi iki farklı durum dikkate alınarak tasarlanmış ve düşey doğrultuda artan düşey yükler altında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir.

1.2.2. Lifli Polimer Kompozit Malzemeler ile İlgili Çalışmalar

Wang vd. (1994) yaptıkları çalışmada, dayanıklı, hafif ve düşük maliyetli pultrüzyonik yapısal kompozitlerin inşaat uygulamaları için uygun malzemeler olduğunu belirtmiş ve farklı konumlardan kesilmiş farklı genişlikteki kupon örnekleri kullanılarak, sıkıştırılmış kompozit I-şekilli yapı elemanlarının gerilme davranışını karakterize etmek için deneysel bir program uygulamıştır. Malzeme dayanımı, modül ve başarısızlık mekanizmalarının sonuçları rapor edilmiştir. Örnek genişliğinin ve orijinal konumunun test verilerinin varyasyonu üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, ortalama güç ve modül değerleri bu faktörlerden önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür. Örnek seçimi ve yapısal tasarım için malzeme özellik verilerinin tahmini için önerilen yöntemler tartışılmıştır.

Fam vd. (2003) yaptıkları çalışmada, dikdörtgen kesitli CTP elemanın içerisini betonla doldurarak hibrit yapı elde etmişler ve kolon kiriş gibi kullanmışlardır. Bazı elemanları tamamıyla bazılarını ise kısmen betonla doldurup, hazırlanan numunelere farklı eksantrik yükler uygulayarak deneyler yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda deney numunelerine ait çeşitli grafikler elde etmişler ve tamamen dolu profiller ile kısmen dolu profiller arasında karşılaştırmalar yapmışlardır. Deneyler sonucunda yarı dolu profil kirişler tam dolu profiller ile benzer rijitlik göstermiş fakat eğilme deneylerinde yarı dolu profiller daha düşük değerlerde kırılmıştır.

Neto vd. (2006) yaptıkları çalışmada, CTP kiriş tasarımlarında eğilme davranışlarını incelemesinde dayanabilecekleri en yüksek yük yerine, çalışma yükleri altında izin verilen sehim miktarları göz önüne almıştır. Yaptıkları çalışmada CTP profillerin eğilme davranışları analitik, deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Profiller üzerinde üç nokta eğilme testleri uygulanarak eğilme dayanımları ve kayma modülleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Öztürk (2006), CTP profillerle depreme dayanıklı yapı modelleri ve analizlerini yapmış ve yapılan çalışmada CTP malzemesinin özelliğinden dolayı oluşan kesme kuvvetlerine karşı dayanım zayıflığını gidermek için sorunun tespit edildiği kolonların, kat kirişlerinin, döşeme kirişlerinin, döşeme tali kirişlerinin ve aşıkların kesit alanını değiştirilmesi yoluna gidilmiş, ayrıca çatı makaslarına stabilite çubukları eklenmiştir. Yapılan bu değişikliklerin yanısıra yapının geometrik şekli, zemin cinsi, yük değerleri ve uygulanan yük kombinasyonları aynı kalmak şartıyla SAP 2000 programında tekrar simüle

edilerek çözülmüştür. Yapılan çözümlemede yapı elemanların kesitleri güvenlik tahkiklerinden geçmiş ve böylece modernizasyon sonunda yetersiz kesit problemi ortadan kaldırılmıştır.

Keller vd. (2007) pultrüzyonik cam lifli polimerden yapılmış kafes köprünün 1997 ve 2005 yılları arasındaki performansını incelemiştir. Köprüdeki gözlemsel muayenelerden, darbeden kaynaklanan yerel ezilmeler, yapının uygun olmayan şekilde depolanması ve kaldırılması nedeniyle yerel çatlaklar, lif çiçeklenmeleri, kesilmiş yüzeylerin bozulması gibi hasarların olduğu görülmüştür. Çalışma sonunda, dayanıklılığın temel olarak uygun olmayan yapı hatalarından etkilendiğini; doğru üretilmesi ve işletilmesi durumunda, pultrüzyonik cam lifli polimer yapıların iyi bir uzun süreli performans ve dayanıklılık sunabileceği gösterilmiştir.

Sarıbyık vd. (2008) çalışmalarında, pultrüzyon metodu ile üretilmiş CTP profillerle sera modellemesi oluşturularak sera modellemesinde aşıklarda kutu profil kullanmıştır. Bu profiller kullanılmadan önce eğilme deneyine tabi tutulmuş ve deney sonucunda kutu profillerde lokal kırılmalar meydana gelmiş ve bu durum numunelerin eğilme dayanımlarında düşüşe neden olmuştur. Numunelerde lokal kırılmaların önlenmesi amacıyla aynı profillerden kesilen dolu kesitli numuneler deneye tabi tutulmuş deney sonucunda numunelerin eğilme gerilmelerinde artışlar görülmüştür.

Adanur vd. (2011) çalışmalarında, LP kompozitlerin, asma köprülerde uygulanabilirliği üzerine çalışma yapmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizler yapılmış ve analizlerde aynı köprü, LP ve çelik malzeme kullanılarak iki farklı şekilde modellenmiştir. Çalışmada eşdeğer rijitlik modeli kullanılmıştır. Fatih Sultan Mehmet Köprü'sü örnek olarak alınmıştır. Statik analizlerde köprünün ölü ağırlığı dikkate alınmıştır. Dinamik analizlerde ise 1999 Kocaeli Depremi dikkate alınmış ve ilk 20 mod kullanılmıştır. Dinamik analizde sönüm oranı LP için %5 ve çelik için %2 olarak belirlenmiştir. Çelik için köprü modellemesinde izotropik özellikler, LP köprü için ise ortotropik özellikler tercih edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda her iki köprünün, farklı tepkiler verdiği görülmüştür. Çelik köprü için tepki değerlerinin, LP'li köprüye oranla daha fazla olduğu ifade edilmiştir. LP kompozitlerin hafif ağırlıklı olması sebebiyle; LP kompozit köprü modelinin frekans değerlerinin, çelik köprü frekans değerlerinden daha fazla çıktığı ortaya çıkarılmıştır.

Russo (2012) yaptığı çalışmada, büyük bir pultrüzyonik yapısal elemanlardan yapılan LP yapısında bağlantılar için kullanılan çelik cıvatalar hariç, tamamen sıkıştırılmış LP elemanları ile inşa edilmiş bir binanın dinamik özelliklerinin analizini elde etmiştir.

Bai ve Yang (2013) tamamıyla kompozit uzay kafes oluşturmak için eğik ve başlık elemanlarını bağlamada pultrüzyonik cam lifli polimerden yapılmış bir bağlantı elemanı önermişlerdir. Önerilen kafes eleman oluşturularak statik olarak test edilmiş ve yük-yerdeğiştirme davranışı kaydedilmiştir. Ayrıca çalışma sonlu eleman analizi ile de doğrulanmıştır.

Heshmati vd. (2015) yaptığı çalışmada, LP laminatlarını kullanarak mevcut inşaat mühendisliği yapılarının güçlendirilmesi ve onarımı üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Polimer bilimindeki gelişmeler ile, yapıştırıcı yapıştırma bu uygulamalarda ortak bir birleştirme teknolojisi haline geldiğini belirtmiştir. Yapışkan bağlanmış LP-çelik bağlantıların kısa vadeli davranışını ele alan çok sayıda çalışmaya rağmen, uzun vadeli performansa ilişkin belirsizlik devam etmektedir. Bu bilgi boşluğu, çelik yapıların güçlendirilmesi ve güçlendirilmesi için LP'lerin yaygın olarak uygulanmasını engelleyen kritik bir engel olarak kabul edilir. Yaptığı çalışmada, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan LP-çelik bağlantıların dayanıklılığı açısından son teknolojiyi sunmuştur. Bağlantıların dayanıklılığı ile ilgili önemli etken faktörler gözden geçirdi ve farklı hasar mekanizmaları üzerine görüş bildirdi. Ayrıca, bu bağlantıların birleşik çevresel dayanıklılıklarına ilişkin incelemeler eleştirel bir şekilde gözden geçirmiş ve bulgular sunmuştur.

Landessman vd. (2015), Brezilya endüstrisi tarafından üretilen Cam Lifli Polimer (CLP) elemanının mekanik özelliklerinin yapısal uygulamalar için sınıflandırılması için mekanik özelliklerinin belirlenmesini amaçlayan deneysel bir araştırma yürütmüştür. Bu araştırmanın deneysel nihai amacı, CLP numuneleri için elde edilen mekanik özellikleri bir ön tasarım kılavuzuna bağlamanın olasılığını araştırmaktır. Yükleme tipi koşullarının ve lif içeriğinin, mukabil nihai mukavemet üzerinde ihmal edilemeyecek etkileri olabilecek mekanik özellikler üzerindeki etkisi ve dolayısıyla tasarım yöntemleri ile öngörülmesi üzerine araştırma yapmıştır. Bu araştırmanın kapsamı, CLP numunelerini, diğer mekanik özellikleri ve sıcaklığın etkisini kapsayacak şekilde oluşturulmuştur.

Günaydın (2016) yaptığı çalışmada, onarılmış ve lifli polimer kompozit malzemeler ile birlikte güçlendirilmiş betonarme yapıların dinamik davranışları analitik ve deneysel yöntemlerle inceledi. Bu amaçla, laboratuvar ortamında inşa edilen ölçekli betonarme

binalar üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirdi. Laboratuvar ortamında özdeş üç adet ölçekli inşa edilen betonarme binanın dinamik davranışlarını hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için deneysel yöntemler kullanarak belirledi. Binaların üç boyutlu sonlu eleman modelleri hasarsız, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için oluşturarak dinamik davranışları analitik olarak belirleyerek binaların sonlu eleman modellerini deneysel sonuçlara göre iyileştirdi. Ayrıca, binaların başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri kullanarak hasarsız, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için doğrusal olmayan dinamik davranışları elde edildi. Çalışma sonucunda, onarım ve lifli polimer kompozit malzeme kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme uygulamalarının betonarme binaların dinamik davranışlarını iyileştirmede oldukça etkili olduğu sağlandı.

Ding vd. (2018) kafes yapılar için üretilmiş pultrüzyonik bazalt LP elemanların aksel çekme ve basınç altındaki mekanik davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla bazalt LP elemanların çekme ve basınç dayanımları test edilmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak, narin bazalt LP elemanların basınç dayanımını tahmin etmek için kararlılık denklemi türetilmiş ve doğrulanmıştır.

Topçu vd. (2018) çalışmalarında, pultrüzyon metodu ile üretilmiş CTP profillerini kullandı. Düşük karbonlu çelik ve pultrüzyon metodu ile üretilmiş olan silindirik CTP numuneler kullanarak mekanik davranışları inceledi. Aynı çaplara sahip düz silindirik ve düzgün yüzeye sahip yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış CTP numuneleri ile aynı çaptaki çelik numuneleri sürünme test metodu ile karşılaştırdı. 24 saat süreyle oda sıcaklığında ve 45 MPa sabit statik yük altında deney gerçekleştirildi. Statik sürünme testinde sinüzidal bir yükleme uygulandı. CTP numunesinde uzama oranı 0,532mm (% 10,6), yaşlandırılmamış CTP numunesinde uzama oranı 0,355mm (% 7,1) iken çelik numunede bu oran 0,294 mm (% 5) olarak görüldü. CTP profillerin avantajları dikkate alındığında inşaat sektöründe kullanımının önemi ortaya konuldu. CTP malzemedен üretilmiş numunelere ait test verileri, çelik konstrüksiyon çözümleri ile karşılaştırılarak alternatif çözüm olma durumları belirlendi.

Hizam vd. (2019) mekanik bağlı geçiş civatası kullanılarak bağlanmış pultrüzyonik cam lifli polimer kafes sisteminin deneysel ve analitik davranışını incelemiştir. Kompozit kafes kirişler, birleştirilmiş alanların yakınına yapıştırılarak bağlanmış mekanik eklerin sokulduğu, pultrüzyonik cam lifli polimerin dikdörtgen içi boş bölümleri kullanılarak birleştirilmiştir. Amerikan standartına göre pultrüzyonik cam lifli polimer kafes

elemanlarının çekme, basınç ve eğilmedeki teorik dayanım limitlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu oldukları görülmüştür.

Zhu vd. (2019) düğüm noktası rijitliğinin yeni hibrit LP-alüminyum uzay kafes sisteminin yerdeğiştirmeleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada yeni bir hibrit uzay kafes sistemi önerilmiş ve önerilen bu hibrit uzay kafes sistemi kullanılarak bir hangar yapısının tasarımı gerçekteştirilmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu çalışmada pultrüzyon metoduyla elde edilmiş lifli polimer kompozit malzemelerden yapılmış kafes sistemlerin statik ve dinamik davranışlarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla pultrüzyonik cam lifli polimer, karbon lifli polimer ve aramid lifli polimer malzemelerden yapılmış kafes sistemlerin statik ve dinamik analizleri gerçekteştirilmiştir. Aynı kafes sistemlerin çelik malzemedan yapılması durumu için de analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda kafes sistemler için elde edilen yerdeğiştirme ve eksenel kuvvetler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çelik malzeme için kullanılan kesit alanları dikkate alınarak LP kompozit malzemelere ait kesit alanları, eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemlerine göre elde edilmiştir. Bu kapsamda çalışmalar bölümler halinde sunulmuştur. Birinci bölümde lifli polimer kompozit malzeme özellikleri, literatür çalışmaları ve pultrüzyon yöntemi sunulmuştur. İkinci bölümde kafes sistem sonlu eleman modellerinin özellikleri; cam, karbon, aramid için malzeme özellikleri, kullanılacak LP kompozit malzeme kesit alanları verilmiş, mod bilgileri, elde edilen mod Şekilleri karşılaştırmalı verilmiştir; statik ve dinamik analizlerde elde edilmiş bulgulara bağlı olarak sonuçlar ortaya konmuştur. Yerdeğiştirme ve eksenel kuvvetler her bir lifli polimer malzeme için elde edildikten sonra Őekillerle verilmiştir.

1.4. Kafes Sistemler

Yapı teknolojilerinde hafif, hızlı ve endüstrileşmiş çözümler arayışı uzay kafes sistemlerin doğmasına sebep olmuştur. Bu sistemler yapılarda büyük açıklıkların kolonsuz ve hafif bir yapı sistemi ile geçilmesini sağlayarak işlevsel olarak yapıların daha esnek ve kullanışlı olmasını sağlamaktadır.

Kafes sistemler, doğru eksenli çubukların, mafsallar aracılığı ile birbirlerine bağlandığı ve yüklerin sadece mafsal noktalarına etki ettiği kabul edilen çok parçalı taşıyıcı sistemlerdir. Diğer yapı sistemlerine göre çok daha hafif olmaları nedeniyle, köprü, çatı makası gibi mühendislik problemlerinde tercih edilirler.

Kafes sistemleri oluşturan çubukların birleşim (mafsal) noktaları kaynaklı, bulonlu ya da perçinli olabilir ve düğüm noktası olarak adlandırılır.

Kafes sistemlere etkiyen dış yükler hep düğüm noktaları üstünden taşıyıcı sisteme aktarılır. Bu nedenle kafes sistemde çubuklar sadece basınç ya da çekme biçiminde eksenel kuvvet aktarırlar.

Kafes sistemler;

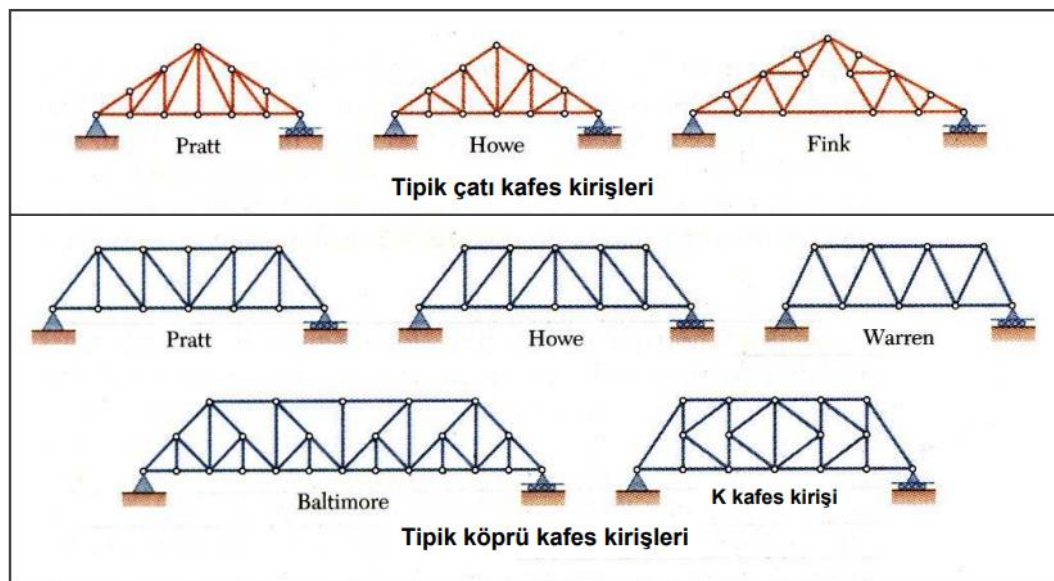
- Düzlem Kafes Sistem
- Uzay Kafes Sistem

şeklinde iki gruba ayrılırlar. Bunlar da kendi içinde oluşumlarına göre ;

- Basit Kafes Sistem
- Bileşik Kafes Sistem
- Karmaşık Kafes Sistem

olarak ayrılırlar.

Eğer kafes sistem belli bir düzlem içinde yer alıyorsa, buna düzlem kafes sistem denir. Uygulamada sıklıkla üç boyutlu kafes sistemlere rastlamak mümkündür. Şekil 1.2.'de bazı düzlem kafes sistemler görülmektedir.



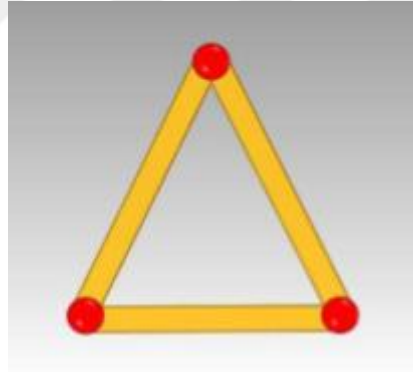
Şekil 1.2. Çok bilinen bazı kafes sistem türleri ve bunların kullanıldığı yerler

1.4.1. Düzlem Kafes Sistemler

Düzlem kafes sistemler; yalnız normal kuvvet taşıyan doğru eksenli çubukların, mafsallı düğüm noktaları aracılığı ile birbirine bağlandığı, yüklerin ve çubuk ağırlıklarının sadece düğüm noktalarına etki ettiği varsayılan çok parçalı taşıyıcı sistemlerdir (Omurtag, 2015).

Düzlem kafes sistemler; iki boyutta teşkil edilmiş sistemlerdir. Bütün çubukları, düğüm noktaları ve yükleri aynı düzlem üzerinde bulunur. Düzlem kafes sistemler; basit kafes kiriş, çıkmalı kafes kiriş, konsol kafes kiriş, kafes çerçeve, üç mafsallı kafes çerçeve, kemer kafes kiriş veya gerber kafes kiriş şeklinde olabilirler (Omurtag, 2015).

Düzlem kafes sistemini oluşturan en basit yapı, üç çubuğun uç kısımlarındaki mafsallı düğüm noktalarından birleştirilerek oluşturulan üçgen yapıdır (Şekil 1.3). Birbirine mafsallarla bağlı üç çubuğun oluşturduğu üçgen en basit anlamda bir düzlem kafestir ve buna rijit çerçeve denir. Buradaki rijit çerçeve tanımı, mafsal noktalarındaki yer değiştirmelerin ihmal edilebilecek mertebede olduğunu anlatmaktadır (Omurtag, 2015).



Şekil 1.3. Birim düzlem kafes sistem (Duranoğlu, 2019)

Temel üçgenler yanyana eklenerek daha büyük kafes sistemler elde edilir. Bu şekilde oluşturulan sistemlere “Basit Kafes Sistemler” adı verilir. Örneğin “Howe” sistemi ile tanınan ve tipik bir çatı makası olarak kullanılan sistem basit kafes sistemidir. İki basit kafes sistem karşılıklı olarak birleştirilirse “Bileşik Kafes Sistemi” elde edilir. Bağlantı en az ya bir noktada kesişmeyen üç çubukla ya da bir mafsal ve bir çubukla birleştirilmiş olmalıdır. Basit ve bileşik kafes sistemlerin dışında kalan sistemlere “Karışık Kafes Sistemler” denir.

Kafes sistemlerde, çubuk sayısı ($\ç$), düğüm noktası sayısı (d) ve bilinmeyen mesnet tepki sayısı (m) kullanılarak yazılacak rijitlik koşulu,

$$2d = \ç + m \quad (1.1)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada $2d = \ç + m$ eşitliği sağlanıyorsa birleşik kafesler statik olarak belirli, rijit ve tam bağlı sistemler olarak yapılmıştır. $2d < \ç + m$ ise kafes sistemin fazla rijit olduğunu gösterir; yani sistemin fazla bağlı (hiperstatik-statikçe belirsiz) olduğu anlaşılmaktadır. $2d > \ç + m$ olması durumunda da sistem rijit olmaz ve göçer (Omurtag, 2015).

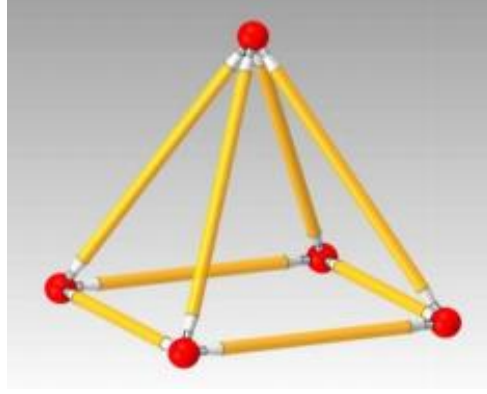
Düzlem kafes sistemlerde çubuk elemanlar, birleşim araçları olarak adlandırılan kaynaklar, bulonlar ve perçinler vasıtasıyla birbirlerine bağlanmaktadır. Kaynaklar ve perçinlerin, tahrip etmeden sökülmesi olanaksız olduğundan “sökülemeyen birleşim araçları” şeklinde ifade edilir. Buna karşılık bulonlu birleşimler, istenilen vakit tahrip edilmeden sökülmesi sebebiyle “sökülebilen birleşim aracı” diye adlandırılır. Günümüzde çelik endüstri yapılarında birleşim aracı olarak perçinlerin uygulaması yapılmamaktadır (Odabaşı, 1997).

1.4.2. Uzak Kafes Sistemler

Üç boyutlu ortamda düz eksenli çubukların bir uzak taşıyıcı sistem oluşturacak şekilde uçlarından mafsallı olarak birleştirilmesiyle elde edilen sisteme “Uzak Kafes Sistem” adı verilir.

Uzak kafesler basit, bileşik veya karışık şekillerde teşkil edilebilir. Düzlem kafeslerin temelini teşkil eden “temel üçgen” elemanına; dışında bulunan bir noktadan üç çubukla bağlantı kurulursa uzak kafes sistemin “temel sistem” i elde edilmiş olur. Bu temel elemana bağlanan yeni bir düğüm noktası ve bağlantı çubuklarıyla daha büyük uzak kafes sistemler oluşturulur. İki basit uzak kafes altı çubukla birbirine bağlanırsa bir bileşik uzak kafes sistemi elde edilir. Basit ve bileşik olamayan uzak kafes sistemlerde karışık sistemler olarak adlandırılır.

En küçük uzak kafes sistem yapısı, altı çubuğun dört düğüm noktasından birleştirilmesiyle oluşan bir dörtyüzlüdür (Şekil 1.4). Bu dörtyüzlü basit sisteme, farklı düzlemlerde bulunan üç çubuk ve bir düğüm eklenmesiyle yapı sistemi büyütülebilir. Yapının geometrik şekline uygun olacak biçimde çeşitli birleşimleri kullanılarak farklı türlerde uzak kafes sistem şekilleri oluşturulabilir.



Şekil 1.4. Uzay kafes sistem modülü (Duranoğlu, 2019)

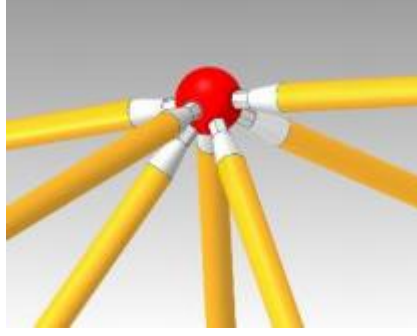
Uzay kafes sistemlerde rijitlik koşulu, düzlem kafes sistemlerde olduğu gibi çubuk sayısı ($\ç$), düğüm noktası sayısı (d) ve mesnet tepki sayısı (m) kullanılarak,

$$3d = \ç + m \quad (1.2)$$

hesaplanmaktadır. Burada $3d = \ç + m$ eşitliği sağlanıyorsa uzay kafes sistem statik olarak belirli, rijit ve tam bağlı sistem olarak yapılmıştır. $3d < \ç + m$ ise kafes sistemin hiperstatik (statikçe belirsiz) olduğu anlaşılmaktadır. $3d > \ç + m$ olması durumunda da sistem rijit olmaz ve göçer (Omurtag, 2015).

Uzay kafes sistemini oluşturan ana elemanlar çelik boru (çubuk elemanlar) ve çelik küre elemanlar (düğüm noktaları)'dır. Bu elemanlardan başka konik, cıvata, somun, pim, aşık ve aşık dikmesi elemanları, mesnetler de kullanılmaktadır.

Uzay kafes sistemin düğüm noktası ana bileşenlerinden biri olan küreler, çelik malzemesi C40 kalitesinde DIN 17200 normuna uygun olarak üretilir. Sıcak dövme tekniği ile şekil verilip kumlama ile yüzeyindeki tufal tabakası temizlenir ve dolu gövdeli olarak 50mm ila 250mm çapları arasında boyutlandırılırlar. Üzerinde en çok 18 adet delik açılabilen çelik küreler, CNC tezgâhlarında imalata uygun hale getirilerek kalite kontrolleri yapılır. Kalite kontrolleri yapılan çelik küreler, elektro galvaniz ile kaplanırlar. Uçlarındaki cıvatalar sayesinde çubuklar, küre deliklerine bağlanarak uzay kafes sistem imalatı yapılır (Karabulut, 2018).



Şekil 1.5. Uzay kafes sistem düğüm noktası detayı (Duranoğlu, 2019)

Çubuk elemanlar, boru ve kutu kesitli profil gibi elemanlardan oluşturulabilmektedir. Uzay kafes sistemlerde düğüm noktalarının birleşim detayı küre, çelik plaka, disk gibi elemanlar kullanılabilen ve profiller bu elemanlar aracılığı ile bulonlu, pimli ve kaynaklı birleşimlerle düğüm noktalarından mafsallı olarak birleştirilebilmektedir (Alçıçek, 2015).

Konik elemanlar içi dolu silindirik malzeme olarak üretilmekte ve çubukların her iki ucuna gazaltı kaynak ile kaynatılarak birleşimi yapılmaktadır. Cıvatalar, konik ile kürenin bağlantısını sağlayan ve çekme kuvvetini karşılayan birleşim elemanlarıdır. Somunlar, montaj sırasında cıvatanın küreye sıkılmasını sağlayan ve çubuklarla birlikte aksel basınç kuvvetine karşı çalışan ve malzeme kalitesi en az St37 olan elemanlardır. Aşıklar; çatı, cephe kaplamaları ve drenaj derelerinin uzay kafes sisteme bağlanmasını sağlayan, genellikle dikdörtgen kutu profillerden oluşan elemanlardır. Bazı durumlarda I, Z ve U profilleri de kullanılabilir. Aşıklar, eğim dikmeleriyle uzay kafes sisteme istenilen yükseklikte bağlanırlar. Mesnetler, uzay kafes sistemin üzerine oturtularak, sistem yüklerini kolonlara ve zemine aktaran elemanlardır. Sistem ihtiyacına göre sabit, hareketli, doğrusal ve radyel tiplerde üretilmektedirler (Karabulut, 2018).

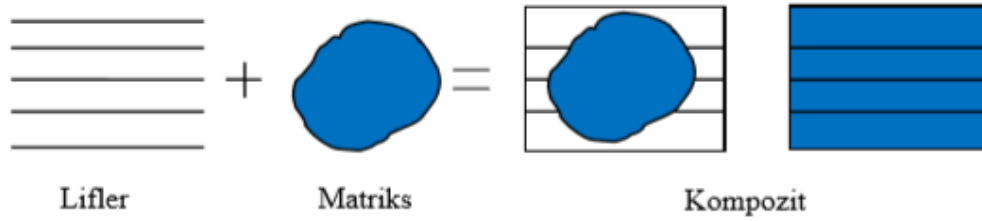
1.5. Lifli Polimer (LP) Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, yüzyıllardır insanların bilerek veya bilmeden, sorunlara çözüm için kullandıkları, iki veya daha fazla farklı özellikleri olan malzemelerin mikro veya makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen yeni bir üründür.

Kompozit malzemeler iki bileşenden oluşur: Lifler ve matris. Lifler kompozit hacminden % 30 ile % 70 ve ağırlığının % 50'sinden oluşur. Liflerin temel işlevleri yükü taşımak ve LP'ye sertlik, kuvvet, ısı stabilite ve diğer yapısal özellikler sağlamaktır.

Kompozitlerdeki lifler, yüksek elastisite modülüne, yüksek nihai mukavemete, lifler arasında düşük mukavemet değişikliklerine, taşıma sırasındaki kuvvetlerinin yüksek stabilitesine ve lifler arasında yüksek çap ve yüzey boyut homojenliğine sahip olmalıdır. Matris, elyafların konumlandırılmasını ve hizalanmasını, üretim ve manipülasyon sırasındaki hasarlardan korunmayı, kompozitin dayanıklılığını ve çevre etkilerinden korumayı sağlar. Yüklerin münferit elyaflara dağıtılmasından da sorumludur (Sonnenschein, 2016).

Bu anlamda LP kompozit malzeme, matris malzemenin (Epoksi reçineler) genellikle yüksek mekanik özelliklere sahip cam, karbon veya aramid liflerle güçlendirilmesi sonucu üretilen kompozit malzemelerin bir çeşididir. İngilizce’de “Fiber Reinforced Polymers/Plastic” olarak anılan bu malzemeler; ülkemizde kelimelerin baş harfleri olan “LP” şeklinde de anılabilmektedir. LP kompozit malzemeler genel anlamda lifler ile kullanılan matris malzemesinin birbirine yapışması sonucu oluşurlar. Lifler ve matris malzemesinin kendi mekanik özelliklerini göstermesi sonucu kompozit sistem oluşmaktadır. Şekil 1.6’da görüldüğü gibi kompozit malzeme lif ve reçinenin birbirine yapışmasıyla oluşurken; sistemdeki lifler rijitlik ve dayanımı sağlarken, matris malzemesi sertlik vererek sistemi hem dış etkilere karşı korur hem de yüklerin liflere aktarılmasını sağlar (Günaydın, 2016).



Şekil 1.6. Lifli polimer kompozit yapısı

LP kompozit malzemeler, çelik, beton gibi yapı malzemeleriyle kıyaslandığında, ağırlık oranına göre yüksek çekme dayanımları, farklı biçimlere göre kalıp alabilmesi, çevresel değişkenler karşı direnç, düşük bakım-onarım maliyet potansiyeli gibi avantajları vardır. Bu özellikler ile LP kompozit malzemeler, yenilikçi inşaat alanında iyi bir alternatif olmuştur (Tuakta, 2005).

Kompozit malzemelerinin bilimsel yöntemlerle ele alınması ve üretilmiş malzemeler ilgili çalışmalar 1940’lı yıllarda cam eklenmiş plastiklerin kullanımıyla başlamıştır. İlk

uygulamalardan biri radar kubbeleridir. 1950'li yıllardan itibaren uçak pervaneleri kompozit malzemelerden yapılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler günümüzde her alanda yaygınlaşmıştır. Elyaf takviyeli üretilen kompozit malzemeler bu alanda en gelişmiş olanlardır. Bu tip kompozit malzemeler elastisite modülü yüksek olan genellikle karbon veya bor gibi liflerle takviye edilerek üretilmektedir. Bu tip kompozitler yüksek mukavemet ve yüksek rijitliğe sahip olarak diğer kompozitlerden ayrılmaktadır. Yüksek mukavemetli çeliğe göre aynı mukavemet değerlerine sahip gelişmiş kompozitler, %70 oranında daha hafiftirler. Bazı gelişmiş kompozitler, alüminyuma göre üç kat daha kuvvetlidir. Bu sebeple kompozitlerden imal edilen uçak parçalarının ağırlığı, geleneksel uçak malzemelerinden imal edilenlere göre %60 oranında daha düşüktür (Judge, 1996).

Lifli polimer kompozit malzemelerde kullanılan çok çeşitli reçine çeşitleri ve her biri farklı özellikler içeren lifler vardır. Ayrıca, LP'nin yapısı oldukça özelleştirilebilir (örneğin, elyaf yönü, çok çeşitli reçineler ve elyaflar). Dolayısıyla, tüm özellikler bir LP bileşeninin formüle edilememesi sonucunu doğurur. Ancak genel olarak, tüm LP'ler inşaat mühendisliği ile ilgili aşağıdaki avantajlı özellikleri içerebilir.

Temel özellikleri şunlardır:

- Düşük ağırlıkta yüksek mukavemet göstermesi
- Düşük bakım maliyetleri
- Uygun maliyetli üretim süreçleri
- Belirli özelliklerin özelleştirilmesi için uygun (rijitlik, ısıl direnç, elektrik direnci, aşınma direnci, mükemmel kimyasal ve korozyon direnci)

Bu nedenle, bu özellikler LP'ye bir yapı malzemesi olarak bakmayı ilginç hale getirir.

Bununla birlikte, LP dezavantajlı özelliklere de sahiptir.

- Zayıf süneklik;
 - Geleneksel ve / veya rekabetçi malzemelere kıyasla katılık (sertlik) düşük;
 - Termosetler ve hatta termoplastikler için sınırlı geri dönüşüm özellikleri;
 - Sıcaklık dayanımı 150 °C'ye kadar sınırlıdır;
 - Yüksek malzeme maliyetleri nedeniyle yüksek başlangıç maliyetleri;
- İnşaat mühendisliği uygulamalarında uzun vadeli özellikler iyi bilinmemektedir.

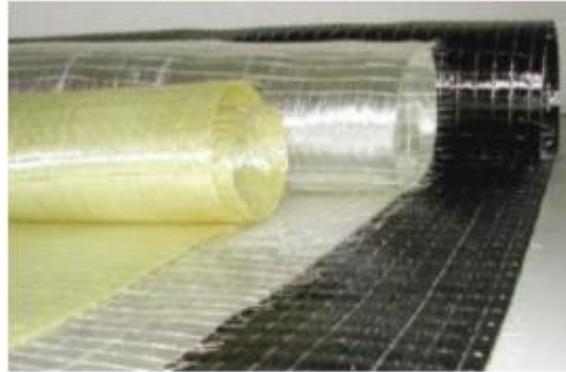
1.5.1. Lifler

LP kompozit yapıda asıl yük taşıyıcı bileşenler liflerdir. Lifler ayrıca matris malzemesinin rijitliğini ve dayanımını artırır. Lifler kompozit yapıda “takviye malzemesi” olarak da adlandırılır. Liflerin tanımlanmasında kesin bir tanım yapılmamakla birlikte genel olarak lif malzemesinin boy/çap oranı tanımlayıcı bir unsur olarak kullanılmaktadır.

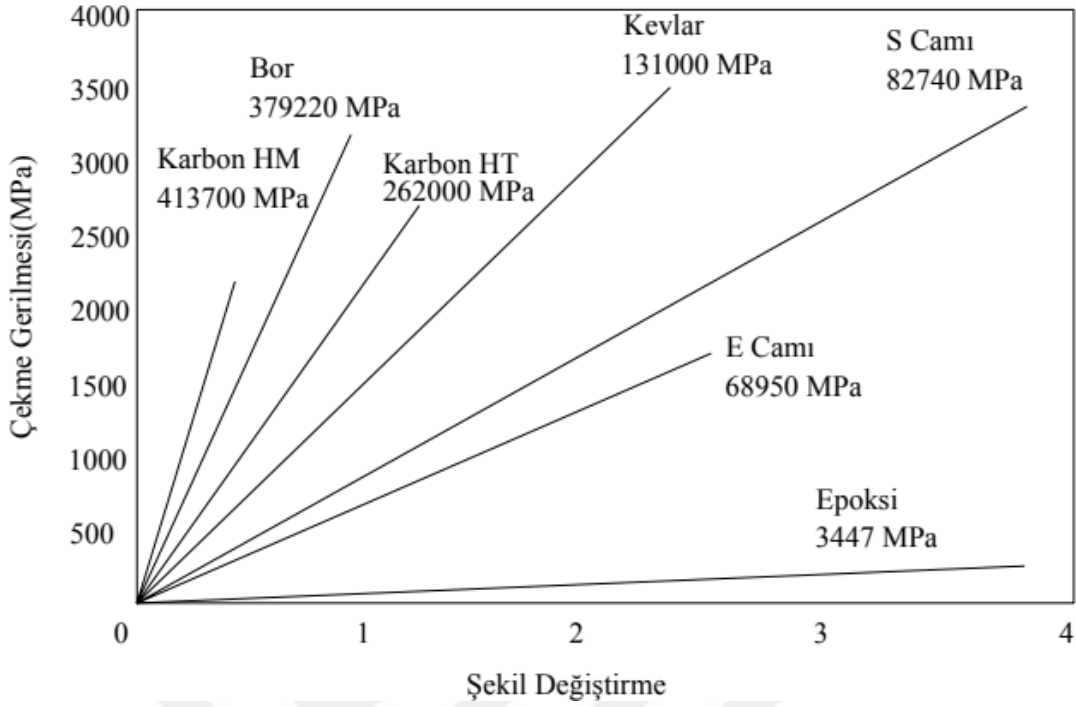
Amerikan Standardı ASTM’de bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy/ortalama çap oranının en az 10 olması, lifin en büyük genişliğinin 0,25 mm’den ve en büyük kesit alanının da 0,05 mm²’den daha küçük olması gibi kısıtlamalar getirmektedir. Dilimizde lif kelimesinin yerine bu kelimenin çoğul hali olan “elyaf” kelimesi daha çok kullanılmaktadır. Liflerin çapı ortalama 0,01 mm mertebesinde olup, narinlik olarak tanımlanan boy/çap oranı on binlere kadar çıkabilmektedir (Ersoy, 2001).

Lifler, lifli polimer kompozit malzemenin birincil bileşenleridir. İçinde yer alan lifler, kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır.

Kompozit yapının yük taşımasında temel görevi üstlenirler ve genel olarak en yüksek hacim oranına sahiptirler. Farklı lif tipleri Şekil 1.7’de görülmektedir. Ayrıca farklı türdeki liflerin şekil değiştirme ve gerilme özellikleri Şekil 1.8’de görülmektedir.



Şekil 1.7. Cam, karbon ve aramid lif örnekleri (Caggegi, 2013)



Şekil 1.8 Farklı türdeki lifler için gerilme-şekil değiştirme diyagramları (Caggegi, 2013)

1.5.1.1. Karbon Lifler

Karbon lifleri bugün yapı uygulamalarında lifli polimer güçlendirme tabakaları ve kumaşları, lifli polimer güçlendirme şeritleri ve lifli polimer öngerilme tendonları olarak kullanılır. Karbon lifi sağlam çok kristalli organik malzemedir, atomik seviyede düzlemsel iki-boyutlu sıralanmış karbon atomları barındırır. İki-boyutlu çarşafımsı diziliş grafitik form olarak anılır, bu nedenle lifler grafit lifler olarak da bilinir. (Üç-boyutlu diziliş elmas formudur).

Karbon lifleri, standart modül, yüksek dayanım, yüksek modül ve ultra yüksek modül olarak bilinen sınıflarda üretilir (IM, HS, HM, UHM). Ticari olarak 207 GPa ile 1035GPa'ya kadar değişen aralıkta çekme modüllerinde temin edilebilir. Genel olarak düşük modüllü lifler yüksek modüllülere göre düşük yoğunluklu, düşük maliyetli, yüksek çekme ve basınç dayanımlı ve daha yüksek göçme deformasyon oranlıdır.

Karbon liflerinin çapları 0,05mm ile 0,1mm arasında değişir. Karbon lifinin karakteristik kömür-siyahı rengi vardır. İki-boyutlu atomik yapıları yüzünden karbon lifleri tersine izotropiktir, atomik dizilişe paralel yöndeki özellikleri, diğer yönden farklıdır. Lifin boyuna eksen grafitik düzlemlere paraleldir, böylece yüksek boyuna eksenel modül ve dayanım elde edilir. Yaygın sınıftaki karbon liflerin yaklaşık değerleri Tablo 1.1'de verilmiştir (Akıncı, 2010).

Tablo 1.1. Genel karbon lifi sınıflarının yaklaşık özellikleri (Akıncı, 2010)

Karbon Lifi Sınıfı	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maks.Uzama (%)
Standart Modül (IM)	1,7	250-300	3700-5200	1,2-1,73
Yüksek Dayanım (HS)	1,8	250-260	4800-5020	1,4-1,93
Yüksek Modül (HM)	1,9	450-500	3000-3500	0,5-0,8
Ultra Yüksek Modülü (UHM)	2,1	800	2400	0,2

Karbon lifler en yüksek elastisite modülüne sahiptir (200–800GPa). En yüksek uzama değeri %0,4-2,5 arasındadır. Uzama oranı gevreklikle ters orantılıdır (Carolin, 2001).

Karbon lifler, yoğunluğu 2,268g/cm³ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon lifler su emmez ve birçok kimyasal birleşimi geçirmezler. Bu yüzden dış etkenlere maruz kalabilecek ortamlar için oldukça uygundur. Yorulma göstermezler ve çürüme, sünme, gevşeme yapmazlar. Karbon lifler elektriği iletirler ve bu yüzden çelikle beraber kullanıldığında galvanik korozyon etkisi yapar (Dejke, 2001). Üç temel hammadde yapısı mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000 - 3000°C kadar ısıtılır ve bu işlemde sonra çekme kuvveti uygulanır. Bu aşama mukavemet ve rijitlik oluşmasında etkilidir fakat yüksek maliyet nedeniyle rayon lifler uygun değildir. Lif imalatında çoğunlukla rayon kullanılmaz yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı lifler 2413 ila 3102MPa civarında çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı lifler ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı lifler kadar iyi değildir fakat maliyetleri düşüktür. Karbon lifler düşük yoğunluğu, yüksek mukavemet ve yüksek rijitlik değerleriyle önemli olmaktadır. Ayrıca sürünme mukavemetlerinin yüksek olmasıyla birlikte aşınma ve yorulma mukavemetleri önemli özellikleri arasındadır. Karbon lifler çeşitli plastik matrislerle ve çoğunlukla epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon lifler alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

Karbon lifi yüksek sıcaklıklarda (1200 ~ 2400°C), üç öncül malzemedenden birisi kullanılarak üretilir; doğal selülozik rayon tekstil lifi, sentetik polyacrilonitrile (PAN) tekstil lifi veya zift (kömür katranı). Zift-bazlı lifler petrol sürecinden yan ürün olarak üretilir ve genelde PAN ve rayon bazlı liflere göre daha ucuzdur. Karbon lifi üretimi sırasında ısı yükseltirse atomik yapıda daha çok çarşafimsı düzlemsel grafitik dizilim oluşturur ve lif daha yüksek boyuna aksenal modül kazanır. Bu sebepten ilk karbon lifleri grafit lifleri olarak

adlandırılmışlardır. 2000°C'nin üzerindeki üretim sıcaklıklarında karbon kristallerinin boyutlarının büyümesi ile dizilişleri iyileşir böylece modül değerleri yükselir. Ancak 1600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çekme dayanımı düşer. Sonuç olarak yüksek dayanımlı lif üretmek için 1600°C'lik sıcaklık gereklidir (Hollaway, 2008).

1.5.1.2. Cam Lifler

Cam izotropik bir maddedir ve hammaddesi kalsiyum oksit, boron, sodyum, demir ve alüminyum gibi eklentilerle beraber silika (SiO_2) ya dayanır. Cam lifleri polimerik reçineli kompozit ürünlerde en yaygın kullanılan donatı lifleridir. Lifli polimer donatı çubukları, lifli polimer güçlendirme kumaşları ve lifli polimer yapısal profiller gibi birçok üründe kullanılırlar.

Cam lifler karbon ve aramid liflere göre daha ekonomiktir. Bu sebeple cam lif kullanımı tekne yapımı vb. gibi sektörlerde çok yaygın bir uygulama olmuştur. Cam liflerin çeşitli türleri vardır. E-glass (Elektrik geçirmez), S-glass (çok güçlü) ve AR-glass (alkali geçirmez). Lif çeşidine göre modülü 70–85 Gpa arasında ve en yüksek uzama miktarı da %2–5 arasında değişir. Bunların arasında en çok kullanılan E-glass cam lifleridir. E-glass silis, alümin ve kireçten, S-glass ise silis alümin ve magneziden oluşmuştur.

Cam lifi kullanımının önemli avantajları arasında düşük maliyet, yüksek korozyon direnci, yüksek çekme dayanımı ve mükemmel yalıtım özellikleri gelir. Dezavantajları ise diğer lifler ile kıyaslandıklarında düşük çekme modülü, yüksek yoğunluk, işlenirken aşınmaya yatkın oluşları, yorulma dirençlerinin düşük oluşu ve yüksek sertliklerinden dolayı kesme ve şekillendiricilerde sorunlara sebebiyet vermeleridir.

Cam liflerinin çekme dayanımları suyun varlığında ya da sabit yükler altında (statik yorulma) azalır. Su, lif yüzeyinden alkali çıkartır ve zaten mevcut olan yüzey kusurlarını derinleştirir. Kalıcı yükler altında yüzey kusurlarının büyümesi hızlanır. Sonuç olarak yükün uygulandığı zaman arttıkça cam liflerinin çekme dayanımları düşer. Tablo 1.2'de çeşitli liflerin malzeme özellikleri ve çeliğin malzeme özellikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 1.2 Lifli polimer ve çeliğin malzeme özelliklerinin karşılaştırılması (Caggegi, 2013).

	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Çekme Mukavemeti (σ_r) (MPa)	Kopma Anındaki Şekil Değişirme (ϵ_r) (%)	Isıl Genleşme Katsayısı (α) ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Yoğunluk (ρ) (g/cm ³)
E-Cam	70-80	2000-3500	3,5-4,5	5-5,4	2,5-2,6
S-Cam	85-90	3500-4800	4,5-5,5	1,6-2,9	2,46-2,49
Karbon (HM)	390-760	2400-3400	0,5-0,8	-1,45	1,85-1,9
Karbon (HS)	240-280	4100-5100	1,6-1,73	-0,6 - -0,9	1,75
Aramid	62-180	3600-3800	1,9-5,5	2	1,14-1,47
Polimerik Matris	2,7-3,6	40-82	1,4-5,2	30-54	1,10-1,25
Çelik	206	250-400 (akma) 350-600 (kopma)	20-30	10,4	7,8

1.5.1.3. Aramid Lifler

Aramid lifleri aromatik poliamid lifleridir. En basit formu polipfenilentereftalamid'dir ve piyasada Kevlar ve Twaron lifleri olarak bulunmaktadır. Ticari olarak kevlar ya da tvaron olarak adlandırılan aramid lifleri cam liflere oranla daha iyi derecede çekme dayanımına sahiptirler, aynı zamanda daha hafiftirler ancak kabul edilebilir basınç dayanımları elde etmek için çoğu zaman diğer elyaflarla birleştirilmesi gerekir.

Kevlar lifleri, düşük ağırlıkta yüksek mukavemet, yüksek modül ve kesilmeye karşı yüksek dayanım göstermektedirler. Elektrik iletkenliği düşüktür, yüksek sıcaklığa ve kimyasallara karşı yüksek dayanıma sahiptir, sıcaklıkla büzülmesi azdır ve yüksek boyutsal stabilite göstermektedir. Technora lifleri ise Teijin firmasının geliştirdiği yüksek mukavemetli liftir. Technora liflerinin modülü Kevlar'a yakın olup, aşınma dayanımı daha iyidir, ancak bu lifler Kevlar'dan çok daha pahalıdır. Technora'nın avantajı hidrolize dayanıklı olmasıdır

1.5.2. Matris

Liflerin etrafını saran ve lifleri bir arada tutan malzemelerdir. Lifler arasındaki yük transferini sağlar ve liflerin çevresel etkilerden (nem, kimyasallar ve oksitlenme vb.) korunmasını sağlar. Lif yüzeylerinin birbirine çarparak veya dış faktörlerle hasar görmesini engeller (Keskin, 2005).

Termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılırlar.

Kompozit yapılarda matrisin, üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, lifleri bir arada tutmak, yükü liflere dağıtmak ve lifleri çevresel etkilerden korumaktır. ideal bir matris malzemesi, başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken, daha sonra lifleri sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilen, katı forma kolaylıkla geçebilen özellikte olmalıdır.

LP kompozit malzemeleri oluşturan iki fazdan bir tanesi matris malzemesidir. Matris malzemesinin temel fonksiyonları; Lifleri bir arada tutmak ve üzerine gelen kuvvetleri liflere aktarmak, Lifleri dış (kimyasal ve mevsimsel) etkilerden korumak, Çatlak yayılımını kısıtlamak, şeklinde sıralanabilir. LP kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak en çok termoset plastikler kullanılmaktadır. Termoset plastikler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir: Polyesterler, Epoksiler, Vinilesterler, Poliüretanlar, Fenolikler.

Termoset plastikler sıvı halde bulunur, ısı veya kimyasal tepkimelerle sertleşerek sağlamlaşırlar ve şekil aldıktan sonra şekillerini çok uzun süre muhafaza ederler. Termoset plastikler; profil çekme, iplik sarma, hazır kalıplama yöntemi, reçine enjeksiyon yöntemi gibi yöntemler kullanılarak üretilen LP kompozit elemanlarında matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Termoset plastikler ile borular, tanklar, inşaat levhaları, mimari paneller, gemi iskeletleri, koltuklar, spor ürünleri, otomobil parçaları, duşa kabinler, elektrik kutuları gibi LP kompozit malzemedan imal edilmiş elemanlar üretilebilmektedir (Günaydın, 2011).

Seçilen bazı termosetlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1.3'te görülebilmektedir.

Tablo 1.3. Seçilen bazı termosetlerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Günaydın, 2016)

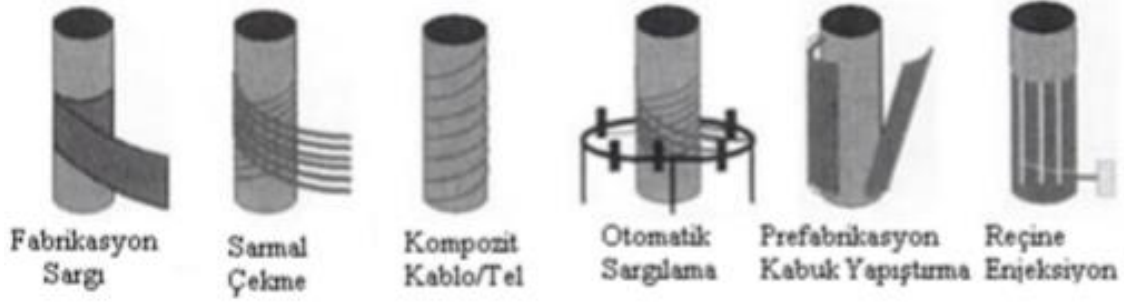
Özellik	Matris		
	Polyester	Epoksi	Vinilester
Özgül Ağırlık (kg/m ³)	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Çekme dayanımı (MPa)	34,5-104	55-130	73-81
Elastisite Modülü (GPa)	2,1-3,45	2,75-4,10	3-3,5
Possion Oranı (-)	0,35-0,39	0,38-0,40	0,36-0,39
Termal İletkenlik (10 ⁻⁶ °C)	55-100	45-65	50-75
Rutubet Oranı (%)	0,15-0,6	0,08-0,15	0,14-0,30

1.6. LP Kompozit Malzeme ile Mevcut Yapılarda Onarım ve Güçlendirme

Hasara uğramış ve/veya düşük standartlarda inşa edilmiş mevcut yapıların onarımı ve güçlendirilmesi tüm dünyada yapı endüstrilerinin üzerinde uğraştığı önemli konulardan birisidir (Büyüköztürk vd. 1999). Dünyada ve ülkemizde meydana gelen depremlerde tespit edilen yapı hasarları, mevcut tasarım standartlarının ve inşaat kalitesinin yetersizliğini göstermiş olup yapıların depreme karşı uygun bir şekilde onarılması veya güçlendirilmesi gereğini ortaya koymuştur. Lifli polimer (LP) kompozit malzemelerin yapı elemanlarına dışarıdan yapıştırılarak bu elemanların kapasitelerin artırılması son zamanlarda oldukça uygulanır duruma gelmiş bir durumdur aynı zamanda pratik bir onarım ve güçlendirme tekniğidir. Bu tekniğin uygulama sahası oldukça fazla olmakla birlikte binalar, köprüler, tüneller, barajlar, bacalar, su ve gaz iletim hatlarında kullanılan geniş çaplı borular gibi yapıları içermektedir. LP kompozit malzemeler betonarme, çelik, taşıyıcı tuğla ve ahşap elemanların; eğilme, kesme, darbe direnci ve düşey yük taşıma kapasitelerinin artırılması veya sünekliklerinin artırılmasında kullanılabilir (Günaydın, 2016).

LP kompozitler, geleneksel çelik plaklar yerine kullanılabilir. Avrupa'da yaklaşık %5 oranında hasarlı köprüde güçlendirme işlemi bu şekilde yapılmıştır. Onarım ve güçlendirme işlemlerinde uygulamaya bağlı olarak, LP malzemeler, şeritler halinde ya da bantlar halinde dıştan yapıştırma tekniği ile uygulanır. Dıştan yapıştırma tekniğinden başka, el ile uygulama ve reçine akıtma gibi uygulama teknikleri de vardır. Özellikle köprü tabliyelerinde ve elemanlarında artan servis yüklerine karşı, uygulama kolaylığı, bakım masraflarının azlığı, uygulama esnasında trafiğin durdurulmaması gibi sebeplerle LP güçlendirme sistemleri tercih edilmektedir.

Kolonlar bir yapının düşey taşıyıcı elemanlarıdır. Bunun yanında, kolonlar, yapının maruz kaldığı dinamik yükleri, temellerden alıp, yapının tamamına rijitliklere bağlı olarak aktarmakta görevlidir. Kolonlar, bir yapının ayakta kalabilmesinde en büyük davranışı sağlayan elemanlardan biridir. Kolonlara zarar veren kuvvetler; kesme, eğilme, burkulma ve basınç olarak gösterilebilir. Bu kuvvetlerin tamamı birbirleriyle ilişkilidir. Örneğin, eğilme donatılarındaki yetersizlik, binanın rijitliğini azaltarak, binanın daha fazla yerdeğiştirme yapmasına sebep olacak ve burkulmaya yol açacaktır. Eğilme donatısındaki fazlalık ise, kolonun rijitleşmesine sebep olacak ve çekme donatısı akmadan, basınç kırılması meydana gelecektir. Bu durumda toptan göçme gözlenir. Kolonlardaki etriyeler eksik olursa kolon, kesme kuvvetlerine mukavemet gösteremeyecek ve ani bir kırılmaya maruz kalacaktır. Ayrıca etriyeler, betonun basınç dayanımını aşması halinde kolonun dağılmasını engellemekte görevlidir. Şekil 1.9'da kolonlarda LP ile güçlendirme tekniklerinden örnekler verilmiştir.



Şekil 1. 9. Kolonlarda LP ile güçlendirme teknikleri

Lifli polimer malzemeler kolonlarda güçlendirme amacıyla kullanılacak etkili ve yeni nesil malzemelerdir. Eğilme mukavemetinin ve rijitliğin artırılması için lif doğrultusuna paralel uygulanırlar. Kesme mukavemetinin, sünekliliğin, basınç mukavemetinin ve sismik dayanımın artırılması için enlemesine uygulanırlar (Mert, 2007).

1.7. LP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Lifli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, lif-matris oranına, üretim tekniklerine ve lif ile matris arasındaki uyuma bağlıdır. Tek doğrultulu LP kompozitlerde lifler düzgün ve birbirine paraleldir. Malzemenin ortotropik olduğu dikkate alınır. Çünkü her iki düzlemde simetrikdir. Tek doğrultulu lifli kompozitlerde elastisite modülü için, lif ve matris arasındaki ilişki Denklem (1.3)'te verilmektedir.

Denklemden; V_f ve V_m sırası ile lif ve matrisin hacimsel oranına, E_f ve E_m ise sırası ile lif ve matrisin elastisite modülünü ifade etmektedir (Tuakta, 2005).

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (1.3)$$

Enlemesine doğrultuda ikinci modül, türetilmesi kadar kolay değildir. Bir basitleştirici varsayım, elyaf ve matrisdeki aynı enine gerilim olan σ_2 göz önünde bulundurularak yapılabilir, bu, görünür Young modülünün E_2 değerinin daha düşük bir sınır değeri verdiği bilinen Denklem (1.4)'teki malzeme mekaniği ifadesine yol açar.

$$E_2 = \frac{(E_f E_m)}{(E_f V_m + E_m V_f)} \quad (1.4)$$

Poisson oranı, lif ve matrisin lif yönü boyunca eşit miktarlarda deforme olması ve enine gerilmenin $\sigma_2=0$ olması durumunda önceki iki varsayımdan kaynaklanan karışım

kuralı ile belirlenebilir. Bu varsayımların doğru olduğu ve Poisson oranının doğru bir tahminine yol açtığı bilinmektedir.

Bu bölümde, LP kompozit malzemelerin yoğunluk, ısı genleşme katsayısı, çekme-basma dayanımı ve dayanıklılık gibi mekanik özellikleri aşağıda verilmektedir.

- ✓ Yoğunluk: Lifli polimerlerin yoğunluk değerleri 12-25 kN/m³ arasında olup çeliğin yoğunluğundan 4 kat daha düşüktür. Yoğunluğunun çok az olması sebebiyle nakliye maliyetleri, yapı toplam ağırlığını azaltmakta ve aynı zamanda kolay uygulanabilmesine olanak vermektedir. Tablo 1.4'te LP kompozit malzemelerin ve çeliğin birim ağırlık değerleri verilmiştir.

Tablo 1.4. LP kompozit malzemelerin birim ağırlık değerleri (kN/m³).

Çelik	Cam LP	Karbon LP	Aramid LP
77	12-21	15-16	12-15

- ✓ Isıl genleşme katsayısı: Isıl genleşme katsayısı LP kompozitlerde, boyuna ve dik yönlerde kullanılan lifin ve reçinenin türü ile liflerin hacimsel oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Tek yönlü LP kompozitler için her iki yön doğrultusu için ısı genleşme katsayıları Tablo 1.5'de verilmiştir. Tablo 1.5'te karbon elyaf kumaşlardan üretilen kompozitlerin negatif ısı genleşme katsayıları sıcaklık artışında kısalan, sıcaklık azaldığında ise uzayan davranış gösterdiği anlamına gelmektedir.

Tablo 1.5. LP kompozitler için ısı genleşme katsayılarının değerleri

Yön	Cam LP	Karbon LP	Aramid LP
Eksenel	6 ile 10	-1 ile 0	1,2 ile 1,5
Eksene dik	19 ile 23	22 ile 50	60 ile 80

- ✓ Dayanıklılık: Birçok LP kompozit sıcaklık, kimyasal ve nem gibi çevresel etkiler altında mekanik özelliklerinde kayıplar yaşarlar. Maruz kalınan dış etki, reçine tipi, üretim şekli gibi etkenler de mekanik özelliklerin kaybında etkilidir.

Avantaj:

- 1) Elektromanyetik nötrlük

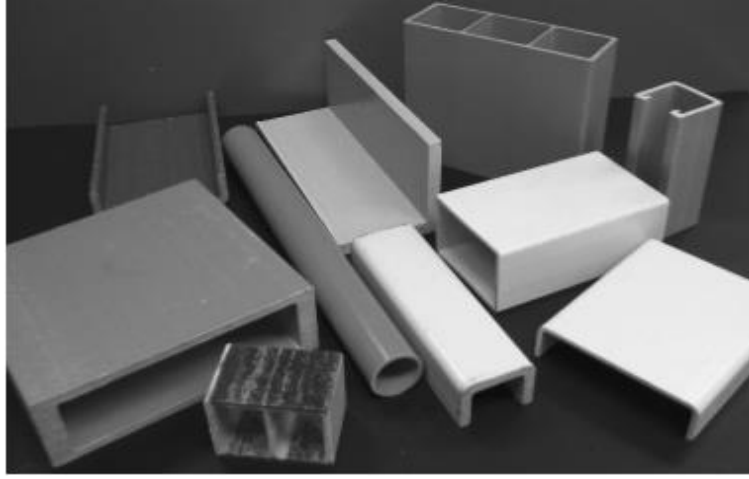
- 2) Yüksek özgül mukavemet
- 3) Korozyon dayanımlı
- 4) Yüksek yorulma dayanımı (karbon ve aramid için)

Dezavantaj:

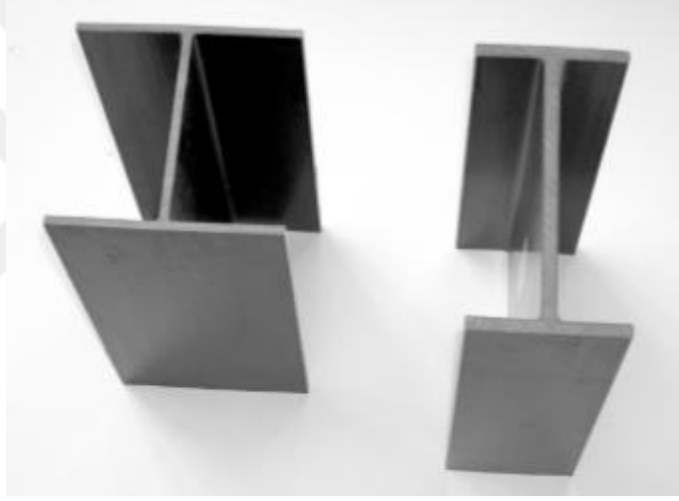
- 1) Sünek davranış kapasitesinin olmaması
- 2) Düşük enine yük taşıması kapasitesi
- 3) Düşük elastisite modül değerine sahip olması (cam ve aramid için)
- ✓ Çekme-Basma Dayanımları: LP kompozitler çalışma yönü doğrultusunda çekme etkisi altında hiç plastik davranış göstermeyerek kopma tipi davranış gösterirler. Tek tip lif tipi ile üretilen kompozitlerin çekme gerilmesi ve şekil değiştirme ilişkisi lineer tek doğrulu şekilde ani kopma ile ifade edilir. LP kompozitlerin çekme dayanım ve rijitlik değerleri birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Yük taşıma kapasitesine, ana bileşen olan liflerin yerleşimi, tipi ve kompozit içindeki hacimsel miktarı büyük oranda etkilemektedir (Uysal, 2017).

1.8. Pultrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş LP Kompozit Malzemelerin Özellikleri

ABD'de 1950'lerde, pultrüzyon adı verilen, yüksek kaliteli sabit kesitli LP profillerinin üretilmesine olanak sağlayan etkin bir yöntem geliştirilmiştir. 1940'ların sonundan itibaren "Pultrüzyon" asıl olarak iki çeşit ürün geliştirmek amacıyla kullanılmıştır. Bunlar; rijit çubuk, lamalar ve boru, kiriş gibi endüstriyel profil şekilleridir. 1960'ların sonunda ve 1970'lerin başında birçok pultrüzyon şirketi 'standart', 'şekilli' ve 'boru şekilli' ürünler geliştirmişlerdir. Şekil 1.10'da örnekleri görülen profil çekme metodu ile üretilen kutu, boru, 'I', 'T', 'L', ve 'U' profillerinin yanı sıra sabit şekle sahip olmayan ve renkli profillerin de üretimi rahat bir şekilde yapılabilmektedir (Sarıbyık, 2007). Şekil 1.11'de ise pultrozonik I-profiller gösterilmiştir.

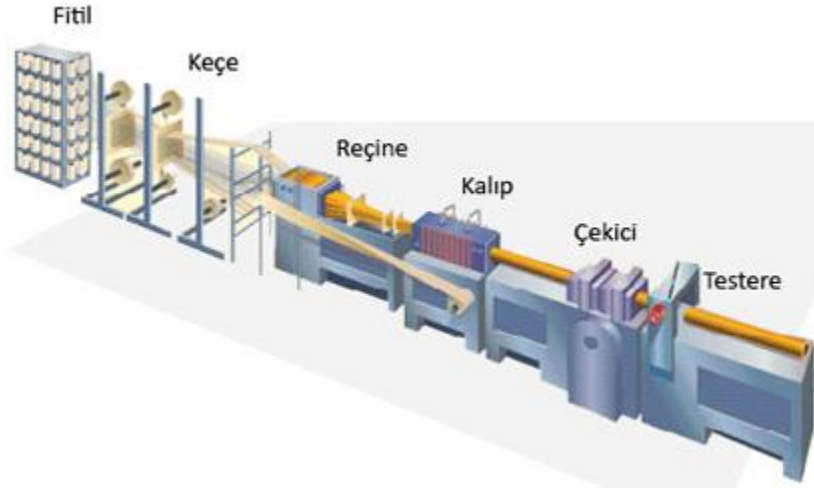


Şekil 1.10. Pultrüzyonik profil örnekleri



Şekil 1.11. Pultrüzyonik I-profiller. (Courtesy of Racquel Hagan.)

Pultrüzyon metodu; karbon, aramid ve cam elyaf gibi çeşitli elyaflar ile dokuma ve keçelerin bir reçine banyosundan geçirilerek kalıp içinde ısı altında şekillendirilmesidir. Burada elyaflar bir banyo içinde istenilen özelliklere uygun olan reçine ile ıslatılırlar ve şekillendirilmenin yapılacağı kalıp içine girerler. Kalıp içinde birkaç bölgede kontrol edilen sıcaklık dağılımı altında şekillendirirler ve daha sonra çekici yardımı ile çekilerek istenilen boylarda kesilirler. Bu yolla elde edilen kompozit malzeme termoset özelliklerde olup, sıcaklık ile tekrar yumuşamaz, eritilemez ve yapısında yüksek oranda elyaf yüzdesine sahip olurlar. Şekil 1.12’de Pultrüzyon süreci gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Pultrüzyon süreci

Pultrüzyon hattının çalışma prensibi; makineden ayrı bir bölümde bulunan elyaflar bobinlerden çekilir ve ilk olarak matris malzemesi olan reçine içinden geçerek ön kalıp olarak adlandırılan bölümden geçerken içlerindeki hava ve fazla reçineden arınır. Ön kalıptan çıkan malzemenin kullanım yerinde atmosfer ve diğer dış etmenlerden korunması için esas kalıba girmeden önce yüzeyi kaplanır. Kalıptan çıkan profiller paletler tarafından çekilmesi suretiyle sistemin sürekliliği sağlanır ve son işlem olarak istenen uzunluğa gelen malzemenin bıçaklar vasıtası ile kesilmesi sonucu işlem tamamlanmış olur.

Pultrüzyon metodu dışındaki üretim yöntemleriyle çeşitli elyaf türleri (karbon, aramid vb.) kullanarak çeşitli otomobil parçaları, uçak aksamaları ve inşaat sektöründe yardımcı veya dekoratif amaçlı elemanlar yapılabilmektedir. Fakat bu yöntemler ile üretilen kompozitlerin inşaat sektöründe birincil eleman olarak kullanılması mümkün olmamaktadır. Çünkü bu yöntemlerle üretilen malzemeler, yapıda taşıyıcı olarak kullanılan elemanların karşılması gereken çekme, basma veya kesme kuvvetlerine karşı gereken mukavemeti gösterememektedirler. Bu sorunu çözebilmek için yeni bir kompozit üretim yöntemi olan pultrüzyon metodu geliştirilmiştir. Pultrüzyon yöntemi, malzemenin kalıp boyunca çekilerek üretilmesi yöntemidir. Boyuna mukavemetin yüksek olduğu bu üretim şeklinde malzemenin enine mukavemetini de artırmak amacı ile özel olarak düğümlü üretilmiş fitil (keçe), dokunmuş ya da farklı eksenel yönlerde sahip cam kumaşlar ile kaplanır. Bunların dışında da yüzey düzgünlüğünü ve atmosferik etkileri azaltmak için termoplastik yüzey tülü çok kullanılan takviye malzemesidir. Bu metodun önemli özelliklerinden biri de kullanılan reçineye istenilen özellikleri geliştirmek amacı ile dolgu malzemeleri katılabilmesidir. Maliyeti düşürmek için 3-6 mikron boyutunda olan kalsiyum karbonat (kalsit), alev

dayanımı istendiğinde alüminyum hidroksit, korozyon dayanımı istendiğinde kil, elektriksel izolasyon istendiğinde alüminyum trihidrat gibi dolgu maddeleri kullanılabilir.

Pultrüzyon metodunda kullanılan reçinelerden aranan en önemli özellik, çekme hızına ve yüksek düzeyde tutabilecek reaktiviteye sahip olabilmesi ve iyi bir ısınmayı sağlayabilecek düşük viskoziteye veya seyreltilme olanağına sahip olmasıdır. Bu bağlamda kullanılan reçinelerin %90'ı polyester ve vinil reçinelerdir. Bunların dışında fenolik reçineler pultrüzyon yöntemi ile üretilen ürünlere yanmazlık ve düşük duman yayma özellikleri; epoksiler yüksek mukavemet, daha yüksek ısı dayanımı ve elektriksel özelliklerde yüksek performans sağlar.

1.9. Pultrüzyonik LP Kompozitlerin İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı

Yapısal Plastik Araştırma Konseyi (SPRC), 1971 yılında Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği (ASCE) tarafından kurulmuş ve yapısal plastiklerin tasarımı için bir el kitabı geliştirilmiştir. LP profillerinden inşa edilen ilk büyük yapılar, gelişmekte olan bilgisayar ve elektronik endüstrisinde Elektromanyetik Parazit (EMI) test laboratuvarları için kullanılan tek katlı üçgen çerçevelerdi. LP profillerinin elektromanyetik şeffaflığı, bu binalarda temel seviyesinin üzerinde manyetik malzeme gerektirmeyen önemli bir faydadır. Özel üretim sistemleri ve bina sistemleri 1960'lı yıllarda Teksas'ta Andrew Green tarafından kurulan Composites Technology, Inc. (CTI) tarafından geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir. 1985 yılında, CTI, Apple Computer için yenilikçi bir EMI binası tasarladı ve inşa etti. Büyük çaplı bina bileşenleri için en büyük pazar segmenti olmaya devam eden LP profilleri için bina sistemlerindeki bir sonraki büyük gelişme soğutma kulesi endüstrisinde yaşandı. 1980'lerde Seramik Soğutma Kulesi (CCT) için Composite Technology, Inc. tarafından bir LP bina sistemi geliştirildi ve Unilite sistemi olarak ticarileştirildi.

Özellikle kororyonun etkili olduğu ortamlara dayanıklı yürüme yolları, köprüler ve çatı makası kontrüksiyonları denenmiş başlıca uygulamaları oluşturmaktadır. Yaygın olarak kullanılan CTP profiller, profil çekme metodu ile seri olarak üretilmektedir. Köprü taban tabliyeleri sandviç kontrüksiyon metodu ile üretilmekte, böylelikle yüklerin homojen olarak dağılması ve yüksek rijitlik sağlanmaktadır. Şekil 1.13'te pultrüzyonik yaya köprüsü gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Pultrüzyon LP malzemeli yaya köprüsü (ET Techtonics.) (Akıncı, 2010)

Köprü mühendisliği alanında, LP projelerinin şekilleri 1970'lerin ortalarından bu yana artan bir uygulama görmüştür. Hem LP bileşenlerinin hem de aşındırıcı olmayan özelliklerinin hafif ağırlığı, köprü döşeme panelleri ve üst yapı elemanları olarak çekici olmalarını sağlar. Kafes çeşidinin (9 ila 27 m) uzunluğundaki kısa açıklıklı yaya köprüleri, küçük LP projeleri kullanılarak dünya çapında tasarlanmış ve üretilmiştir (Yıldırım, 2011).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu çalışma pultrüzyonik lifli polimer kompozit malzemelerden yapılmış kafes sistemlerin statik ve dinamik analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Lifli polimer kompozit malzemelerin kullanımı özellikle son zamanlarda gelişme göstermekte olup; ağır olmaması, korozyona karşı dayanıklı olması, yüksek çekme dayanım değerleri, elastisite modülü özellikleri ve pratik uygulanması gibi özelliklerinden dolayı kullanımı inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada kafes sistemlerde lifli polimer kompozit malzeme kullanımı üzerine iki çalışma yapılmıştır. Bunlardan birincisi düzlem kafes sistemlerde lifli kompozit malzeme kullanılması, ikincisi ise uzay kafes sistemlerde lifli kompozit malzeme kullanılmasına aittir. Lifli polimer kompozit malzeme olarak cam, karbon ve aramit kullanılmıştır. Çelik malzeme kullanılarak elde edilen değerler LP malzeme kullanılarak elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

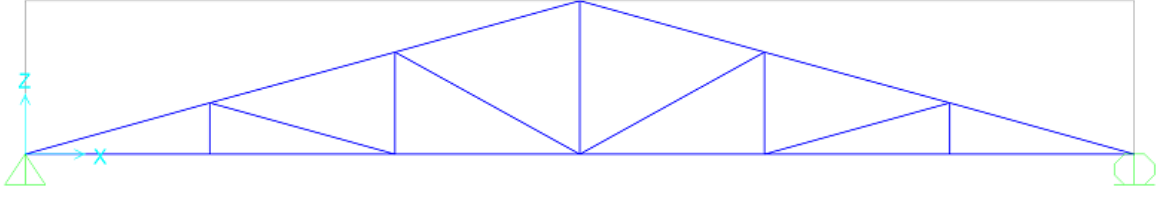
Kafes sistem örnekleri olarak düzlem kafes ve uzay kafes sistemler seçilmiştir.

Düzlem kafes sistemin makas açıklığı 10,5m olup yüksekliği ise 1,45m'dir. Bu kafes sistem toplamda 12 adet düğüm noktasından ve 21 adet çubuk elemandan oluşmaktadır.

Uzay kafes sistemi X yönünde 27m ve Y yönünde 36m açıklığa; Z yönünde ise 2,5m yüksekliğe sahiptir. Bu kafes sistem 185 adet düğüm noktası ve 652 adet çubuk elemandan oluşmaktadır.

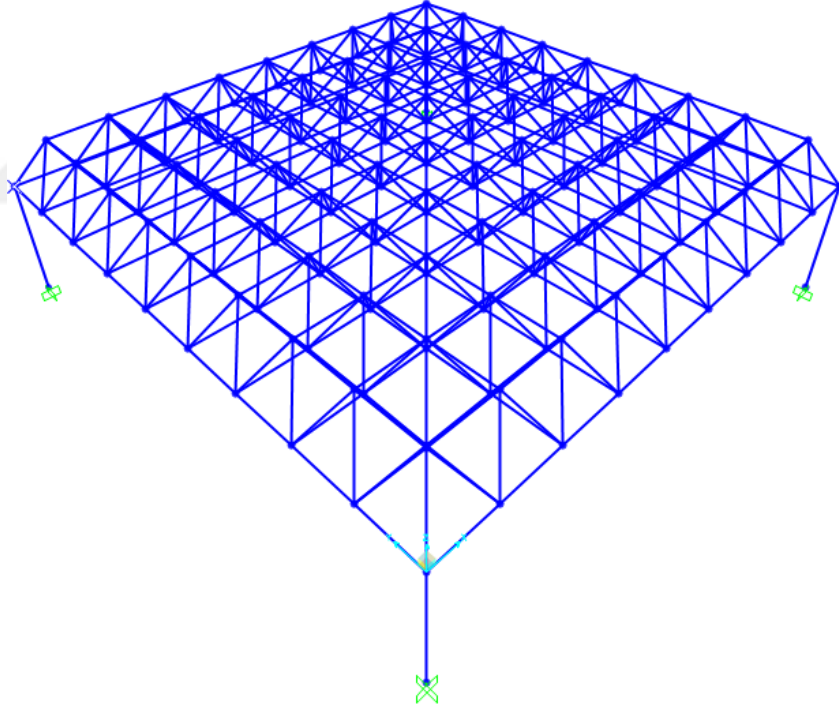
2.2. Düzlem Kafes ve Uzay Kafes Sistem Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Düzlem kafes sistemin TS498 yönetmeliğinden yararlanılarak belirlenen yükler altında, SAP2000 yazılımı ile modellenip, statik ve dinamik analizi yapılmıştır. Düzlem kafes sistemde kullanılan çubuk elemanlarda kesit olarak 2L120.120.18mm seçilmiştir. Kar yükü 0,80kN/m², rüzgar yükü 0,50kN/m² olarak dikkate alınmıştır. Düzlem kafes sistemin sonlu eleman modeli Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Düzlem kafes sistem sonlu eleman modeli

Uzay kafes sistemin TS498 yönetmeliğinden yararlanılarak belirlenen yükler altında, SAP2000 yazılımı ile modellenip, statik ve dinamik analizi yapılmıştır. Kullanılan çubuk elemanlar boru kesitli olup, kesitleri $\text{Ø}60,3,3,65\text{mm}$; $\text{Ø}33,7,3,25\text{mm}$ şeklindedir. Kullanılan kolon kesiti ise $200.200.15\text{mm}$ olan kutu profildir. Kar yükü $0,75\text{kN/m}^2$, rüzgar yükü $0,50\text{kN/m}^2$ olarak dikkate alınmıştır. Uzay kafes sonlu eleman modeli Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Uzay kafes sonlu eleman modeli

2.3. Lifli Polimer Kompozit Malzeme Kesit Alanlarının Belirlenmesi

Düzlem ve uzay kafes sistemlerin statik ve dinamik davranışlarında, LP kompozit malzemelerin etkisini belirlemek amacıyla Tablo 2.1’de özellikleri verilen cam, karbon ve aramid LP kompozit malzemeler dikkate alınmıştır.

Tablo 2.1. Cam, karbon, aramid LP kompozit malzeme özellikleri (URL-1).

Özellikler	Cam	Karbon	Aramid	Çelik
Elastisite modülü (E) (MPa)	40000	135000	75000	210000
Poisson oranı (ν)	0,25	0,30	0,34	0,30
Yoğunluk (ρ) (g/cm ³)	1,900	1,600	1,400	7,849
Gerilme dayanımı (σ) (MPa)	1000	1500	1300	1000

Çelik kullanılarak gerçekleştirilmiş olan statik ve dinamik analizler, cam LP kompozit, karbon LP kompozit ve aramid LP kompozit malzemeler için de tekrarlanmıştır. LP kompozit malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sırasında Tablo 2.1.’de verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. LP kompozit malzemelere ait kesit alanları ise çelik kesit alanı esas alınarak eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemlerine göre, her bir LP kompozit malzeme için ayrı ayrı belirlenmiştir.

2.3.1.Eşdeğer Rijitlik Yöntemi

Eşdeğer rijitlik yöntemine göre hesapta;

$$E_{\text{çelik}} \times A_{\text{çelik}} = E_{\text{cam}} \times A_{\text{cam}} \quad (2.1)$$

$$E_{\text{çelik}} \times A_{\text{çelik}} = E_{\text{karbon}} \times A_{\text{karbon}} \quad (2.2)$$

$$E_{\text{çelik}} \times A_{\text{çelik}} = E_{\text{aramid}} \times A_{\text{aramid}} \quad (2.3)$$

formülasyonu kullanılmıştır. Burada $E_{\text{çelik}}$, E_{cam} , E_{karbon} , E_{aramid} sırasıyla çelik, cam LP kompozit, karbon LP kompozit, aramid LP kompozit malzemelerin elastisite modülünü; $A_{\text{çelik}}$, A_{cam} , A_{karbon} , A_{aramid} sırasıyla çelik, cam LP kompozit, karbon LP kompozit, aramid LP kompozit malzemelerin kesit alanını göstermektedir.

Denklem (2.1) ile elde edilen cam kesit alanı, Denklem (2.2) ile elde edilen karbon kesit alanı ve Denklem (2.3) ile elde edilen aramid kesit alanı düzlem kafes sistem için Tablo 2.2’de, uzay kafes sistem için Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Düzlem kafes sistem için eşdeğer rijitlik yöntemi ile hesaplanan kesit alanları

Eleman	Değişken	Değer(mm ²)
Çelik	Çelik kesit alanı	7992
Cam	Cam kesit alanı	41958
Karbon	Karbon kesit alanı	12467
Aramid	Aramid kesit alanı	22378

Tablo 2.3. Uzay kafes sistem için eşdeğer rijitlik yöntemi ile hesaplanan kesit alanları

Eleman	Değişken	Değer (mm ²)
Çelik	Çubuk eleman kesit alanı	650
	Çubuk eleman kesit alanı	311
	Kolon kesit alanı	11100
Cam	Çubuk eleman kesit alanı	3413
	Çubuk eleman kesit alanı	1633
	Kolon kesit alanı	58275
Karbon	Çubuk eleman kesit alanı	1014
	Çubuk eleman kesit alanı	485
	Kolon kesit alanı	17316
Aramid	Çubuk eleman kesit alanı	1820
	Çubuk eleman kesit alanı	871
	Kolon kesit alanı	31080

2.3.2.Eşdeğer Dayanım Yöntemi

Eşdeğer dayanım yöntemine göre hesapta;

$$\sigma_{\text{çelik}} \times A_{\text{çelik}} = \sigma_{\text{cam}} \times A_{\text{cam}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{\text{çelik}} \times A_{\text{çelik}} = \sigma_{\text{karbon}} \times A_{\text{karbon}} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{\text{çelik}} \times A_{\text{çelik}} = \sigma_{\text{aramid}} \times A_{\text{aramid}} \quad (2.6)$$

formülasyonu kullanılmıştır. Burada Burada $\sigma_{\text{çelik}}$, σ_{cam} , σ_{karbon} , σ_{aramid} sırasıyla çelik, cam LP kompozit, karbon LP kompozit, aramid LP kompozit malzemelerin gerilme dayanımını; $A_{\text{çelik}}$, A_{cam} , A_{karbon} , A_{aramid} sırasıyla çelik, cam LP kompozit, karbon LP kompozit, aramid LP kompozit malzemelerin kesit alanını göstermektedir.

Denklem (2.4) ile elde edilen cam kesit alanı, Denklem (2.5) ile elde edilen karbon kesit alanı ve Denklem (2.6) ile elde edilen aramid kesit alanı düzlem kafes sistem için Tablo 2.4'te ve uzay kafes sistem için Tablo 2.5'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Düzlem kafes sistem için eşdeğer dayanım yöntemi ile hesaplanan kesit alanları

Eleman	Değişken	Değer (mm ²)
Çelik	Çelik kesit alanı	7992
Cam	Cam kesit alanı	7912
Karbon	Karbon kesit alanı	5275
Aramid	Aramid kesit alanı	6086

Tablo 2.5. Uzay kafes sistem için eşdeğer dayanım yöntemi ile hesaplanan kesit alanları

Eleman	Değişken	Değer (mm ²)
Çelik	Çubuk eleman kesit alanı	650
	Çubuk eleman kesit alanı	311
	Kolon kesit alanı	11100
Cam	Çubuk eleman kesit alanı	644
	Kolon kesit alanı	308
	Kolon kesit alanı	10989
Karbon	Çubuk eleman kesit alanı	429
	Çubuk eleman kesit alanı	206
	Kolon kesit alanı	7326
Aramid	Çubuk eleman kesit alanı	495
	Çubuk eleman kesit alanı	237
	Kolon kesit alanı	8453

2.3.3. Seçilen Profil Tabloları

LP kompozit malzemeler için Tablo 2.6, Tablo 2.7 ve Tablo 2.8'de verilen profillerden, hesaplamalar sonucu elde edilen alana yakın olan profiller kullanılmıştır. LP kompozit malzemelerin kesit alanlarının oluşturulmasında gerekli olduğu durumlarda hem profil boyu hem de et kalınlıkları artırılarak kesit alanları elde edilmiştir.

Tablo 2.6. Eşit kollu L profil tablosu (URL-3)

Özellik	h mm	b mm	t mm	A mm ²	I mm ⁴	S mm ³	r mm	r _z mm
AE120	25,4	25,4	3,175	142	184	492	7,72	4,62
AE140	25,4	25,4	6,35	271	306	869	7,26	4,65
AE122	38,1	38,1	3,175	226	656	1163	11,81	7,21
AE130	38,1	38,1	4,7625	329	927	1655	11,56	7,16
AE142	38,1	38,1	6,35	432	1163	2114	11,30	7,14
AE220	50,8	50,8	3,175	303	1629	2114	15,90	9,80
AE230	50,8	50,8	4,7625	452	2325	3064	15,65	9,73
AE240	50,8	50,8	6,35	594	2954	3949	15,39	9,68
AE320	76,2	76,2	3,175	465	5690	4867	24,10	14,99
AE330	76,2	76,2	4,7625	697	8278	7128	23,83	14,91
AE340	76,2	76,2	6,35	916	10690	9308	23,55	14,83
AE360	76,2	76,2	9,525	1348	15043	13355	23,06	14,68
AE440	101,6	101,6	6,35	1239	26240	16944	31,75	19,99
AE460	101,6	101,6	9,525	1832	37498	24564	31,24	19,81
AE480	101,6	101,6	12,7	2400	47646	31693	30,76	19,66
AE640	152,4	152,4	6,35	1884	91700	39034	48,13	30,33
AE660	152,4	152,4	9,525	2800	133123	57224	47,60	30,10
AE680	152,4	152,4	12,7	3690	171792	74594	47,09	29,90

Tablo 2.7. Boru kesit için profil tablosu (URL-3)

Özellik	D (mm)	d (mm)	t (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	S (mm ³)	r (mm)
TU005	19,05	14,22	2,38	123	4162	492	5,84
TU120	25,40	19,05	3,18	219	12487	1147	7,87
TU118	31,75	25,40	2,38	219	24974	1475	10,41
TU122	31,75	25,40	3,18	284	29136	1803	10,16
TU124	38,10	31,75	3,18	348	54110	2786	12,45
TU143	38,10	25,40	6,35	632	83246	4425	11,43
TU126	44,45	38,10	3,18	413	87409	3933	14,73
TU142	44,45	31,75	6,35	587	141519	6391	13,72
TU220	50,80	44,45	6,35	471	137356	5408	16,76
TU240	50,80	38,10	3,18	884	224765	8849	16,00
TU222	63,50	57,15	6,35	600	274713	8685	21,34
TU242	63,50	50,80	3,18	1142	470342	14912	20,32
TU340	76,20	63,50	6,35	1394	857437	22450	24,89
TU410	102,11	87,88	7,11	2090	2368357	46539	33,78

Tablo 2.8. Kutu kesit için profil tablosu (URL-4)

Özellik	H(mm)	B(mm)	t(mm)	A(mm ²)
200x200x10	200	200	10	7690
200x200x12	240	240	12	11100

2.3.4. Statik Analiz Denklemi

Statik analiz denklemi, Denklem (2.7) deki gibidir.

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (2.7)$$

Burada, $[K]$ sistem rijitlik matrisini, $\{U\}$ sistem yerdeğiştirme vektörünü, $\{F\}$ sistem yük vektörünü göstermektedir.

2.3.5. Dinamik Analiz Denklemi

Dinamik analiz denklemi, Denklem (2.8) deki gibidir.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (2.8)$$

Burada, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla sistem kütle, sönüm ve rijitlik matrisini, $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$ ve $\{U\}$ sırasıyla sistem ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini, $\{F\}$ ise sistem yük vektörünü göstermektedir.

2.4. Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

2.4.1. Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çelik, cam LP, karbon LP ve aramid LP malzemeler dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucunda düzlem kafes sistem için elde edilen ilk 12 moda ait frekans ve periyot değerleri Tablo 2.9 ve Tablo 2.10'da verilmektedir.

Çelik ve Eşdeğer Rijitlik Yöntemine göre; cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilmiş mod şekilleri Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de verilmiştir.

Çelik ve Eşdeğer Dayanım Yöntemine göre; cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilmiş mod şekilleri Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'de verilmiştir.

Çelik için hesaplanan periyot değerleri 0,00169s ile 0,05150s arasında değişmektedir.

Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için elde edilen periyot değerleri 0,00193s ile 0,05880s arasında; karbon LP için bulunan periyot değerleri 0,00096s ile 0,02937s arasında ve aramid LP için hesaplanan periyot değerleri 0,00121s ile 0,03686s arasında değişmektedir.

Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için elde edilen periyot değerleri 0,00061s ile 0,01860s arasında, karbon LP için periyot değerleri 0,00096s ile 0,02937s arasında ve aramid LP için hesaplanan periyot değerleri 0,00121s ile 0,03686s arasında değişmektedir.

2.4.2. Uzay Kafes Sistem İçin Elde Edilen Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

elik, cam LP, karbon LP ve aramid LP malzemeler dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucunda uzay kafes sitem için elde edilen ilk 12 moda ait frekans ve periyot değerleri Tablo 2.11 ve Tablo 2.12’de verilmektedir.

elik ve Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen mod şekilleri şekil 2.7 ve şekil 2.8’de verilmiştir.

elik ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen mod şekilleri şekil 2.9 ve şekil 2.10’da verilmiştir.

elik için hesaplanan periyot değerleri 0,02923s ile 0,42813s arasında değişmektedir.

Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için elde edilen periyot değerleri 0,03265s ile 0,53155s arasında, karbon LP için bulunan periyot değerleri 0,01959s ile 0,23994s arasında ve aramid LP için hesaplanan periyot değerleri 0,02066s ile 0,27899s arasında değişmektedir.

Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için elde edilen periyot değerleri 0,03304s ile 0,48335s arasında, karbon LP için bulunan periyot değerleri 0,01649s ile 0,23471s arasında ve aramid LP için hesaplanan periyot değerleri 0,02067s ile 0,30182s arasında değişmektedir.

Tablo 2.9. Düzlem kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - Eşdeğer rijitlik yöntemine göre periyot ve frekans değerleri

Mod No	Çelik		LP EŞDEĞER RİJİTLİK					
			Cam LP		Karbon LP		Aramid LP	
	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)
1	0,05150	19,41832	0,05880	17,00583	0,02937	34,04487	0,03686	27,12760
2	0,02077	48,14277	0,02372	42,16162	0,01185	84,40555	0,01487	67,25595
3	0,01010	99,01184	0,01153	86,71083	0,00576	173,59093	0,00723	138,32057
4	0,00919	108,86982	0,01049	95,34408	0,00524	190,87429	0,00658	152,09227
5	0,00680	147,01206	0,00777	128,74761	0,00388	257,74655	0,00487	205,37737
6	0,00456	219,25935	0,00521	192,01906	0,00260	384,41296	0,00327	306,30758
7	0,00338	295,97350	0,00386	259,20241	0,00193	518,91083	0,00242	413,47804
8	0,00254	393,84229	0,00290	344,91220	0,00145	690,49773	0,00182	550,20176
9	0,00215	465,02313	0,00246	407,24969	0,00123	815,29441	0,00154	649,64213
10	0,00191	523,03814	0,00218	458,05704	0,00109	917,00829	0,00137	730,68970
11	0,00173	579,47825	0,00197	507,48516	0,00098	1015,96103	0,00124	809,53712
12	0,00169	593,28887	0,00193	519,57998	0,00096	1040,17427	0,00121	828,83069

Tablo 2.10. Düzlem kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - Eşdeğer dayanım yöntemine göre frekans ve periyot değerleri

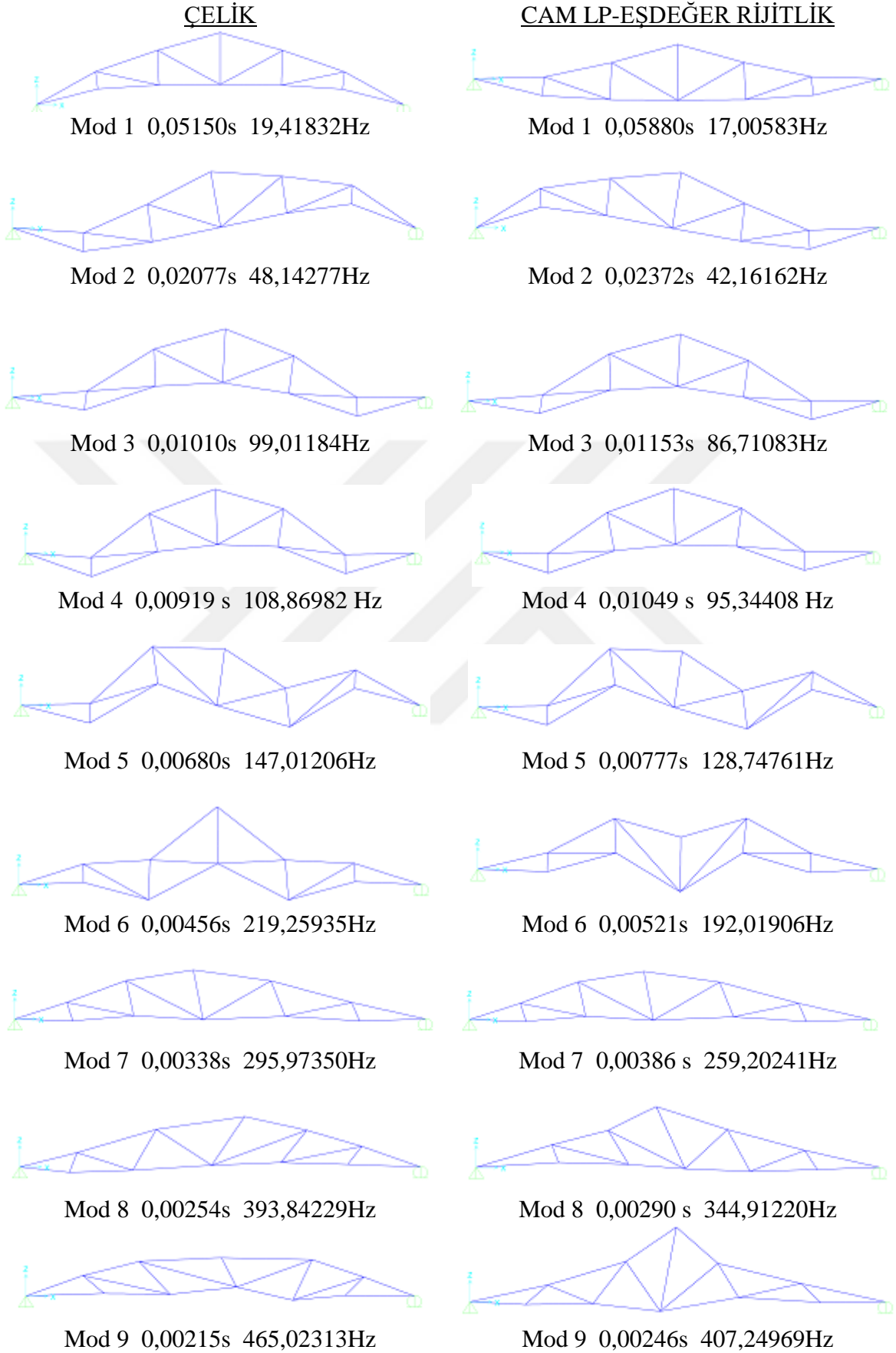
Mod No	Çelik		LP EŞDEĞER DAYANIM					
			Cam LP		Karbon LP		Aramid LP	
	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)
1	0,05150	19,41832	0,01860	53,77717	0,02937	34,04487	0,03686	27,12760
2	0,02077	48,14277	0,00750	133,32675	0,01185	84,40555	0,01487	67,25595
3	0,01010	99,01184	0,00365	274,20372	0,00576	173,59093	0,00723	138,32057
4	0,00919	108,86982	0,00332	301,50445	0,00524	190,87429	0,00658	152,09227
5	0,00680	147,01206	0,00246	407,13568	0,00388	257,74655	0,00487	205,37737
6	0,00456	219,25935	0,00165	607,21757	0,00260	384,41296	0,00327	306,30758
7	0,00338	295,97350	0,00122	819,66999	0,00193	518,91083	0,00242	413,47804
8	0,00254	393,84229	0,00092	1090,70814	0,00145	690,49773	0,00182	550,20176
9	0,00215	465,02313	0,00078	1287,83661	0,00123	815,29441	0,00154	649,64213
10	0,00191	523,03814	0,00069	1448,50355	0,00109	917,00829	0,00137	730,68970
11	0,00173	579,47825	0,00062	1604,80900	0,00098	1015,96103	0,00124	809,53712
12	0,00169	593,28887	0,00061	1643,05616	0,00096	1040,17427	0,00121	828,83069

Tablo 2.11. Uzay kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - eşdeğer rijitlik yöntemine göre periyot ve frekans değerleri

Mod No	Çelik		LP EŞDEĞER RİJİTLİK					
			Cam LP		Karbon LP		Aramid LP	
	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)
1	0,42813	2,33577	0,53155	1,88129	0,23994	4,16768	0,27899	3,58430
2	0,42813	2,33577	0,53155	1,88129	0,23994	4,16768	0,27899	3,58430
3	0,31409	3,18384	0,38925	2,56905	0,21302	4,69434	0,20449	4,89034
4	0,10654	9,38600	0,11925	8,38595	0,06483	15,42587	0,07532	13,27679
5	0,06961	14,36672	0,07791	12,83485	0,04699	21,27973	0,04921	20,32078
6	0,06961	14,36672	0,07791	12,83485	0,04699	21,27973	0,04921	20,32078
7	0,03725	26,84563	0,04184	23,90293	0,03992	25,04960	0,02626	38,08419
8	0,03504	28,53867	0,03904	25,61363	0,03989	25,06692	0,02474	40,42900
9	0,03499	28,58158	0,03904	25,61363	0,03231	30,95157	0,02468	40,51135
10	0,03499	28,58158	0,03902	25,63045	0,03231	30,95157	0,02468	40,51135
11	0,02992	33,42789	0,03339	29,95377	0,02921	34,24091	0,02114	47,30343
12	0,02923	34,21203	0,03265	30,62684	0,01959	51,05476	0,02066	48,39932

Tablo 2.12. Uzak kafes sisteme ait çelik, LP malzeme - eşdeğer dayanım yöntemine göre periyot ve frekans değerleri

Mod No	Çelik		LP EŞDEĞER DAYANIM					
			Cam LP		Karbon LP		Aramid LP	
	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)	Periyot(s)	Frekans(Hz)
1	0,42813	2,33577	0,48335	2,06891	0,23471	4,26052	0,30182	3,31329
2	0,42813	2,33577	0,48335	2,06891	0,23471	4,26052	0,30182	3,31329
3	0,31409	3,18384	0,35471	2,81921	0,17216	5,80866	0,22139	4,51688
4	0,10654	9,38600	0,12040	8,30551	0,06011	16,63643	0,07536	13,26929
5	0,06961	14,36672	0,07865	12,71457	0,03927	25,46694	0,04923	20,31217
6	0,06961	14,36672	0,07865	12,71457	0,03927	25,46694	0,04923	20,31217
7	0,03725	26,84563	0,04202	23,79908	0,02096	47,70752	0,02631	38,00252
8	0,03504	28,53867	0,03963	25,23291	0,01977	50,59424	0,02478	40,35632
9	0,03499	28,58158	0,03954	25,28931	0,01972	50,70728	0,02473	40,43054
10	0,03499	28,58158	0,03954	25,28931	0,01972	50,70728	0,02473	40,43054
11	0,02992	33,42789	0,03382	29,57040	0,01688	59,25403	0,02116	47,26635
12	0,02923	34,21203	0,03304	30,27069	0,01649	60,64450	0,02067	48,37429



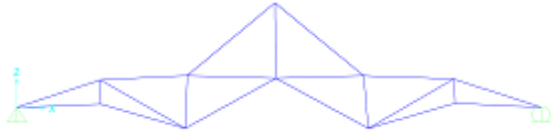
Şekil 2.3. Düzlem kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri

Şekil 2.3. Devamı

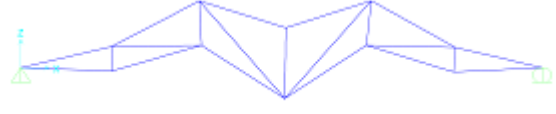


Şekil 2.4. Düzlem kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri

Şekil 2.4. Devamı



Mod 6 0,00260s 384,41296Hz



Mod 6 0,00327s 306,30758Hz



Mod 7 0,00193s 518,91083Hz



Mod 7 0,00242 s 413,47804 Hz



Mod 8 0,00145s 690,49773Hz



Mod 8 0,00182 s 550,20176 Hz



Mod 9 0,00123s 815,29441Hz



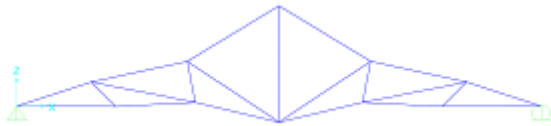
Mod 9 0,00154 s 649,64213 Hz



Mod 10 0,00109s 917,00829Hz



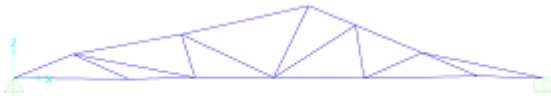
Mod 10 0,00137s 730,68970Hz



Mod 11 0,00098s 1015,96103Hz



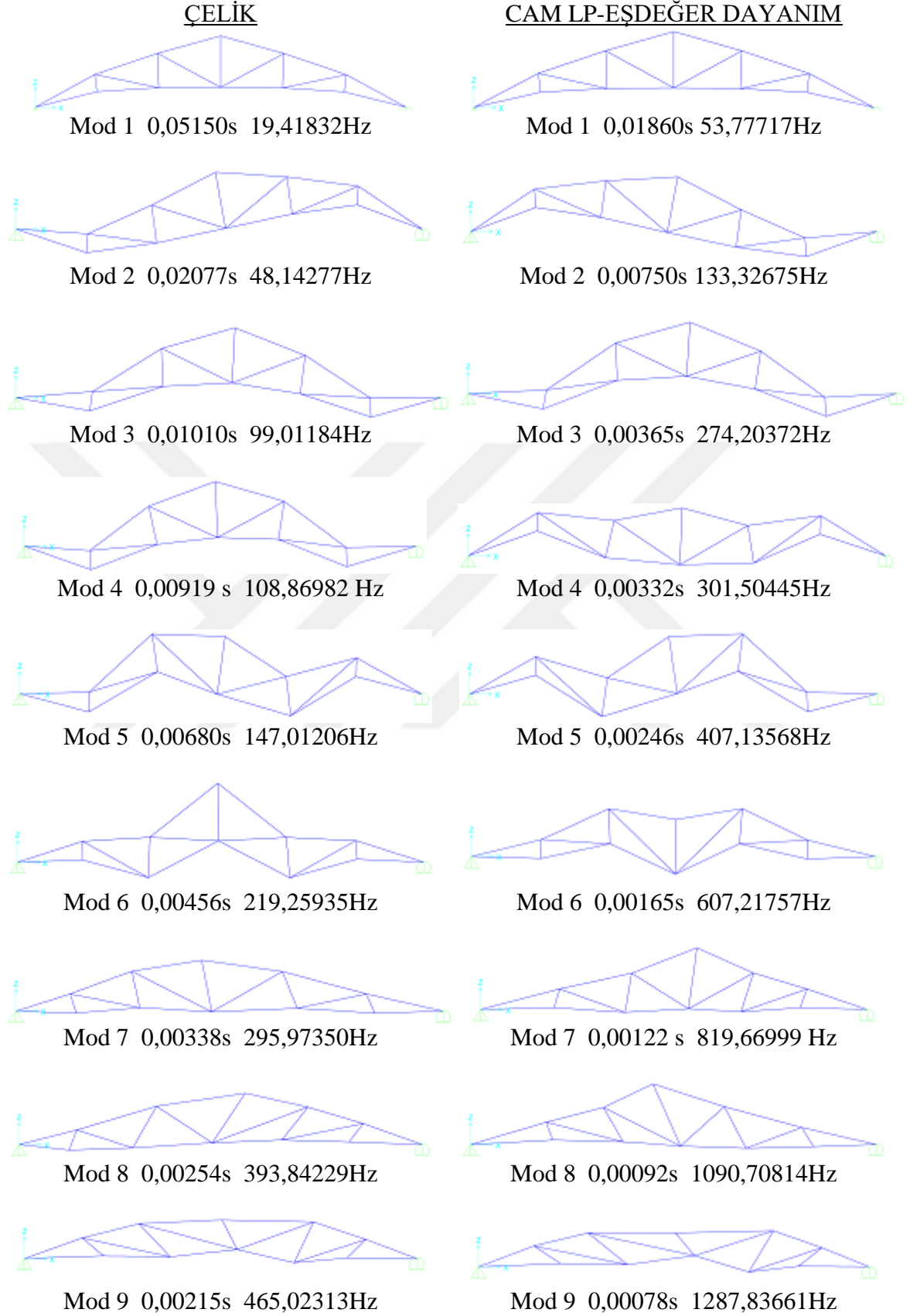
Mod 11 0,00124s 809,53712Hz



Mod 12 0,00096s 1040,1742Hz

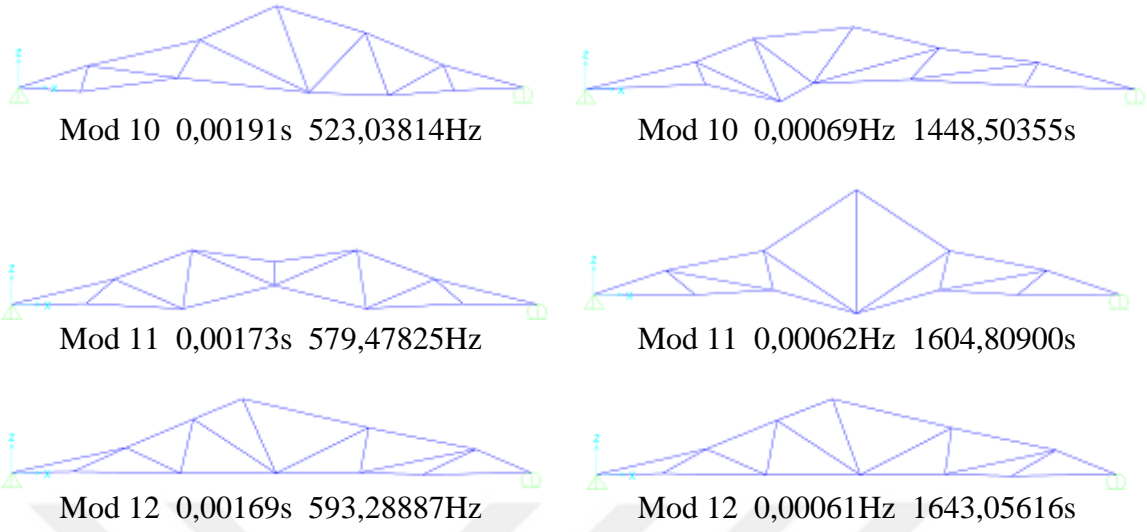
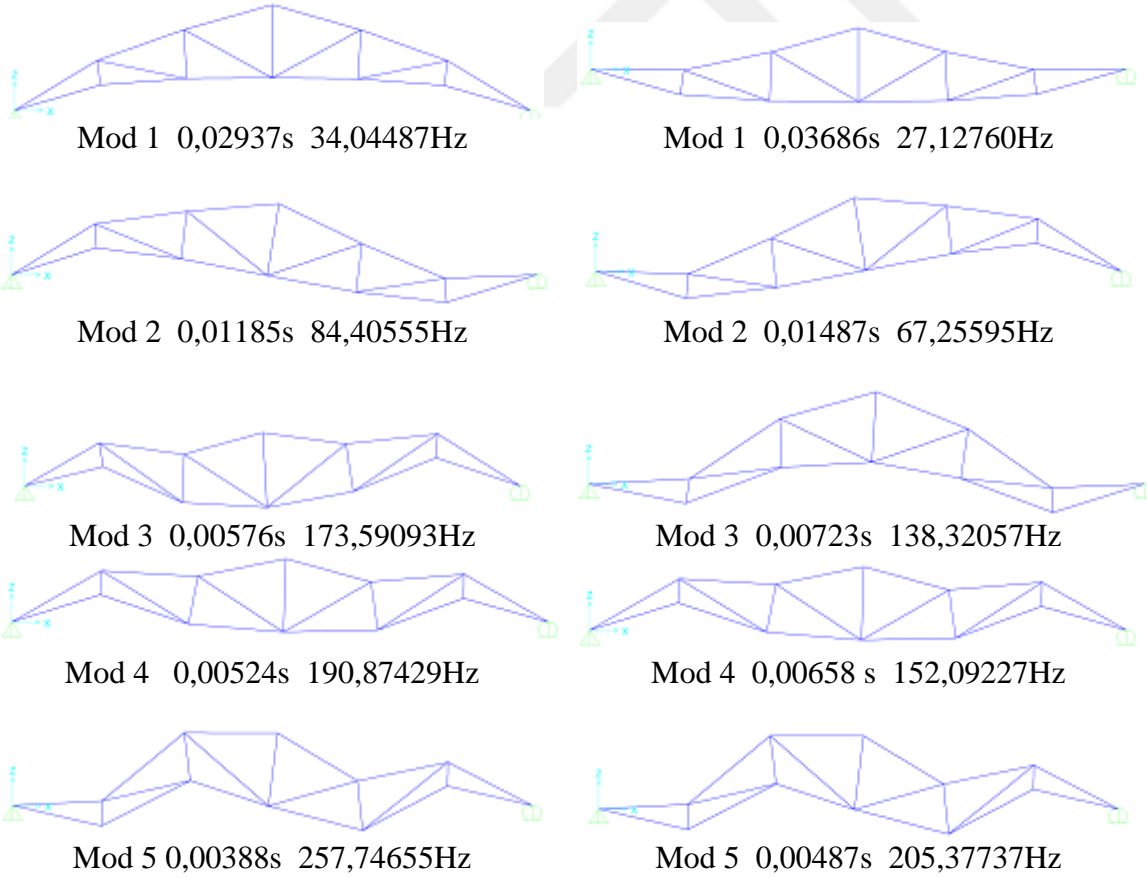


Mod 12 0,00121s 828,83069Hz



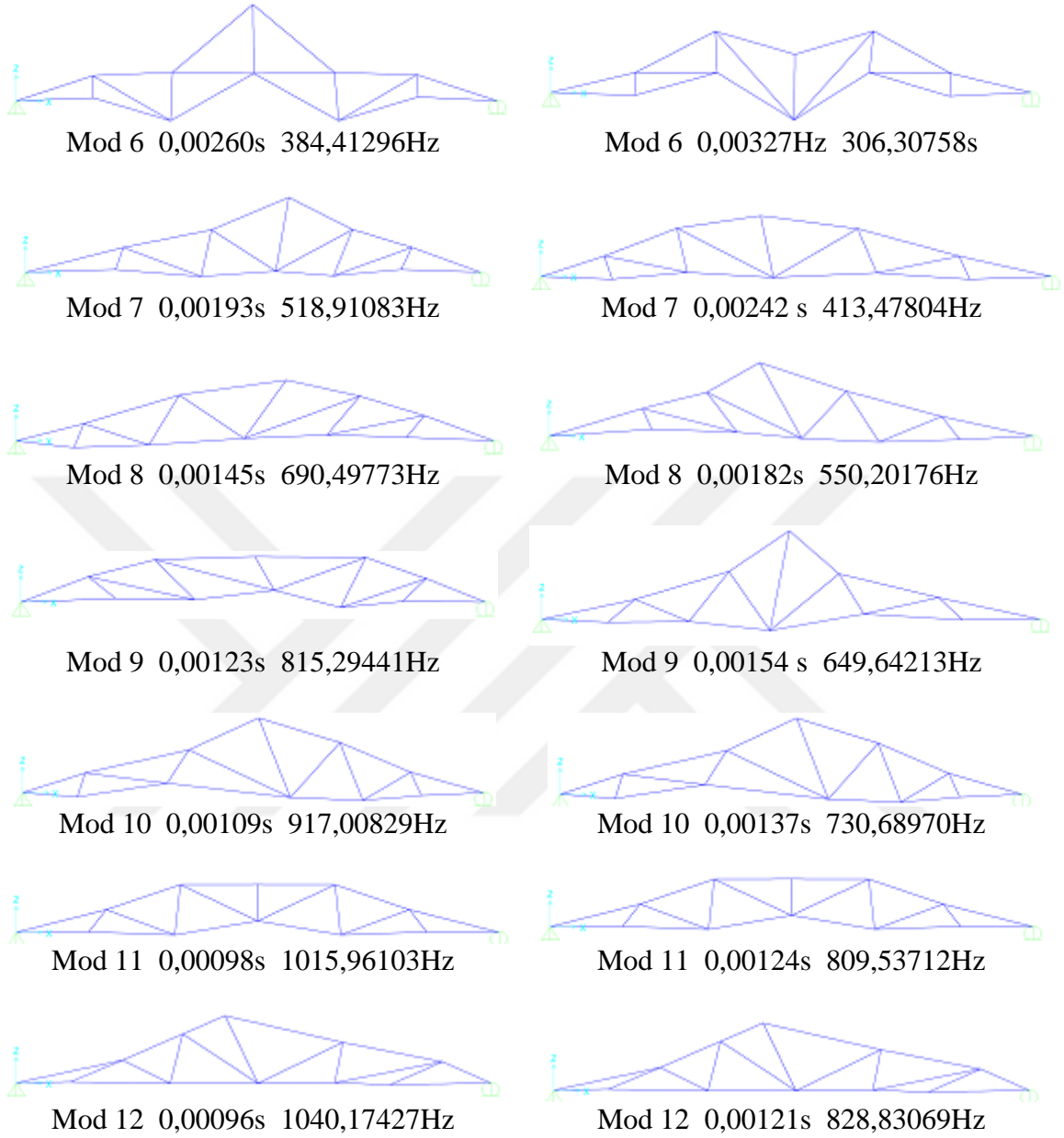
Şekil 2.5. Düzlem kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri

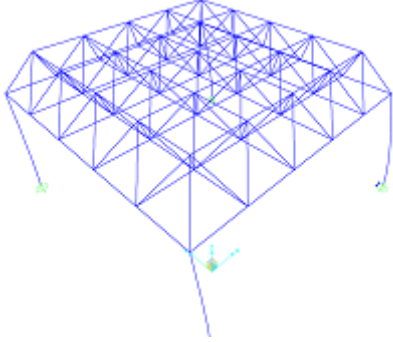
Şekil 2.5. Devamı

KARBON LP-EŞDEĞER DAYANIMARAMİD LP-EŞDEĞER DAYANIM

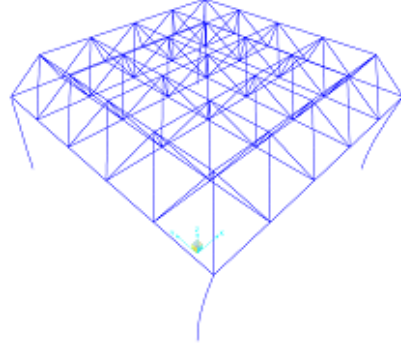
Şekil 2.6. Düzlem kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri

Şekil 2.6. Devamı

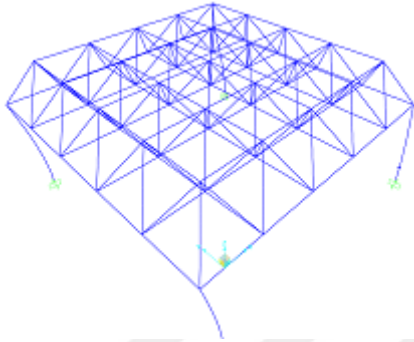


ÇELİK

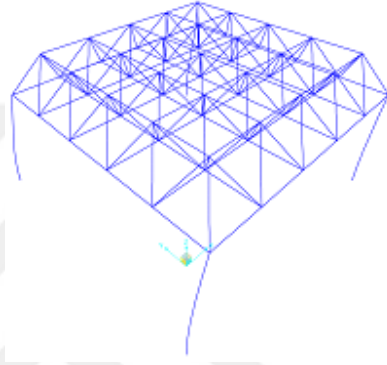
Mod 1 0,42813s 2,33577Hz

CAM LP-EŞDEĞER RİJİTLİK

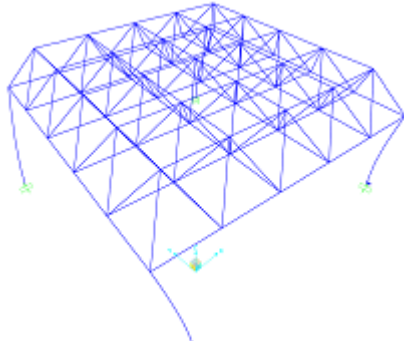
Mod 1 0,53155s 1,88129Hz



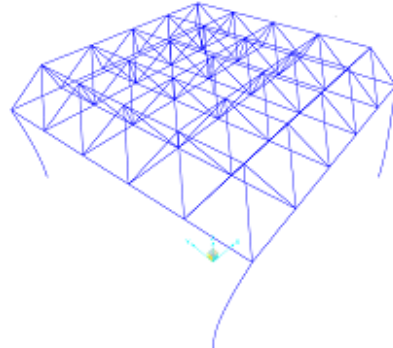
Mod 2 0,42813s 2,33577Hz



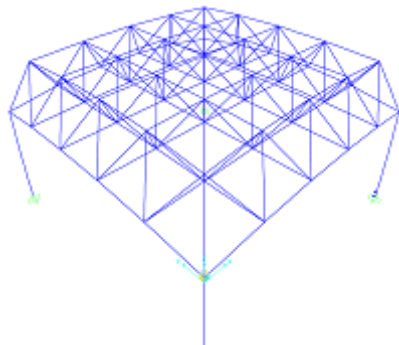
Mod 2 0,53155s 1,88129Hz



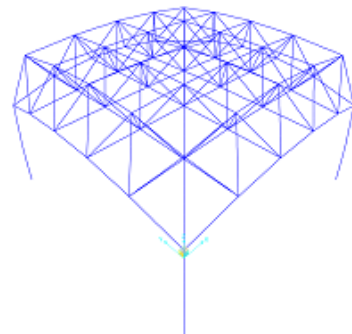
Mod 3 0,31409s 3,1838Hz



Mod 3 0,38925s 2,56905Hz



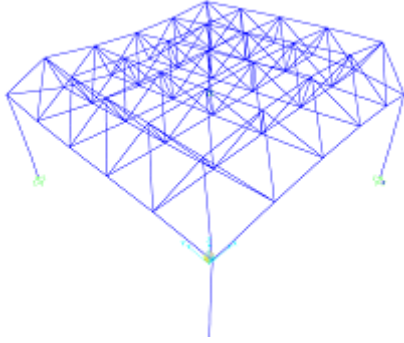
Mod 4 0,10654s 9,386Hz



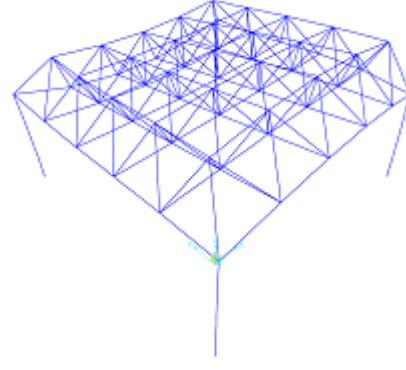
Mod 4 0,11925s 8,38595Hz

Şekil 2.7. Uzay kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri

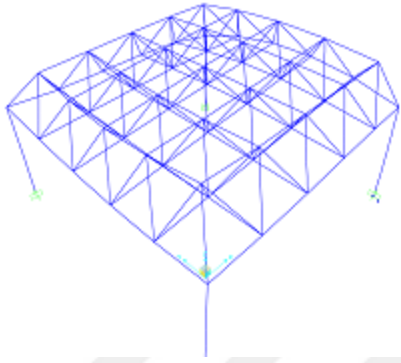
Şekil 2.7. Devamı



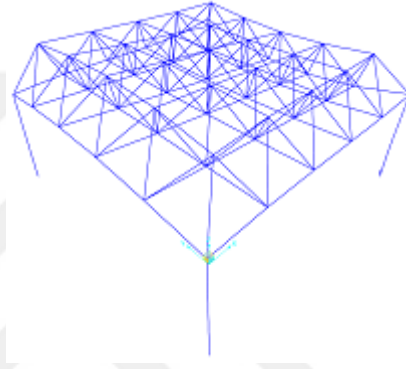
Mod 5 0,06961s 14,36672Hz



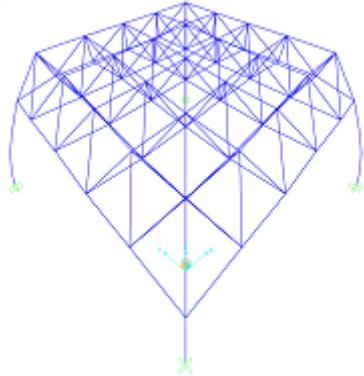
Mod 5 0,07791s 12,83485Hz



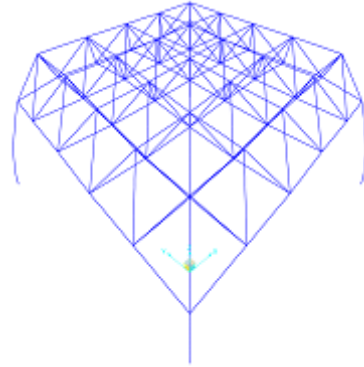
Mod 6 0,06961s 14,36672Hz



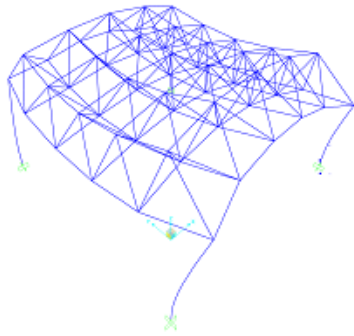
Mod 6 0,07791s 12,83485Hz



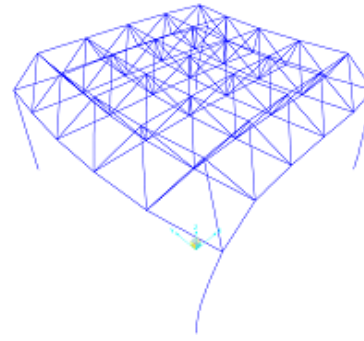
Mod 7 0,03725s 26,84563Hz



Mod 7 0,04184s 23,90293Hz

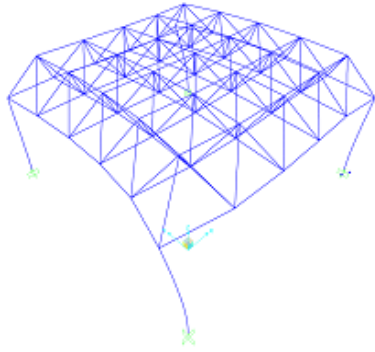


Mod 8 0,03504s 28,5356Hz

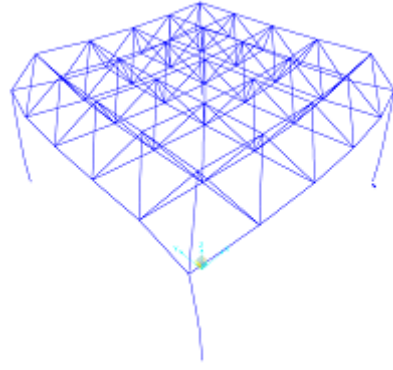


Mod 8 0,03904s 25,61363Hz

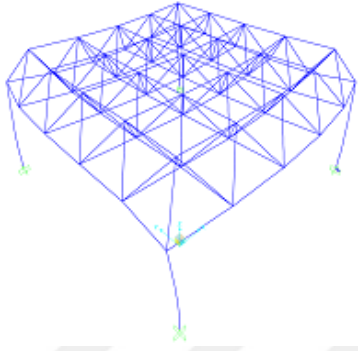
Şekil 2.7. Devamı



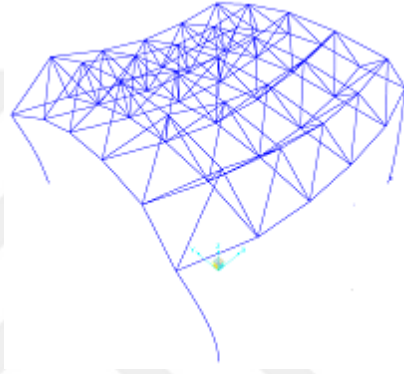
Mod 9 0,03499s 28,58158Hz



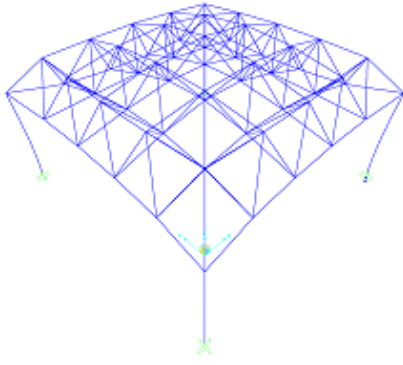
Mod 9 0,03904s 25,61363Hz



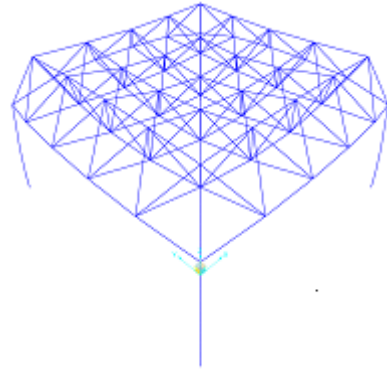
Mod 10 0,03499s 28,58158Hz



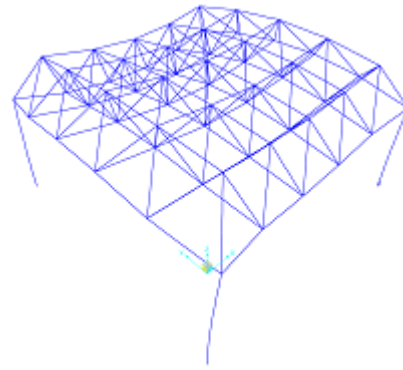
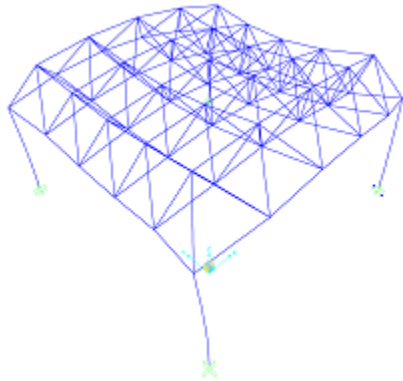
Mod 10 0,03902s 25,63045Hz

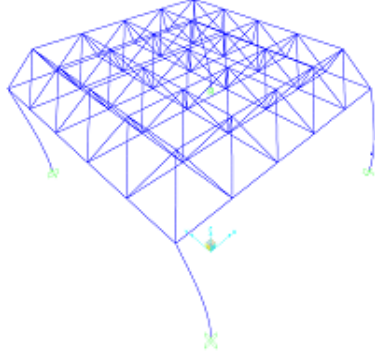


Mod 11 0,02992s 33,42789Hz

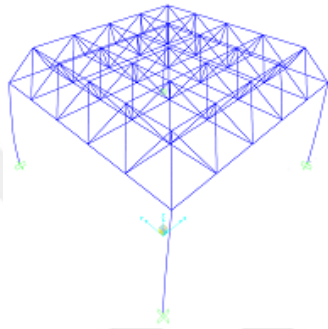


Mod 11 0,03339s 29,95377Hz

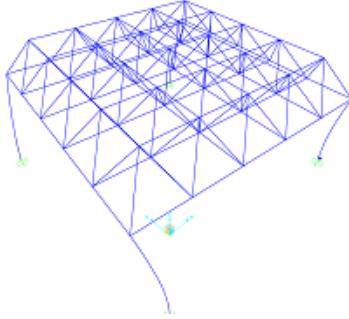


KARBON LP-EŞDEĞER RİJİTLİK

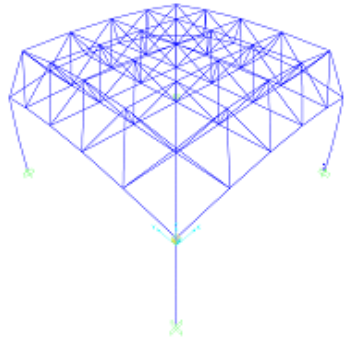
Mod 1 0,23994s 4,16768Hz



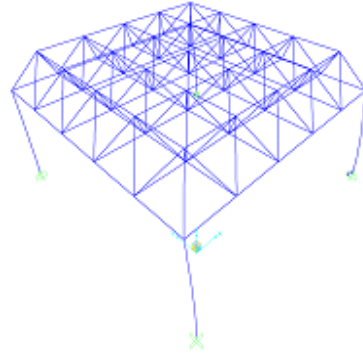
Mod 2 0,23994s 4,16768Hz



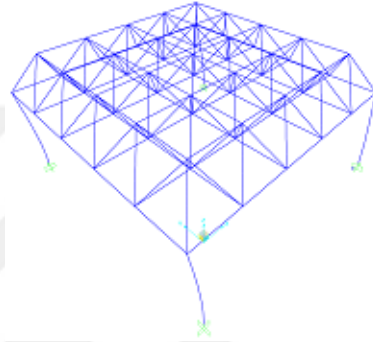
Mod 3 0,21302s 4,69434Hz



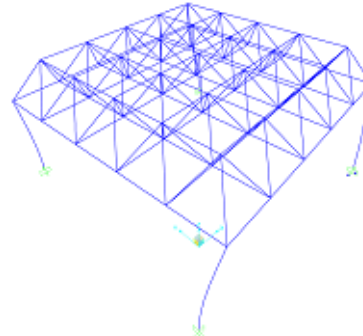
Mod 4 0,06483s 15,42587Hz

ARAMİD LP-EŞDEĞER RİJİTLİK

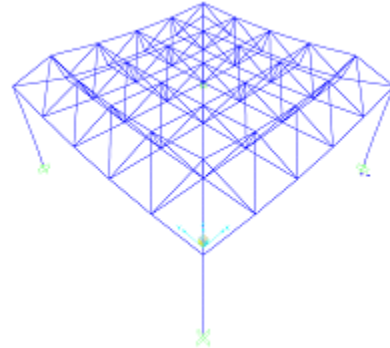
Mod 1 0,27899s 3,58430Hz



Mod 2 0,27899s 3,58430Hz



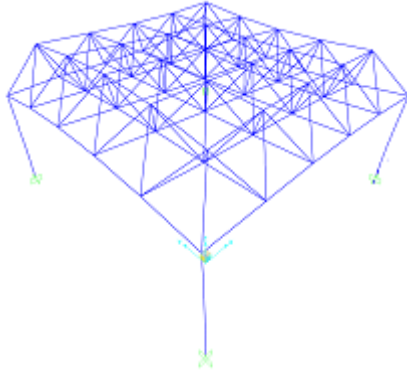
Mod 3 0,20449s 4,89034Hz



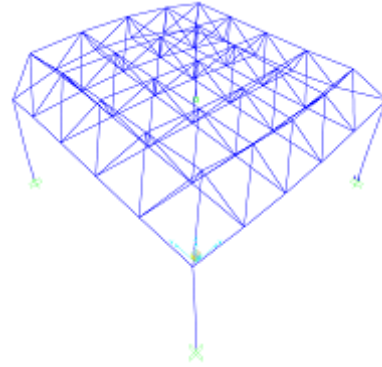
Mod 4 0,07532s 13,27679Hz

Şekil 2.8. Uzak kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Rijitlik'e ait mod şekilleri

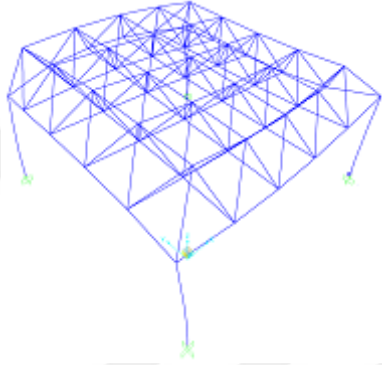
Şekil 2.8. Devamı



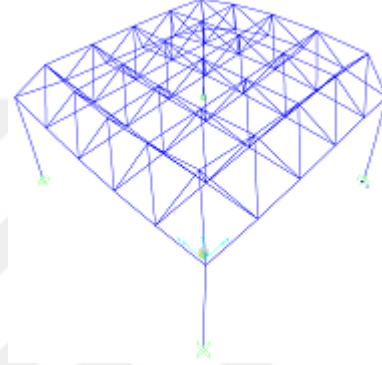
Mod 5 0,04699s 21,27973Hz



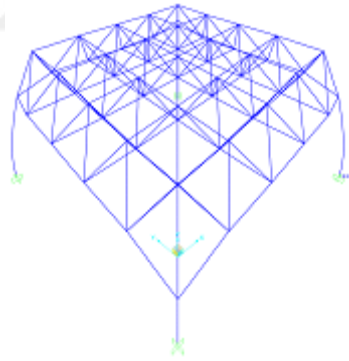
Mod 5 0,04921s 20,32078Hz



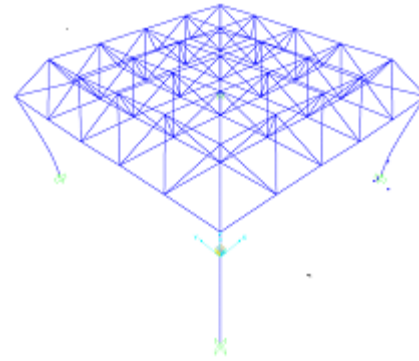
Mod 6 0,04699s 21,27973Hz



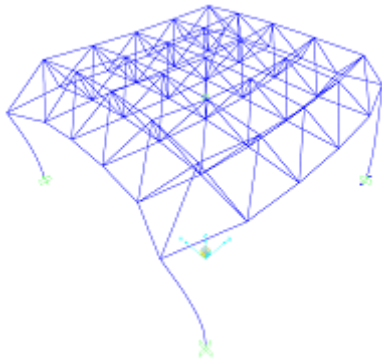
Mod 6 0,04921s 20,32078Hz



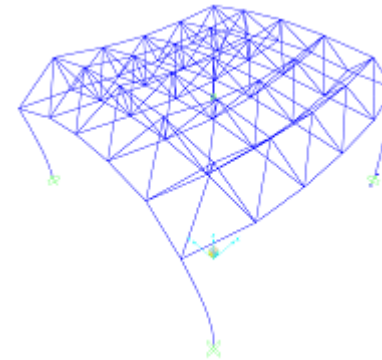
Mod 7 0,03992s 25,04960Hz



Mod 7 0,02626s 38,08419Hz

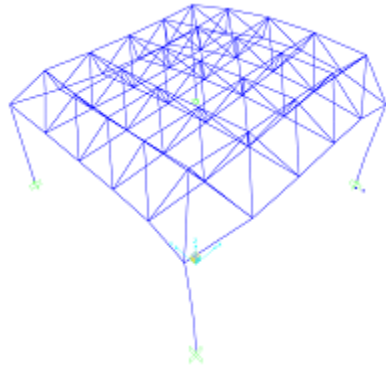


Mod 8 0,03989s 25,06692Hz

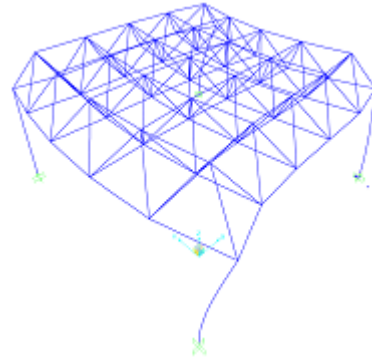


Mod 8 0,02474s 40,42900Hz

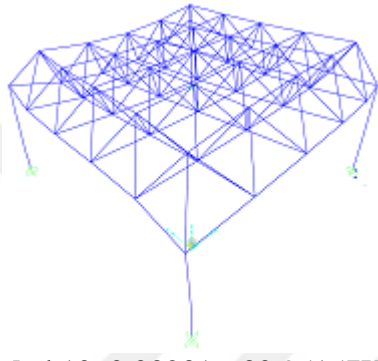
Şekil 2.8. Devamı



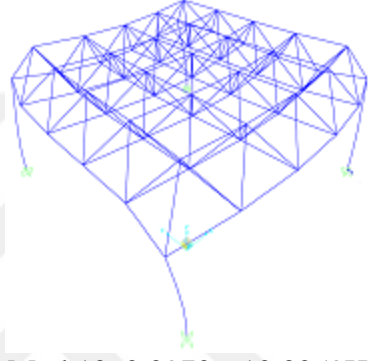
Mod 9 0,03231s 30,95157Hz



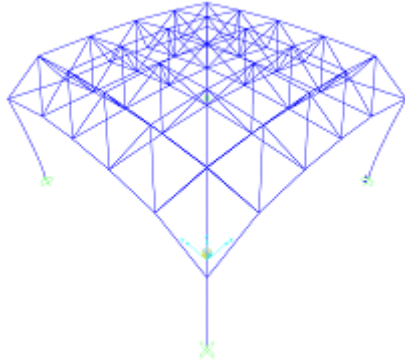
Mod 9 0,02468s 40,51135Hz



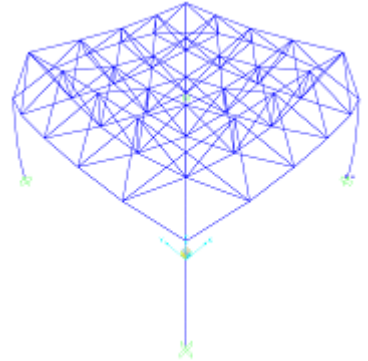
Mod 10 0,03231s 30,95157Hz



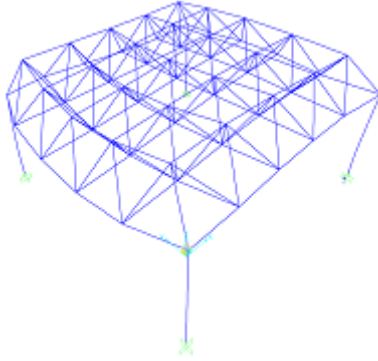
Mod 10 0,0970s 10,3059Hz



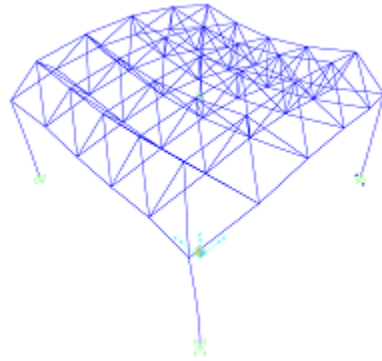
Mod 11 0,02921s 34,24091Hz



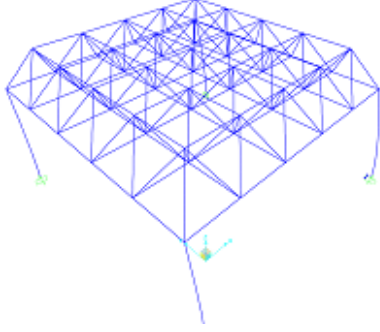
Mod 11 0,02114s 47,30343Hz



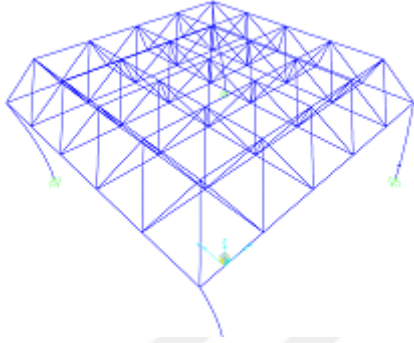
Mod 12 0,01959s 51,05476Hz



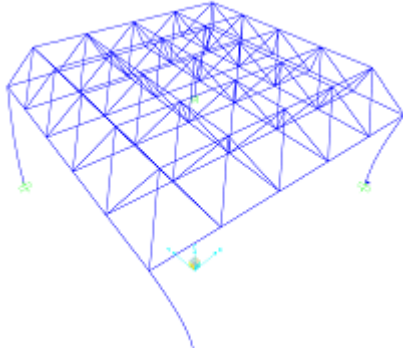
Mod 12 0,02066s 48,39932Hz

ÇELİK

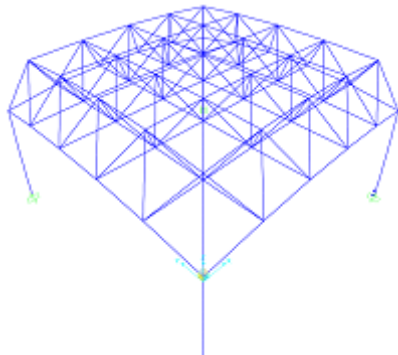
Mod 1 0,42813s 2,33577Hz



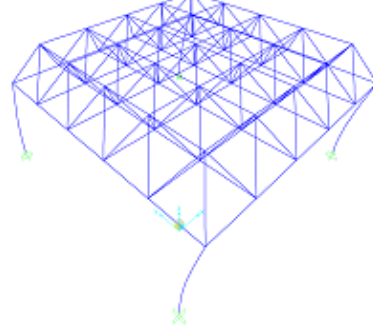
Mod 2 0,42813s 2,33577Hz



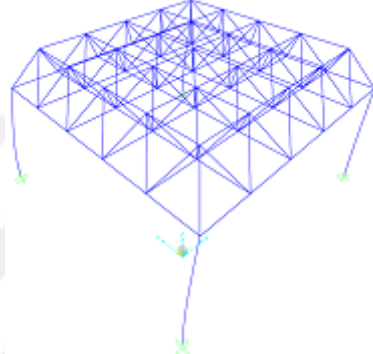
Mod 3 0,31409s 3,1838Hz



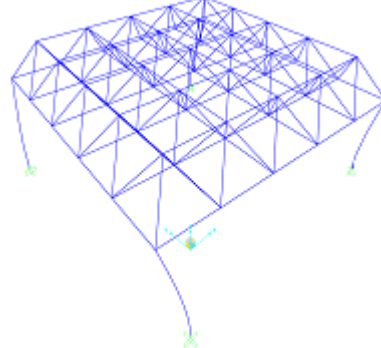
Mod 4 0,10654s 9,38600Hz

CAM LP-EŞDEĞER DAYANIM

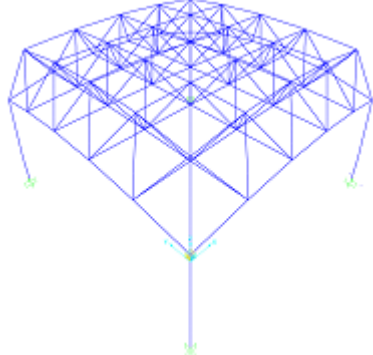
Mod 1 0,48335s 2,06891Hz



Mod 2 0,48335s 2,06891Hz



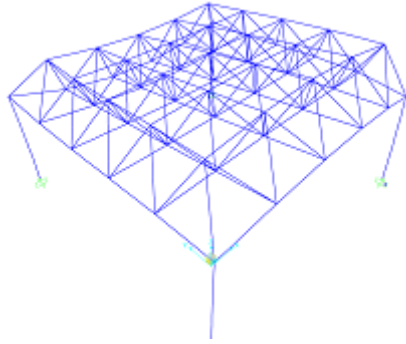
Mod 3 0,35471s 2,81921Hz



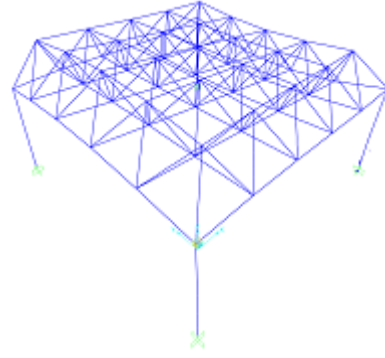
Mod 4 0,12040s 8,30551Hz

Şekil 2.9. Uzak kafes sistem için çelik ve cam LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri

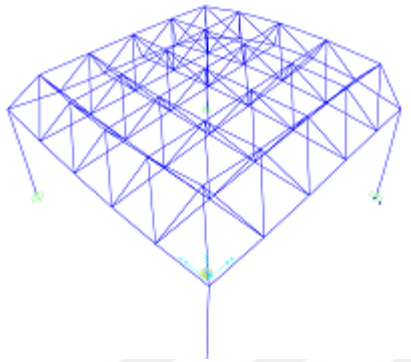
Şekil 2.9. Devamı



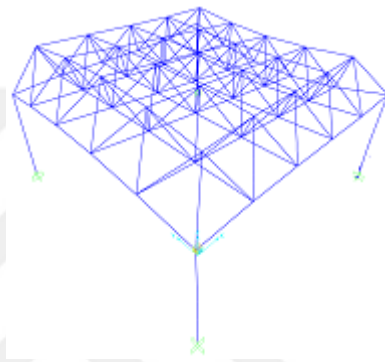
Mod 5 0,06961s 14,36672Hz



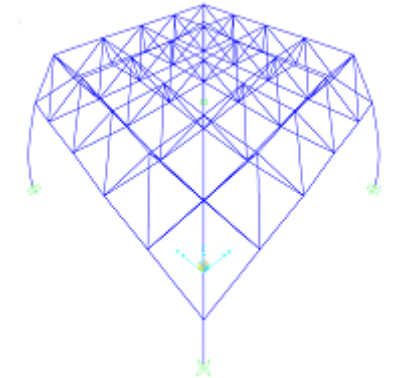
Mod 5 0,07865s 12,71457Hz



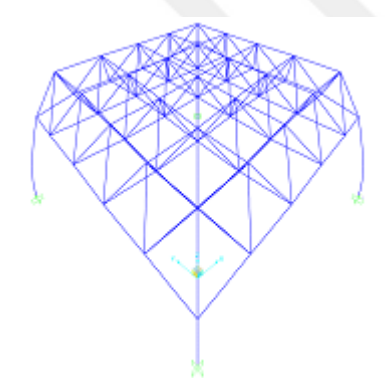
Mod 6 0,06961s 14,36672Hz



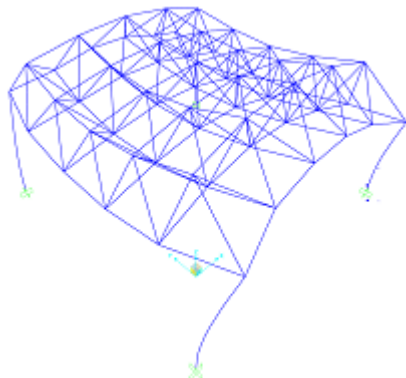
Mod 6 0,07865s 12,71457Hz



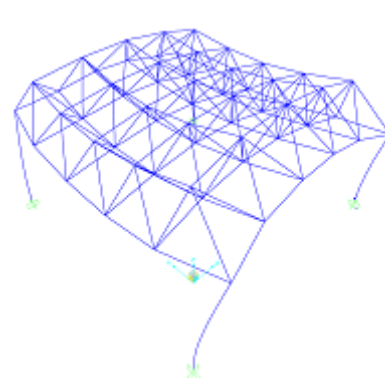
Mod 7 0,03725s 26,84563Hz



Mod 7 0,04202s 23,79908Hz

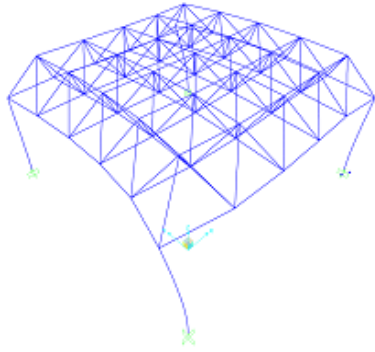


Mod 8 0,03504s 28,5356Hz

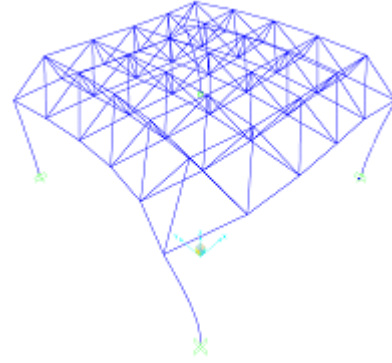


Mod 8 0,03963Hz 25,23291s

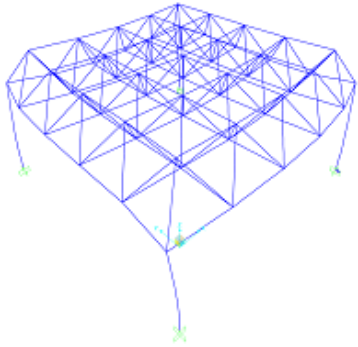
Şekil 2.9. Devamı



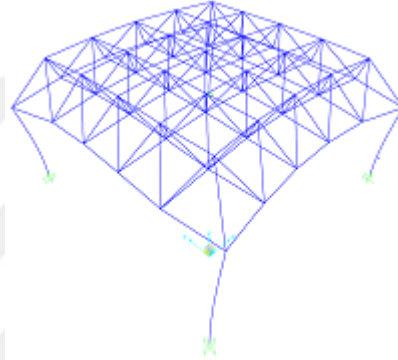
Mod 9 0,03499s 28,58158Hz



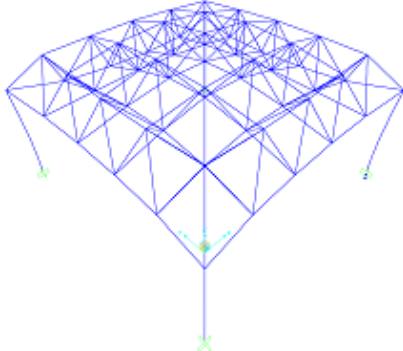
Mod 9 0,03954s 25,28931Hz



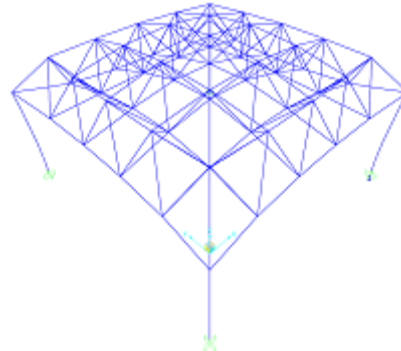
Mod 10 0,03499s 28,58158Hz



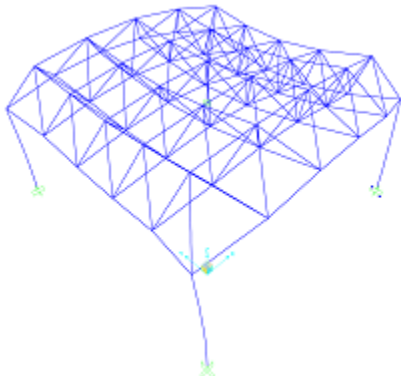
Mod 10 0,03954s 25,28931Hz



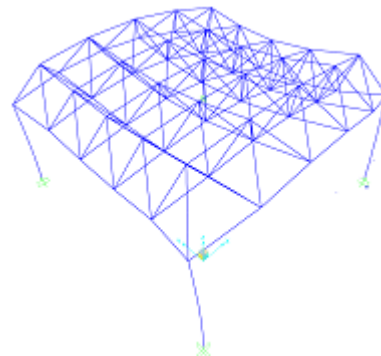
Mod 11 0,02992s 33,42789Hz



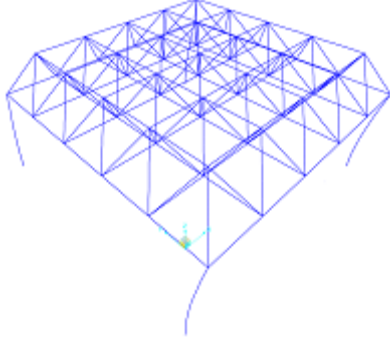
Mod 11 0,03382s 29,57040Hz



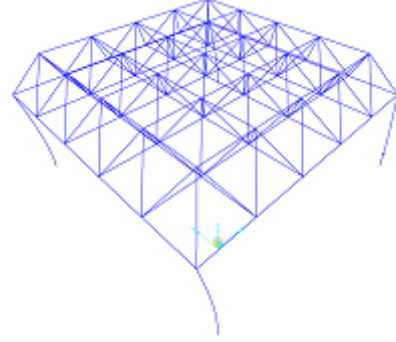
Mod 12 0,02923s 34,21203Hz



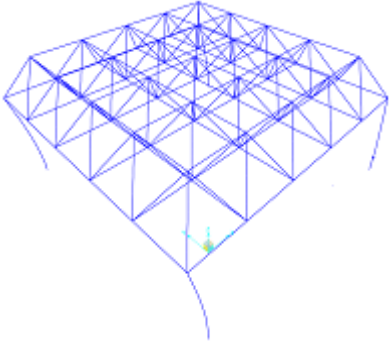
Mod 12 0,03304s 30,27069Hz

KARBON LP-EŞDEĞER DAYANIMARAMİD LP-EŞDEĞER DAYANIM

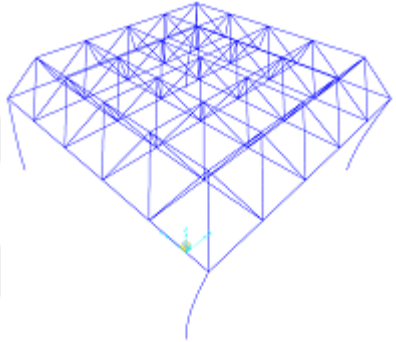
Mod 1 0,23471s 4,26052Hz



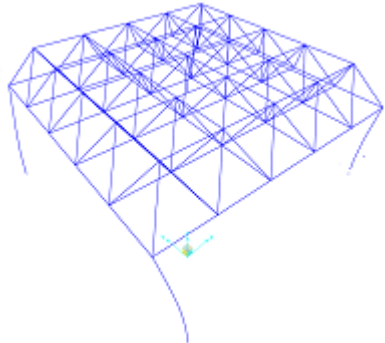
Mod 1 0,30182s 3,31329Hz



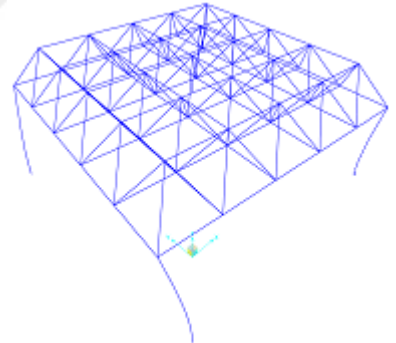
Mod 2 0,23471s 4,26052Hz



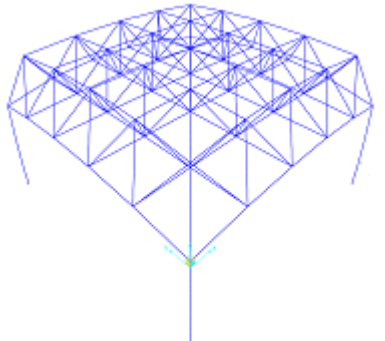
Mod 2 0,30182s 3,31329Hz



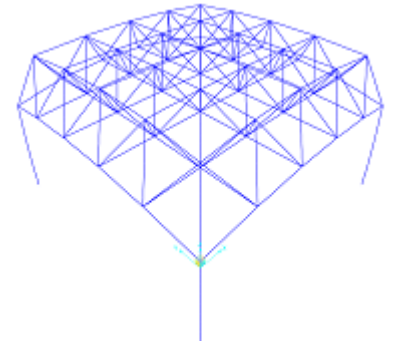
Mod 3 0,17216s 5,80866Hz



Mod 3 0,22139s 4,51688Hz



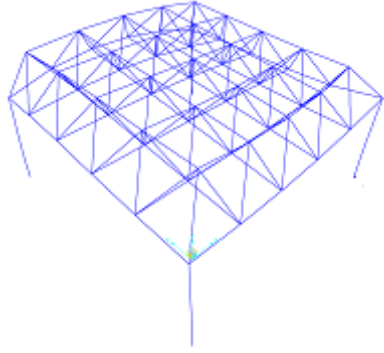
Mod 4 0,06011s 16,63643Hz



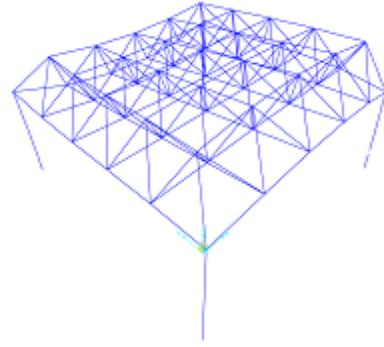
Mod 4 0,07536s 13,26929Hz

Şekil 2.10. Uzay kafes sistem için karbon ve aramid LP-Eşdeğer Dayanım'a ait mod şekilleri

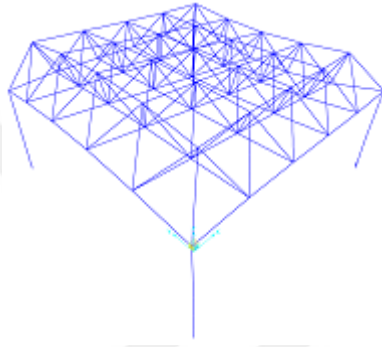
Şekil 2.10. Devamı



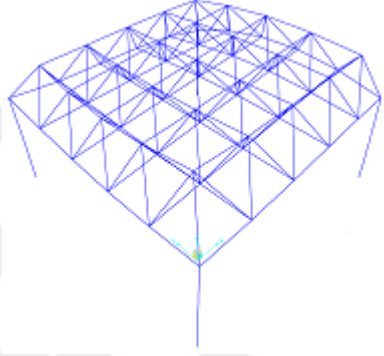
Mod 5 0,03927s 25,46694Hz



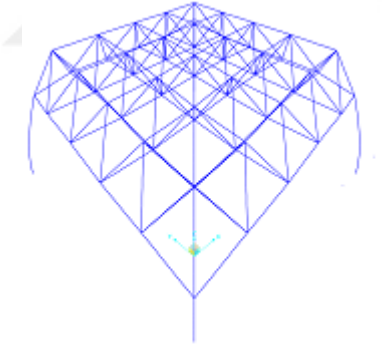
Mod 5 0,04923s 20,31217Hz



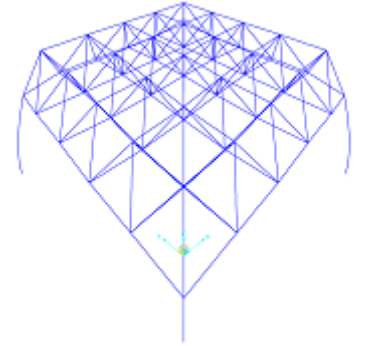
Mod 6 0,03927s 25,46694Hz



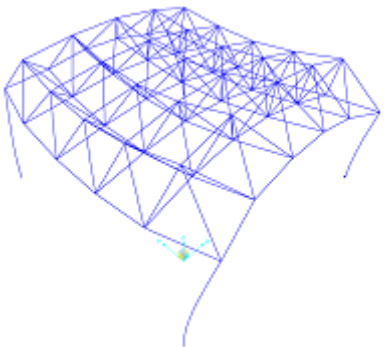
Mod 6 0,04923s 20,31217Hz



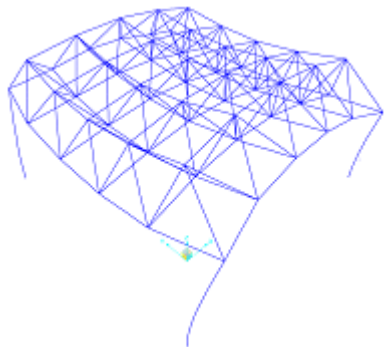
Mod 7 0,02096s 47,70752Hz



Mod 7 0,02631s 38,00252Hz

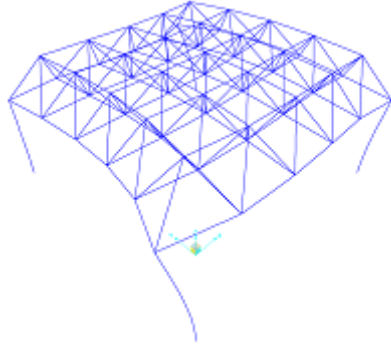


Mod 8 0,01977s 50,59424Hz

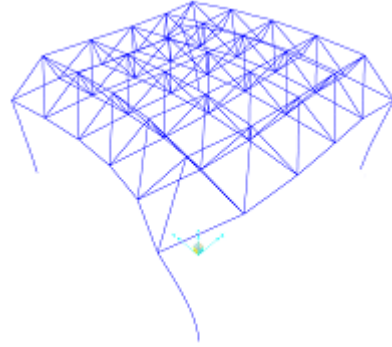


Mod 8 0,02478s 40,35632Hz

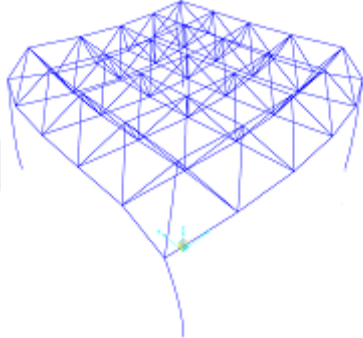
Şekil 2.10. Devamı



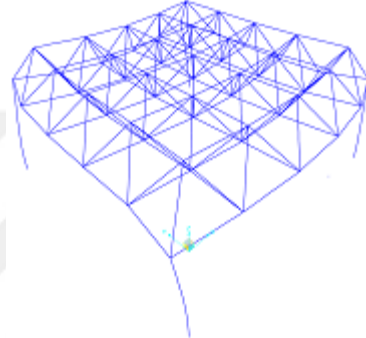
Mod 9 0,01972s 50,70728Hz



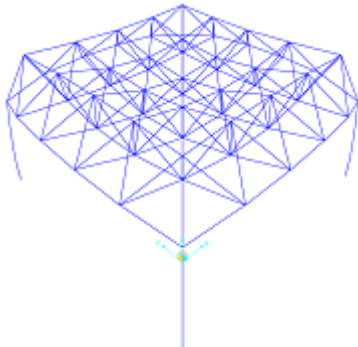
Mod 9 0,02473s 40,43054Hz



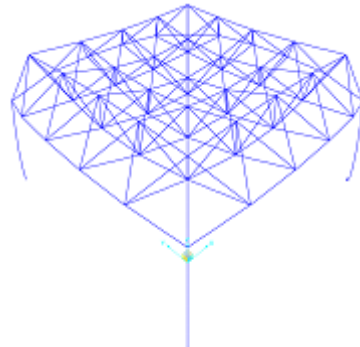
Mod 10 0,01972s 50,70728Hz



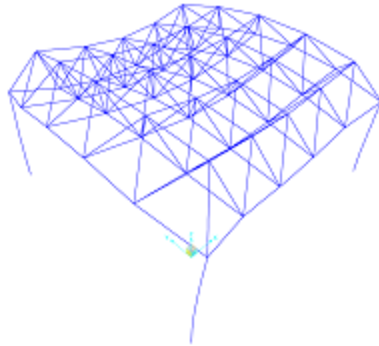
Mod 10 0,02473s 40,43054Hz



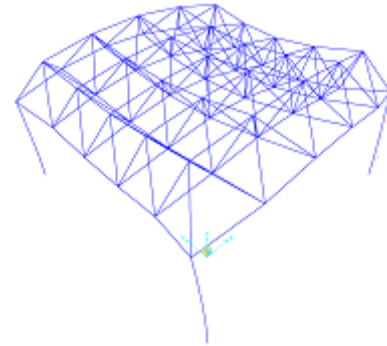
Mod 11 0,01688s 59,25403Hz



Mod 11 0,02116s 47,26635Hz



Mod 12 0,01649s 60,64450Hz



Mod 12 0,02067s 48,37429Hz

2.5. Statik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

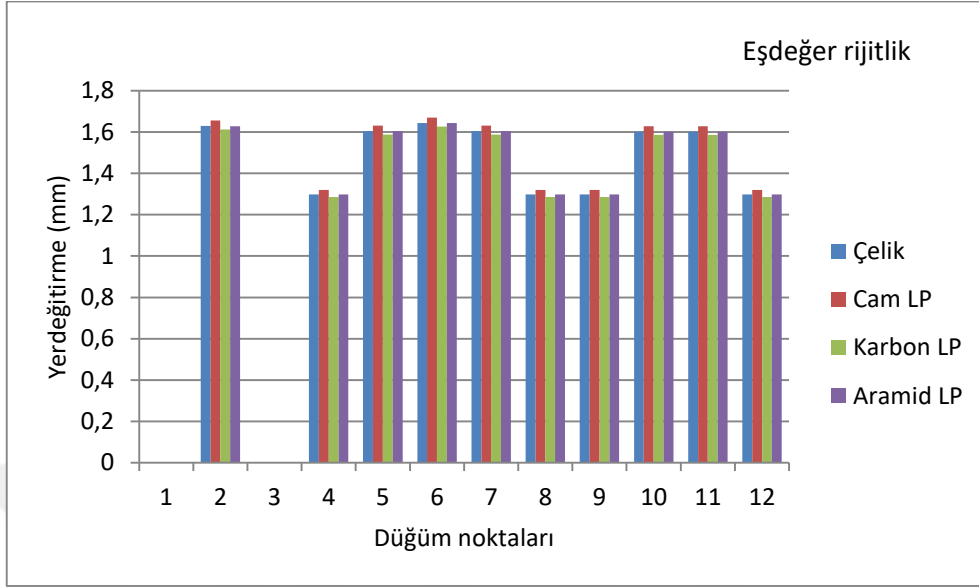
2.5.1. Yerdeğiştirmeler

2.5.1.1. Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Yerdeğiştirmeler

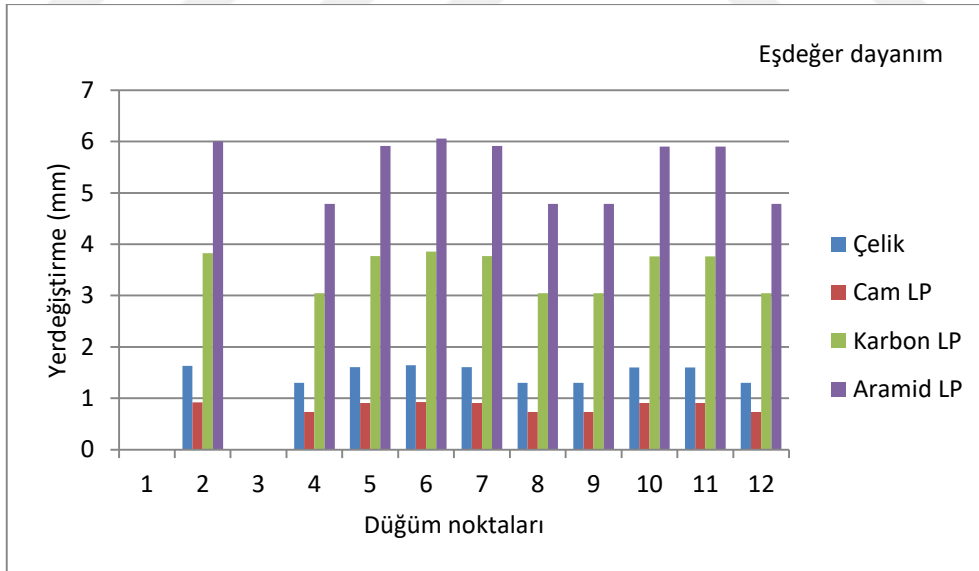
Düzlem kafes sistemin Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile LP malzeme ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile LP malzeme kullanılarak yapılan statik analizi ile elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler, çelik malzemenin kullanıldığı analiz ile bulunan maksimum yerdeğiştirmeler ile karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.11’de çelik ve LP malzemelere (Eşdeğer Rijitlik) ait yerdeğiştirme sonuçları, Şekil 2.12’de ise çelik ve LP malzemelere (Eşdeğer Dayanım) ait yerdeğiştirme sonuçları gösterilmiştir. Maksimum yerdeğiştirme çelik için 1,63mm, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 1,66mm, karbon LP için 1,61mm, aramid LP için 1,63mm; Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 0,92mm, karbon LP için 3,82mm, aramid LP için 6,00mm olarak elde edilmiştir.

2.5.1.2. Uzay Kafes Sistem İçin Elde Edilen Yerdeğiştirmeler

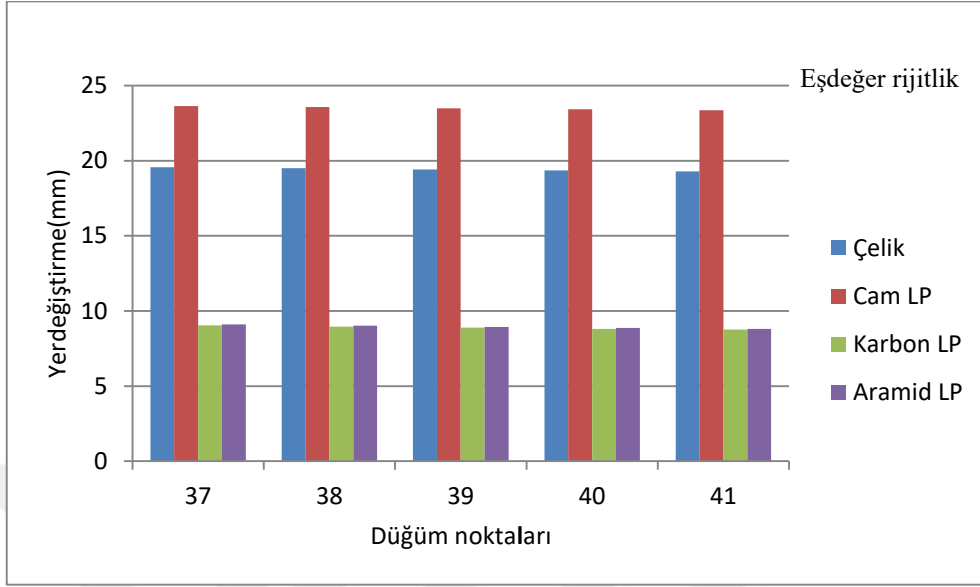
Uzay kafes sistemin Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile LP malzeme ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile LP malzeme kullanılarak yapılan statik analizi ile elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler, çelik malzemenin kullanıldığı analiz ile hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2.13’te çelik ve Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile LP malzemelere ait yerdeğiştirme sonuçları, Şekil 2.14’te ise çelik ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile LP malzemelere ait yerdeğiştirme sonuçları verilmiştir. Maksimum yerdeğiştirmeler çelik için 19,58mm, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 23,65mm, karbon LP için 9,04mm, aramid LP için 9,10mm; Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 104,30mm, karbon LP için 28,47mm, aramid LP için 39,11mm olarak elde edilmiştir.



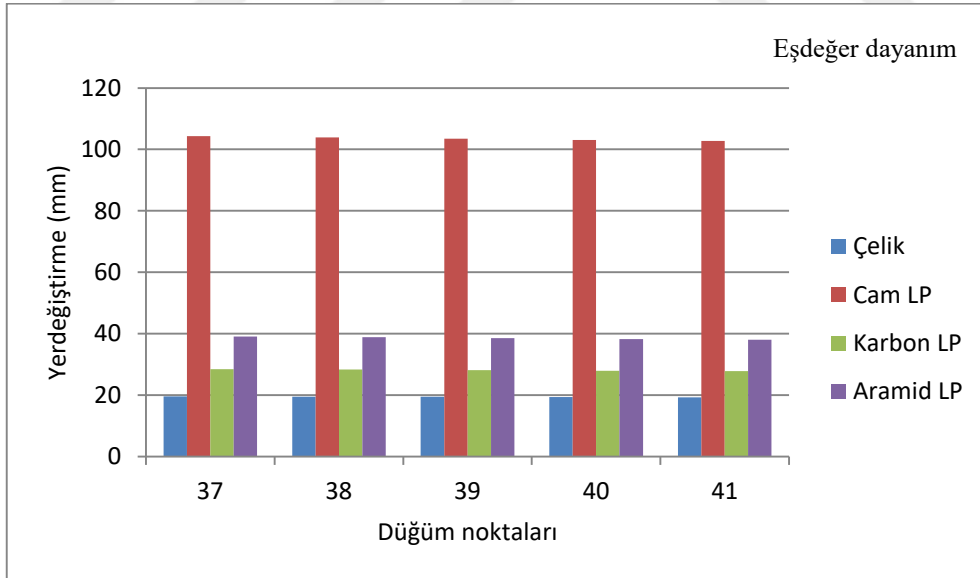
Şekil 2.11. Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 2.12. Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 2.13. Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler



Şekil 2.14. Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler

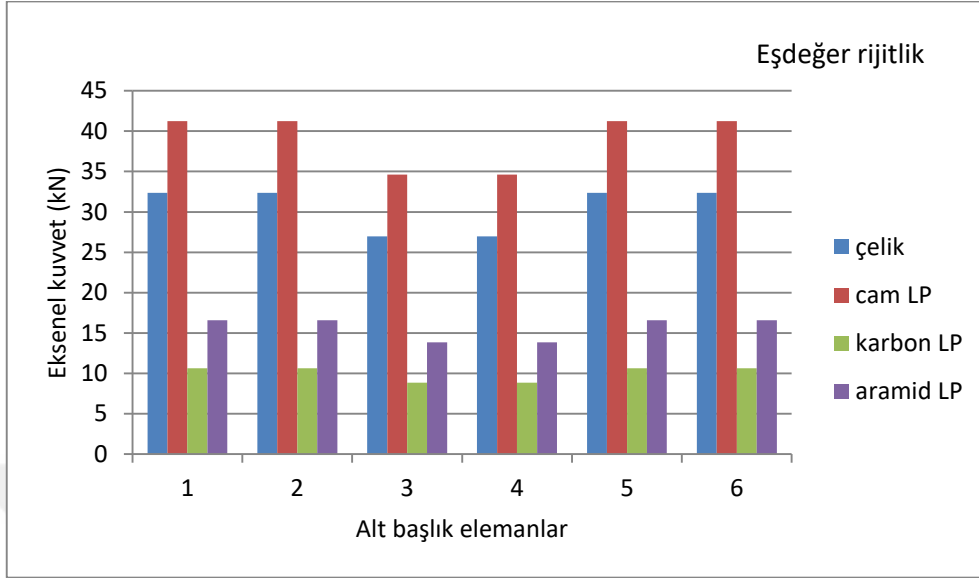
2.5.2. Eksenel Kuvvetler

2.5.2.1. Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler

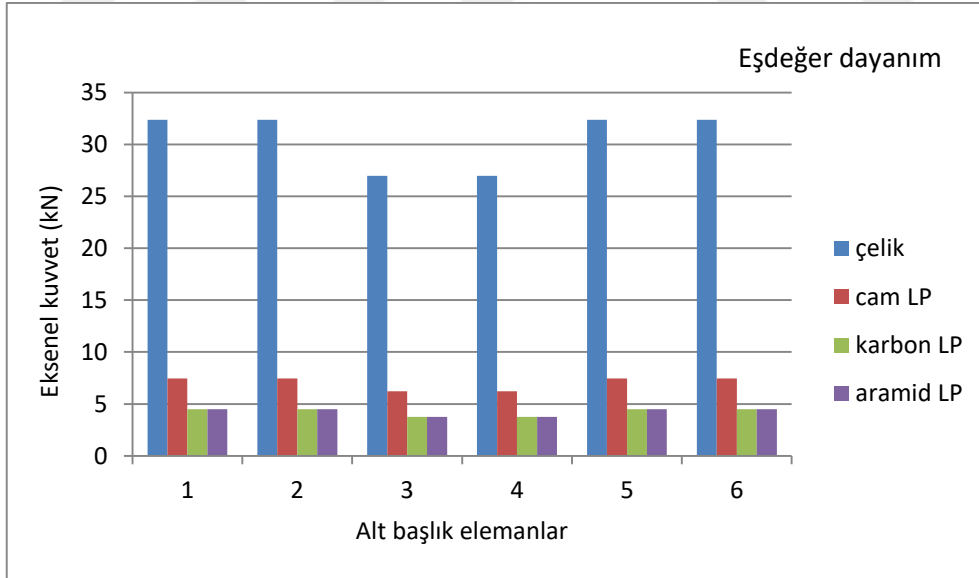
Düzlem kafes sistemin Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile LP malzeme ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile LP malzeme kullanılarak yapılan statik analizi sonucu elde edilen eksenel kuvvetler çelik malzeme için gerçekleştirilen analiz sonucu elde edilen eksenel kuvvetlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 2.15'te çelik ve Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile LP malzemelere ait eksenel kuvvetler, Şekil 2.16'da ise çelik ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile LP malzemelere ait eksenel kuvvetler sunulmuştur. Maksimum değerler çelik için 32,36kN, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 41,26kN, karbon LP için 10,64kN, aramid LP için 16,59kN; Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 7,46kN, karbon LP için 4,49kN, aramid LP için 4,50kN olarak elde edilmiştir.

2.5.2.2. Uzay Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler

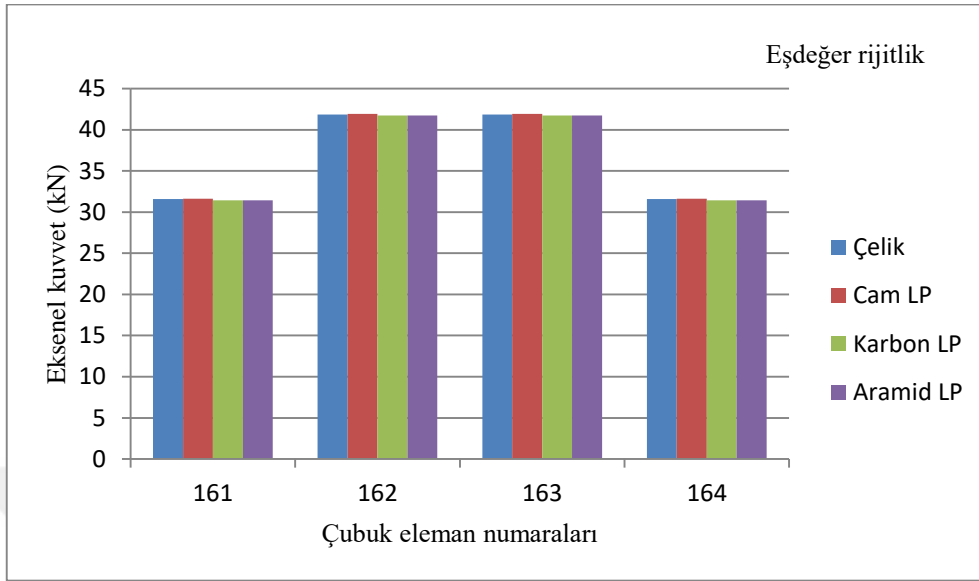
Uzay kafes sistemin Eşdeğer Rijitlik ve Eşdeğer Dayanım Yöntemleri ile LP malzeme kullanılarak yapılan statik analizi sonucu elde edilen eksenel kuvvetler çelik malzeme için gerçekleştirilen analiz sonucu elde edilen eksenel kuvvetlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 2.17'de çelik ve Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile LP malzemelere ait eksenel kuvvetler, Şekil 2.18'de ise çelik ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile LP malzemelere ait eksenel kuvvetler sunulmuştur. Maksimum değerler çelik için 41,87kN, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 41,93kN, karbon LP için 41,74kN, aramid LP için 41,74kN; Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 41,85kN, karbon LP için 41,79kN, aramid LP için 41,77kN olarak elde edilmiştir.



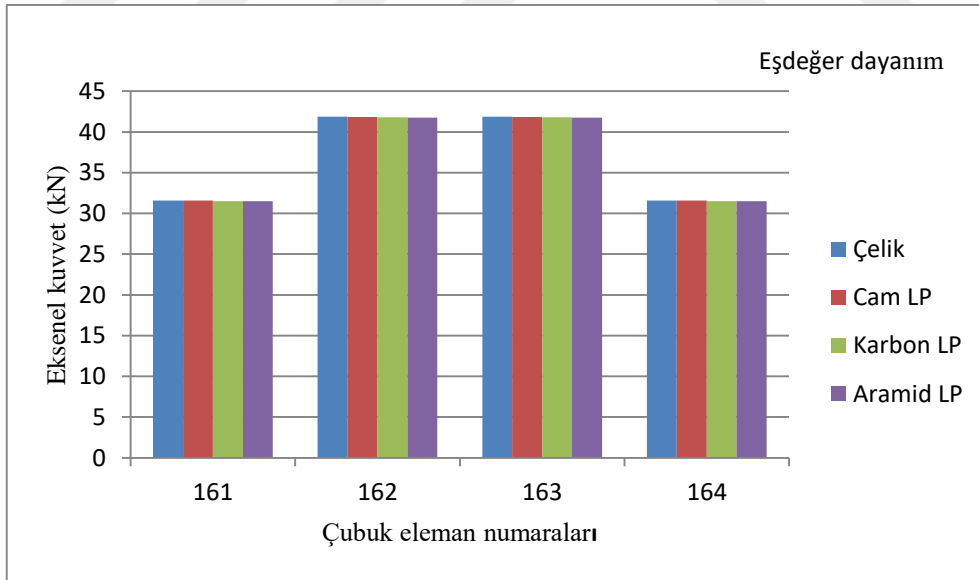
Şekil 2.15. Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen aksenal kuvvetler



Şekil 2. 16. Düzlem kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen aksenal kuvvetler



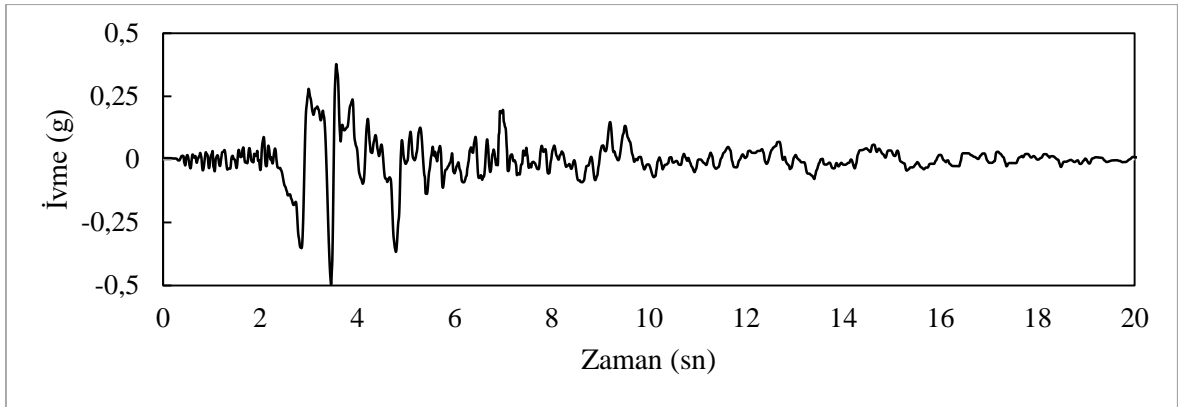
Şekil 2. 17. Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen aksenal kuvvetler



Şekil 2.18. Uzay kafes sistem için statik analiz ile eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen aksenal kuvvetler

2.6. Dinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tezin bu bölümünde, LP kompozit malzemeden yapılmış kafes sistemlerin dinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme ve eksenel kuvvetler ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Dinamik analizlerde, 13 Mart 1992 tarihinde meydana gelen Erzincan Depremi'nin, Erzincan İstasyonu'nda kaydedilen ivme kaydının yatay bileşeni kullanılmıştır (URL-2).

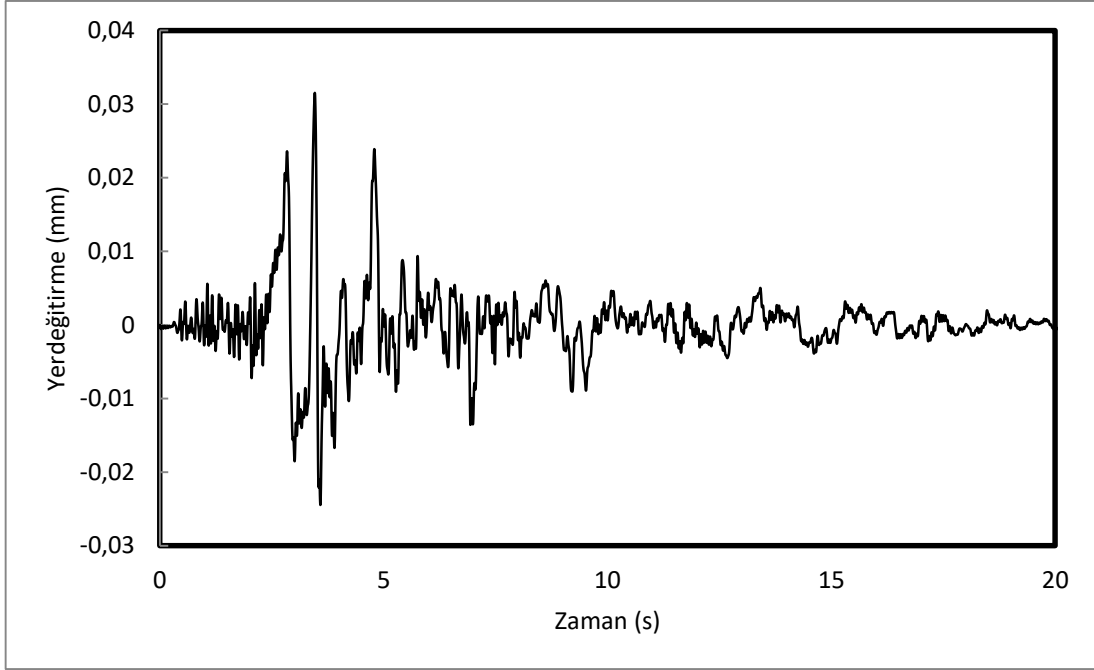


Şekil 2.19. 1992 Erzincan depreminin Erzincan İstasyonundan kaydedilen ivme kaydının ivme-zaman grafiği

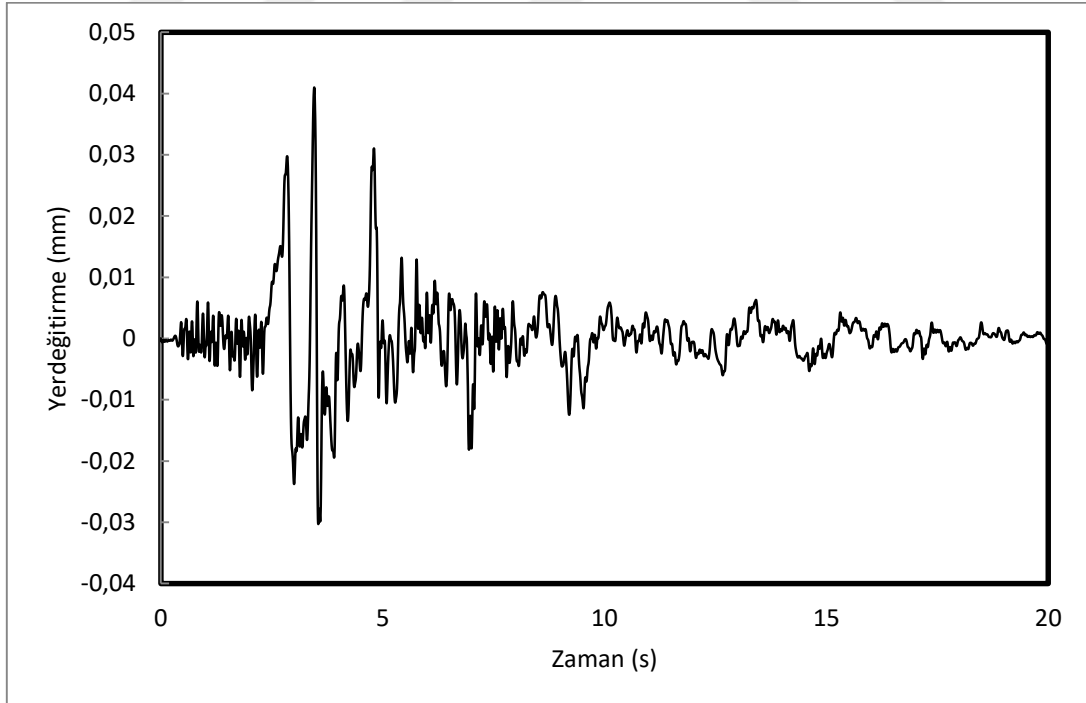
2.6.1. Yerdeğiştirmeler

2.6.1.1. Düzlem Kafes Sistemde Elde Edilen Yerdeğiştirmeler

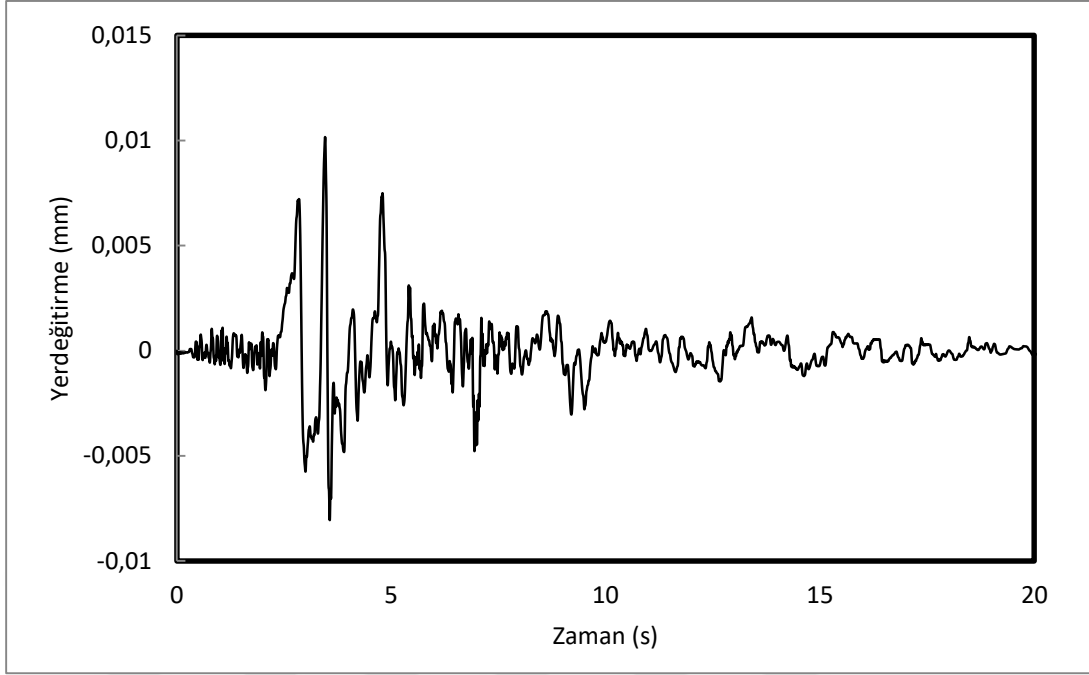
Çelik, LP kompozit malzeme - Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ve LP kompozit malzeme - Eşdeğer Dayanım Yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analizler sonucunda düzlem kafes sistemde elde edilen yerdeğiştirmeler ve bu yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Maksimum yerdeğiştirmeler çelik için 0,035mm, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 0,041mm, karbon LP için 0,010mm, aramid LP için 0,016mm ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 0,004mm, karbon LP için 0,010mm, aramid LP için 0,016mm olarak bulunmuştur. Dinamik analiz sonucunda düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri Şekil 2.20 - Şekil 2.26'da verilmiştir.



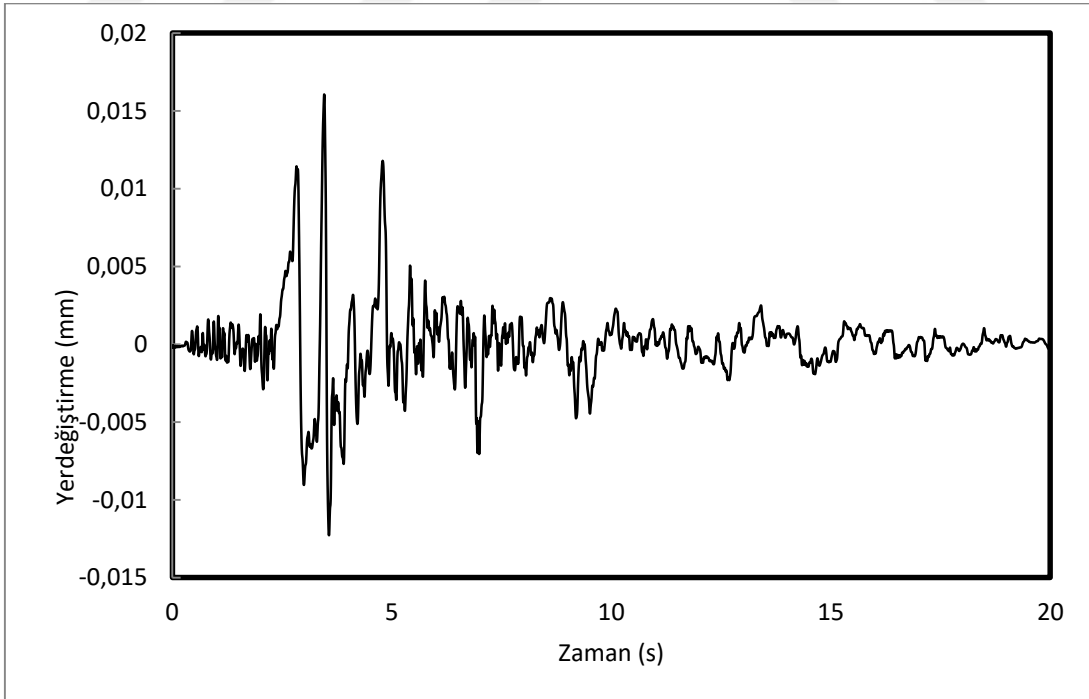
Şekil 2.20. Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



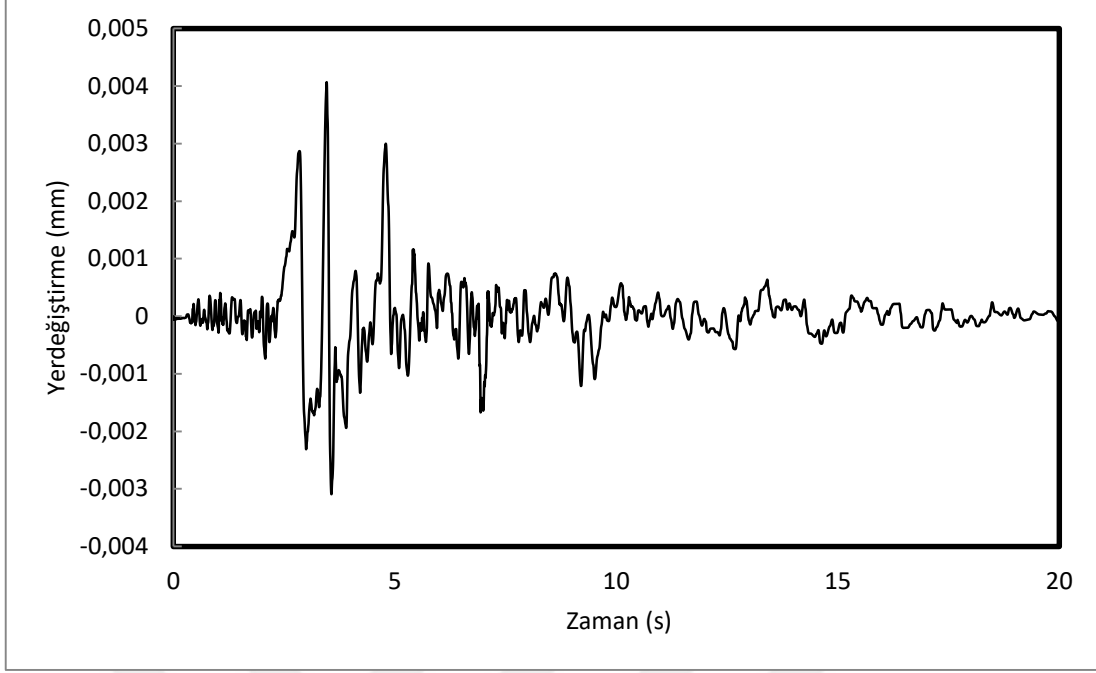
Şekil 2.21. Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



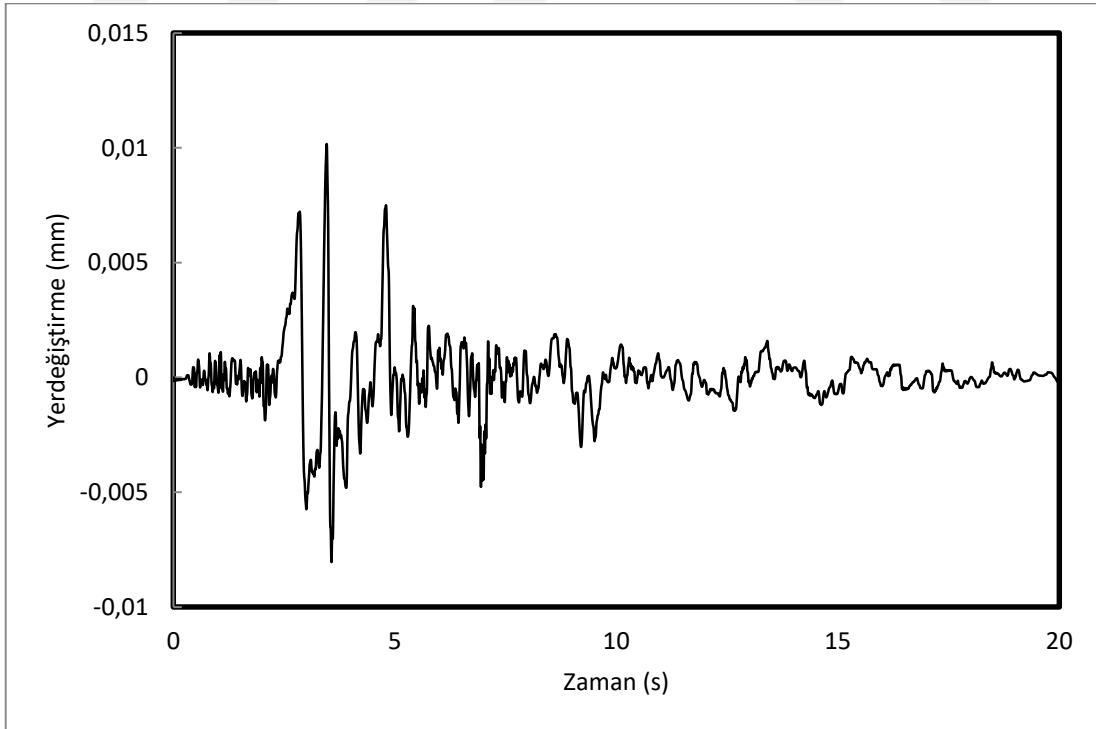
Şekil 2.22. Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



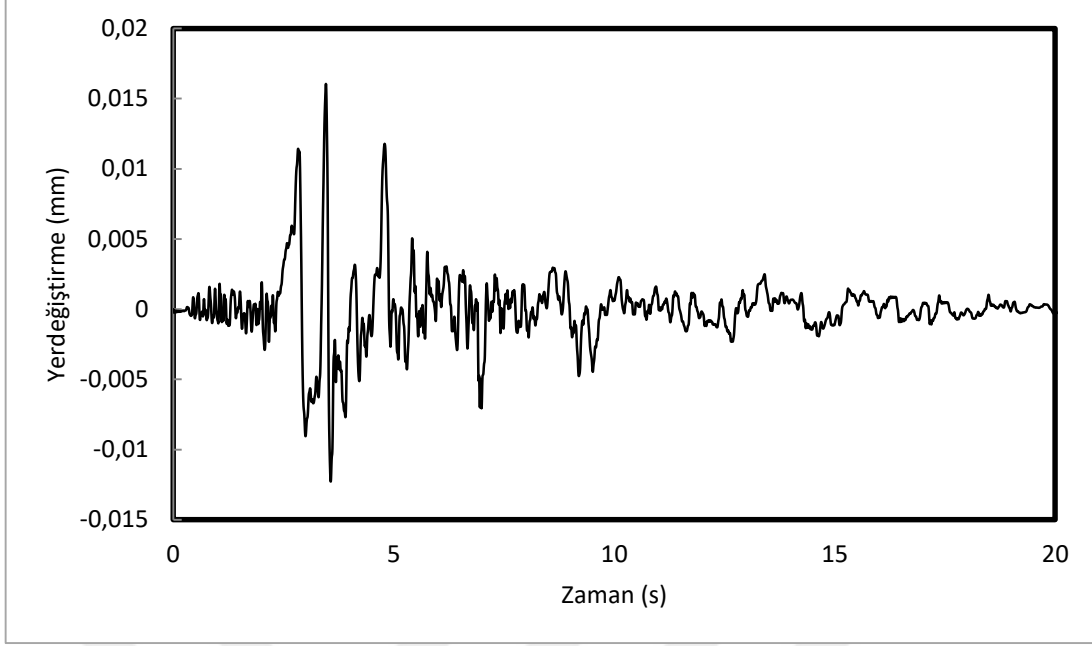
Şekil 2.23. Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 2.24. Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



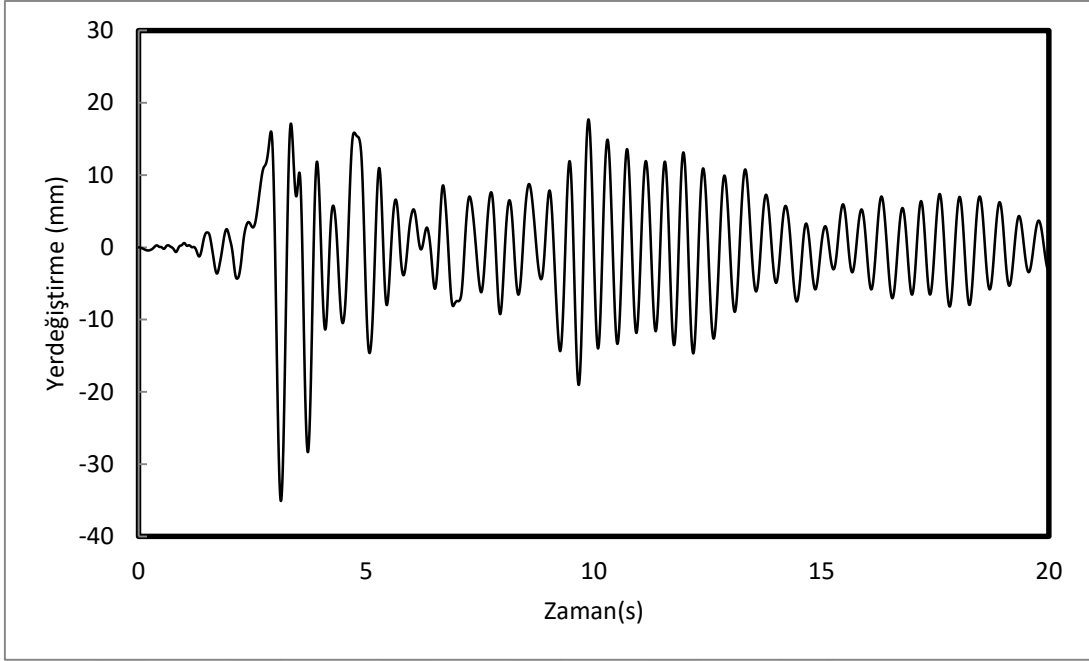
Şekil 2.25. Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



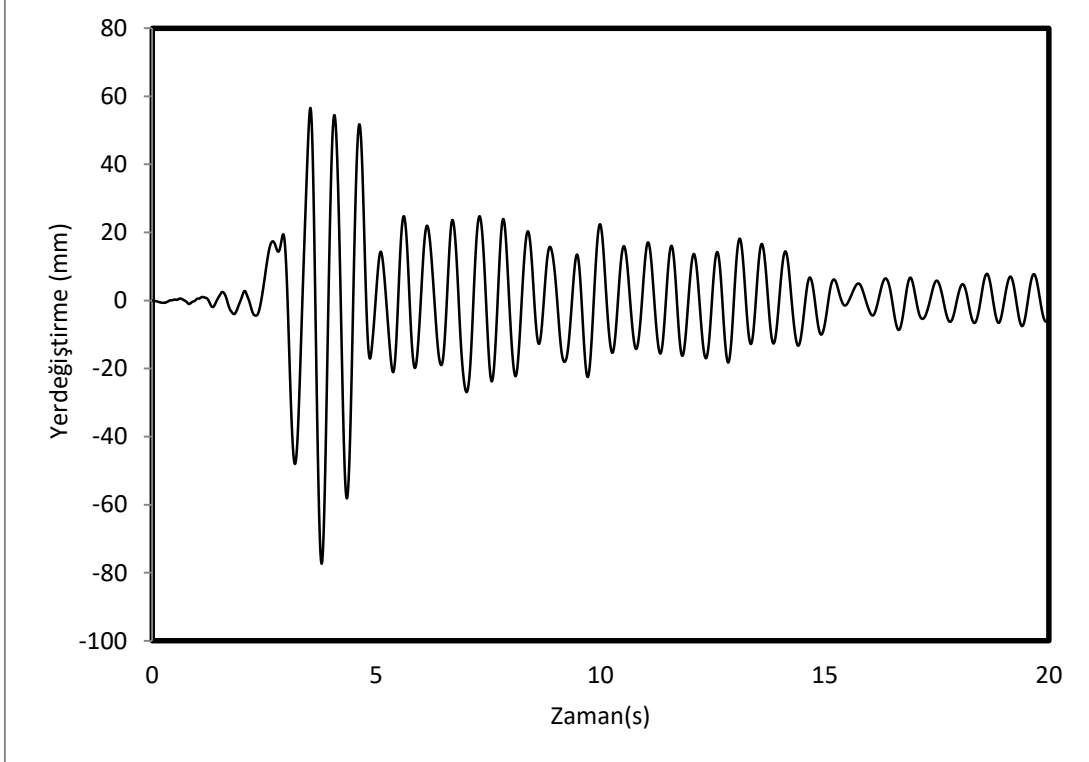
Şekil 2.26. Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirme zamanla değişimi

2.6.1.2. Uzay Kafes Sistem İçin Elde Edilen Yerdeğiştirmeler

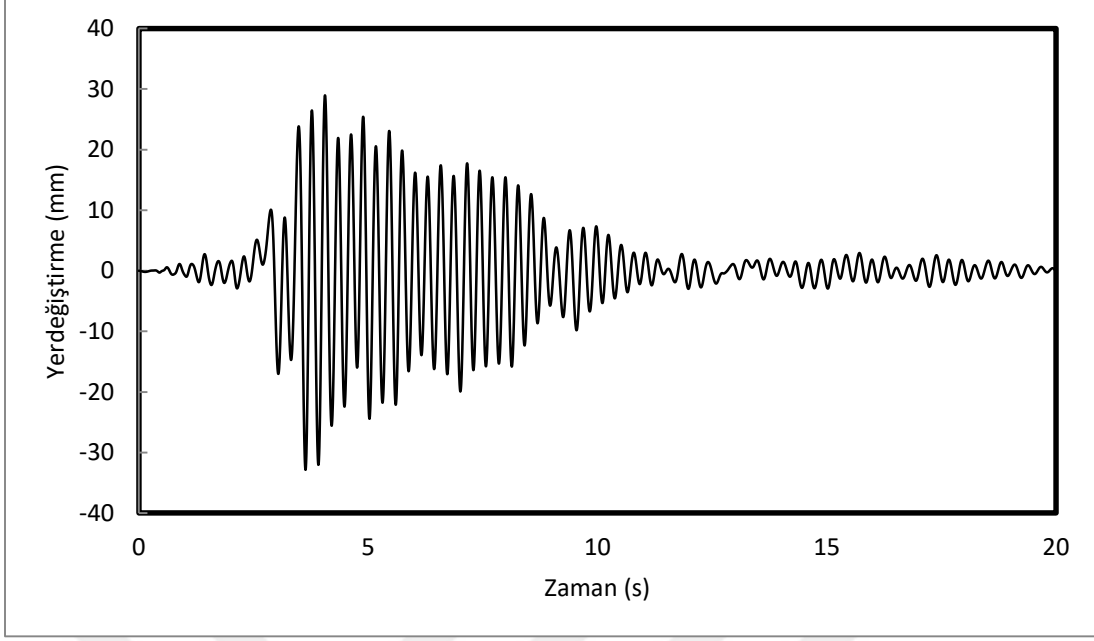
Çelik, LP kompozit malzeme - Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ve LP kompozit malzeme - Eşdeğer Dayanım Yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analizler sonucunda uzay kafes sistemde elde edilen yerdeğiştirmeler ve bu yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Maksimum yerdeğiştirmeler çelik için 35,09mm, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 77,33mm, karbon LP için 32,88mm, aramid LP için 17,30mm ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 58,16mm, karbon LP için 13,12mm, aramid LP için 13,79mm olarak bulunmuştur. Dinamik analiz sonucunda uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri Şekil 2.27 – Şekil 2.33’te verilmiştir.



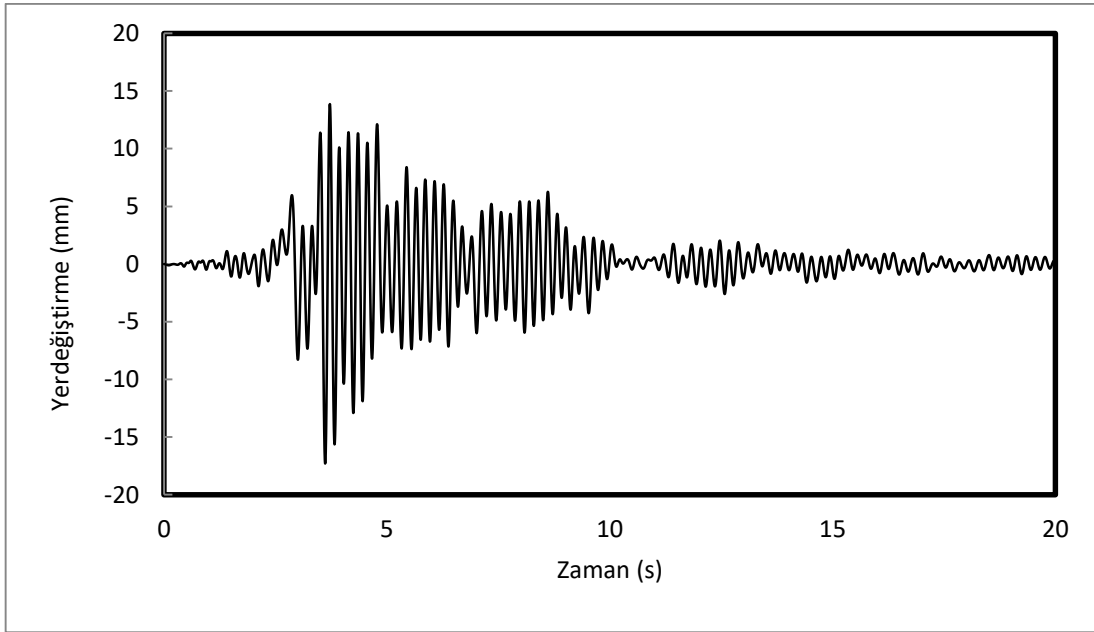
Şekil 2.27. Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



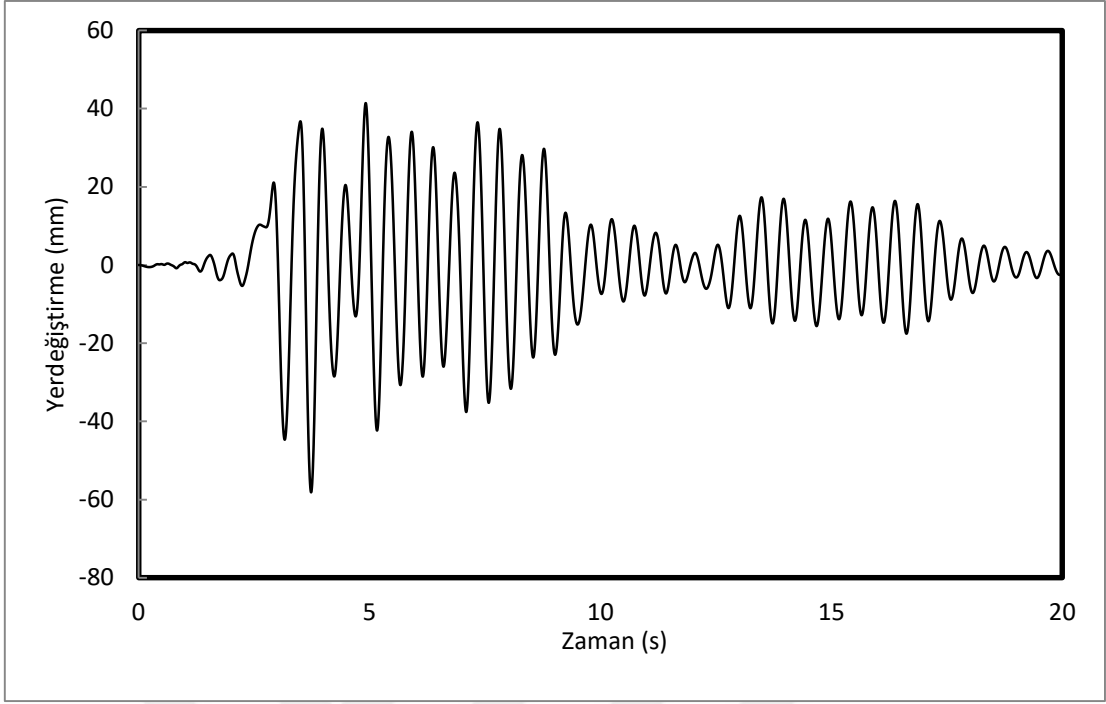
Şekil 2.28. Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



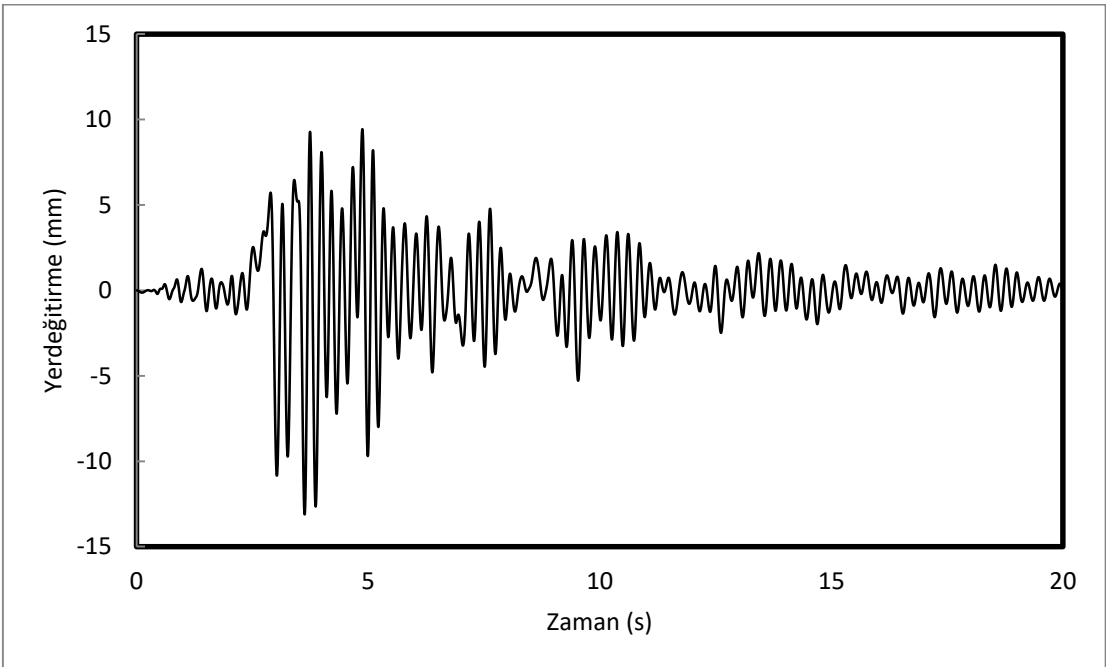
Şekil 2.29. Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



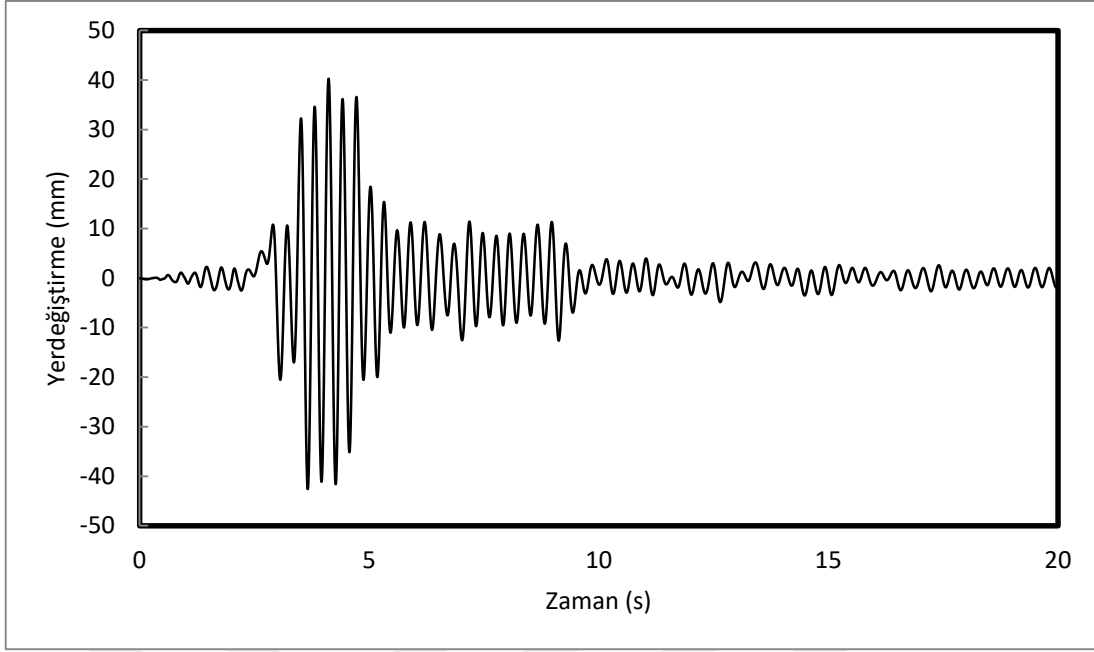
Şekil 2.30. Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 2.31. Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 2.32. Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

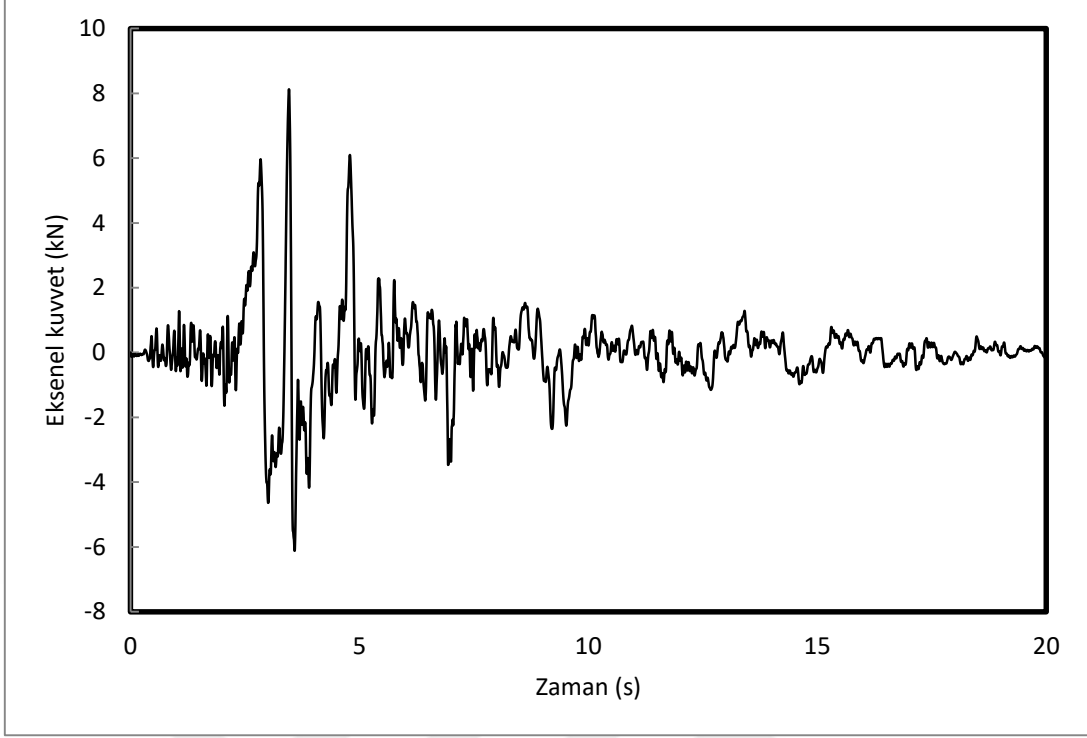


Şekil 2.33. Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

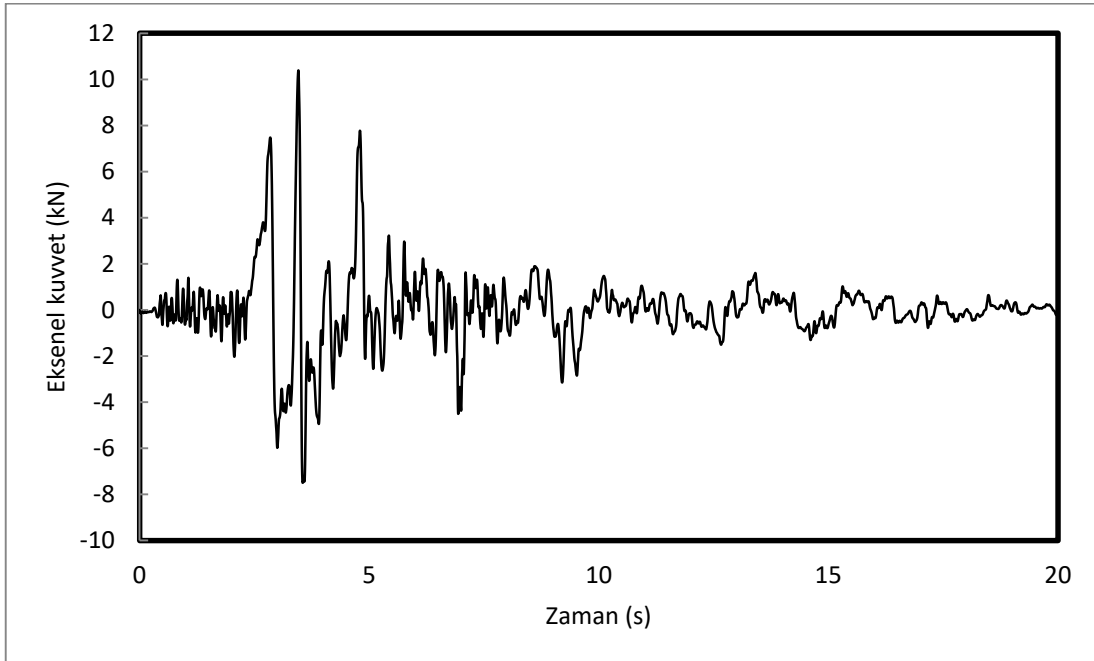
2.6.2. Eksenel Kuvvetler

2.6.2.1. Düzlem Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler

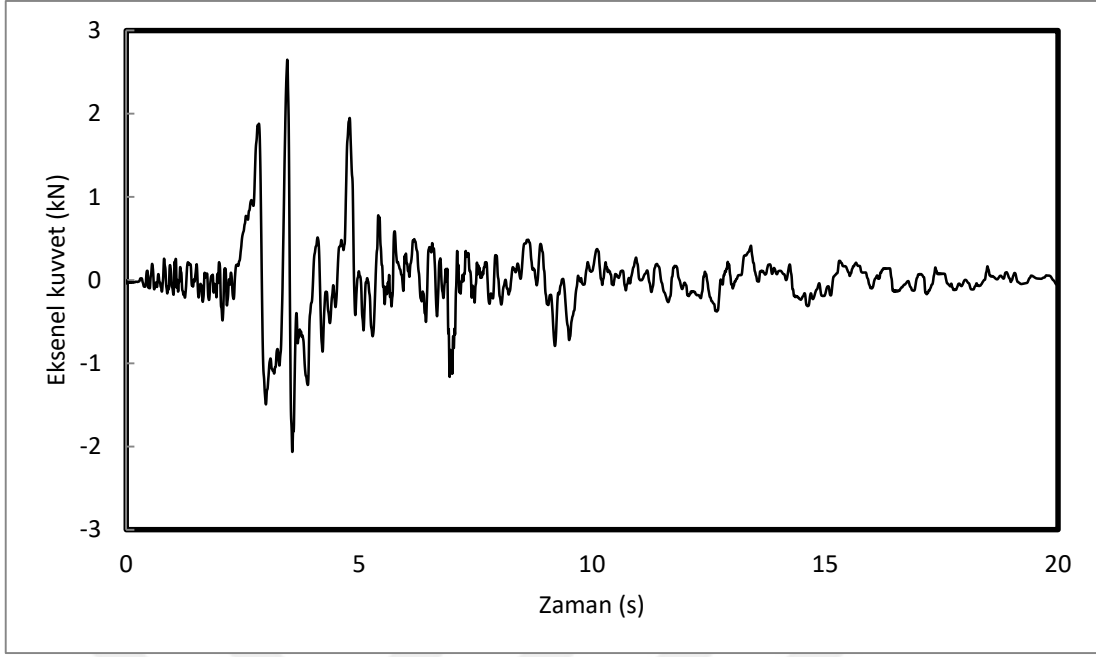
Çelik, LP kompozit malzeme - Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ve LP kompozit malzeme - Eşdeğer Dayanım Yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analizler sonucunda düzlem kafes sistemde elde edilen eksenel kuvvetler ve bu eksenel kuvvetlerin zamanla değişimleri incelenmiştir. Maksimum eksenel kuvvetler çelik için 8,12kN, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 10,39kN, karbon LP için 2,65kN, aramid LP için 4,14kN ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 1,86kN, karbon LP için 1,12kN, aramid LP için 1,12kN olarak bulunmuştur. Dinamik analiz sonucunda düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetlerin zamanla değişimleri Şekil 2.34 - Şekil 2.40'da verilmiştir.



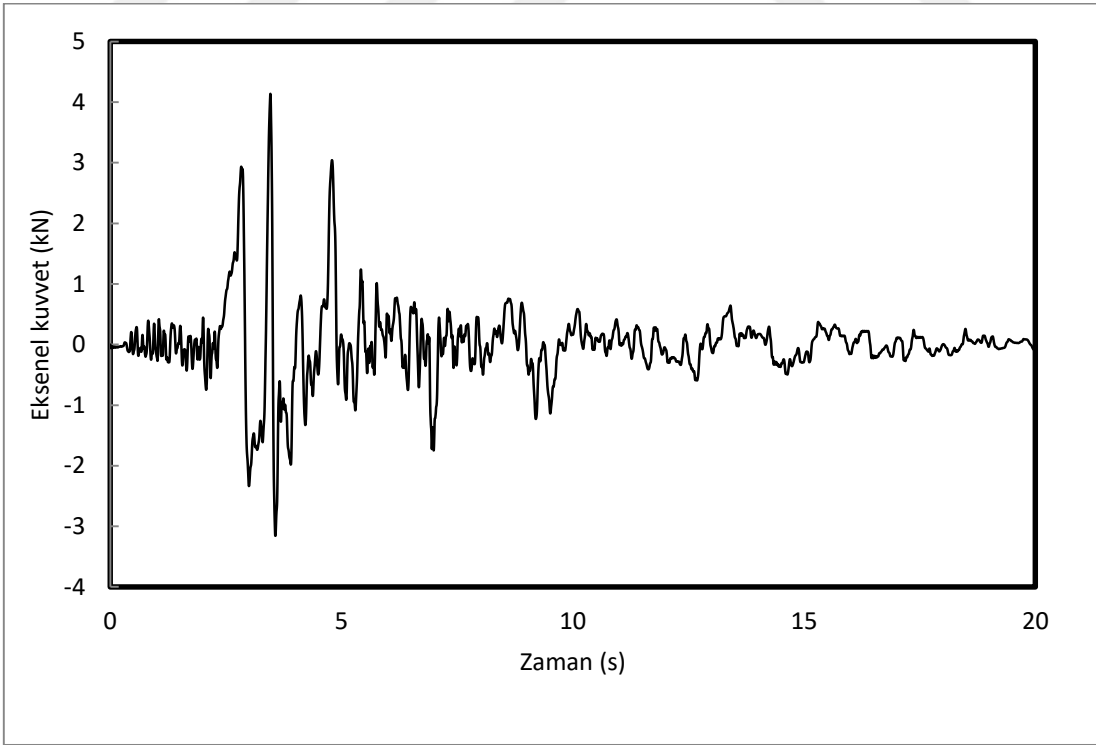
Şekil 2.34. Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



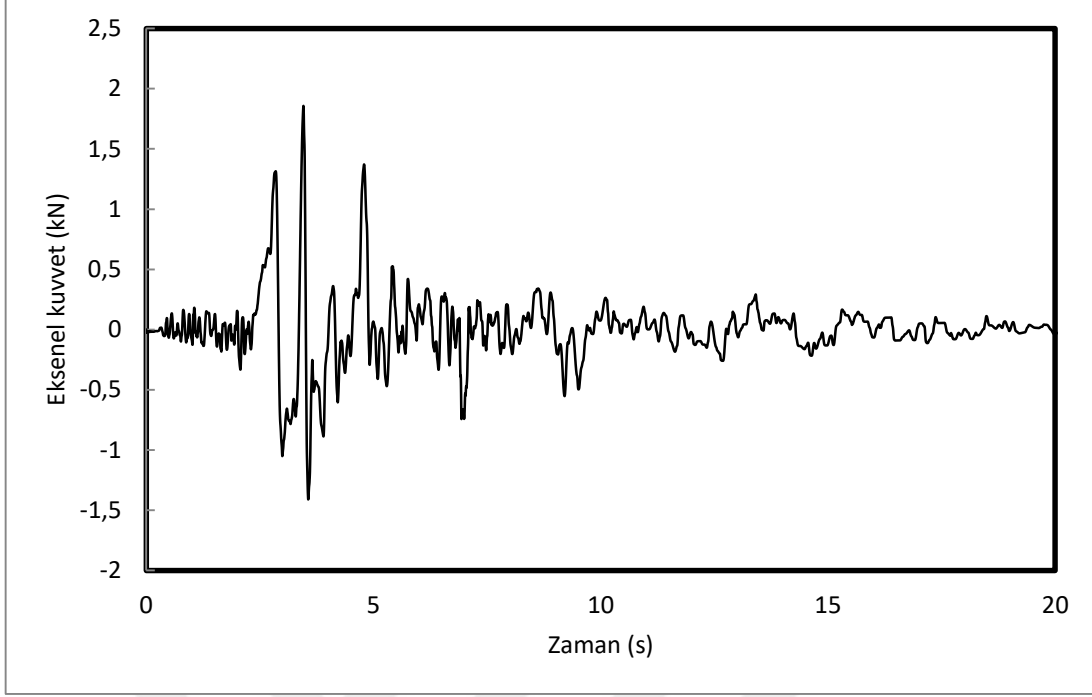
Şekil 2.35. Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



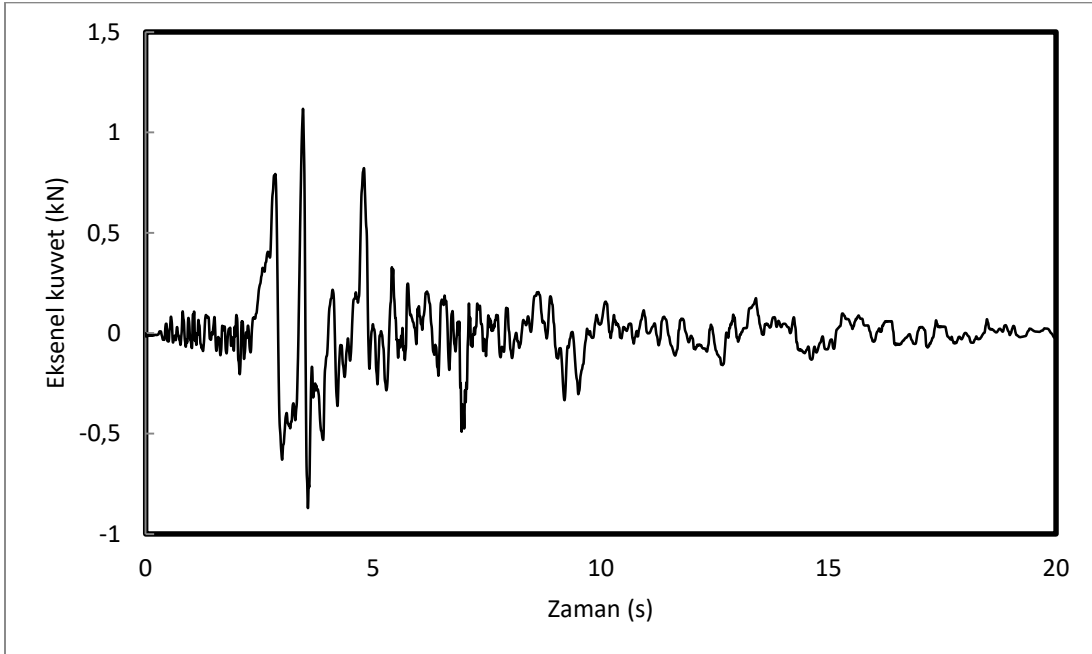
Şekil 2. 36. Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



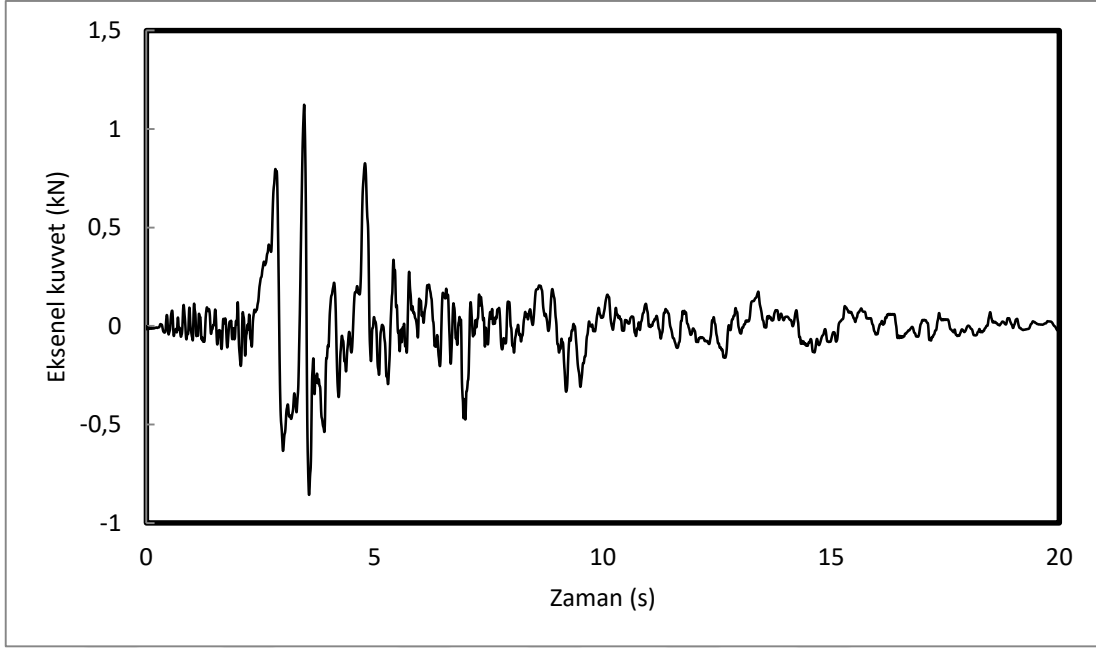
Şekil 2.37. Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



Şekil 2.38. Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



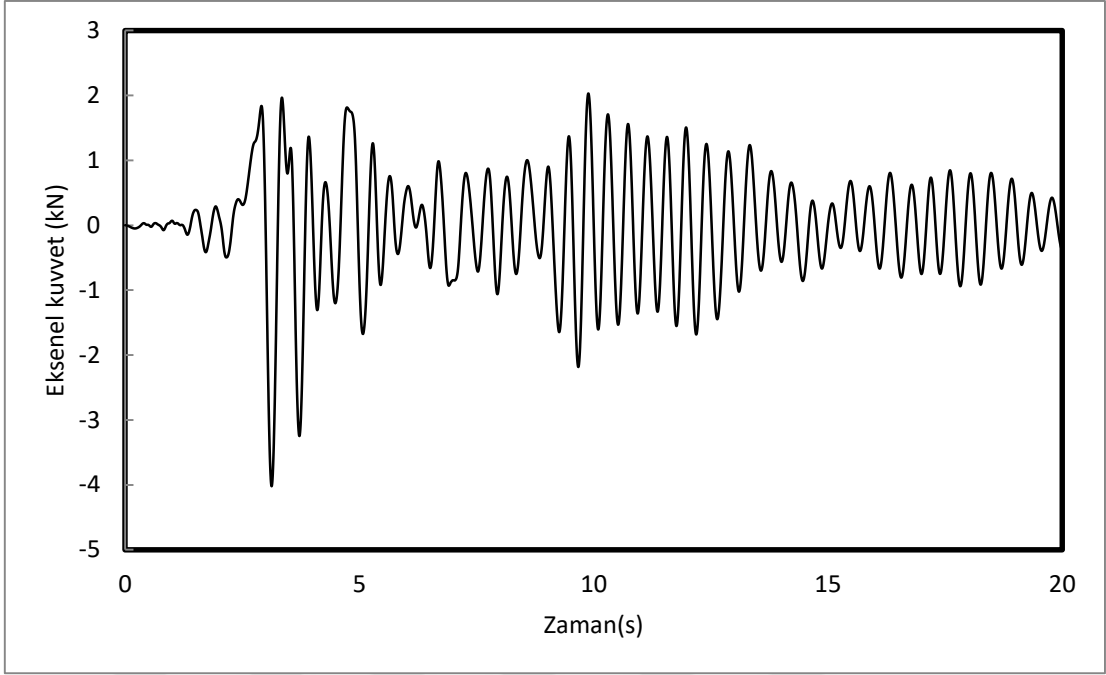
Şekil 2.39. Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



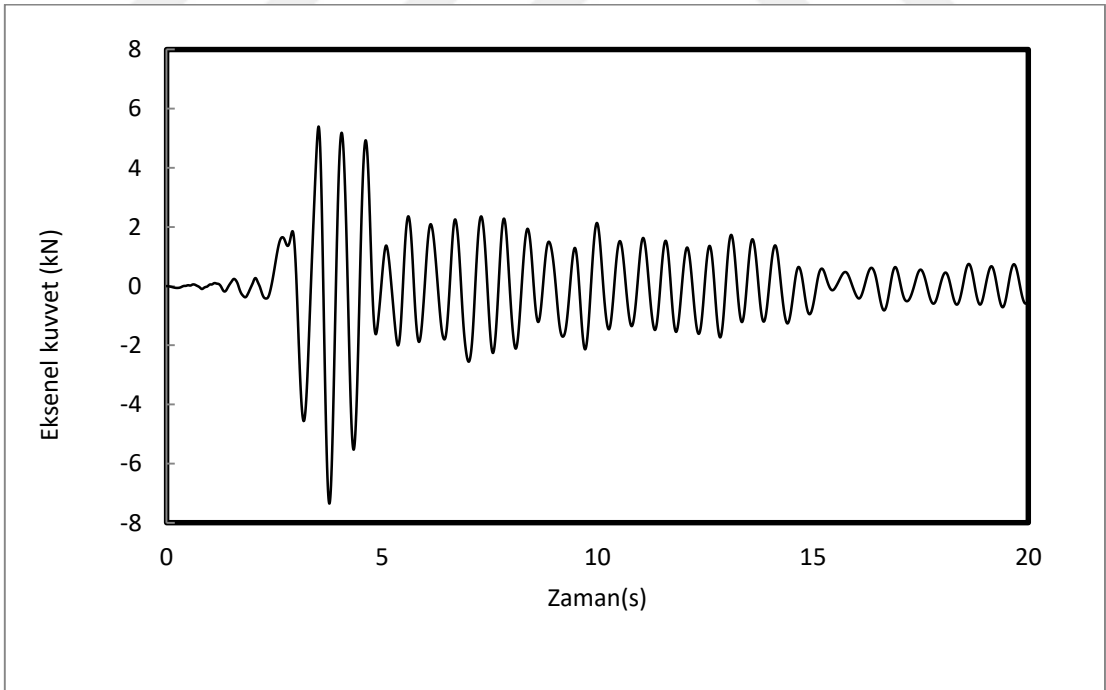
Şekil 2.40. Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu düzlem kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi

2.6.2.2. Uzak Kafes Sistem İçin Elde Edilen Eksenel Kuvvetler

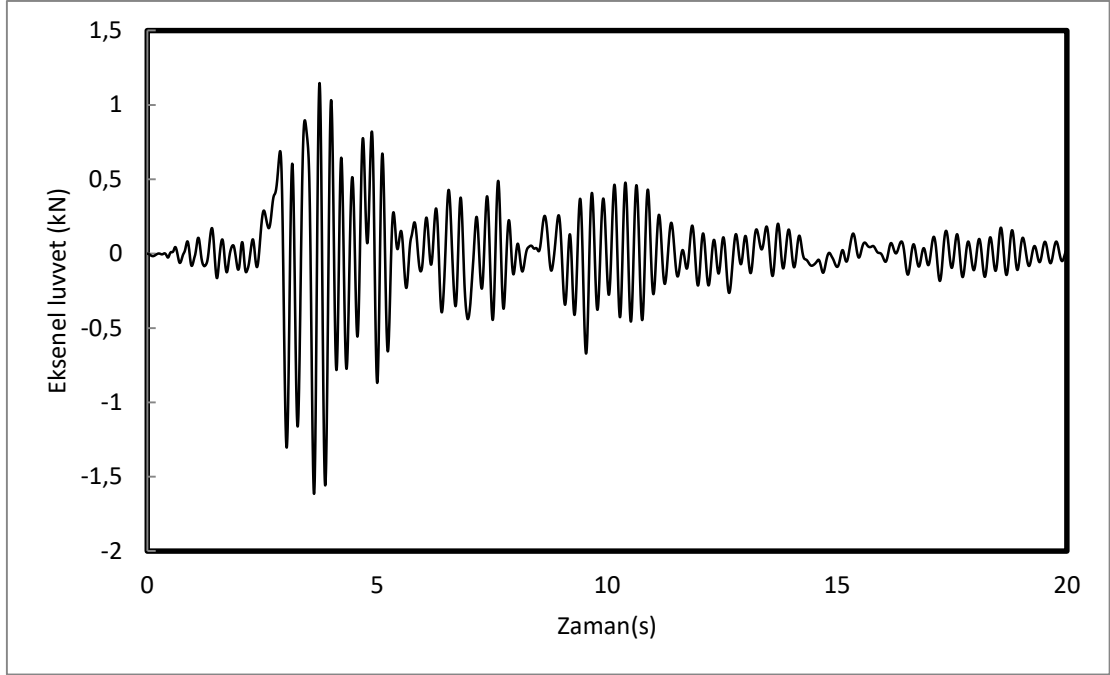
Çelik, LP kompozit malzeme - Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ve LP kompozit malzeme - Eşdeğer Dayanım Yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analizler sonucunda uzak kafes sistemde elde edilen eksenel kuvvetler ve bu eksenel kuvvetlerin zamanla değişimleri incelenmiştir. Maksimum eksenel kuvvetler çelik için 4,02kN, Eşdeğer Rijitlik Yöntemi ile cam LP için 7,35kN, karbon LP için 1,61kN, aramid LP için 4,21kN ve Eşdeğer Dayanım Yöntemi ile cam LP için 1,25kN, karbon LP için 0,67kN, aramid LP için 1,34kN olarak bulunmuştur. Dinamik analiz sonucunda uzak kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetlerin zamanla değişimleri Şekil 2.41 - Şekil 2.47'de verilmiştir.



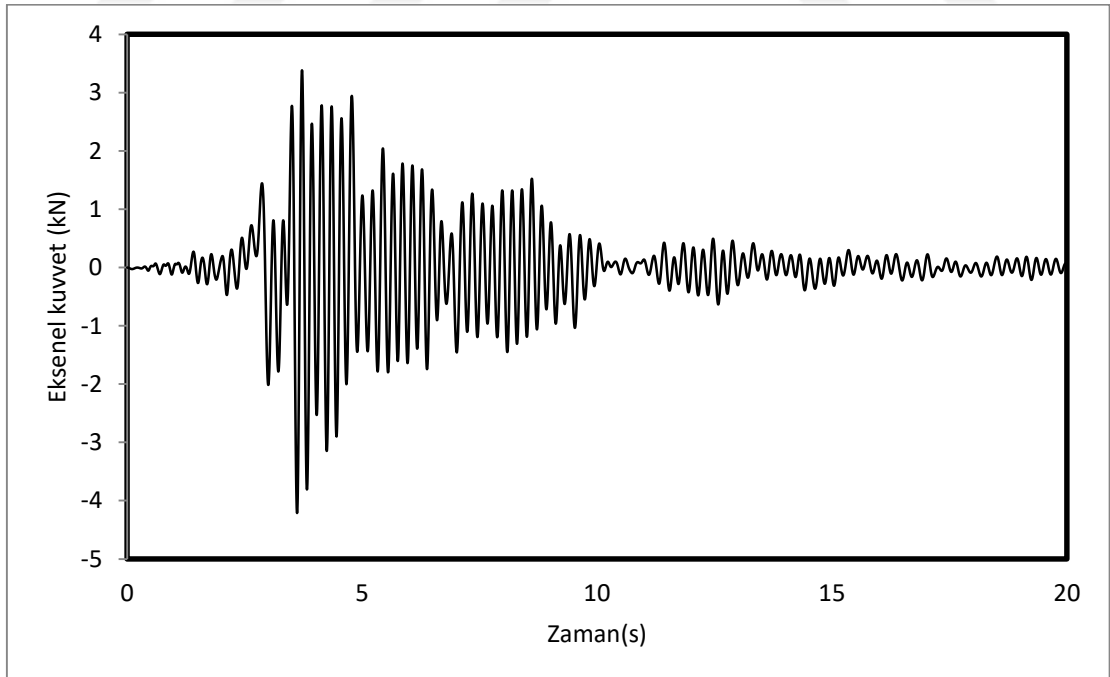
Şekil 2.41 Çelik malzeme kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



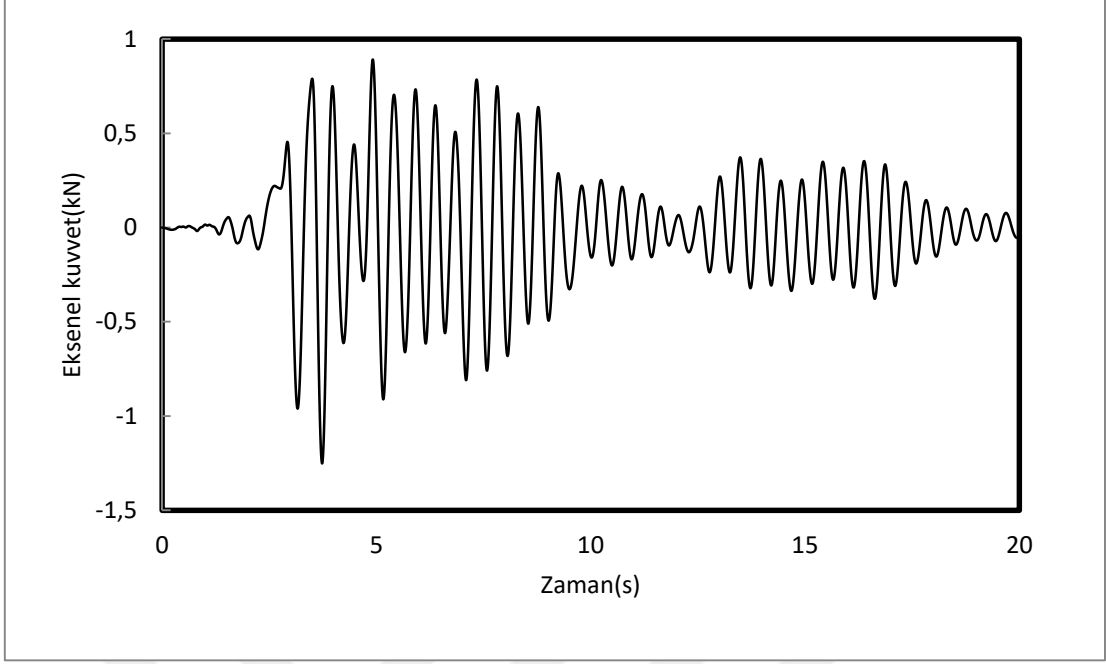
Şekil 2.42. Cam LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



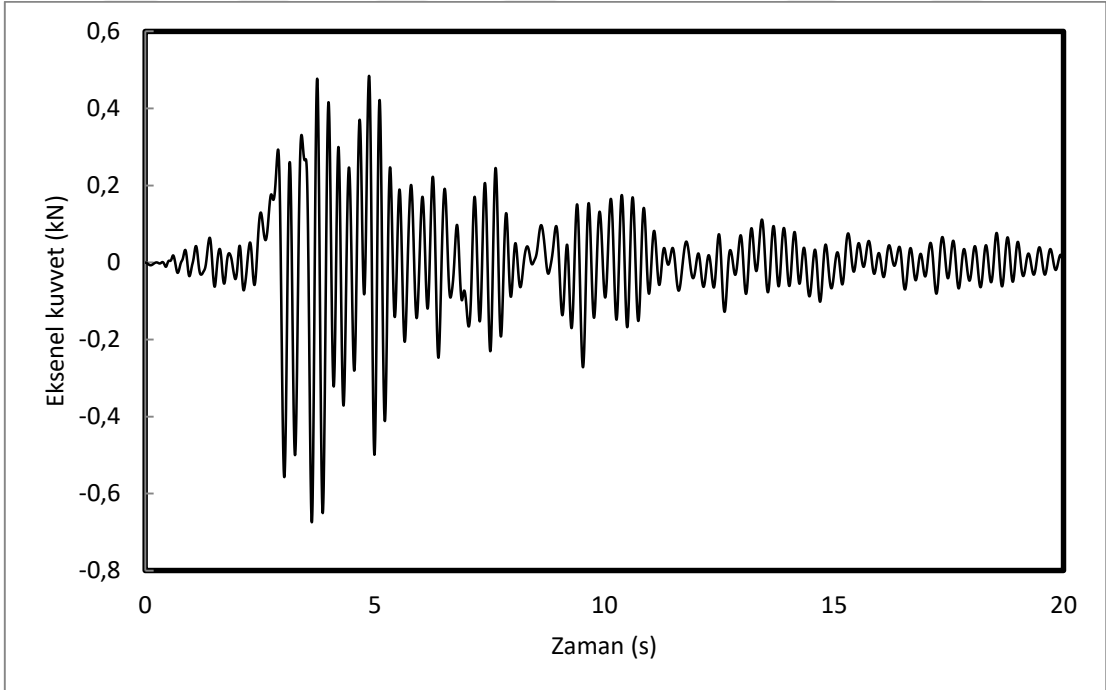
Şekil 2.43. Karbon LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



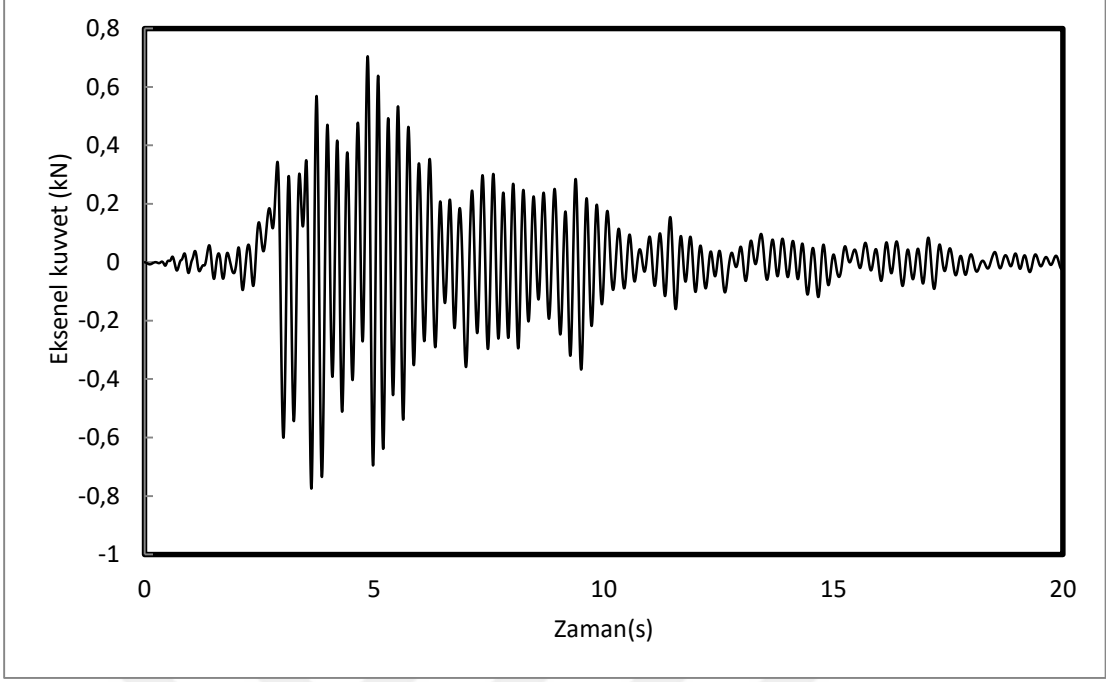
Şekil 2.44. Aramid LP malzeme ve eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



Şekil 2.45. Cam LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



Şekil 2.46. Karbon LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi



Şekil 2.47. Aramid LP malzeme ve eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucu uzay kafes sistemde elde edilen maksimum eksenel kuvvetin zamanla değişimi

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, pultrüzyonik lifli polimer kompozit malzemelerden yapılmış kafes sistemlerin statik ve dinamik analizi incelenmiştir. Çelik malzemeden yapılmış düzlem ve uzay kafes sistemlerin statik ve dinamik analizi sonucu yerdeğiştirme ve eksenel kuvvetler elde edilmiştir. Eşdeğer Rijitlik ve Eşdeğer Dayanım Yöntemleri kullanılarak, çelik kesit alanı esas alınarak cam LP, karbon LP ve aramid LP kompozit malzemelere ait kesit alanları belirlenmiştir. LP kompozit malzemeler için belirlenen kesitler kullanılarak statik ve dinamik analizler tekrarlanmıştır. Statik ve dinamik analizler sonucu hesaplanan yerdeğiştirme ve eksenel kuvvetler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Dinamik analizlerde zaman tanım alanında hesap metodu uygulanmış olup, yer hareketi olarak 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin Erzincan istasyonunda kaydedilen deprem ivme kaydının, yatay bileşeni kullanılmıştır. Dinamik analizlerde ilk 12 mod dikkate alınmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Düzlem kafes sistemin statik analizi sonucunda elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak cam LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha büyük, karbon LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha küçük, aramid LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirme ile aynı olduğu; eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak cam LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha küçük, karbon LP ve aramid LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Uzay kafes sistemin statik analizi sonucunda elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak cam LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha büyük, karbon LP ve aramid LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha küçük olduğu; eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha büyük olduğu görülmüştür.

Düzlem kafes sistemin statik analizi sonucunda elde edilen eksenel kuvvetler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak cam LP için elde edilen eksenel kuvvetin çelik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha büyük, karbon LP ve aramid LP için elde edilen eksenel kuvvetlerin çelik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha küçük olduğu; eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen eksenel kuvvetlerin çelik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Uzay kafes sistemin statik analizi sonucunda elde edilen eksenel kuvvetler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemleri kullanılarak cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen eksenel kuvvetlerin çelik için hesaplanan eksenel kuvvete yakın olduğu belirlenmiştir.

Düzlem kafes sistemin dinamik analizi sonucunda elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak cam LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha büyük, karbon LP ve aramid LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha küçük olduğu, eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha küçük olduğu belirlenmiştir.

Uzay kafes sistemin dinamik analizi sonucunda elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemleri kullanılarak cam LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha büyük, karbon LP ve aramid LP için elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin çelik için hesaplanan maksimum yerdeğiştirmeden daha küçük olduğu görülmüştür.

Düzlem kafes sistemin dinamik analizi sonucunda elde edilen eksenel kuvvetler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak cam LP için elde edilen eksenel kuvvetin çelik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha büyük, karbon LP ve aramid LP için elde edilen eksenel kuvvetlerin çelik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha küçük olduğu; eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen eksenel kuvvetlerin çelik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Uzay kafes sistemin dinamik analizi sonucunda elde edilen eksenel kuvvetler dikkate alındığında; eşdeğer rijitlik yöntemi kullanılarak cam LP için elde edilen eksenel kuvvetin çelik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha büyük, karbon LP ve aramid LP için elde edilen

eksenel kuvvetlerin elik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha kk olduğu; eşdeğer dayanım yöntemi kullanılarak cam LP, karbon LP ve aramid LP için elde edilen eksenel kuvvetlerin elik için hesaplanan eksenel kuvvetten daha kk olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasından yapılabilecek öneriler de aşağıda verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, seçilen uygulamalar ile dikkate alınan yük ve kesitler için geçerlidir. Uygulamalar, yk ve kesitlerin deėiŐmesi durumunda sonuçların da deėiŐebileceėi unutulmamalıdır.

Hesaplanan kesit alanları ve sonuçlar dikkate alındığında, LP kompozit malzeme kullanımı sırasında eşdeğer dayanım yönteminin, eşdeğer rijitlik yöntemine göre daha uygun olduğu görülmüştür.



4. KAYNAKLAR

- Adanur, S., Mosallam, A.S., Shinozuka, M. ve Gümüşel, L., 2011. A Comparative Study on Static and Dynamic Responses of FRP Composite and Steel Suspension Bridges, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, DOI:10.1177/073168441141839
- Alçıçek, H.E., 2015. Uzay kafes sistemlerin artan düşey yükler altında doğrusal olmayan analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alçıçek, H. ve Vatansever, C., 2017. “Uzay kafes sistemlerin artan düşey yükler altında doğrusal olmayan davranışı”, Uluslararası katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, Gaziantep, 83-92, 26-27.
- Altunışık, A., Ateş, Ş. ve Adanur, S. 2019. İnşaat Mühendisliğinde SAP2000 Uygulamaları Dynamic Academy Yayınevi, Trabzon, 784s.
- Akıncı, U., 2010. Pultruzyon metodu ile üretilen Lifli Polimer Profiller için Yarı Rijit Birleşimler, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ayhün, E., 2006. Uzay Kafes Sistemlerin Farkı Bölge Koşullarında Davranışının İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Proje Çözümleri, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Akman, M. S., Taşıyıcı beton elemanlarda donatı, ön veya art germe kablosu olarak kullanılan lif takviyeli polimer çubuklar, İ.T.Ü., İstanbul.
- Aran, A., 1990. Elyaf takviyeli Karma Malzemeler, İ.T.Ü. Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul.
- Arıkan, T.A., 2004. CTP Malzemesinin Yapısal Strüktürde Kullanılmasına Yönelik Sorunlar ve Strüktürel Davranışının İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Atabey, N., 2011. Betonarme Lifli Polimer Kompozit Asma Köprülerin Statik ve Dinamik Analizi Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bai, Y. and Yang, X., 2013. Novel Joint for Assembly of All-Composite Space Truss Structures: Conceptual Design and Preliminary Study, *Journal of Composites for Construction*, 17,1, 130-138.
- Caggegi, C., 2013. Experimental Analysis of The Efficiency of Carbon Fiber Anchors Applied over CFRP to Firebrick Bonded Joints, Doktora Tezi, University of Catania, Italy.
- Cardoso, D., Dikici, M. ve Harries, K., 2019. A viscoelastic model for time-dependent behavior of pultruded GFRP, *Construction and Building Materials* , 208, 63-74
- Carolin, A., 2001. Strengthening of Concrete Structures with CFRP, Licentiate Thesis, Lulea University Of Technology, Sweden.

- Castellero, S. ve Russo, S., 2011. Dynamic characterization an all-FRP construction, Composite Structures, 218, 1-14.
- Castellero, S. ve Russo, S., 2011. Composites: Mechanics, Applications. An International Journal 6,2, 1-18.
- Cheng, L., ve Karbhari V.M., 2006. New Bridge Systems Using FRP Composites And Concrete: A State-Of-The-Art Review, Progress In Structural Engineering And Materials, 8, 4, 143-154.
- Cumhur, A., 2007. Pultrüzyon Metodu İle Üretilmiş CTP Profillerle Sera Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Çağdaş S., 2004. Uygulamalı SAP 2000. Türkmen Kitapevi, İstanbul, 558s.
- Dejke, V., 2001. Durability of FRP Reinforcement in Concrete, Licentiate Thesis, Chalmers University Of Technology, Sweede.
- Demirlek, M., Z., 2011. Sıcaklık Etkisi Altındaki Düzlem Kafes Sistemlerin Optimum Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Ding, L., Liu, X., Wang, X., et al., 2018. Mechanical properties of pultruded basalt fiber-reinforced polymer tube under axial tension and compression, Construction and Building Materials, 176, 629-637.
- Duranoğlu, R., 2019. Tek Katlı Endüstriyel Yapıların Düzlem ve Uzak Kafes Sistem Çözümlerinin Karşılaştırılması Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Eşsizzoğlu, B., 2008. Uzak Kafes Sistemlerinin Sayısal Yöntemle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Fam, A.Z., Schnerch, D.A.ve Rizkalla, S.H., 2003. Rectangular FRP tubes filled with concrete for beam and column applications, Proceeding of the sixth international symposium on FRP reinforcement for concrete structures (FRPRCS-6), pp. 685–694, Singapore, 8–10.
- Guades, E., Aravinthan, T. ve Islam, M., M., 2014. Characterisation of the mechanical properties of pultruded fibre-reinforced polymer tube. Materials & Design, 63, 305–315.
- Günaydın, M., 2016. Onarılmış ve Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Betonarme Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Heshmati, M., Haghani, R. ve Al-Emrani, M., 2015. Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: State of the art. Composites Part B: Engineering, 81259–275.

- Jafari, A., Ashrafi, H., Bazli, M. ve Ozbakkaloglu, T., 2019. Effect of Thermal Cycles on Mechanical Responce of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Profiles of Different Geometries. *Composite Structures*, 110959.
- Judge, J.F., 1996. *The Coming Revolution, Airline Management and Marketing*, September,
- Hizam, R.M., Manalo, A.C., Karunasena, W., et al., 2019. Behaviour of pultruded GFRP truss system connected using through-bolt with mechanical insert, *Composites Part B-Engineering*, 168, 44-57.
- Hollaway, L. C., 2008. "Advanced Fiber Reinforced Polymer Composites" World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Karabulut, U., 2018. Geniş Açıklıklı Uzay Kafes Sistemlerin İlgili Türk ve Avrupa Standartları Uyarınca Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Keller, T., Bai, Y. ve Vallee, T., 2007. Long-term performance of a glass fiber-reinforced polymer truss bridge, *Journal of Composites for Construction*, 11, 1, 99-108.
- Keskin, E., 2005. Betonarme Yapıların Onarımı, Güçlendirilmesi ve Lifle Güçlendirilmiş Polimerler Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Landessman, A., Seruti, C. ve Batista, E., 2015. Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers Members for Structural Applications, *Materials Research* 181372-1383.
- Mallick, P. K., 2008. "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design" CRC Press.
- Mert, N., 2007. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Plakalarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Neto, A.B.S. ve Rovere, H.L., 2006. Flexual stifness Characterization of fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams, *Composite Structures*, 81, 274-282.
- Noh, J., Ghadimi, B., Russo, S. ve Rosana, M., 2018. Assessment of FRP pultruded elements under static and dynamic loads, *Composite Structures*, 202, 17-28.
- Özgür, Z., 2005. Prefabrike Çelik Uzay Kafes Çatı Sistemli Büyük Açıklıklı Yapıların Sismik Performansı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özmen G., Orakdöğen E. ve Darılmaz K., 2004. Örneklerle SAP 2000 v8. Birsen Yayınevi, İstanbul, 145s.
- Öztürk, O., 2006. CTP Profillerle Depreme Dayanıklı Yapı Modellemeleri ve Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Russo, S., 2012. Experimental and finite element analysis of a very large pultruded FRP structure subjected to free vibration, Composite Structures, 94, 1097-1105.
- SAP2000, 1998. Integrated finite element analysis and design of structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Sarıbıyık, M., Cumhuri, A., Aydın, F., Sarıbıyık, A. ve Çağlar, A., 2007. Pultrüzyon Metodu ile Üretilen Cam Fiber Takviyeli Plastik Profillerin Sera Modellemesinde Kullanılması, Uluslararası Deprem ve Yapı Mühendisliğinde Gelişmeler Sempozyumu, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta-Antalya, Türkiye
- Sarıbıyık, A., 2008. Pultrüzyon Metodu ile Üretilmiş Ctp Profillerin Kalıcı Sera Tasarımında Kullanılması Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Sonnenschein, R., Gajdosova, K. ve Holly, I., 2016. FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges, Procedia Engineering, 161, 477-482.
- Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Yayın Evi, Ankara.
- Topçu, I., Dikici, M. ve Ipek, C., 2018. İnşaat sektöründe kullanıma dönük cam elyaf ile takviye edilmiş plastiklerin statik yük altında sürünme davranışlarının incelenmesi, International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 09-11.
- Tuakta, C., 2005. Use of Fiber Reinforced Polymer Compositein Bridge Structures, Master of Engineering in Civil and Enviromental Engineering, M.I.T
- TS 498, 1987. Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 24 s.
- TBDY-2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, Mart 2018.
- Ülker, F., 2007. Çift Katmanlı Uzay Kafes Sistemlerin Statik ve Dinamik Analizi Yüksek Lisans Tezi, Yüksek Lisans Tezi, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- URL-1, http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp 18.04.2019
- URL-2, PEER <http://peer.berkeley.edu/svbin/GeneralSearch> 1992 Erzincan Depremi, Erzincan İstasyonu Deprem ivme-Zaman Kayıtları, 20 Haziran 2019
- URL-3, <http://www.creativepultrusions.com>, 20 Haziran 2019
- URL-4, <http://fiberline.com>, 20 Haziran 2019
- Uysal, H., 2017. Mevcut Yapıların Lifli Polimer Kompozitlerle Güçlendirme Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

- Vatansever, C., 2019. Investigation of buckled truss bars of a space truss roof system, Engineering Failure Analysis 106, 104156.
- Vural, M., 2012. Uzay Kafes Sistemlerinin Kar Yüklere Yönünden İncelenmesi: Stadyum Çatısı Örneği Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- W. Wu, 1990. "Thermo Mechanical Properties of Fiber Reinforced Plastics (FRP) Bars," Doktora Tezi, West Virginia University, 292.
- Wang, Y. ve Zureick, A., 1994. Characterization of the longitudinal tensile behavior of pultruded I-shape structural members using coupon specimens, *Composite Structures*, 29 436-472.
- Yıldırım, G., 2011. Pultrüzyon Metoduyla Üretilmiş CTP Profillerin Şekil ve Boyutlarının Eğilme ve Basınç Dayanımlarına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Zhang, X.J., 2008. Mechanics Feasibility of Using CFRP Cables in Super Long-Span CableStayed Bridges, *Structural Engineering and Mechanics*, 29, 5, 30, 567-579.
- Zhu, R., Li, F. Zhang, D.D., et al., 2019. Effect of Joint Stiffness on Deformation of a Novel Hybrid FRP-Aluminum Space Truss System, *Journal of Structural Engineering*, 145, 11, 04019123.

ÖZGEÇMİŞ

Zeynep DEĞERMENCİ, 1989 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğrenimini 1996-2003 yılları arasında Trabzon 24 Şubat İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini Trabzon Cumhuriyet Ortaokulu'nda ve lise öğrenimini ise Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında üniversite eğitimine başlamış olduğu Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun oldu. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.