

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CTP KOMPOZİT PROFİLLERİN DARBE YÜKÜ ETKİSİ
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR
METODU İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe ÇİMŞİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

ŞUBAT 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CTP KOMPOZİT PROFİLLERİN DARBE YÜKÜ ETKİSİ
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR METODU
İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe ÇİMŞİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zeynep YAMAN

Ortak Danışman: Dr. Mohammad Manzoor NASERY

ŞUBAT 2024

Tuğçe ÇİMŞİR tarafından hazırlanan “CTP KOMPOZİT PROFİLLERİN DARBE YÜKÜ ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ ” adlı tez çalışması 22.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç.Dr. Yusuf SÜMER**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof.Dr. Mehmet EMİROĞLU**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr. Zeynep YAMAN** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr. Elif AĞCAKOCA**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Elif BORU**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Mohammad Manzoor NASERY** (Ortak Danışman)
Karadeniz Teknik Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “CTP KOMPOZİT PROFİLLERİN DARBE YÜKÜ ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(22/02/2024)

Tuğçe ÇİMŞİR





Aileme ve arkadaşlarıma



TEŞEKKÜR

Yıllar boyunca ciddi emek ve özveri ile bu çalışmanın yürütülmesini sağlayan, değerli bilgilerini benimle paylaşan ve desteğini hiç esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Zeynep YAMAN'a, ortak danışman hocam Dr. Mohammad ManzoorNASERY'e ve Doç. Dr. Elif AĞCAKOCA'ya destekleri ve katkıları için teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın her aşamasında destek olup bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Mohammad SaberSADID'e,

Değerli bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan FİBERKO işletmesine ve İbrahim Bey'e,

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman sevgileri ve destekleri ile yanımda olan, bu hayatta sahip olduğum en değerli varlıklarım canım anneme, babama, kardeşlerime, amcama, yengeme ve her zaman yanımda olan arkadaşlarıma,

Sonsuz teşekkürler...

Tuğçe ÇİMŞİR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLOLİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	15
2.1. Kompozit Malzeme Nedir?	15
2.2. Kompozit Malzeme Kullanım Alanları	17
2.3. Kompozit Malzemenin Tercih Edilme Nedenleri	18
2.4. Kompozit Malzeme Bileşenleri	21
2.5. GFRP Kompozit Malzeme	24
2.5.1. GFRP malzeme ve çeşitleri	25
2.5.2. GFRP malzemenin avantajları ve uygulama alanları	27
2.5.3. GFRP malzeme kalıplama yöntemleri	30
2.5.4. GFRP malzemenin inşaat sektöründeki yeri	36
2.5.5. Sektörde kullanımı yaygın GFRP profiller	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM	43
3.1. ABAQUS ve Sonlu Elemanlar Yöntemi	43
3.2. Yapılan Çalışma	45
3.3. ABAQUS Birim Kabulü	45
3.4. Analiz Modellerinin Geometrik Özelliklerinin Oluşturulması	46
3.4.1. Darbe cismi geometrik modellenmesi	46
3.4.2. 100*100*10 GFRP kutu profil ve çelik kutu profil geometrik modellemesi	46
3.4.3. 200*100*10 GFRP I profil ve çelik I profil geometrik modellemesi	47
3.4.4. 200*60*10 GFRP U profil ve çelik U profil geometrik modellemesi	49
3.4.5. 200*60*10 GFRP boru profil ve çelik boru profil geometrik modellemesi	50
3.4.6. Eleman tipinin seçilmesi	51
3.5. Analiz Modellerine Malzeme Tanımlaması	53
3.5.1. Çelik malzeme modeli tanımlama	53
3.5.2. GFRP malzeme modeli tanımlama	55
3.5.3. Yükleme ve sınır şartlarının belirlenmesi	59
3.6. Sonlu Eleman Ağ Sıklığı	62
3.7. Analiz Adımları Sıralaması	65

3.7.1. Cisimlerin geometrik modellemesinin yapılması.....	65
3.8. Kullanılacak Malzemelerin Oluşturulması.....	65
3.8.1. Oluşturulan modellerin birleştirilmesi	66
3.8.2. Analizin adımlarının belirlenmesi.....	66
3.8.3. Geometrik modellerinin etkileşiminin belirlenmesi.....	66
3.8.4. Modele gelen yüklerin belirlenmesi.....	67
3.8.5. modele uygulanan sonlu elemanlar sıklığının belirlenmesi	67
3.8.6. Modellemenin Sonuçlarını Alma	67
3.9. Doğrulama Çalışması	68
4. BULGULAR VE İRDELEMELER.....	71
4.1. 100*100*10 Kutu Profil İncelemesi.....	71
4.1.1. Çelik kutu profil ve GFRP kutu profil gerilme dağılımları.....	71
4.1.2. Çelik kutu profil ve GFRP kutu profil plastik şekil değiştirme dağılımı .	74
4.1.3. Çelik kutu profil ve GFRP kutu profil karşılaştırması	76
4.2. 200*60*10 U Profil İncelemesi.....	79
4.2.1. Çelik U profil ve GFRP U profil gerilme dağılımları	79
4.2.2. Çelik U profil ve GFRP U profil plastik şekil değiştirme dağılımı	82
4.2.3. Çelik U profil ve GFRP U profil karşılaştırması.....	84
4.3. 200*100*10 I Profil İncelemesi	87
4.3.1. Çelik I profil ve GFRP I profil gerilme dağılımları	87
4.3.2. Çelik I profil ve GFRP I profil plastik şekil değiştirme dağılımı.....	90
4.3.3. Çelik I profil ve GFRP I profil karşılaştırması.....	92
4.4. 114,3*4,50 Boru Profil İncelemesi.....	94
4.4.1. Çelik boru profil ve GFRP boru profil gerilme dağılımları	94
4.4.2. Çelik boru profil ve GFRP boru profil plastik şekil değiştirme dağılımı	96
4.4.3. Çelik boru profil ve GFRP boru profil karşılaştırması.....	98
5. SONUÇ ve öneriler.....	103
KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	111

KISALTMALAR

CTP	:Cam Elyaf Takviyeli Plastik
DAMAGEFC	:Fiber Sıkıştırma Hasarı Değişkeni(Fiber compressive damage variable)
DAMAGEFT	:Fiber Çekme Hasarı Değişkeni(Fiber tensile damage variable)
DAMAGEMC	:Matris Sıkıştırma Hasarı Değişkeni(Matrix compressive damage variable)
DAMAGEMT	:Matris Çekme Hasarı Değişkeni(Matrix tensile damage variable)
DMICRT	:Tüm Hasar Başlatma Kriterleri(All active components of the damage initiation criteria)
FEA	:Finite Element Analysis
GFRP	:Glass Fiber Reinforced Plastic
HSNFCCRT	:Fiber Sıkıştırma Başlatma Kriteri (Hashin's fiber compressive damage initiation criterion)
HSNFTCRT	:Fiber Gerilme Başlatma Kriteri(Hashin's fiber tensile damage initiation criterion)
HSNMCCRT	:Matris Sıkıştırma Başlatma Kriteri(Hashin's matrix tensile damage initiation criterion)
HSNMTCRT	:Matris Gerilme Başlatma Kriteri(Hashin's matrix compressive damage initiation criterion)
PEEQ	:Plastik Şekil Değiştirme(Equivalent plastic strain)
R3D4	:4 Düğümlü 3 Boyutlu Katı Eleman
S4R	:Dört Düğümlü Kabuk Eleman
Von Mises	:Von Mises Gerilmesi



SİMGELER

A	:İvme
U	:Yerdeğiştirme
R_F	:Mesnet Reaksiyonu
V	:Hız
kN	:Kilonewton
MPa	:Megapascal
mm	:Milimetre
G	:İvme [m/s^2]
cm	:Santimetre
J	:Joule
kg	:Kilogram
t	:Ton
s	:Saniye
L	:BoyunaYön
T	:Enine Yön
f_t	:Çekme Dayanımı
f_c	:Basma Dayanımı



TABLÖLİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. GFRP Malzemenin Kullanıldığı Sektörler (CTP Teknolojisi,2018).....	17
Tablo 2.2. Çelik Demir ve GFRP Demir Karşılaştırması (Madewell, 2021).....	19
Tablo 2.3. İnşaat sektörünün içinden GFRP ve Demir donatı karşılaştırması (FİBERKO, 2023).....	20
Tablo 2.4. Takviye türleri karşılaştırması (CTP Teknolojisi, 2018)	23
Tablo 2.5. Belli elyafların özelliklerinin karşılaştırılması (Enşici, 2009)	24
Tablo 2.6. Bazı cam takviyelerinin özellikleri (Ekiz, 2013)	26
Tablo 2.7. GFRP Kompozit Malzemenin Avantajları (FİBERKO,2023)	28
Tablo 2.8. Sektörde Kullanılan U Profiller (FİBERKO, 2023).....	39
Tablo 2.9. Sektörde Kullanılan Kutu Profiller (FİBERKO, 2023).....	39
Tablo 2.10. Sektörde Kullanılan I Profiller (FİBERKO, 2023)	40
Tablo 2.11. Sektörde Kullanılan Boru Profiller (FİBERKO, 2023)	40
Tablo 2.12. Sektörde Kullanılan Özel Üretim Profiller (FİBERKO, 2023).....	41
Tablo 3.1. Abaqus Programı Kabul Edilen Birimler	45
Tablo 3.2. Çelik Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	54
Tablo 3.3. Plastik Bölge Özelliklerinin Tanımlanması	55
Tablo 3.4. GFRP Malzemenin Elastik Özelliklerinin Tanımlanması.....	55
Tablo 3.5. GFRP Malzemenin Özelliklerinin Tanımlanması.....	56
Tablo 3.6. GFRP Malzemenin Lif ve Matris Özelliklerinin Tanımlanması.....	56
Tablo 3.7. Doğrulama Çalışması Malzeme Özellikleri (Nasery, 2020)	68
Tablo 3.8. Doğrulama Çalışması Analiz Sonuçları (Nasery,2020)	69
Tablo 4.1. Kutu Profil Analiz Sonuçları.....	76
Tablo 4.2. Kutu Profil Analiz Sonuçları.....	84
Tablo 4.3. I Profil Analiz Sonuçları	92
Tablo 4.4. Boru Profil Analiz Sonuçları.....	99
Tablo 4.5. Analiz Sonuçları.....	102



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 2003 yılı Amerika GFRP Pazarı Sektörel Dağılımı (CTP Teknolojisi,2018)	18
Şekil 2.2. 2003 yılı Türkiye GFRP Pazarı Sektörel Dağılımı (CTP Teknolojisi,2018)	18
Şekil 2.3. Kompozit Malzeme Tipleri (Kaya, 2016)	22
Şekil 2.4. Kompozit Malzeme İçeriği (Kaya, 2016)	22
Şekil 2.5. Kompozit Bileşenleri	23
Şekil 2.6. Kompozit Profil Üretimi Cam Lifi Görseli	25
Şekil 2.7. Cam Elyafı Kullanım Alanı Otomotiv Sektörü (Fiberpull, 2017)	29
Şekil 2.8. Cam Elyafı Kullanım Alanı Boru Yapımı (Fiberpull, 2017)	29
Şekil 2.9. Cam Elyafı Kullanım Alanı Karayolları Uygulamaları (Fiberpull, 2017)	30
Şekil 2.10. GFRP Üretimi Kalıplama Yöntemleri (CTP Teknolojisi, 2018)	31
Şekil 2.11. Kompozit Malzeme Üretimi El Yatırma Yöntemi (CTP Teknolojisi, 2018)	32
Şekil 2.12. Kompozit Malzeme Üretimi Püskürtme Yöntemi (CTP Teknolojisi, 2018)	32
Şekil 2.13. Kompozit Malzeme Pres Kalıplama (CTP Teknolojisi, 2018)	33
Şekil 2.14. Kompozit Malzeme Üretimi Bmc Hazır Kalıplama (CTP Teknolojisi, 2018)	34
Şekil 2.15. Kompozit Malzeme Üretimi Reçine Enjeksiyon Kalıplama (CTP Teknolojisi, 2018)	34
Şekil 2.16. Kompozit Malzeme Üretimi Pultrüzyon (CTP Teknolojisi, 2018)	35
Şekil 2.17. Kompozit Malzeme Üretimi Elyaf Sarma (CTP Teknolojisi, 2018)	36
Şekil 2.18. Kompozit Malzeme Üretimi Enjeksiyon Kaplama (CTP Teknolojisi, 2018)	36
Şekil 2.19. Kompozit Malzeme Merdiven Kullanım Alanı (FİBERKO, 2023)	37
Şekil 2.20. Kompozit Malzeme Sera Kullanım Alanı (Fiberpull, 2017)	37
Şekil 2.21. GFRP Kompozit Profil (FİBERKO, 2023)	38
Şekil 2.22. GFRP Kompozit Malzeme (FİBERKO, 2023)	38
Şekil 2.23. GFRP Kompozit Profillerin Kullanım Alanları (FİBERKO, 2023)	41
Şekil 3.1. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellenmesi	46
Şekil 3.2. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi	47
Şekil 3.3. Abaqus Programı Assembly Modellemesi	47
Şekil 3.4. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellenmesi	48
Şekil 3.5. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi	48
Şekil 3.6. Abaqus Programı Assembly Modellemesi	48
Şekil 3.7. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellenmesi	49
Şekil 3.8. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi	49

Şekil 3.9. Abaqus Programı Assembly Modellemesi	50
Şekil 3.10. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellenmesi	50
Şekil 3.11. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi	51
Şekil 3.12. Abaqus Programı Assembly Modellemesi	51
Şekil 3.13. Eleman Oluşturma Örneği (ABAQUS V.6.6 Documentation).....	52
Şekil 3.14. Geleneksel Kabuk Elemanlar (ABAQUS V.6.6 Documentation).....	52
Şekil 3.15. Shell Eleman Tipleri (Elements).....	52
Şekil 3.16. Rijit Cisim Abaqus Shell Eleman Tanımlaması	53
Şekil 3.17. Profil Abaqus Shell Eleman Tanımlaması.....	53
Şekil 3.18. Elasto-Plastik Çeliğin Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi.....	54
Şekil 3.19. GFRP Malzeme Katman Dizilimi.....	57
Şekil 3.20. Kutu Profil GFRP Malzeme Katman Dizilim Gösterimi.....	57
Şekil 3.21. Boru Profil GFRP Malzeme Katman Dizilim Gösterimi.....	58
Şekil 3.22. I Profil GFRP Malzeme Katman Dizilim Gösterimi	58
Şekil 3.23. U Profil GFRP Malzeme Katman Dizilim Gösterimi.....	58
Şekil 3.24. Darbe Cisminin Mesnet Tanımlaması	59
Şekil 3.25. Profillerin Sabit Mesnet Tanımlaması	59
Şekil 3.26. Profillerin Kayıcı Mesnet Tanımlaması.....	60
Şekil 3.27. Kutu Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması	60
Şekil 3.28. U Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması	61
Şekil 3.29. I Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması	61
Şekil 3.30. Boru Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması	61
Şekil 3.31. 3x3 Sonlu Eleman Ağ Sıklığı	62
Şekil 3.32. 5x5 Birim Sonlu Eleman Ağ Sıklığı.....	63
Şekil 3.33. 10x10 Birim Sonlu Eleman Ağ Sıklığı.....	63
Şekil 3.34. 15x15 Birim Sonlu Eleman Ağ Sıklığı.....	63
Şekil 3.35. SPC#C1-Farklı Boyutlardaki Sonlu Eleman Ağ Sıklığının ve Deney Yerdeğiştirme-Zaman Grafiği (Nasery,2020)	64
Şekil 3.36. SPC#C2-Farklı Boyutlardaki Sonlu Eleman Ağ Sıklığının ve Deney Yerdeğiştirme-Zaman Grafiği (Nasery,2020)	64
Şekil 3.37. Darbe Cismi Modellemesi (Nasery,2020)	65
Şekil 3.38. GFRP Malzemesi Lif Katman Doğrultuları.....	66
Şekil 3.39. Geometrik Modellerin Mesh Boyutu Seçimi.....	67
Şekil 3.40. Doğrulama Çalışması SPC#C1Yer DeğiştirmeSonuçları Karşılaştırması (Nasery,2020).....	69
Şekil 3.41. Doğrulama Çalışması SPC#C2 Yer DeğiştirmeSonuçları Karşılaştırması (Nasery,2020).....	70
Şekil 4.1. Çelik Kutu Profil Von Mises Gerilme Dağılımı	71
Şekil 4.2.GFRP Kutu Profil Von Mises Gerilme Dağılımı.....	72
Şekil 4.3. Çelik Kutu Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı	72
Şekil 4.4. GFRPKutu Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı	72
Şekil 4.5. Çelik Kutu Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı	73
Şekil 4.6. GFRP Kutu Profil Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı.....	73
Şekil 4.7. Çelik Kutu Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı	73
Şekil 4.8. GFRP Kutu Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı.....	74
Şekil 4.9. Çelik Kutu Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı.....	74
Şekil 4.10. GFRP Kutu Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı	75
Şekil 4.11. Çelik-GFRP Kutu Profil Yer Değiştirme Grafiği	77
Şekil 4.12. Çelik Kutu Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı	78

Şekil 4.13. GFRP Kutu Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı	78
Şekil 4.14. Çelik-GFRP Kutu Profil Mesnet Kuvveti Grafiği	78
Şekil 4.15. Çelik-GFRP Kutu Profil İvme Grafiği	79
Şekil 4.16. Çelik U Profil Von Mises Gerilme Dağılımı	79
Şekil 4.17. GFRP U Profil Von Mises Gerilme Dağılımı	80
Şekil 4.18. Çelik U Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı.....	80
Şekil 4.19. GFRP U Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı	80
Şekil 4.20. Çelik U Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı	81
Şekil 4.21. GFRP U Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı.....	81
Şekil 4.22. Çelik U Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı	81
Şekil 4.23. GFRP U Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı.....	82
Şekil 4.24. Çelik U Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı	82
Şekil 4.25. GFRP U Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımları	83
Şekil 4.26. Çelik-GFRP U Profil Yer Değiştirme Grafiği	85
Şekil 4.27. Çelik U Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı	85
Şekil 4.28. GFRP U Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı.....	85
Şekil 4.29. Çelik-GFRP U Profil Mesnet Kuvveti Grafiği	86
Şekil 4.30. Çelik-GFRP U Profil İvme Grafiği.....	86
Şekil 4.31. Çelik I Profil Von Mises Gerilme Dağılımı	87
Şekil 4.32. GFRP I Profil Von Mises Gerilme Dağılımı	87
Şekil 4.33. Çelik I Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı	88
Şekil 4.34. GFRP I Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı	88
Şekil 4.35. Çelik I Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı.....	88
Şekil 4.36. GFRP I Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı	89
Şekil 4.37. Çelik I Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı.....	89
Şekil 4.38. GFRP I Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı	89
Şekil 4.39. Çelik I Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı	90
Şekil 4.40. GFRP I Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımları.....	90
Şekil 4.41. Çelik-GFRP I Profil Yer Değiştirme Grafiği	92
Şekil 4.42. Çelik I Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı	93
Şekil 4.43. GFRP I Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı	93
Şekil 4.44. Çelik-GFRP I Profil Mesnet Kuvveti Grafiği.....	93
Şekil 4.45. Çelik-GFRP I Profil İvme Grafiği	94
Şekil 4.46. Çelik Boru Profil Von Mises Gerilme Dağılımı.....	94
Şekil 4.47. GFRP Boru Profil Von Mises Gerilme Dağılımı	95
Şekil 4.48. Çelik Boru Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı.....	95
Şekil 4.49. GFRP Boru Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı	95
Şekil 4.50. Çelik Boru Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı	95
Şekil 4.51. GFRP Boru Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı ...	96
Şekil 4.52. Çelik Boru Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı	96
Şekil 4.53. GFRP Boru Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı.....	96
Şekil 4.54. Çelik Boru Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı	97
Şekil 4.55. GFRP Boru Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımları.....	97
Şekil 4.56. Çelik-GFRP Boru Profil Yer Değiştirme Grafiği.....	99
Şekil 4.57. Çelik Boru Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Grafiği	100
Şekil 4.58. GFRP Boru Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Grafiği	100
Şekil 4.59. Çelik-GFRP Boru Profil Mesnet Kuvveti Grafiği	100
Şekil 4.60. Çelik-GFRP Boru Profil İvme Grafiği	101



GFRP KOMPOZİT PROFİLLERİN DARBE YÜKÜ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) kompozit profillerin yapısal eleman olarak kullanılabilirliği, GFRP kompozit malzemenin profiller için uygunluğu ve darbe yüküne maruz durumlarda çelik malzemeye yeni bir alternatif olma potansiyelinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kutu profil, I profil, U profil ve boru profil gibi farklı geometrik şekillere sahip profillerin darbe yükü altındaki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Lineer olmayan darbe analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu analizlerde Abaqus programı kullanılmıştır. GFRP profiller ile çelik profillerin darbe yükü altındaki davranışlarını karşılaştırmak amacıyla, endüstride yaygın olarak kullanılan söz konusu profiller Fiberko firmasından alınan bilgiler baz alınarak analiz edilmiştir. Seçilen profillerin boyutları, endüstriyel bir üretim işletmesinin ürünleri referans alınarak belirlenmiş ve bu boyutlara göre hem GFRP hem de çelik malzeme olarak profiller Abaqus programında modellenmiştir. Belirlenen kutu profil, I profil, U profil ve boru profilleri modelledikten sonra, darbe yükleme 2000 mm yükseklikten 0,075 ton ağırlığına sahip rijit cismin serbest düşürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Darbe uygulanan cisim, deformasyon oluşmadan ve gerilme almaksızın bir rijit cisim olarak modellenmiş bununla birlikte profiller, boyutlarına göre deformasyona izin veren kabuk elemanlar olarak modellenmiştir. Geometrik modellere malzeme ataması yapılmış ve cam elyaf takviyeli (GFRP) malzeme için kullanılan elastik ve plastik malzeme özellikleri Abaqus programı kütüphanesinden alınmıştır. Cam fiber lifleri, profil kalınlığına göre eşit katmanlara bölünerek liflerin doğrultuları [0/-45/90/45/90/-45/0] olacak şekilde düzenlenmiştir. Sekiz farklı doğrultuda yönlendirilmiş cam fiber liflerinden meydana gelen kompozit malzemeye uygun malzeme ataması yapılmış ve profilin sınır şartları belirlenerek, biri sabit mesnet diğeri kayıcı mesnet olacak şekilde konfigüre edilmiştir. Rijit darbe cismi sadece düşey yönde hareket edebilecek şekilde sınırlandırılarak darbe analizi için rijit cisme hız tanımlaması yapılmış; 2000 mm yükseklikten serbest bırakılan ve 0,075 ton ağırlığındaki cismin düşme hızı, hesaplanarak 6264,18 mm/sn olarak belirlenmiştir. Bu değer, darbe analizi için kullanılmıştır. Sonlu eleman ağ boyutunun belirlenebilmesi amacıyla bir yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan profil üç farklı bölüme ayrılmış ve her bir bölüm için farklı sonlu eleman ağ boyutları denenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, profilin orta bölümünde en uygun sonlu eleman ağ boyutu olarak 5x5 mm belirlenirken, kalan bölgeler ve rijit darbe cismi için ise 15x15 mm boyutları tercih edilmiştir. Bu boyutlar, analizlerin doğruluğunu ve hesaplama stabilitesini sağlamak amacıyla seçilmiştir, böylelikle sonuçların güvenilirliği artırılmıştır. Malzeme farklılıkları ile birlikte çelik profiller ve GFRP kompozit profillerin arasında yapısal performans ve dayanıklılık açısından belirgin farklılıklar görülmüştür. Yapılan analizler, GFRP kompozit profillerin çelik profillere kıyasla daha elastik bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Çelik profillerin genellikle daha az deplasman gösterdiği ancak kalıcı deformasyona daha fazla maruz kaldığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, GFRP kompozit profillerin yer değiştirmeye karşı daha hassas olduğu ve bu malzemenin minimum mesnet reaksiyonu gerektiren yerlerde tercih edilebileceği, minimum deplasman ihtiyacı duyulan yerlerde ise elik malzemenin tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu alışma, yapısal gereksinimlere uygun malzeme seçiminin kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamakta ve darbe yüküne maruz kalacak yapılar için malzeme seçiminin titizlikle yapılması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar arasında kompozit elemanların profil seçimi ve kalınlığının darbe davranışını etkileyen faktrler arasında olduğu da yer almaktadır.



INVESTIGATING THE BEHAVIOR OF GFRP COMPOSITE PROFILES UNDER IMPACT LOADS USING FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

This thesis aims to investigate the usability of glass fiber-reinforced plastic (GFRP) composite profiles as structural elements, assess the suitability of GFRP composite material for profiles, and evaluate its potential as a new alternative to steel. Within the scope of this thesis, impact analysis modeling was carried out for the profile types determined using the Abaqus program, which provides high-performance simulations, and the finite element method. To compare the impact behavior of GFRP and steel profiles, four different profile types commonly used in the industry were selected: box profile, I profile, U profile, and pipe profile. These profiles were modeled as GFRP and steel materials.

Profile dimensions were determined using the products of an industrial production company, and the profiles were designed in Abaqus according to these dimensions. Following the design, impact tests were carried out by dropping a rigid object weighing 0.075 tons from a height of 2000 mm. In Abaqus, the rigid body was modeled as non-deformable, and the selected profiles with dimensions of 620550200 mm were modeled as shell elements that can be deformed according to their dimensions. Material assignments were made to the created geometric models, and elastic and plastic material properties for GFRP were obtained from the Abaqus program library. Glass fiber profiles are divided into equal layers with fiber orientations [0/-45/90/45/45/90/-45/0] according to profile thickness. Appropriate material assignment was made for the composite material consisting of glass fiber strips oriented in eight different directions. Boundary conditions were defined for the profile, with one end stable and the other end sliding. The hard impact body was constrained to move only in the vertical direction. For the impact analysis, the velocity of the rigid body was calculated as the free fall speed of the 0.075 ton object from a height of 2000 mm, resulting in a velocity input of 6264.18 mm/s.

In the finite element modeling, the profile was divided into three sections for mesh density. The middle section of the profile had a mesh size of 5 units, while the remaining sections and the rigid impact body were modeled with a mesh size of 15 units. Appropriate adjustment of the mesh size is important to obtain accurate analysis results, avoiding unnecessary complexity or oversimplification in the modeling process.

Impact analysis was performed on steel profiles and glass fiber reinforced composite profiles (GFRD) to examine the behavior of these profiles under impact load. The results of the impact analysis were used to make a comparative evaluation between steel profiles and GFRP composite profiles. A total of eight impact tests were modeled on four different profiles using the Abaqus program and the finite element method. According to the impact analysis results of the box profile, the Von Mises stress distribution was determined as 411.040 MPa in the steel box profile, while this value was observed as 143.583 MPa in the GFRP box profile. At the moment of impact, the

maximum Von Mises stress value was determined as 411.040 MPa in the steel profile and 925.207 MPa in the GFRP box profile. While Von Mises stresses under triaxial deformation continued after impact in the steel profile, it was observed that post-impact stresses were lower in the GFRP box profile. In addition to the plastic deformation distribution in the steel profile, the tensile and compression damage distributions of the fiber and matrix elements in the GFRP box profile were also observed. During the collision of the rigid object with the profile, displacements of 9.64 mm in the steel box profile and 22.32 mm in the GFRP box profile were detected. However, while permanent deformation was observed in the steel box profile after the impact, no permanent deformation was observed in the GFRP box profile. As a result of the impact load, a reaction force of 276.383 kN was obtained on stable and sliding supports in the steel box profile, and the force was calculated as 167.300 kN in the GFRP box profile model.

The support forces calculated in the GFRP box profile produced from composite material are smaller than those in the steel box profile. Although the acceleration value in the steel box profile is greater than that of the GFRP box profile, there is no significant difference between them. According to the U profile impact analysis results, it was determined that the Von Mises stresses calculated on the GFRP U profile and the Steel U profile were very similar to each other. However, it was observed that the Von Mises stresses calculated in the GFRP U profile were significantly larger than the stresses in the Steel U profile. The maximum Von Mises stress was calculated as 483.149 MPa in the steel profile, whereas this value was determined as 1692.487 MPa in the GFRP profile. The maximum displacement analyzed in the elements in the center of the steel U profile is 10.31 mm, while the maximum displacement analyzed in the elements in the center of the GFRP U profile is 23.49 mm. After the impact, a reaction force of 244,510 kN was observed on the supports of the steel U profile, while a force of 135,509 kN was observed in the GFRP U profile model. The support forces calculated for the GFRP U profile produced from composite material were found to be lower than the Steel U profile, and at the same time, the acceleration value in the Steel U profile was found to be higher than the GFRP U profile. Regarding the I-profile impact analysis results, the Von Mises stress in the steel I profile is 408.507 MPa, and in the GFRP I profile, it is 97.276 MPa. The maximum Von Mises stress during the collision of the impact object with the profile were obtained 1507.216 MPa in the GFRP I profile and 418.680 MPa in the steel I profile. As the load was removed, the stresses in the GFRP profile decreased and approached the initial position, while post-impact stresses in the steel profile continued at similar values. The maximum displacement observed in the steel I profile is 7.75 mm, whereas the maximum displacement in the GFRP I profile is 16.67 mm.

The maximum support force is 326.331 kN in the steel profile and 184.906 kN in the GFRP profile. Steel I profile was exposed to more stress under impact load than GFRP I profile. After the impact, it was observed that the support forces in the steel profile were greater than the support forces in the GFRP profile. It was determined that the acceleration value of the steel I profile during impact was much higher than the GFRP I profile. According to the pipe profile impact analysis results, the maximum Von Mises stress during the impact was 488.797 MPa in the steel pipe profile and 1979.917 MPa in the GFRP pipe profile. After the impact, a stress of 399.086 MPa was observed in the steel profile and 1261.256 MPa in the GFRP profile. The maximum displacement observed in the steel pipe profile is 33.51 mm, while in the GFRP pipe profile the maximum displacement is 59.89 mm. While the maximum support force in

the steel profile is determined as 53.587 kN, this value was measured as 29.837 kN in the GFRP profile. This revealed that the steel pipe profile was exposed to more stress under impact load than the GFRP pipe profile. It was observed that the acceleration value in the steel pipe profile at the moment of impact was greater than the acceleration value in the GFRP pipe profile. When the displacement, support response and acceleration values at the center of the profile modeled with GFRP material consisting of box profile, I profile, U profile and pipe profile are compared, the results are as follows; The U profile has a displacement of 23.49 mm, the I profile has a displacement of 16.67 mm, the box profile has a displacement of 22.32 mm and the pipe profile has a displacement of 59.89 mm.

After the displacements that occurred during the impact, three profiles except the GFRP pipe profile were able to return to their original positions. However, the GFRP pipe profile suffered a permanent deformation of 3.5 mm due to the impact load. This results shows that the largest displacement during impact occurs in the pipe profile. Although the support reaction results obtained for I-profile, U-profile and box profile are similar to each other, the highest support reaction was calculated as 184.906 kN in the I-profile. The lowest support reaction value was obtained in the pipe profile. When the acceleration values calculated at the center of the profile were examined, it was observed that the GFRP pipe profile reached its maximum acceleration value. The lowest acceleration value was obtained in the GFRP I profile. When the displacement, support response and acceleration values at the center of the profile modeled with the steel material consisting of U profile, I profile, box profile and pipe profile are compared, the U profile has a displacement of 10.31 mm and the I profile has a displacement of 7.75 mm. mm, the box profile 9 is shifted by 0.64 mm, and the pipe profile is shifted by 33.51 mm. Following impact analysis, plastic deformation was applied to all steel profiles. This observation shows that the profiles change shape due to plastic deformation under impact.

The largest displacement during impact was observed in the pipe profile. The calculated maximum support force is 326.331 kN for I profile, 244.51 kN for U profile, 276.383 kN for box profile and 53.587 kN for pipe profile. While the maximum support reaction value was calculated for the I-profile, the lowest support reaction value was obtained for the pipe profile. When the acceleration values calculated at the center of the profile were examined, it was seen that the maximum acceleration value was reached in the U profile and the minimum acceleration value was reached in the pipe profile.

Material differences indicate significant differences in structural performance and durability between steel and GFRP composite profiles. In all impact analyses, maximum displacement results were obtained in glass fiber reinforced composite profiles, while maximum support reaction results were obtained in steel profiles. The results show that GFRP composite profiles exhibit a more elastic behavior than steel profiles and return to their original form more quickly after impact. Steel profiles generally showed less displacement but often exhibited permanent deformation. According to the analysis results, it was determined that GFRP composite profiles have advantages, especially in terms of corrosion resistance, but are more sensitive under impact loads and therefore are not preferred over steel profiles. The study emphasizes the critical importance of selecting materials that meet structural requirements and recommends the use of steel profiles in structures subjected to impact loads. It was concluded that especially GFRP pipe profiles are more sensitive to impact loads and should be taken into account in the selection process.



1. GİRİŞ

Yük, yapısal elemanlara uygulanan bir kuvvet veya deformasyon olup yapıda gerilime, deformasyona ve yer değiştirmeye neden olur. Aşırı yük yapısal bozulmaya neden olabileceği için yapı tasarımı sırasında dikkate alınmalı ve kontrol edilmelidir. Mühendisler genellikle yapısal yükleri yayınlanmış düzenlemelere, sözleşmelere veya spesifikasyonlara göre değerlendirmektedirler. Belirli mekanik yapılar örneğin uçaklar, uydular, roketler, uzay istasyonları, gemiler ve denizaltılar kendilerine özgü yapısal yüklere ve etkilere tabidir. Ölü yükler, uzun bir süre boyunca değişmeyen sabit olan statik kuvvetlerdir. Gerilim veya sıkıştırma halinde olabilirler. Canlı yükler genellikle değişken veya hareketli yüklerdir. Bunlar önemli dinamik öğeye; darbe, momentum, titreşim, çalkantı dinamikleri gibi sahip olabilirler. Darbe yükü, bir malzeme üzerindeki uygulama süresinin o malzemenin doğal titreşim süresinin üçte birinden daha az olduğu yüküdür. Bir yapı üzerindeki döngüsel yükler yorulma hasarına, kümülatif hasara veya yıkıma neden olabilir. Bu yükler yapıda tekrarlanan yüklemeler olabileceği gibi titreşimden de kaynaklanabilir. Yapısal yükler, binaların tasarımında önemli bir husustur. Yönetmelikler, yapıların hizmet ömürleri boyunca karşılaşılabilecekleri tüm etkileşimlere karşı güvenli bir performans sergilemelerini sağlamak amacıyla tasarım ve inşa süreçlerini yönlendirir. Bu kurallar, yapıların kullanım amacına uygun, olası etkileşimlere karşı dirençli ve güvenli bir yapı ortaya çıkarırlar. Yapı türleri, coğrafi konumlar, kullanım ve yapı malzemeleri için bu yapı yönetmeliklerinde minimum yükler veya eylemler belirtilmiştir. Yapısal yükler, nedenlerine göre kategorilere ayrılır. Bir yapı için gerçek yük açısından, ölü veya hareketli yükleme arasında bir fark yoktur, ancak güvenlik hesaplamalarında veya karmaşık modellerde analiz işlemleri farklılaşmaktadır. Tasarım dayanımının maksimum yüklerden daha yüksek olması gerektiği için yönetmelikler, yüklerin yük faktörleriyle artırılmasını şart koşar. Bu yük faktörleri, kabaca teorik tasarım gücünün hizmette beklenen maksimum yüke oranıdır. Yük faktörleri yükün kaynak nedenini, tekrarını, dağılımını, statik veya dinamik doğasını hesaba katan, yapının istenen güvenilirlik düzeyine ulaşmasına yardımcı olmak için geliştirilen faktörlerdir. Bazen olasılıksal yükler olarak da adlandırılan hareketli yükler, inşaat veya çevresel yükler

hariç, nesnenin normal çalışma döngüsü içinde değişken olan tüm kuvvetleri içerir. Örneğin; çatı ve zemin hareketli yükleri, bakım sırasında işçiler, ekipman ve malzemeler tarafından ve yapının ömrü boyunca ekiciler ve insanlar gibi hareketli nesneler tarafından üretilir, köprü hareketli yükleri, köprü tabliyesi üzerinde hareket eden araçlar tarafından üretilir. Çevresel yükler;

- Rüzgâr yükleri
- Kar, yağmur ve buz yükleri
- Sismik yükler
- Hidrostatik yükler
- Termal Yükler
- Havuzlama yükleri
- Don kabarması
- Toprak, yeraltı suyu veya dökme malzemelerin yanal basıncı
- Akışkanlardan veya taşkınlardan kaynaklanan yükler

Diğer yükler; mühendisler ayrıca bir yapıyı etkileyebilecek diğer eylemlerin de farkında olmalıdır.

- Temel oturması veya yer değiştirmesi
- Ateş
- Aşınma
- Patlama
- Sürünme veya büzülme
- Araçlardan veya makine titreşiminden kaynaklanan etki
- İnşaat yükleri

Yapıya birden fazla yük türü etki ettiğinde bir yük kombinasyonu oluşur. Bina yönetmelikleri, beklenen farklı maksimum yükleme senaryoları altında yapının güvenliğini sağlamak için genellikle her yük türü için yük faktörleri ile birlikte çeşitli yük kombinasyonlarını belirtir. Yük faktörünün boyutu, belirtilen herhangi bir tasarım yükünü aşma olasılığına bağlıdır (Structural steel, 2022).

Darbe yükü, uzun bir süre boyunca uygulanan sabit ve sürekli bir kuvvetin aksine, yapısal bir parça üzerinde ani bir yükün sağladığı kuvvet olarak tanımlanır (Impact Load, 2022). Statik veya sürekli yüklerin aksine, darbe yükleri kısa zamanlı olarak meydana gelir ve deformasyonda veya yapısal tepkide ani değişikliklere neden

olabilir. Darbe yükleri genellikle çarpışma, patlama, ekipmanın düşmesi veya ani hareketler gibi dinamik olaylardan kaynaklanır. Sistemin yapısal bütünlüğünü ve güvenliğini sağlamak için mühendislik tasarımında dikkatli bir şekilde değerlendirilmeleri gerekir. Aşağıda örneklerle birlikte farklı darbe yükü türleri verilmiştir:

- ✓ **Dinamik Darbe Yüğü:** Dinamik darbe yüğü, hareketli bir nesnenin sabit bir nesneye çarpması veya iki nesnenin birbiriyle çarpışması sonucu oluşur. Bu tür darbe yüğü, yüksek kuvvetlere ve momentumda hızlı değişikliklere neden olabilir. Örnekler olarak hareket halindeki bir aracın bir bariyere çarpması, düşen bir nesnenin bir yüzeye çarpması verilebilir. Darbe yükünün büyüklüğü ve süresi, ilgili nesnelerin kütesine, hızına ve temas alanına bağlıdır.
- ✓ **Serbest Düşme Darbe Yüğü:** Serbest düşme darbe yüğü, bir nesnenin belirli bir yükseklikten serbestçe düşmesi ve bir yüzeye veya yapıya çarpması sonucu oluşur. Darbe yüğü düşen nesnenin kütesinden, hızından ve şeklinden etkilenir. Yere düşen ağır bir nesne veya vinçten bırakılan bir yük örnek olabilir. Ani darbe, alıcı yapının tasarımında dikkate alınması gereken yüksek kuvvetlere ve titreşimlere neden olabilir.
- ✓ **Patlama Darbe Yüğü:** Patlama darbe yüğü, bir patlama sonucu aniden ortaya çıkan enerji nedeniyle oluşur. Patlama, yüksek basınç seviyelerinde meydana gelen ve çevresindeki yapılar üzerinde önemli dinamik etkiler oluşturan bir şok dalgası oluşturan bir olaydır. Patlama darbe yükleri oldukça yıkıcıdır ve yapısal arızalara yol açabilir. Patlama darbe yüklerine direnecek yapıların tasarlanması, patlamanın etkilerini en aza indirecek özel teknikleri ve hususları içerir.
- ✓ **Deprem Etki Yüğü:** Deprem darbe yüğü, sismik olaylar sırasında zemin sallandığında ve yapılara dinamik kuvvetler uyguladığında meydana gelir. Depremler, binalarda ve diğer yapılarda titreşimlere neden olan yer ivmesi üretir. Bu darbe yükleri, tasarımda uygun şekilde hesaba katılmadığı takdirde yapısal hasara veya çökmeye yol açabilir.
- ✓ **Makine Darbe Yüğü:** Makine darbe yüğü, dönen veya öne arkaya hareket eden makinelerin yapıya ani kuvvetler veya şoklar vermesi durumunda meydana gelir. Çekiçler, kırıcılar veya presler gibi ekipmanlar, çalışmaları sırasında yüksek darbe yükleri oluşturabilir bu da titreşimlere ve dinamik gerilimlere

neden olabilir. Bu darbe yüklerine dayanmak ve sistemin stabilitesini ve bütünlüğünü sağlamak için uygun tasarım ve yapısal güçlendirme gereklidir.

Darbe yüklerine ilişkin tasarım hususu, geçici ve yüksek yoğunluklu kuvvetlere dayanacak yapıların mukavemetinin, sağlamlığının ve dayanıklılığının değerlendirilmesini içerir. Mühendisler, darbe yüklerini değerlendirmek ve gerekli yapısal takviyeleri belirlemek için dinamik analiz, sonlu elemanlar analizi (FEA) gibi teknikleri kullanır. Güvenlik faktörleri ve uygun malzeme seçimi, belirsizlikleri hesaba katmak ve yapının darbe yüklerine hasar veya aşırı deformasyon olmadan dayanma kabiliyetini sağlamak için önemli hususlardır (Md Abu Zaed Khan, 2022). Dinamik darbe yüklemesi kompozit yapılarda araştırılması gereken en kritik yükleme türlerinden biridir çünkü mukavemette ciddi azalmalara neden olabilir ve kompozit yapıların içinde fark edilmeden hasarlar büyüyebilir. Darbe mukavemetini önemli ölçüde arttırılabilecek yöntemler, lifli takviye edici dolgu maddelerinin kullanılması ve ürün tasarımıdır. Takviye malzemeleri, darbe yükü nedeniyle yüksek düzeyde gerilime maruz kalan bölge çevresinde gerilim transfer maddesi görevi görür. Cam gibi lifli dolgu maddelerinin çoğu yüksek elastisite modülüne sahip olduğundan, darbeli yüklemelerde karşılaşılan yüksek yükleme hızlarına elastik olarak yanıt verme yeteneğine sahiptirler.

İnşaat projeleri farklı malzemeleri kullanmayı gerektirmektedir. Farklı özelliklere sahip beton, farklı özelliklere sahip yapısal çelik, harç, seramik, ahşap vb. malzemeler ile en verimli yapı oluşturulmak istenmektedir. Çoğu ticari ve endüstriyel yapı, öncelikle yapısal çelik veya betonarme tercih edilerek inşa edilmektedir. Bir yapı tasarımı yapılırken öncelikle hangi malzemenin uygun olacağına karar verilmelidir. Malzeme seçimini kullanılacağı ortam, dayanıklılık, ağırlık, yangına dayanıklılık, sürdürülebilirlik, maliyet vb. gibi etmenler etkilemektedir. Günümüzün en yüksek yapıları, inşa edilebilirliği ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı sebebiyle çelik malzemesi kullanılarak inşa edilir. Buna karşılık beton, çeliğe nazaran daha az yoğun olmakla birlikte, daha düşük bir mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Bunun nedeni, yapısal bir beton elemanın aynı yükü taşıması için gereken hacmin çok daha büyük olmasıdır. Çelik daha yoğun olduğundan bir yükü taşımak için çok fazla malzeme gerektirmez. Yapısal çelik, basınç dayanımı ve çekme dayanımı açısından betondan farklıdır. Yüksek mukavemet, sertlik, tokluk ve sünek özelliklere sahip olduğu için çelik, ticari ve endüstriyel bina yapımında en yaygın kullanılan malzemelerden biridir.

Çelik, malzemeler sahaya teslim edilir edilmez kurulabilir fakat inşaatın devam edebilmesi için betonun döküldükten en az 1-2 hafta sonra kürlenmesi gerekir, bu da çeliği programa uygun bir inşaat malzemesi yapar. Çelik doğası gereği yanmaz bir malzemedir. Bununla birlikte, bir yangın senaryosunda belirli sıcaklıklara kadar ısıtıldığında, malzemenin dayanıklılığı ve sertliği önemli ölçüde azalır. Uluslararası Yapı Kanunu, çeliğin yeterli yangına dayanıklı malzemelerle kaplanmasını zorunlu kılar ve bu da çelik yapı binalarının toplam maliyetini artırır. Çelik, suyla temas ettiğinde paslanarak potansiyel olarak tehlikeli bir yapı oluşturabilir. Yapısal çelik konstrüksiyonda ömür boyu korozyonu önleyecek önlemler alınmalıdır. Çelik, su geçirmez boya ile boyanabilir. Ayrıca, çeliği kaplamak için kullanılan yangına dayanıklı malzeme genellikle suya dayanıklıdır ve küf oluşumu için çelik, ahşap malzemeye göre daha az uygun yüzey ortamı sağlar. Yapısal çelik ve betonarme sadece yapı için en ideal malzeme olduğundan dolayı seçilmezler. Tasarım yapılırken herhangi iki malzeme kullanılarak bir yapı inşa edilebiliyorsa, ikisinden en uygun maliyetlisi tercih edilecektir. Bir diğer önemli değişken ise projenin konumudur. En yakın çelik imalat tesisi şantiyeden veya şantiyeye en yakın beton tedarikçisinden çok daha uzakta olabilir. Yüksek enerji ve nakliye maliyeti, yapı için malzeme seçiminde rol oynayacaktır. Bir inşaat projesinin tasarımına başlanmadan önce tüm bu maliyetler dikkate alınmalıdır (Structural steel, 2022).

Kompozit malzeme farklı özelliğe sahip yeni tür bir malzemeyi belirtmek için kullanılır (Enşici,2009). İlk kullanılan kompozit malzemeye saman ve çamurdan oluşan kerpiç malzemesi örnek verilebilir. Günümüzde çok kullanılan malzemelerden beton bir kompozit malzemedir ve beton, kum ve çimentodan oluşmakta aynı zamanda çelik donatılar ile desteklenerek betonarme malzeme olarak kullanılabilmektedir (Kompozit malzemeler, 2022). Kompozit malzemelerin üretimi ve geliştirilmesi, kullanılacağı yapılarda malzeme olarak daha iyi performans göstermesi, düşük ağırlık, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci vb. gibi üstün özelliklere sahip olabilmesi için yapılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında kompozit malzeme tercih edilmesinin sebeplerini birkaç madde ile sıralayabiliriz:

- ✚ Malzemeler hafiftir.
- ✚ Korozyif değildir.
- ✚ Kimyasal olarak dirençlidir.
- ✚ İyi yorulma dayanımına sahiptir.

- ✚ Manyetik değildir.
- ✚ Elektrik ve alev direnci sağlar.
- ✚ Malzeme yüzeyleri dayanıklıdır ve az bakım gerektirir (Sarıbyık ve ark., 2012).

Sentetik plastikler kolay şekil verilebilmesi, düşük yoğunluğu, üstün yüzey kapasitesi ve korozyona karşı dayanımıyla tercih sebebi olsa da sertlik ve mukavemet özelliklerinin düşük olması nedeniyle güçlendirme çalışmaları ile polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Geliştirilen kompozit malzemeler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik ve aşınmaya karşı dayanıklılık, metal malzemelere göre hafiflik gibi özelliklere sahiptir. Kompozit malzemeler, çeşitli yapıdaki reçine ve takviye bileşenlerinin entegrasyonu ile meydana gelir. Bu yapılardan takviye malzemesi taşıyıcı görev üstlenirken matris onu destekler ve bir arada tutar. Matris bütünleştiren malzeme anlamına gelmekte olup, karıştırıldığı malzemeyi kenetleyip dayanımını artırmaktadır (Kompozit malzemeler, 2022). Plastik malzemeler elyaf ile güçlendirilerek fiziksel özellikleri artırılmış faydalı malzemeler oluşturulabilir. Reçine içine gömülmüş sürekli veya kırılmış elyaflar birbiri içerisinde çözülmezler ve karışmazlar. Kompozit malzemelerde elyaf sertlik, sağlamlık özelliklerini sağlarken plastik reçine malzemesi ise elyafın bütünlük oluşturmaya, yükün elyaf arasında dağılmasını sağlar ve elyafın dış etkenlerden korunmasına yardımcı olur (Enşici,2009). Takviye için karbon ve aramid lifleri pahalı olduğu için genellikle E-Cam kullanılır. Cam elyaf takviyeli ısıyla sertleşen polimer kompozit, yapısal uygulamalarda kullanılır ve cam elyaf takviyeli plastik GFRP olarak adlandırılır (Sarıbyık ve ark., 2012). Günümüzde GFRP profiller ağırlıklı olarak köprü, yaya köprüleri ve karayolu köprü güverteleri yapımında kullanılmaktadır. Aşındırıcı ortamlarda yapılacak yapılar için GFRP profil kullanımı uygundur. Konut ve ofis binalarında kullanımı yaygın olmamasına karşın düşük ağırlığa sahip olmasıyla avantajlar sunmaktadır (Correia ve ark., 2015). Kompozit malzemeler kolay şekil verilebilir, içerisindeki takviye malzemesi sayesinde sert ve sağlam, aynı zamanda hafif bir malzeme olması ile günümüzde kullanım alanı bulmaktadır. Tüm bu faydalarına rağmen kompozitlerin metallerin yerini alamamasının birkaç sebebi vardır;

1. İhtiyaç duyulan bazı ısı ve mekanik özellikleri kompozit malzemelerin sağlayamaması,

2. Başlangıç maliyetlerinin metallere göre daha fazla olması,
3. Kompozit malzeme özellikleri farklı bir veya birden fazla bileşenden oluştuğu için davranış şekilleri metaller kadar bilinmemektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri, kimyasal özellikleri, mekanik özellikleri ve dayanımı üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Enşici, 2009).

Mincigrucci ve ark. (2023) yaptığı çalışmanın amacı cam elyaf takviyeli kompozit profillerin dinamik koşullar altındaki tepkisini değerlendirmek ve kompozit malzemenin performansını geleneksel malzemeler ile karşılaştırmaktır. Bu nedenle çelik, çelik takviyeli beton (RC) veya GFRP pultrüzyon malzemeleri ile iki boyutlu bir çerçeve sonlu elemanlar metodu ile modellenmiştir ve deprem yüküne maruz bırakılmıştır. İlk olarak tüm çerçeveler için modal analiz yapılmış ve titreşim modları, mod şekilleri bulunmuştur. Daha sonra 1995 Kobe depreminde kaydedilen ivme değerleri uygulanarak dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Çerçeve iki açıklık 6 kat olarak modellenmiştir. Çalışma sonucunda çerçevede kompozit malzeme kullanımı taban kesme kuvveti karşılaştırması yapıldığında çeliğe göre %40, betonarmeye göre %88,5 daha az değerler elde edilmiştir. Bu durum deprem koşulları altında pozitif sonuçlar doğurmaktadır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde GFRP çerçevenin dinamik koşullar altında performansının iyi olduğu genel davranışının çelik ile betonarme arasında bir yerde olduğunu göstermiştir. Wu ve ark. (2023) yaptığı çalışma pultrüze cam elyaf takviyeli kompozit profillerde oluşan hasarlardan gövde çökmesini incelemektedir. GFRP kompozit profillerde oluşan gövde hasarını incelerken, hasara neden olan faktörlerde irdelenmektedir. Hasar mekanizmalarının doğru yorumlanabilmesi için malzeme özelliklerinin ayrıntılı girilmesi gerektiği ortaya koyulmuştur. Bu makale yapılan araştırmaları gözden geçirmiş ve literatürdeki boşlukları ve geliştirilmesi gereken noktaları belirlemiştir. Yapılan çalışmalardan bir veri tabanı geliştirilmiş ve sayısal ve analitik modellerin doğrulanabilmesine olanak sağlanmıştır. Önceki yapılan çalışmalardan yola çıkarak cam elyaf takviyeli kompozit malzemede gövde göçme hasarın; yük koşullarının, geometrik faktörlerin etkilediği görülmüştür. Geometrik faktörler kesit yüksekliği, ağ kalınlığı, başlık kalınlığı, gövde-başlık birleşimindeki dolgunun yarıçapı, yatak plakasının kalınlığı ve uzunluğunu içermektedir. Gövde hasarı henüz tam olarak anlaşılmayan üç ana mekanizmayı içerir; gövde-başlık bağlantı hasarı, gövdenin ezilmesi, gövdenin bükülmesi. Literatürde en

sık karşılaşılan hasarın gövde-başlık bağlantı hasarı olduğu anlaşılmıştır. Literatürdeki mevcut analitik modellerin çoğunun hasar modları ayırt edemediği görülmüştür. Bu nedenle bu çalışma sonucunda deneysel veri tabanını arttırmak ve daha fazla sayısal simülasyonlar yürütmek gerektiği anlaşılmıştır. Babu ve ark. (2023) yaptığı çalışmada GFRP/Epoksi kompozit laminatın darbe davranışı kuvvet, enerji Emilimi, deplasman ve hasar alanlarına dayanarak incelenmiştir. GFRP/Epoksi kompozit laminatlar değişen kalınlıklarla vakum torbalama süreci kullanılarak üretilmiş ve 15J darbe enerjisi altında düşük hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Dört farklı kat sayısına ve kalınlığa sahip iki yönlü dokuma GFRP kumaşından oluşan laminatlar hazırlanmıştır. Darbe kütle ve hızı sabit tutulurken çalışmada laminat kalınlıkları değiştirilmiştir. Çalışma sonucunda katman sayısı arttıkça maksimum darbe kuvvetinin arttığı görülmüştür. Laminat kalınlığının artmasıyla dalgalanmaların azaldığı, düşük kalınlıklarda özellikle 6 katmanlı laminatta salınımın fazla olduğu ve diğerlerine kıyasla daha uzun temas süresine sahip olduğu görülmüştür. GFRP malzemenin uzun vadeli mekanik performansı üzerine Bazli ve ark. (2016) deneysel bir araştırma sunmaktadır. Takviye olarak E-cam fiber, matris olarak vinilester reçine kullanılmıştır. Agresif çevre koşullarında; farklı sıcaklıklardaki deniz suyu, ıslatma ve kuruma döngüleri alkali ve asidik çözeltiler gibi GFRP malzemenin hızlandırılmış yapay yaşlanma süreciyle mekanik performansındaki bozulmalar incelenmiştir. GFRP malzemenin elyaf içeriği %60, yoğunluğu 2 g/cm³ olarak üretilmiştir. Numuneler farklı agresif çevre koşullarında 147 gün bekletilmişlerdir. Mekanik özelliklerinin bozulmasında çözeltilerin emiliminin ve sıcaklığın ana etmenler olduğu bilinmektedir. Zararlı ortama maruz bırakıldıktan sonra numunelerde birçok çeşitli hasarlar görülmüştür. Yüksek sıcaklıktaki deniz suyuna batırılmış numunelerde diğer ortamlara nazaran mekanik özelliklerin düşüşünün daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Alkali ve asidik ortamlar liflerin yapısını ve özelliklerini değiştirmiş, solüsyondan zarar gören GFRP malzeme sonucunda fiber ve matris arasında fiziksel veya kimyasal tepkimeler olmuştur. Mikro çatlakların büyümesi ve sıvı difüzyonunun artışıyla lifler ve matris zayıflamıştır. Sonuç olarak genel mekanik özelliklerinde düşüş gözlenmiştir. Correia ve ark.(2005) 'nın yaptığı çalışma cam elyaf takviyeli 200x100x10mm ve 150x75x8mm I profillerinin nem, sıcaklık gibi kimyasal ve fiziksel etkilere maruz kaldığında oluşan hasarları konu almaktadır. Dört farklı ortamda deney yapılmıştır; 20°'de suya daldırma, 60°'de suyun yoğunlaşması, QUV ekipmanı ile hızlandırılmış ayrışma, Xenon-arc ekipmanı ile hızlandırılmış ayrışma. Kompozit profiller tek yönlü

E-Cam liflerinden ve reçineden oluşmaktadırlar. Yanma deneyleri sonucu lif hacminin %62 olduğu belirlenmiştir. Zararlı çevre şartlarına maruz bırakılan kompozit profillerin deney sonuçlarına göre özellikle daldırma ve yoğunlaşma odalarında kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde bir miktar azalma (%19 kadar) olduğu görülmüştür. Mukavemet ve kırılma geriliminin neme bağlı olarak azaldığı, artan sıcaklık ile bu etkinin hızlandığı gözlemlenmiştir. Genel olarak cam elyaf takviyeli kompozit profillerin gösterdiği mekanik davranışın iyi olduğu söylenebilmektedir. Geleneksek malzemelere kıyasla zor şartlar altında kompozit malzemelerin dayanıklılığı gelişmiş olduğu için tercih edilebileceği görülmüştür. Yapı malzemesi olarak kullanılan GFRP malzemelerin maruz kaldığı yüklerden en önemli ikisi burkulma ve titreşim yükleridir. Bu nedenle Madenci ve ark. (2020) pultrüde GFRP lamine kompozit levhanın serbest titreşim ve burkulma davranışını deneysel, analitik ve sayısal olarak araştırmışlardır. İstiflenme sırası farklı yönlerde (0° ve 90°) E-cam lifleri kullanılarak üretilen cam elyaf takviyeli kompozitler üç grupta incelenmiştir. 150mmx100mmx6mm boyutlarında 1500 mm uzunluğunda numuneler deneye tabi tutulmuştur. Yanma testi ile elyaf ağırlıkları hesaplanmıştır. Elyaf hacim oranı ve matris sırasıyla %54 ve %46 olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda kritik burkulma 8,3 kN yüklemede, 0,6 mm yer değiştirme de gözlenmiştir. 7,8 kN yüklemede ve 2,5 mm yer değiştirmede ilk cam hasarı oluşmaya başlamış, katmanlar arası ve katman içi çatlaklar 7,3 kN yüklemede oluşmuş, 6 kN yük ve 3,7 mm yer değiştirmede birinci cam fitil tabakası ile ikinci cam tabaka arasında burkulma yönünde hasar oluşmuştur. Katman içi hasar 4,3 mm yer değiştirmeye kadar artmakta, fiber kırılması hızlanmakta ve katman içi çatlakların daha belirgin hale geldiği görülmüştür. 4,7 mm yer değiştirme ve 1,5 kN yükte burkulma bölgesindeki hasardan dolayı deney sonlanmıştır. Lif yönü göz önüne alındığında fiber yük kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir lif yönü değiştiğindeki dış burkulma gibi. Bu çalışmada uygulanan yük liflere paralel uygulanmış olup tamamı lifler tarafından karşılanmıştır. Tüm deneysel çalışmalarda ilk hasar matris çatlağı ve ilk cam katmanında meydana gelen çatlaklar olmuştur. Sırasıyla matris çatlağı, cam katmanı hasarı, delaminasyon, katman içi hasarı, lif kırılması ve son hasarın olduğu görülmüştür. Cam elyaf takviyeli malzemelerin sıkıştırarak kırılma özellikleri hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır. Sınırlı bilgi bulunması GFRP yapıların mukavemetinin değerlendirilmesini, gelişmiş hesaplar ve simülasyonların güvenilir bir şekilde kullanılmasını ciddi şekilde sınırlandırmakta ve mühendislik tasarımında kullanılmasını engellemekte olduğu görülmektedir. Bu

nedenle Fernandes ve ark. (2020) yaptığı çalışma pultrüde edilmiş cam elyaf takviyeli polimer malzemelerin enine kırılma davranışı, enine basınç kırılma tokluğu, enine basınç dayanımının değerlendirilmesi konu almaktadır. Önceden enine çekme kırılma toklukları incelenmiş altı malzeme üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu malzemelerin enine takviyeleri; rastgele, $[0^\circ, 90^\circ]$ yönlenmiş, $[45^\circ, 90^\circ]$ yönlenmiş şekilde üç gruba ayrılmıştır. Sıkıştırma gerilimleri nedeniyle tüm numunelerde ilk hasar çentik ucunda oluşmuş ve bu hasar katmanların ayrılması şeklinde yayılmıştır. İki hasar modu görülmüştür; burkulma hasarı ve çekme gerilmesinden kaynaklı kompozitin arka kısmındaki hasar. En düşük enine çekme gerilimlerine ve yüksek kalınlığa sahip numunelerde çekme hasarı, diğer numunelerde genel olarak burkulma hasarı olduğu görülmüştür. Darbeler kompozit yapıların performanslarına etki eden önemli etmenlerdir. Öndürücü ve Karacan'ın (2018) yaptığı çalışmada farklı darbe enerjileri ile farklı takviye açıları ve tabaka kalınlıkları kullanılarak kompozit malzemelerin darbe davranışı incelenmiştir. Kullanım amacına göre kompozit malzemelerin maruz kaldığı darbeler farklı şekillerde olabilmektedir. Darbeler düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılmalarına karşın kategoriler arasında net bir ayrım yoktur. Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumunun tabaka veya fibere dik yükleme hali olduğu bilinmektedir. Darbe hasarları kimi zaman gözle görülebilir kimi zaman matris çatlağı, fiber-matris ara yüzey hasarı, fiber kırılması gibi iç hasarlara sebep olabilmektedir. Dört farklı tabaka dizilimi, iki tabaka kalınlığı ele alınmıştır ve 3 farklı enerji ile darbe deneyi yapılmıştır. Sekiz tabakalı kompozitler, farklı tabaka dizilimleri, farklı enerji değerleri için de benzer özellik göstermiş, aralarında $[0^\circ / 30^\circ / 60^\circ / 0^\circ]_s$ tabaka diziliminin maksimum kuvveti taşıdığı görülmüştür. İkinci olarak sekiz katmanlı kompozit malzeme ile on iki katmanlı kompozit malzeme karşılaştırıldığında on iki katmanlı kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Tabaka kalınlığı arttıkça darbe direnci artmaktadır. Üçüncü olarak oluşan darbe hasarları gözlemlenmiştir. Alt yüzeydeki deformasyonun üst yüzeye göre daha büyük olduğu, üst yüzeyde matris çatlakları olduğu görülmüştür. Eğilmeden dolayı alt yüzeyde fiber uzamaları, ayrılmaları gözlenmiştir. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon dayanımı, gelişmiş dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde 21.yüzyılda inşaatın ayrılmaz bir parçacı haline gelmiştir. Kompozit malzemeler ile köprü tasarımı için yaygın olarak kabul edilen tasarım prosedürleri olmadığından Siwowski ve ark. (2021) tarafından bu çalışma yapılmış ve tasarım süreci laboratuvar testleri ile güçlü bir

şekilde desteklenmiştir. Gerçek köprü kirişinin tam ölçekli 10 m açıklıklı modeli statik ve dinamik yüklemeye tabi tutulmuştur. Tamamen kompozit köprü sistemi, köprü dayanıklılığının artması ve bakım döngüsünün azaltılmasında yarar sağlamaktadır. GFRP köprü kirişinin tam ölçekli örneği yapısal açıdan çok iyi davranış göstermiştir, toplam yükün 702 kN 'una kadar elastik davranmıştır. İç diyagramlarda oluşan ayrışmalar sonucu kabuk deformasyonları görülmüştür ve son taşıma kapasitesine sandviç güverte levhasının ayrışması sonucu ulaşılmıştır. Orta noktadaki yer değiştirmenin 31,6 mm olduğu görülmüştür ve elde edilen yer değiştirmeköprü tasarımında izin verilen aralıkta kalmaktadır. Li ve ark. (2021) aynı enerji altında farklı darbe kütleleri baz alarak darbe deneyi yapmışlardır. İkinci aşamada kompozitlerin hasar mekanizmaları karışık olduğu için farklı darbe enerjileri ele alınmıştır. Bu deneyde 150*100*10 mm boyutlarında %40 izohtalite reçineden oluşan cam elyeflerle takviye edilmiş yoğunluğu 1,84 g/cm³ olan malzeme kullanılmıştır. Kompozit malzeme (0°,30°,90°) açılar ile yerleştirilen lifler ile 7 katmandan oluşmaktadır. İlk aşamada 67J enerji ile yapılan deneylerde benzer sonuçlar elde edilmiş bir miktar enerji absorbe edilirken darbe cismi kompozit malzemeye çarpıp geri dönmüştür. İkinci aşamada 60J, 120J, 240J enerji ile yapılan deneylerin sonuçları ilk aşamada benzerlik gösterirken 360J, 36 kg kullanılan darbe deneyinde kompozit malzemenin delindiği gözlemlenmiştir. Artan kütle yükleri ile yüzeyde oluşan hasar alanlarının doğru orantılı arttığı, merkezde kesme çatlağı oluştuğu ve kompozit malzemede matris çatlakları oluştuğu görülmüştür. Kompozit malzemelerin darbeye duyarlı olduğu bilinmektedir. Sutherland ve ark. (2017) alternatif geometriler ve üç dolgu malzemesi ile yapılan GFRP çok hücreli yaya köprüsü tabliyesine aletli darbe düşürme testi yapmış ve darbe davranışını incelemişlerdir. Yol ve yaya köprüleri için düşük öz ağırlığa, yüksek mukavemete, düşük bakım maliyetlerine ve agresif ortamlarda bile iyi dayanıklılığa sahip GFRP profiller yenilikçi ve rekabetçi çözümler sunmaktadır. Yaya kaynaklı darbe olayları yarı statik olaylar, diğer tipik konsantre yük olayları düşen nesneler gibi “düşük hızlı” çarpma olayı olarak değerlendirilmektedir. Darbe testleri Rosand IFW5 aletli düşme kullanılarak yapılmıştır. En düşük darbe enerjileri ile enine çatlaklar oluşmaktadır. Gelen enerji arttıkça fitillerde boyuna bölünmeler meydana gelmektedir. Yarı statik test sonuçları delme için gerekli darbe enerjisinin tahmininde kullanılmıştır. Hasardan önce kaplanmış güverte bölümleri yarı statik tepkiden daha sert darbe tepkisinde tek başına bir gerinim oranı etkisi sergilemiştir. Hasardan sonra benzer bir sertleşme gerinim oranı etkisi tüm numunelerde görülmüştür. Sonuç olarak

numune kaplaması delme için gerekli enerjiyi %25 oranında arttırmıştır. Bu nedenle güverte kaplama başarılı bir koruma yöntemi olacaktır. Korumasız olanlar ile köpük dolgulu numuneler arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Li ve ark.'nın (2017) bu çalışmadaki amacı 16,75J ile 67J arasında değişen darbe enerjilerine maruz kalan pultrüde GFRP kompozitlerin darbe tepkisini değerlendirmektir. Korkuluklar, tabela destekleri, çarpışma bariyerleri gibi karayolu elemanları, köprüler gibi kullanım alanlarının ortak noktaları düşük hızlı veya döngüsel düşük hızlı darbe yüküne maruz kalmalarıdır. Bu nedenle düşük hızlı darbeye maruz bırakılan GFRP kompozit malzemeler üzerine bir takım çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan kompozit malzemeler pultrüzyon işlemiyle üretilmiş ve %60'lık bir lif fonksiyonuna sahip izoftalik reçine ve cam liflerinden oluşmuştur. Deneysel yapılan çalışmalar sonucu stresin gelişimi ve yayılımını daha iyi görmek için nümerik çalışmalar yapılmıştır. GFRP kompozitler 3 mm kalınlığında üç fitil katman şeklinde oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda farklı darbe enerjilerinde kompozitlerin darbe özellikleri benzer değişim eğrileri ortaya çıkarmıştır. Kompozit malzemeler ilk aşamada maksimum yükün %20'sine kadar elastik davranış sergilemiştir. İkinci aşama elastik olmayan davranışın başlamasıyla başlamıştır. Yükteki artış ile stresin yayılımı artmıştır. Üçüncü aşamada darbe kuvvetinin artışıyla kayma hasarı ve elyaf tabakaları arasında ayrılma gibi hasar mekanizmaları meydana gelmiştir. Tüm farklı darbe enerjileri için matris çatlama yönleri uzunlamasına üst tabakadaki lif yönünü takip etmiştir. Artan darbe enerjisi ile hasarın büyüklüğü önemli ölçüde artmıştır. Hasar başladıktan sonra hasarın büyüme yönünde rijitlik azalmaya başlamıştır. Düşük hızlı darbeye maruz kalan farklı geometrideki kompozit yapılarda genel olarak köşelerde kayma çatlakları, kenarlarda burkulma, malzemenin yırtılması gibi farklı hasar modelleri ve hasar büyüklükleri görülmüştür. Singh ve ark. (2015) bu çalışmada düşük hızlı darbe simülasyonlarını E-cam kompozit için sürekli hasar mekaniği tabanlı malzeme kullanarak modellemiş ve deneylerle karşılaştırmışlardır. Oluşan hasar ve yer değiştirme grafikleri incelenmiştir. Deneyde laminatlara 3 m/s, 3,5m/s, 4 m/s hızla çarpmakta olan darbe altında 33,6 mm x16,33 mm, 44 mm x 20 mm ve 54 mm x 25 mm boyutlarında hasar alanları oluşmuştur. Oluşan hasarların ana eksenlerinin fiber yönü boyunca olduğu görülmüştür. FE yöntemi ile 125mm x 125mm ve 6,4 mm kalınlığında dikdörtgen cam levha ve 1,475 kg ağırlığında düşürülen darbe cismi simüle edilmiştir. Sayısal analiz ile deneysel çalışma sonuçlarının benzerlik göstermekte olduğu fakat artan darbe enerjisi ile aradaki farkın büyüdüğü görülmüştür. Darbe yükünün yüzeye yakın,

profilin etkilenen kısmının karşısında delaminasyona yol açtığı bilinmektedir. Delaminasyon son ve sondan bir önceki katman arasında görülmektedir. Gliszczynski ve ark. (2019) Kompozit malzemelerde darbe sonucu bulunan deneysel sonuçları teorik model ile tanımlamak istemiş ve bunun için katsayı önerisi yapmışlardır. Bu çalışmada darbe hızı 1,5 m/s ve 2,12 m/s olarak kullanılmıştır. Yarı izotropik #1:[0/-45/45/90]_s, #2:[90/-45/45/0]_s, #5:[45/-45/90/0]_s, yarı ortotropik #3:[0/90/0/90]_s ve açılı katlı #4:[45/-45/45/-45]_s olarak katmanlardan oluşan kompozitler analiz edilmiştir. 10J enerjide gözlenen hasar alanlarının 20J enerjiye oranla küçük olduğu görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucu delaminasyonun yayılmasının incelenen malzemenin şekli ile de ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Etkilenen ağların tüm nominal darbe enerjilerinde tekrarlanabilir mekanik tepkiler verdiği görülmüştür. Aynı enerji altında ağlarda oluşan hasar alanları flanşlara göre daha büyük olmuştur. En görünür delaminasyonların yayılma yönünün yüzeye yakın liflerin yönlendirmelerine bağlı olduğu görülmüştür.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışma ABAQUS programı aracılığıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak cam elyaf takviyeli kompozit profillerin ve çelik profillerin darbe analizini konu almaktadır. Yaygın olarak kullanılan profil modelleri seçilerek üzerine 0,075 ton ağırlığındaki cisim 2000 mm yükseklikten serbest düşüş yaptırılarak analiz edilmiştir. Dört farklı GFRP profil ve dört çelik profilin darbe analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. GFRP profillerin darbe dayanımı, profiller üzerinde oluşan gerilmeler, plastik şekil değiştirme, oluşan mesnet tepkileri ve GFRP profillerin çelik profillere göre avantajları dezavantajları irdelenmiştir.

Kompozit malzemeler, günümüzde yaygın olarak tercih edilen ve sürekli gelişim gösteren malzemeler arasında yer almaktadır. Cam elyaf takviyeli plastik, çevresel koşullara dayanıklı, esnek olmakla birlikte yeterli mekanik dayanıma sahip olmayan plastik ile yüksek mekanik dayanıma sahip cam elyafın bir araya getirilmesiyle elde edilen üst düzeyde bir mühendislik malzemesidir. Darbe, malzeme üzerine kısmi veya büyük kuvvetlerin çok kısa bir sürede uygulanması şeklinde tanımlanabilir; düşük, orta ve yüksek hızlarda gerçekleşebilir. Mühendislik malzemelerinin darbelere karşı gösterdiği davranışlar genellikle elastik veya plastik deformasyon olarak gözlemlenir. Ancak, kompozit malzemelerde darbe yükü altında çok az hasar meydana gelebilir.

Darbe sırasında malzeme tarafından absorbe edilen enerji, malzemenin mukavemeti ve tokluğunun bir ölçüsü olarak kullanılır. İnsanların aktif kullanım alanlarında bulunan yapı elemanlarının darbe direnci ve davranışı, önemli bir mühendislik kriteridir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzeme Nedir?

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla malzemenin yeni bir özellik çıkarmak amacıyla birleşmesi sonucu oluşan malzemelerdir. Kompozit malzemeler, genellikle matris ve takviye olmak üzere iki malzemenin birleşiminden oluşmaktadır. Farklı fiziksel özelliklere sahip olan bu malzemeler birleştirildiklerinde gelişmiş fiziksel özelliklere sahip kompozit malzemeyi oluşturmaktadırlar. Genel olarak takviye malzemesi kompozit malzemede yükü veya gerilimi üstlenen malzeme olarak görev yapar ve etrafında bulunan matris faz ise onu bir arada tutar, aktarımı sağlar ve takviye malzemesini destekler. Çok eskilere dönüldüğünde kerpiç evlerde kullanılmakta olan saman malzemesi de karıştırıldığı malzemenin dayanımını arttırmakta olup saman ve çamur ilk kompozit malzemelerden sayılmaktadır (Kompozit Malzemeler, 2022). Bir malzemenin kompozit olarak adlandırılabilmesi için aşağıdaki gibi bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir:

1. Beşerî yapımı olmalıdır
2. En az iki veya daha fazla özellikleri farklı olan malzemeler birleştirilmeli
3. Herhangi bir tek bileşenle elde edilemeyen mekanik özellikler gerçekleştirilmeli
4. İstenilen özellikleri elde etmek için malzemeler birbiri içerisine dikkatli ve uygun bir şekilde karıştırılarak kompozit bir malzeme oluşturulmalı,
5. Malzemeler birleştirildiğinde elde ettiğimiz kompozit malzemenin birleştirilen malzemelerden daha üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir (Yüce, 2007).

Kompozitler; termoset veya termoplastik olabilen matris adını verdiğimiz malzemeye takviye malzemesinin eklenmesi ile oluşan polimer matriksdir. Tüm plastikler kompozit malzeme değildir. Şu anda, plastik malzemelerin çoğu, saf plastik reçineler kullanılarak kalıplanmaktadır. Plastiklerin büyük bir kısmı ve takviyesiz plastiklerin neredeyse tamamı termoplastiktir. Diğer yandan, takviyeli plastiklerin önemli bir kısmı termoset malzemelerdir. Termoset reçineler, uygun takviyelerle birleştğinde,

ağırlıklarına oranla teknolojinin en dayanıklı malzemelerinden biri haline gelirler. Kompozit malzemeler yeni ürünler ile verimliliği arttıran, problemleri çözen, değerli, günümüzün alternatif malzemeleridir. Kompozit malzemelerin özellikleri ve yapısı ihtiyaç duyulan ürüne göre tasarlanabilmektedir. Bu yönüyle kompozitler beton malzemesine benzemektedirler. Beton malzeme sistemleri, gerekli malzemelerin karıştırılması ve sonrasında bir takım katılaşma, kürlenme aşamaları sonrası elde edilmektedir. Kompozit malzemeler çok yönlü ürün yelpazeleri ile sektöre çok faydalı olmaktadır. Kompozit malzeme üretiminde gerekli özen gösterilmezse, uygun proseslerin, malzeme seçiminin ve kalite kontrol metodlarının kullanılmaması durumunda çeşitli sorunların ortaya çıkması muhtemeldir. Kompozitler parça bütünlüğü, hafiflik, yüksek mekanik mukavemet, darbe dayanımı ve uzun kullanım ömrü gibi özellikler ile geniş kullanım alanlarında avantaj sağlamaktadır. Cam elyafının elastik bir malzeme olduğu çok bilinmemektedir. Yani, yük altında düzgün olarak kopma noktasına kadar uzayan cam elyafı, yükün kalkması sonucunda herhangi bir akma özelliği göstermeden başlangıç boyutuna döner. Cam elyafı elastik özelliği sayesinde büyük miktarda enerjiyi depolama olanağına sahiptir. Cam elyafı takviyeli plastiklerde dayanıklılığı etkileyen bir etmen, cam elyafı takviyesinin yönüdür ve yönlendirme cam elyafının reçine ile kaplanabilirliğini de etkiler. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde ani kırılmaların önüne geçilmelidir. Dolayısıyla takviye miktarının artışı mukavemeti de yükseltir. Mukavemetin ve dayanımın azalmaması için uygun takviye oranının yapılması gerekmektedir (CTP Teknolojisi, 2018). Fiber takviyeli kompozitlerin temel amacı, daha yüksek elastik modül ile yüksek mukavemete sahip malzemeler elde etmektir. Son yıllarda kompozit teknolojisinin gelişmesi, ileri malzeme davranışlarını elde etmek için farklı üretim metodolojileri kullanılarak farklı fiber takviyeli kompozit sistemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Fiber takviyesinin ve montaj matrisinin seçimi aynı zamanda uygulama gereksinimlerine de bağlıdır. Bununla birlikte, liflerin hizalanması uygulamalara bağlı olarak sürekli veya rastgele olabilir. Genel olarak, yapısal uygulamalar için kullanılan kompozit malzemeler en iyi şekilde yüksek performanslı sistemler olarak sınıflandırılır ve yüksek mukavemet-ağırlık oranları sunan ancak genellikle optimum performans için kontrollü üretim ortamları gerektiren sentetik malzemelerden yapılır. Fiber takviyeli plastiklerin uygulamaları genel olarak köprü tabliyesi parçaları, kirişler, takviye çubukları, dayanma kabloları veya korkuluklar gibi takviyeli plastikten yapılmış daha küçük parçalarda görülmektedir. Son yıllarda, taşıma ve

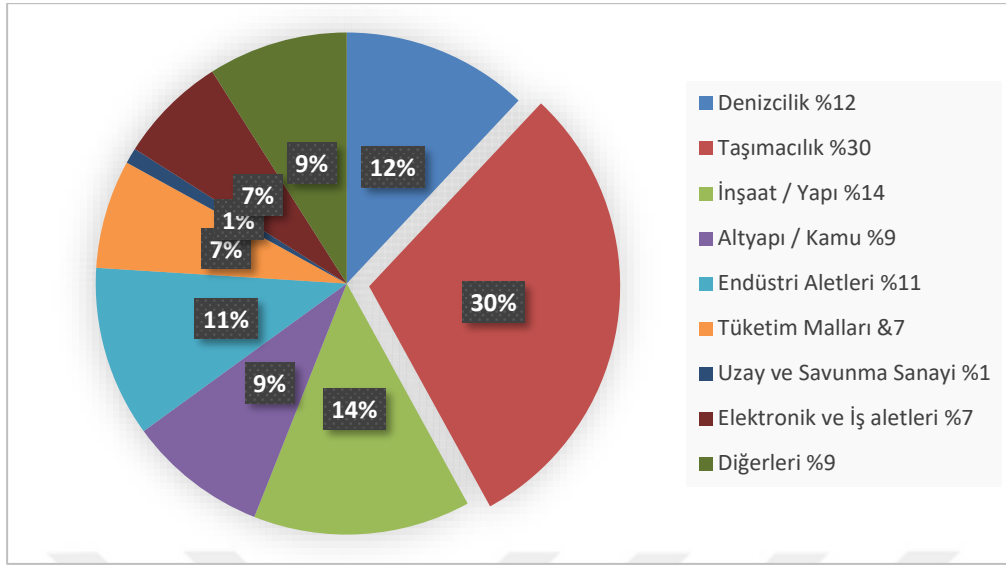
elektronik uygulamalarının yanı sıra, bina ve inşaat için de güçlendirilmiş plastiklerin iyi bir şekilde tasarlanması için araştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca kompozit, herhangi bir projenin özel mekanik ihtiyaçlarına uyacak şekilde tamamen özel olarak üretilebilir ve bu da iyi bir verimliliğe yardımcı olur. Son zamanlarda kullanılan en yaygın elyaflar cam elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar ve doğal elyaflardır ve bunların yanında naylon ve polyester elyaflar da bulunmaktadır (Prashanth, 2017).

2.2. Kompozit Malzeme Kullanım Alanları

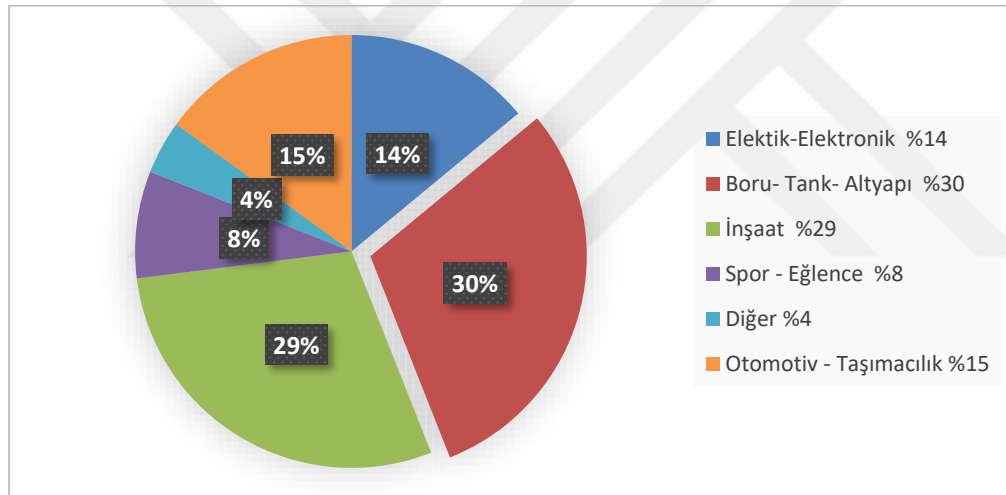
Dünyada'ki gelişmelere bağlı olarak yüksek fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip ürünlere ihtiyaç artmakta olup, artık GFRP üretimi açık kalıplamadan makine üretimine kaymaktadır (CTP Teknolojisi, 2018). GFRP malzemelerin kullanıldığı sektörler Tablo 2.1.'de, sektörler dağılım oranları Şekil 2.1. ve Şekil 2.2.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. GFRP Malzemenin Kullanıldığı Sektörler (CTP Teknolojisi,2018)

GFRP MALZEMESİNİN KULLANILDIĞI SEKTÖRLER	Havacılık / Uzay / Savunma
	Ev Aletleri ve İş Ekipmanları (İmalat Sanayi
	Yapı Sektörü
	Tüketim Malları ve SPor / Eğlence
	Korozyon Dayanımlı Ürünler
	Elektrik / Elektronik
	Denizcilik
	Taşımacılık ve Otomotiv
	Askeri Uygulamalar
	Tarım / Gıda Sektörü



Şekil 2.1. 2003 yılı Amerika GFRP Pazarı Sektörel Dağılımı (CTP Teknolojisi,2018)



Şekil 2.2. 2003 yılı Türkiye GFRP Pazarı Sektörel Dağılımı (CTP Teknolojisi,2018)

2.3. Kompozit Malzemenin Tercih Edilme Nedenleri

Çelik yüksek mukavemeti, düşük maliyeti ve yüksek sünekliği nedeniyle tercih edilen bir malzemedir. Fakat çelik malzemesi korozyona karşı dayanıksız olduğu için bakım maliyetlerine sebep olabilmektedir. Korozyon yapısal bozulmaya ve ileri seviyede can kaybına neden olabilmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile beton ile çelik demir yerine birçok başka malzeme kullanılarak betonarme malzeme üretilmeye başlanmıştır. Bunlara örnek olarak fiber takviyeli demir ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) demir verilebilir. Özellikle GFRP demirinin paslanmaz olması, aşındırıcı ortamlarda dayanıklı olması, hafif olması ve iletken olmaması, çelik takviyeye alternatif bir

malzeme olmasını sağlamaktadır. İletken olmaması demiryolu yapıları gibi elektrik ortamlarındaki uygulamalar için GFRP malzemelerin çelik malzemeye göre kullanışlı olabileceğini göstermektedir. Çelik, az miktarda karbon içeren demirden oluşan bir metal alaşımıdır. GFRP ile çelik arasındaki malzeme farklılıkları, yapısal performanslarının ve dayanıklılıklarının farklı olduğu anlamına gelmektedir. Tablo 2.2 ve Tablo 2.3.'de GFRP inşaat demiri ve çelik inşaat demirinin farklı malzeme özellikleri gösterilmektedir. Cam elyaf takviyeli polimer çeliğin çekme mukavemetinden daha fazlasına sahip olabilir; ancak eğilme ve akma mukavemeti çeliğe göre daha düşüktür ve GFRP daha düşük elastiklik modülüne sahiptir. Bu GFRP'nin gerilime maruz kalan bir kirişin alt kısmı veya konsollu bir levhanın üstü gibi durumlarda kullanıldığında çelikten daha yüksek seviyedeki kuvveti tolere edebileceği anlamına gelir. Bununla birlikte çelik demiri, akma veya kalıcı deformasyon meydana gelmeden önce GFRP'ye göre daha yüksek seviyelerde elastik sapmayı tolere edebilmektedir. Çelik yüksek sünekliğe sahip olduğu için kırılmadan öne deforme olmaktadır. Çelik ile karşılaştırıldığında GFRP elastik bir davranışa sahiptir, bu da onun bir akma noktasından ziyade bir kopma noktasına sahip olduğu anlamına gelir. Bu karakteristik farklılıklar, GFRP takviyeli betonun genellikle betonun ezilme hasarı için tasarlandığı, çelik takviyeli betonun ise tipik olarak akma hasarı için tasarlandığı anlamına gelmektedir (Madewell, 2021).

Tablo 2.2. Çelik Demir ve GFRP Demir Karşılaştırması (Madewell, 2021)

	GFRP DEMİR	ÇELİK DEMİR
Çekme Mukavemeti (MPa)	>1000	450
Elastisite Modülü (GPa)	>60	190 -200
Enine Kesme Dayanımı (MPa)	220	300
Betona Bağlanma Mukavemeti (MPa)	>20	>12
Nihai Gerinim (%)	1,5-2%	15%
Yoğunluk(Kg/m³)	2100	7800

Tablo 2.3. İnşaat sektörünün içinden GFRP ve Demir donatı karşılaştırması (FİBERKO, 2023)

ÖZELLİKLER	DEMİR ARMATÜR CLASS A-III (A400C)	GFRP İNŞAAT DEMİRİ
Malzeme	Çelik	GFRP
Çekme Dayanımı (MPa)	390	1300
Esneklik Modülü (MPa)	200 000	55 000
Bağıl uzama (%)	25	2,2
Korozif aşındırıcı ortamlara karşı dayanım	Aşınır	Paslanmaz
Isı iletkenliği	Isıyı iletir	Isıyı iletmez
Elektrik iletkenliği	Elektrik iletir	Elektrik iletmez
Üretilen Profiller	6-80	4-20
Uzunluk	Çevre Uzunluğu 6-12 m	Siparişe uygun olarak
Uzun ömürlülük	İnşaat normları ile uygundur	En az 80 yıl
Fiziksel ve Mekanik	6 AIII	4 AKS
Özelliklerine Göre Koşullu	8 AIII	6 AKS
Değişim	10 AIII	8 AKS
	12 AIII	10 AKS
	14 AIII	12 AKS
	16 AIII	14 AKS
	18 AIII	18 AKS
	20 AIII	
Ağırlık,kg eşit dayanımlı	6 AIII- 0,22	4 AKS – 0,02
değişimlerde	8 AIII – 0,395	6 AKS – 0,05
	10 AIII – 0,617	8 AKS – 0,07
	12 AIII – 0,888	10 AKS – 0,08
	14 AIII- 1,21	12 AKS- 0 ,12
	16 AIII – 2,0	14 AKS- 0,26
	18 AIII – 2,47	18 AKS – 0,35

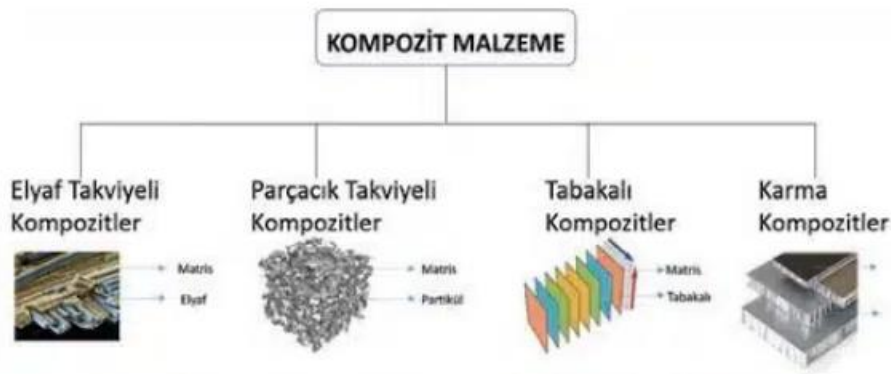
GFRP'nin betona bağlanma mukavemeti çelikten daha fazla olduğu için GFRP ile oluşan betonarmenin çatlamaya karşı daha dayanıklı olduğunu söyleyebilmekteyiz. GFRP (Cam Elyaf Takviyeli Plastik) malzemeleri, çelik malzemedan daha yüksek bir yorulma direncine sahip olmasıyla bilinir; bu nedenle döngüsel yüklemelere maruz kaldıklarında çelikten daha üstün dayanıklılık gösterirler. GFRP malzeme çelik malzemeye göre daha hafif olduğundan kullanımı ve taşınması kolaydır ve yapı ölü yükünü azaltmaktadır (Madewell, 2021). Kompozit ürünlerin tercih edilme sebebi olan üstün özellikleri başlıklar altında inceleyebilmekteyiz:

1. Yüksek Mukavemet: Kompozit malzemeler, önceden belirlenen özelliklere uygun bir şekilde tasarlanabilir. Bu sayede, istenilen yüksek mukavemet değerlerine sahip malzemelerin üretimi mümkündür. Çekme dayanımı, basınç dayanımı, darbe dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik özellikler, gereksinim duyulan dayanıklılık seviyelerine ulaşmak üzere başarılı bir biçimde elde edilebilir.
2. Hafiflik: Kompozit malzemelerin tercih edilmesindeki en önemli etmen mukavemet/hafiflik özelliğidir. Metallere göre daha hafif olmasına karşın yüksek mukavemet özelliği sunmaktadırlar.
3. Tasarım esnekliği: Kompozitler yapılan tasarıma göre her şekli alabilmektedirler.
4. Boyutsal stabilite: Kompozitler etkiler altında boyutsal olarak değişkenlik göstermezler, ısı genleşme katsayıları düşüktür.
5. Yüksek Dielektrik Direnimi: Elektrik yalıtım özellikleri ve istenirse elektrik iletebilirlik sağlanması kompozit malzemeleri tercih sebebi yapmaktadır
6. Korozyon Dayanımı: Uygun tasarlandığında kompozitler uzun hizmet ömrüne sahip olmaktadır ve kompozit malzemeler paslanmazlar ve aşınmazlar.
7. Kompozit Parçaların imalatı: Kompozit malzemeler istenilen tasarıma uygun üretilmektedir. Parçalar halinde çelik malzemeyi birleştirmek yerine uygun tasarım ve uygun maliyetle tek parça kompozit malzeme üretimi sağlanabilmektedir (CTP Teknolojisi, 2018).

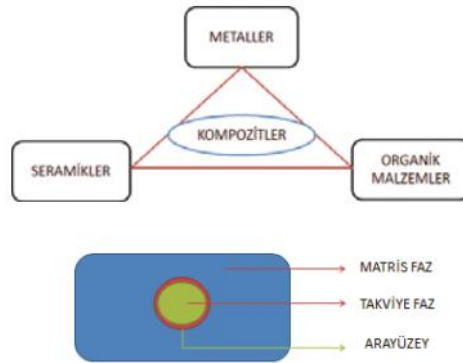
2.4. Kompozit Malzeme Bileşenleri

Kompozit malzemeler yapıları dolayısıyla birçok şekilde sınıflandırılabilir. Fakat en yaygın olarak matris ve içerisinde bulunan takviye malzemesine göre

yapılmaktadır (Kaya, 2016). Takviye edilmiş kompozit malzeme de matrisin görevi destek, koruma ve mukavemet sağlamaktır. Matris genel olarak takviye elemanından daha az yoğun olmakla birlikte fiber ile takviye edildiğinde dahi yoğunlukları düşük olmasına karşın yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olurlar. Kompozit malzemesinde birden fazla takviye malzemesi bulunabilmesi mümkündür. Kompozit malzemeler; Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi matris içinde partiküllü parçalardan oluşan kompozitler, matris içinde fiber olan kompozitler, tabakalardan meydana gelen laminar kompozitler olarak gruplandırılabilir (Çavuşoğlu, 1978).



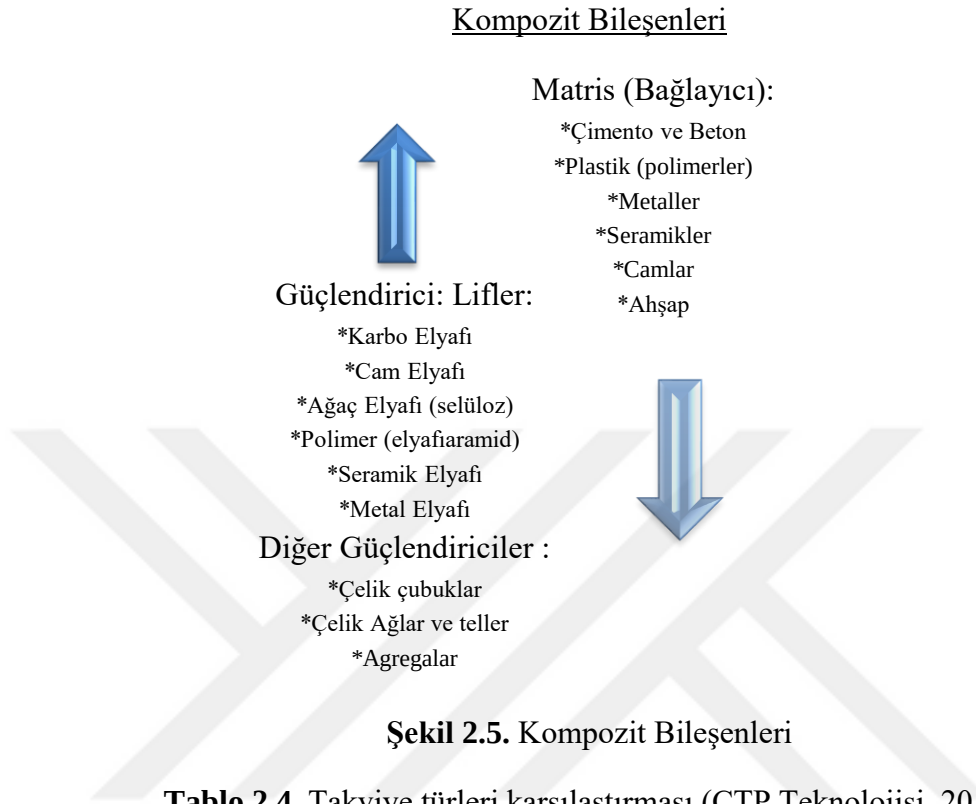
Şekil 2.3. Kompozit Malzeme Tipleri (Kaya, 2016)



Şekil 2.4. Kompozit Malzeme İçeriği (Kaya, 2016)

Şekilde 2.4.'de görüldüğü gibi kompozit malzeme koruyucu bir matris ana fazı içerisinde yer alan takviye fazından oluşmaktadır. Gelen kuvvetler ara yüzey aracılığıyla takviye fazına iletilir ve dağıtılır. Kompozit malzemelerde takviye elemanlarının yükü taşıyabilmesi için matris elemanlarının mekanik özelliklerinin önemi büyüktür ve ara yüzey bağı elastik modülü etkileyen önemli bölge olduğu için

kompozit malzemenin dayanıklılığını büyük ölçüde etkilemektedir (Kaya, 2016). Şekil 2.5.'de kompozit malzeme bileşenleri yer almakta olup, Tablo 2.4.'de bazı takviye türlerinin özellikleri gösterilmektedir.



Tablo 2.4. Takviye türleri karşılaştırması (CTP Teknolojisi, 2018)

Takviye Türleri	Gerilme Dayanımı (MPa)	Gerilme Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık	Özellikler
Cam	3000-5000	72-82	2,48-2,60	Yüksek mukavemet, iyi kalıplama özellikleri, düşük maliyet
Karbon/G rafit	2500-3000	200-700	1,75-1,96	Yüksek modül, elektriksel iletkenlik, yüksek maliyet
Aramid	2750-3000	82-124	1,44	İyi spesifik özellikler, orta maliyet
Boron	3500	400	2,55	Yüksek modül, yüksek maliyet
Polyester	1000	9	1,38	İyi darbe dayanımı ve kimyasal özellikler
Naylon	950	5	1,16	İyi darbe dayanımı ve alkali dayanımı
Polietilen	1200-1500	40-60	0,97	Düşük yoğunluk, iyi darbe dayanımı, düşük derece

2.5. GFRP Kompozit Malzeme

Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri cam elyafı, karbon elyafı, aramid elyafı, bor elyafı, oksit elyafı, yüksek yoğunluklu polyetilen elyafı, poliamid elyafı, polyester elyaf; doğal organik elyaflar cam elyafı ve polyester, aramid elyafı ve epoksi, karbon elyafı ve epoksi yaygın kullanılan kompozitlerdendir. Cam takviyeli polyester kavramı 1940'lı yılların sonunda çıkan günümüzde en çok tercih edilen ilk modern polimer esaslı kompozittir. Cam elyafı diğer elyaflardan daha yüksek dayanıklılığa sahiptir. Tablo 2.5.'de bazı elyafların özellikleri yer almaktadır. Cam elyaf takviyesi ekonomik olarak uygun, iyi bir ağırlık/mukavemet oranına sahip, kolay işlenebilir ve kimyasal direnç gösterebilen bir malzemedir (Enşici, 2009). Kompozit profil üretiminde kullanılan cam lifleri Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Belli elyafların özelliklerinin karşılaştırılması (Enşici, 2009)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Modülüs (GPa)
E-Cam	2,55	2000	80
S-Cam	2,49	4750	89
Alüminyum	3,28	1950	297
Karbon	2,00	2900	525



Şekil 2.6. Kompozit Profil Üretimi Cam Lifi Görseli

2.5.1. GFRP malzeme ve çeşitleri

Kompozit malzeme için elyaf ve reçine malzemelerinin uyumunun iyi olduğu yapılan çalışmalar sonucu anlaşılmıştır. Cam elyaf takviyeli polyester cam elyaf ile takviye edilmiş mukavemet değeri arttırılmış aşındırıcı ortamlara dirençli kompozit malzemelerin genel adıdır. GFRP malzemeler hafif, dayanımı yüksek, korozyona dayanıklı olması gibi özellikleri ile birçok alanda kullanılabilmektedir. Cam elyaf takviyesi sentetik veya doğal elyaf olabilmektedir. Doğal elyaflar yenilenebilir kaynaklardır ve ekonomik olarak sentetik elyaflara göre daha uygun malzemelerdir. Fakat doğal elyafların mekanik özellikleri sentetik elyafların mekanik özellikleri kadar iyi değildir. Bu nedenle günümüzde hibrit malzemeler üzerinde çalışılmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan doğal elyaflardan birkaçı; jüt ve cam elyafı, sisal-jüt ve cam elyafı, kenaf ve cam elyafı, sisal ve cam elyafı, pamuk ve cam elyafı, hindistan cevizi ve cam elyafı, muz ve cam elyafı, kenevir ve cam elyafı, rami ve cam elyafıdır. Ayrıca GFRP malzemelerde nanokil, füme silika, çinko oksit, uçucu kül ve çimento, mikro fibril selüloz, cam partikül, alümina, titanyum oksit, silisyum karbür, yumurta kabuğu, kalsiyum karbonat, alev geciktiriciler, pirinç ve buğday kabuğu, grafit, hematit, talk, kaolin kili, grafen gibi dolgu malzemeleri kullanılabilmektedir. Dolgu malzemeleri kompozit malzemelerin performansını

arttırmaktadır (İlhan ve Feyzullahoğlu, 2019). Takviye olarak kullanılan cam elyafının birçok çeşidi bulunmaktadır ve Tablo 2.6.'da özellikleri ile gösterilmiştir. Cam elyafı üretimi yapılırken E-Camı reçine ile iyi mekanik dayanım değerleri sağladığı, elektrik özellikleri iyi olduğu ve maliyetinin uygunluğu açısından tercih edilmektedir. Takviye malzemesi olarak cam elyaf, matris olarak polyester, dolgu maddesi ve diğer maddeler GFRP malzemesi içerisinde yer alır ve istenilen özelliklerde kompozit malzemesi elde edilebilir (Ekiz, 2013).

Tablo 2.6. Bazı cam takviyelerinin özellikleri (Ekiz, 2013)

Cam Tipi	Özellikleri
A-camı	Yüksek alkali oranı-düşük maliyet
C-camı	Kimyasal dayanım (Yüzey tülleri)
E- camı	Elektriksel özellikler
L-camı	Radyasyona karşı kurşun içerir
M- camı	Yüksek elastik modül
S-2 camı	Yüksek çekme dayanımı
W-2 camı	Paneller için yarı şeffaf
AR-camı	Alkali dayanım
R-camı	Yüksek çekme dayanımı

Plastiklerin çekme, eğilme darbe dayanımları gibi özellikleri değişik cam elyafı tiplerinin takviyesiyle elde edilebilmektedir. İyi bir kompozitte lif rijitliği fazla, lif uzaması az olmalıdır. GFRP kompozit malzemesinin performansı cam elyaf takviyesinin yönüne, takviye miktarına, matris ve ara yüzey ile uyumuna bağlıdır. Cam elyafı takviyesi arttıkça kompozit malzemenin mukavemeti de artmaktadır. Fıtil, dokunmuş fıtil, cam elyafı iplik, kumaş, dokunmamış fıtil, devamlı demetli keçe,

kırpılmış demetler, kırpılmış demetten keçeler, öğütölmüş lifler cam elyafı takviye çeşitlerindenidir (CTP Teknolojisi, 2018).

2.5.2. GFRP malzemenin avantajları ve uygulama alanları

GFRP kompozit malzemesi yüksek dayanıklılığı ve hafifliği ile yapısal eleman olarak tercih edilmektedir. Cam elyaf takviyeli yapısal elemanlar inşaat sektöründe büyük potansiyele sahiptirler çünkü geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında kompozit malzeme olarak geliştirildiği için avantajlara sahiptirler. GFRP malzemeler nemli ortamlara, dış mekanlarda UV ışınlarına, termal etkilere maruz kalabilirler. Geliştirilmiş dayanıklılık agresif ortamlarda kompozit malzemelerin iyi performans gösterdiğini çalışmalar sonucunda göstermiştir (Correia ve ark., 2005). Örneğin yeraltı depolama tankları alanında GFRP malzeme kullanımı başarılı bir uygulama olmuştur. 1960 yılına kadar yalnızca çelik malzemesi kullanılarak üretimi yapılan yeraltı depolama tanklarında korozyon ve sızdırmazlık özelliklerinin düşük olması sebebiyle yenileme gerektiren ürünler elde edilmiştir bu nedenle tanklar için yeni bir malzeme geliştirmek ihtiyaç haline gelmiştir. Çelik malzemesine alternatif olarak kullanılmaya başlanan GFRP yeraltı depolama tankları korozyona karşı dayanıklılığı ve sızdırmazlık özelliği ile çelik yeraltı depolama tanklarına göre avantaj sağlamıştır. Sızdırma olmaması yeraltı sularının kirlenmesini önlemiştir. Kullanımları karşılaştırıldığında GFRP yeraltı depolama tankları uygulama alanı için beklentiyi karşılamıştır ve çelik malzemesine alternatif modern bir ürün haline gelmiştir. Cam elyafı maliyet/ performans açısından da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır ve malzeme performansını arttırmak üzere daha yüksek modüllü cam elyafı türleri geliştirilmektedir. Cam elyafı takviyesi elastik özellik göstermektedir yani kopma noktasına kadar uzar ve üzerindeki yük kalktığında herhangi bir akma göstermeden eski haline geri döner. Bu özelliği sayesinde cam elyafı büyük miktarda enerjiyi bünyesinde depolayabilmektedir. Bu özellikler dışında yüksek mukavemete ve dinamik yorulma dayanımına sahip olması GFRP malzemenin otomotiv sektöründe kullanılmasını sağlamıştır (CTP Teknolojisi, 2018). GFRP kompozit ürünlerin tüm avantajlarını Tablo 2.7.'de birkaç madde ile sıralayabiliriz (FİBERKO, 2023).

Tablo 2.7. GFRP Kompozit Malzemenin Avantajları (FİBERKO,2023)

Yüksek Mukavemet	Hafiflik, Kurulum ve Taşıma kolaylığı
Diğer malzemelere göre düşük maliyet	Tasarım Esnekliği
Yanmazlık özelliği	Üstün boyutsal stabilize
Dielektrik direnimi	Soğuk ve sıcak hava şartlarında izolasyon özelliği
Isıya Dayanıklılık	Kalıplama Kolaylığı
Korozyona dayanıklılık – paslanmaz	Yüksek Kimyasal Dayanımı
Rutubet ve neme dayanıklılık	Çevre Dostu ve antibakteriyel
Mükemmel elastikiyet	Kolay tamir edilebilirlik

GFRP kompozit malzemelerin genel olarak kullanıldığı sektörler ve kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

- Endüstriyel tesisler
- Tersaneler ve gemiler
- Arıtma tesisleri, boru, tank, altyapı
- Elektrik dağıtım ve trafo merkezleri
- Petrol platformları
- Gıda tesisleri
- Tekstil fabrikaları
- Askeri tesisler, savunma sanayi ve havacılık
- Mimari yapılar – İnşaat
 - Platformlarda ve rampalarda
 - Yürüme ve kedi yollarında
 - Basamaklarda
 - İzole halı ve yalıtkan paspas kullanılan alanlarda
 - Yükseltilmiş döşemelerde
 - Rögar ve menhol kapaklarında

- Drenaj kanallarında
- Kablo kapaklarında
- Kaymazlık istenen alanlarda
- Cephelerde kaplama malzeme olarak
- Güneş Kırıcı Olarak (FİBERKO,2023).

Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi darbeye ve aşındırıcı ortamlara dayanıklı olmasından dolayı GFRP malzemeler otomotiv sektöründe; hafif ve ağır araç üretiminde, makas ve amortisör yaylarında, konteynır üretiminde, araçların havalandırma kanallarında, tamponlarında ve ayrıca vagon sanayisinde kullanılmaktadırlar. Eskiden fren ve debriyaj balataalarında kullanılan kimyasal asbest malzemesinin artık kullanılmaması üzerine cam elyafı kullanımı yaygınlaşmıştır (Fiberpull, 2017).



Şekil 2.7. Cam Elyafı Kullanım Alanı Otomotiv Sektörü (Fiberpull, 2017)

Hafiflik, yüksek korozyon direnci, bakım gerektirmemesi, işçilik ve nakliye kolaylığı, sızdırmazlık özelliği ile GFRP malzemesi boru yapımında tercih edilmektedir. Korozyon, kireçlenme gibi durumlar söz konusu olmadığı için ekstra bir koruma veya bakım gerektirmezler. Başlıca GFRP boru malzeme kullanım alanları arıtma tesisleri, kanalizasyon ve kullanım suyu hatları, içme suyu hatları, deniz suyu nakli, soğutma tesisleri, yangın hatları, petrol ve su kuyuları gibi alanlardır ve Şekil 2.8.'de gösterilmiştir (Fiberpull, 2017).



Şekil 2.8. Cam Elyafı Kullanım Alanı Boru Yapımı (Fiberpull, 2017)

Rüzgâr türbinin kanatlarında GFRP malzemeler hafiflik özelliğinden dolayı tercih edilmektedir, aynı zamanda taşıyıcı direği de GFRP malzemedan yapılabilmektedir. Karayolu uygulamalarında; GFRP yol kenar dikmesi, işaret levha direkleri, ses duvarı gibi çelik malzeme yerine elastikliği yüksek, kırılmazlık özelliği olan bakım gerektirmeyen cam elyaf takviyeli plastik malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Elektrik yalıtkanlığı özelliği ile de GFRP malzemeler elektrik ve elektronik sektöründe

yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamaların başında elektrik direkleri, aydınlatma, enerji nakil hatları, yeraltı kablolarının döşenmesi gelmektedir. Elektrik alanında kullanılan GFRP malzemeler elektriği iletmezler, topraklama gerektirmezler, kimyasal etkilere dayanıklıdır, montajı kolaydır ve uzun ömürlüdür. Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi belediye hizmet ve şehir mobilyalarında; üstü kapalı yaya geçitlerinin kapama panellerinde, çöp kutularında, otobüs duraklarında, yaya köprüleri, iskeleler, köprü korkulukları, çok amaçlı kabinler, oturma elemanları gibi alanlarda cam elyaf takviyeli plastik malzemeler kullanılmaktadır (Fiberpull, 2017).



Şekil 2.9. Cam Elyafı Kullanım Alanı Karayolları Uygulamaları (Fiberpull, 2017)

Manyetik alan oluşturmaması özelliği ile savunma sanayisinde; roketlerin gövdelerinde, askeri uçaklarda, füzelerde cam elyaf takviyeli malzemeler tercih edilmektedir (Fiberpull, 2017).

2.5.3. GFRP malzeme kalıplama yöntemleri

Şekil 2.10.'da kompozit malzeme üretim yöntemlerinin, genel olarak açık kalıplama ve kapalı kalıplama olarak iki temel kategoriye ayrılmakta olduğu gösterilmiştir. Açık kalıplama yönteminde ham maddeler çevresel şartlara maruz kalırlar (FİBERKO, 2023).

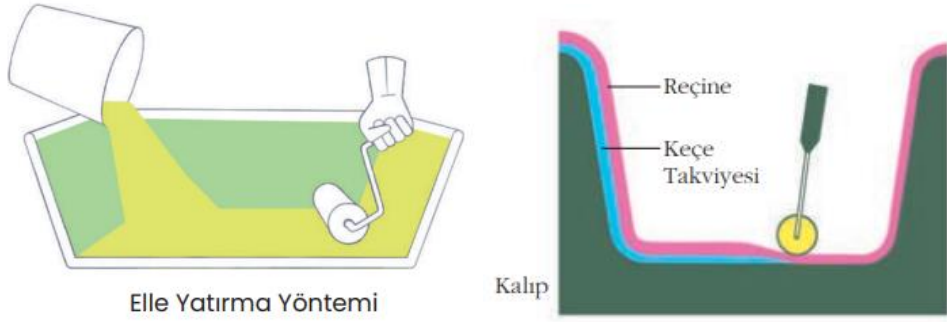
Açık kalıplama Yöntemleri Kapalı Kalıplama Yöntemleri

☐	☐
☐ Elle Yatırma	☐ Pultruzyon
☐ Püskürtme	☐ RTM
☐ Elyaf Sarma	☐ Pres Kalıplama
	☐ Vakum Torbalama
	☐ Enjeksiyon Kalıplama
	☐ Santifrj Kalıplama

Şekil 2.10. GFRP Üretimi Kalıplama Yöntemleri (CTP Teknolojisi, 2018)

1. El Yatırması Yöntemi

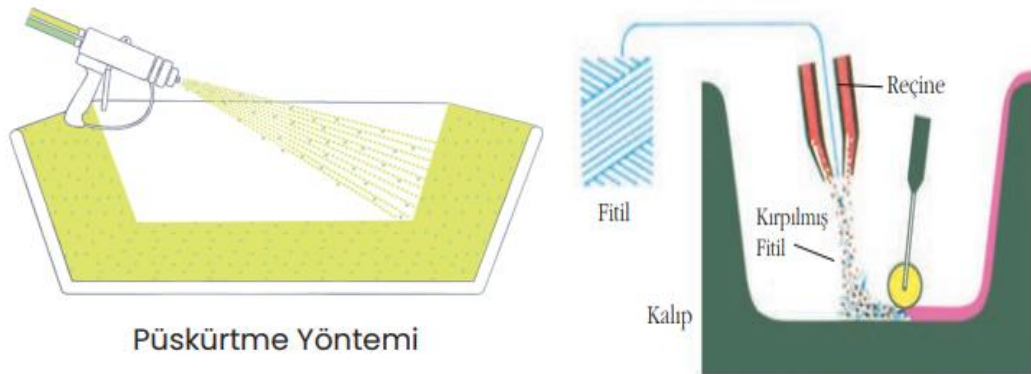
Düşük üretim düzeylerinde kullanılmakta olan en uygulanabilir evrensel kabul edilen üretim yöntemidir. Yüksek mukavemet gerektiren büyük parça üretiminde kullanılması en uygun yöntemlerden biridir. Şekil 2.11.'de görüldüğü gibi ilk önce jelkotlar kalıp yüzeyine uygulanır. Sertleşen jelkotlar üzerine takviye tabakası yerleştirilir. Takviye tabakasından sonra reçine malzemesi eklenir ve rulo yardımıyla sıkıştırılır. İlave her malzeme reçine içerisine katılarak tasarıma eklenmiş olur. Reçine olarak polyester reçineler, izoftalik polyester, vinil ester ve epoksi reçineler kullanılmaktadır. El yatırması yöntemi ile tekne gövdeleri, depolama tankları, otomobil, kamyon gövde panelleri, yüzme havuzları gibi ürünler üretilebilmektedir. El yatırması yönteminin istenilen boyutlarda üretim yapılabilmesi, üretim maliyetinin fazla olmaması, yerinde kalıplama olanağının olması, tasarım esnekliğinin olması gibi avantajları vardır. Nitelikli iş gücü istemesi, kimyasalların havaya temas etmesi ve üretimin kalıp özelliklerine bağlı olması el yatırması üretim yönteminin dezavantajlarındandır (CTP Teknolojisi, 2018).



Şekil 2.11. Kompozit Malzeme Üretimi El Yatırma Yöntemi (CTP Teknolojisi, 2018)

2. Püskürtme Yöntemi

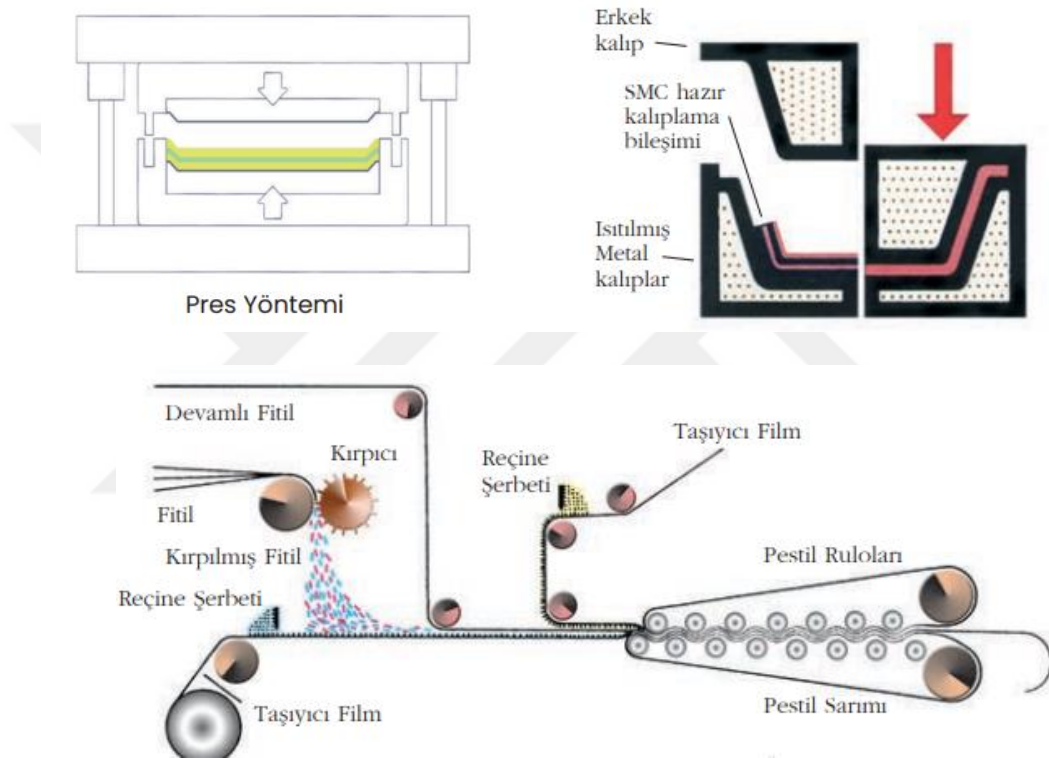
Düşük ve orta düzey üretimler için kullanılmaktadır. Püskürtme aleti takviye malzemelerini ve reçineyi kalıp tabanına Şekil 2.12.' de gösterildiği gibi uygulayarak üretimi gerçekleştirmektedir. El yatırma yönteminde olduğu gibi içerideki havayı almak amacıyla rulolama işlemi yapılmaktadır. Takviye elemanı olarak kullanılan kırılmış cam elyafının yanı sıra el yatırma yöntemiyle dokuma ve kumaş takviye malzemeleri de laminat yapısına eklenebilmektedir. Polyester reçineler kullanılmakta olup izoftalik polyester ve vinil esterler de kullanılabilmektedir. Parçalar oda sıcaklığında sertleşmektedir. Püskürtme yönteminde cam elyafı takviyesi %20-35 oranında kullanılmaktadır. Düşük maliyetli, basit bir yöntem ve işçilik gerektirmeyip makine ağırlıklı bir yöntem oluşu püskürtme yönteminin avantajlı yönlerindendir. Malzemenin arka yüzeyinin pürüzlü olması, kompozitin kalitesinin makine kullanıcısına bağlı oluşu, işgücü maliyetinin yüksek oluşu püskürtme yönteminin dezavantajlarındandır (CTP Teknolojisi, 2018).



Şekil 2.12. Kompozit Malzeme Üretimi Püskürtme Yöntemi (CTP Teknolojisi, 2018)

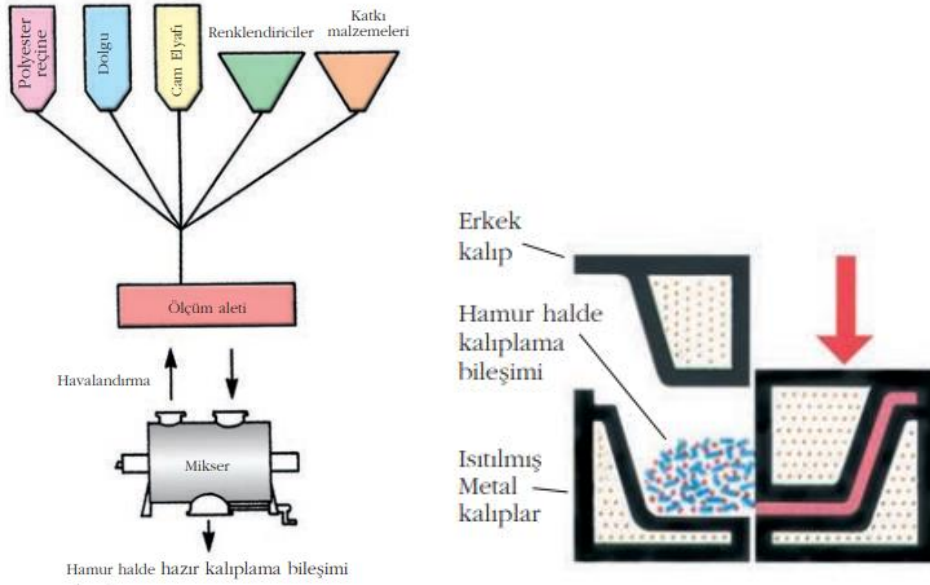
3. Pres Kalıplama

Pres kalıplama yönteminin dört çeşidi vardır; smc hazır kalıplama birleşimi, bmc hazır kalıplama birleşimi, ıslak sistemli preform ve keçeleri presleme, takviyeli termoplastik levha presleme. Şekil 2.13.'de pres kalıplama üretim yöntemi aşamaları gösterilmiştir. Isıtılmış metal kalıplarda kompozit malzeme sertleşene kadar basınç altında sıkıştırılması işlemine pres kalıplama üretim yöntemi denir. Smc hazır kalıplama birleşimi yöntemi takviye malzemesi, reçine ve bütün malzemelerin tamamen bütünleştirilebildiği hazır kalıplama yöntemidir (CTP Teknolojisi, 2018).



Şekil 2.13. Kompozit Malzeme Pres Kalıplama (CTP Teknolojisi, 2018)

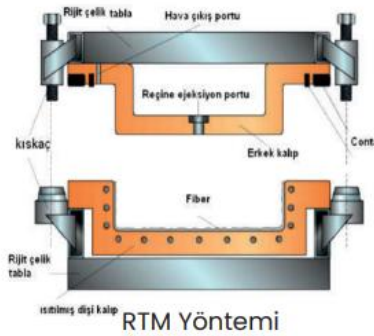
Şekil 2.14.'de Bmc hazır kalıplama üretimi gösterilmekte olup, Bmc hazır kalıplama birleşiminde reçine seçimi öncelikli önem taşır ve takviye malzemesi olarak kırpılmış cam elyafı kullanılmaktadır. Dolgu malzemeleri kullanılarak istenilen özelliklerde malzeme üretimi yapılabilmektedir (CTP Teknolojisi, 2018).



Şekil 2.14. Kompozit Malzeme Üretimi Bmc Hazır Kalıplama (CTP Teknolojisi, 2018)

4. Reçine Enjeksiyon Kalıplama (TRM)

Orta düzeyli üretim hacmine sahiptirler. Reçine enjeksiyon kalıplama yönteminde önceden şekillendirilmiş takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Şekil 2.15.'de görülmekte olduğu gibi takviye malzemesi kalıpların arasına yerleştirilir, reçine malzemesi de kalıp içerisine pompalanır. Birden fazla sayıda parça aynı anda kalıplanabilmektedir. Kapalı kalıplama yöntemlerine göre maliyeti daha azdır (CTP Teknolojisi, 2018).

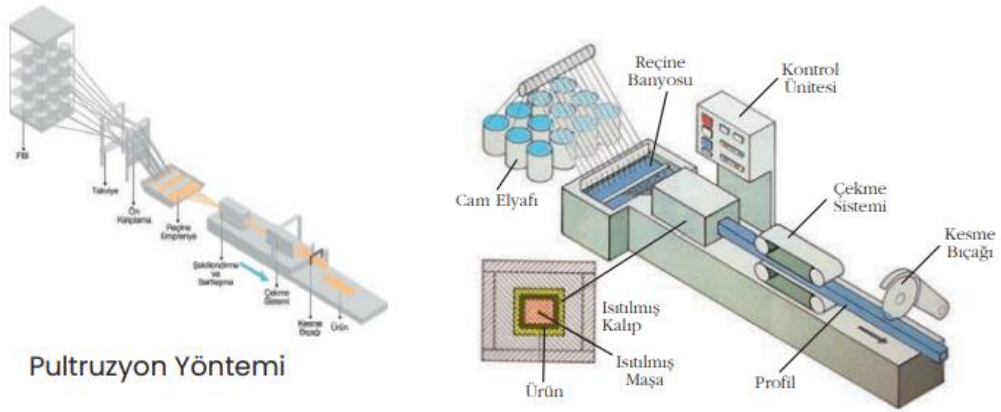


Şekil 2.15. Kompozit Malzeme Üretimi Reçine Enjeksiyon Kalıplama (CTP Teknolojisi, 2018)

5. Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon yöntemi daha çok endüstriyel profil malzemeleri üretmek için kullanılmaktadırlar. Şekil 2.16.'da görüldüğü gibi cam elyafı takviyesi olarak fitil,

dokunmuş fitil, keçe gibi malzemeler reçine banyosuna sokulur sonra bir takım şekillendirme yapılarak sertleşmesi sağlanır. Otomatik, hızlı ve çok fazla işgücü gerektirmeyen bir yöntemdir. Reçine olarak daha çok polyester ve vinil reçine tercih edilmektedir. Bunun yanında kompozit malzemeye kullanıldıkları zaman fenolik reçine yanmazlık özelliği, epoksiler yüksek mukavemet, ısı dayanımı gibi özellikler katabilmektedirler. Pultrüzyon yönteminde kompozit malzemenin ihtiyacına göre elyaf yönlendirmesi yapılabilmektedir. Düşük işçilik gerektirmesi, maliyetinin diğer yöntemlere kıyasla fayda/maliyet oranında uygun olması, orta ve yüksek hacimli üretim yapılabilmesi pultrüzyon yönteminin avantajlarındandır. Sadece çekme dayanımı sağlayacağı yönde yerleştirilen elyaflar diğer yönlerde mukavemetin düşük olmasına sebebiyet vermektedir. Korozyon, elektrik, inşaat gibi birçok sektörde kullanılması ve ekonomik olması sebebiyle kullanılan en yaygın üretim yöntemidir. İstenilen şekilde kompozit malzeme üretilmesi merdiven, trabzan gibi uygulama alanlarında, ısı yalıtımı özellikleriyle kapı, pencere gibi alanlarda kompozit malzemenin kullanımını arttırmıştır. Büyük boyutlu ürünlerin yapılabilmesi, aşındırıcı ortamlara dayanıklı olarak üretilibilmeleri yaya geçitleri, köprü gibi büyük boyutlu yapı elemanlarının tasarlanmasında kompozit malzemelerin kullanımını kolaylaştırmıştır (CTP Teknolojisi, 2018).



Şekil 2.16. Kompozit Malzeme Üretimi Pultrüzyon (CTP Teknolojisi, 2018)

6. Elyaf Sarma

Kaliteli yüzeyler elde etmek için yöntemler arasında elyaf sarma yöntemi en iyi sonucu vermektedir. Polyesterler, vinil esterler, epoksiler, furanlar bu üretim yönteminde reçine olarak, takviye malzemesi olarak her çeşit takviye kullanılmaktadır. Elyaf sarma üretiminde az işçilik olması, değişken mukavemet oranı elde edebiliyor

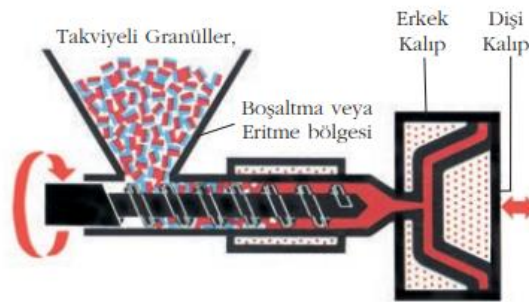
olmak, termoset ve termoplastik kullanımına olanak sağlanması üretimin avantajlarıdır. Tank ve boru üretimlerinde, tren vagonları gibi ürünlerde bu yöntem kullanılabilir (CTP Teknolojisi, 2018). Elyaf sarma yöntemi aşamaları Şekil 2.17.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Kompozit Malzeme Üretimi Elyaf Sarma (CTP Teknolojisi, 2018)

7. Enjeksiyon Kaplama

Şekil 2.18’de gösterilen üretim yöntemi karmaşık yapıların kalıplanmasında kullanılan en uygun kalıplama yöntemidir. Yüksek hacimli üretimler için kullanılmaktadır. Temel prensip termoplastiklerin ısınması ve soğuması üzerine kuruludur. Takviye malzemesi olarak kırılmış cam elyaf, reçine olarak polipropilen, ABS, SAN ve polikarbonat kullanılmaktadır (CTP Teknolojisi, 2018).



Şekil 2.18. Kompozit Malzeme Üretimi Enjeksiyon Kaplama (CTP Teknolojisi, 2018)

2.5.4. GFRP malzemenin inşaat sektöründeki yeri

İnşaat sektöründe cephe kaplama panellerinde, kaset beton kalıplarında, köprülerde, metro istasyonlarının iç duvarlarında, giydirme panellerinde, ışık geçirgen çatı kaplamalarında, eski yapıların restorasyonunda cam fiber takviyeli plastikler kullanılmaktadır (Engin Afşar, 2005). İnşaat sektöründeki GFRP profiller pultrüzyon yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Sektörde daha az bakım gerektiren, daha

ekonomik, uzun ömürlü alternatif malzemelere yönelim olmaktadır. Şekil 2.19.'da görüldüğü gibi yapısal kolonlarda, korkuluklarda, merdivenlerde, sıcak ve soğuk çevresel şartlarda, aşındırıcı ortamlarda cam fiber takviyeli plastiklerin kullanımı tercih edilmektedir.



Şekil 2.19. Kompozit Malzeme Merdiven Kullanım Alanı (FİBERKO, 2023)

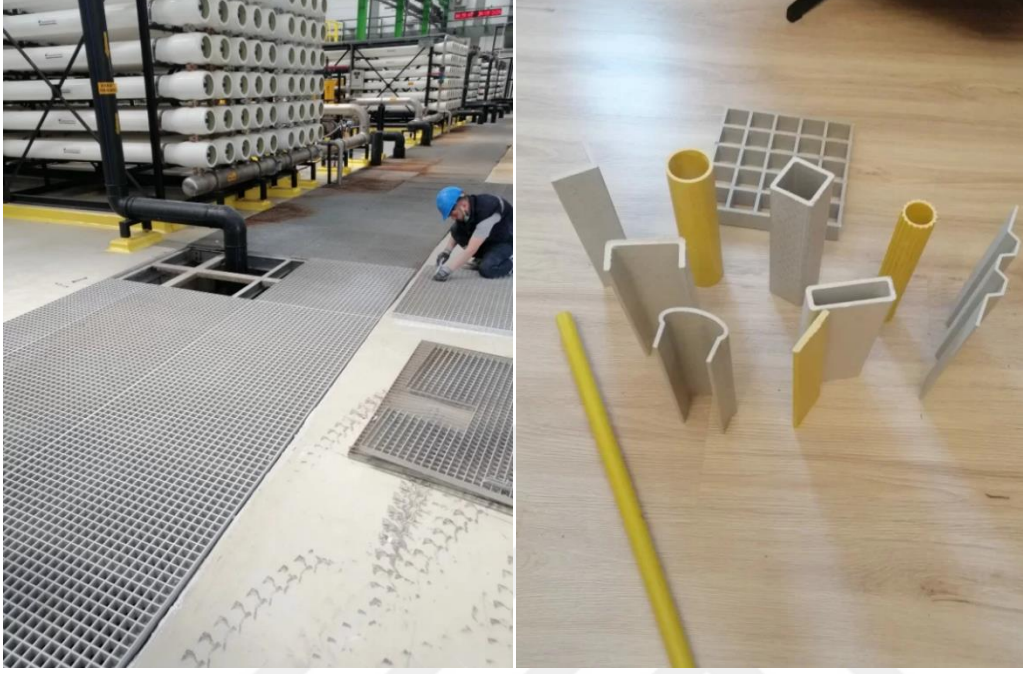
İnşaat sektöründe hafif yapılarda örneğin Şekil 2.20.'de görüldüğü gibi seracılık yapılarında çelik, alüminyum gibi malzemeler yerini cam fiber takviyeli malzemelere bırakmaktadır. Sera yapısının iskeletinin dayanıklı, hafif ve geçirgen olmaması gerekir bu nedenle GFRP kompozit malzeme kullanımının avantajları bulunmaktadır. Aynı zamanda montajı kolaydır, korozyona uğramaz, sıcak ve soğuya karşı dayanıklıdır, uzun ömürlüdür, rutubetten etkilenmez, yanıcı değildir ve ısı geçirgenliği düşüktür bu sayede seracılık alanı için GFRP malzeme ile uygun ortam oluşumu sağlanabilmektedir.



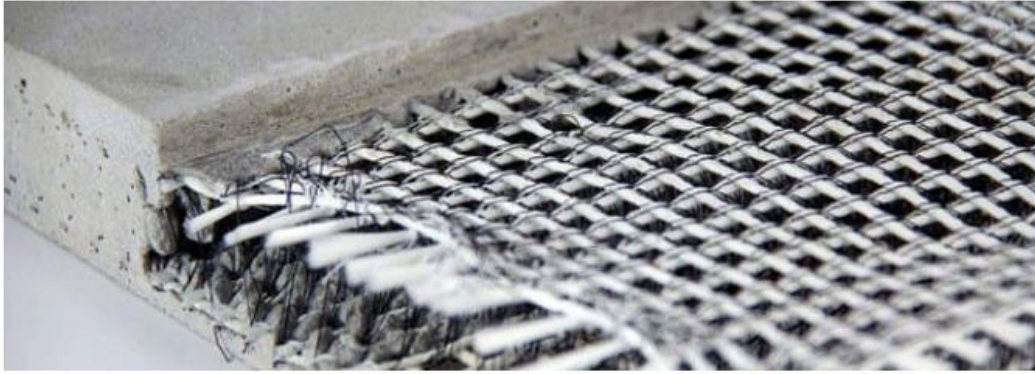
Şekil 2.20. Kompozit Malzeme Sera Kullanım Alanı (Fiberpull, 2017)

GFRP malzemesinin kurulumunun kolay ve hızlı olması, bakım masraflarının az olması, nakliye ve montaj kolaylığı, çevresel şartlardan etkilememesi, paslanmaması gibi özellikleri sayesinde köprülerde kullanımı inşaat alanında yaygınlaşmıştır. Aynı şekilde merdivenlerde korozyona uğramadığı, elektrik iletkenliği olmadığı, yanmazlık özelliğine sahip olduğu için kullanımı çelik vb. malzemelere göre daha elverişlidir. GFRP malzemelerin tüm özellikleri düşünüldüğünde soğutma kuleleri, aydınlatma

direkleri, havalimanı çitleri, zemin kaplamaları gibi alanlarda kullanımları bulunmaktadır (Fiberpull, 2017). İnşaat sektöründe üretilen ve kullanılan GFRP profiller ve GFRP malzemeler Şekil 2.21. ve Şekil 2.22.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. GFRP Kompozit Profil (FİBERKO, 2023)



Şekil 2.22. GFRP Kompozit Malzeme (FİBERKO, 2023)

2.5.5. Sektörde kullanımı yaygın GFRP profiller

Alternatif malzemeler olarak üretilen GFRP kompozit malzemeler yüksek dayanıklılık, hafiflik, termal ve elektriksel yalıtıcılık, kimyasal dayanıklılık gibi özellikleri ile konstrüksiyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Profiller ISO EN 13706 standartlarına uygun olarak üretilmektedirler.

1. U Profiller

Hasarlı binaların güçlendirilmesi, ev ve inşaat sektörü, fabrika yapıları gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sektörde yaygın olarak kullanılan GFRP U profil ölçüleri Tablo 2.8.'de verilmiştir.

Tablo 2.8. Sektörde Kullanılan U Profiller (FİBERKO, 2023)

Profil Ölçüleri (mm)	Ağırlık (gr/m)
Ø 75x32x5	1235,00
Ø 100x30x6	1720,00
Ø 140x50x7	2927,00
Ø 150x38x6	2440,00
Ø 150x43x9	3580,00
Ø 200x55x9	4800,00
Ø 200x60x10	5535,00
Ø 300x75x12	8720,00
Ø 300x33x3	1998,00

2. Kutu Profiller

Pek çok sektörde çatı sistemlerinde, otomobil sektöründe, sanayi sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Sektörde yaygın olarak kullanılan GFRP kutu profil ölçüleri Tablo 2.9.'da verilmiştir.

Tablo 2.9. Sektörde Kullanılan Kutu Profiller (FİBERKO, 2023)

Profil Ölçüleri (mm)	Ağırlık (gr/m)
Ø 30x30x2	414,00
Ø 40x40x4	1000,00
Ø 45x45x5	1440,00
Ø 50x50x5	1700,00
Ø 50x50x6	1980,00
Ø 63x63x6	2400,00
Ø 75x40x4	1639,00
Ø 75x75x6	3140,00
Ø 75x75x9	4380,00
Ø 80x25x4	1435,00
Ø 80x25x5	1750,00
Ø 80x40x5	2035,00
Ø 95x50x3	1540,00
Ø 100x100x6	4305,00
Ø 100x100x8	5350,00
Ø 100x100x10	6660,00
Ø 120x60x5	3145,00

3. I Profiller

Sektörde yaygın olarak kullanılan GFRP I profil ölçüleri Tablo 2.10.'da verilmiştir.

Tablo 2.10. Sektörde Kullanılan I Profiller (FİBERKO, 2023)

Profil Ölçüleri (mm)	Ağırlık (gr/m)
Ø 30x15x4	376,00
Ø 40x15x4	550,00
Ø 100x50x6	2393,00
Ø 150x75x6	3300,00
Ø 150x75x8	4203,00
Ø 200x100x10	7030,00
Ø 200x200x10	10773,00

4. Boru Profiller

Temel inşaat malzemelerinden olan boru profiller mutfaklarda, sanayi ve ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Sektörde yaygın olarak kullanılan GFRP boru profil ölçüleri Tablo 2.11.'de verilmiştir.

Tablo 2.11. Sektörde Kullanılan Boru Profiller (FİBERKO, 2023)

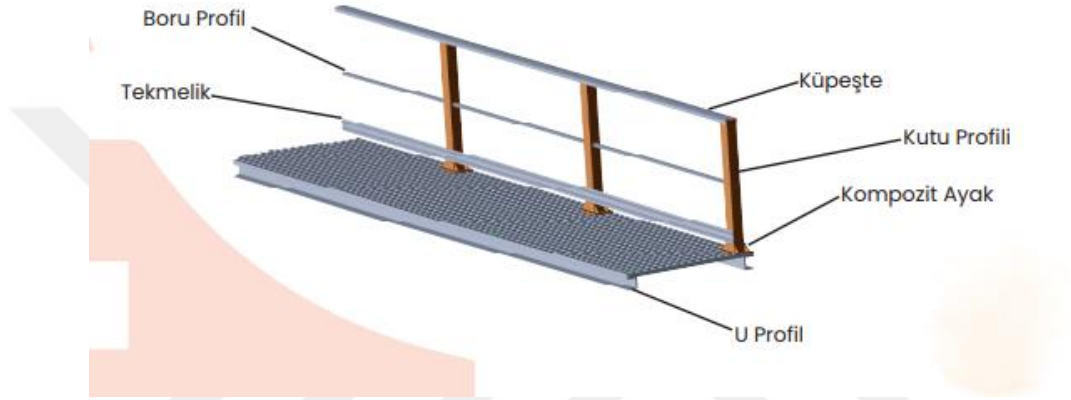
Profil Ölçüleri (mm)	Ağırlık (gr/m)
Ø 34x3	540,00
Ø 50x4	1114,00
Ø 36x3	580,00
Ø 50x4	1064,00
Ø 50x5	1300,00
Ø 50x6,5	1640,00

5. Özel Profiller

Tasarıma uygun istenilen şekilde üretilen profillerdir. Sektörde üretilen tasarım GFRP profil ölçüleri Tablo 2.12.'de verilmiş, özel profillerden oluşan bir yapı örneği Şekil 2.23'de gösterilmiştir.

Tablo 2.12. Sektörde Kullanılan Özel Üretim Profiller (FİBERKO, 2023)

	Profil Ölçüleri (mm)	Ağırlık (gr/m)
Tekmelik Profil	Ø 100x12x2	450,00
Küpeşte Profil	50'lik kutu için	960,00
Kaplama Profil	Ø 200x38x4	2252,00
Panjur	Ø 100x10x3	798,00
Yol Kenar Dikmesi	Ø 100x10x3	558,00
Kar Siperi	Ø 55x8x3	400,00



Şekil 2.23. GFRP Kompozit Profillerin Kullanım Alanları (FİBERKO, 2023)



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. ABAQUS ve Sonlu Elemanlar Yöntemi

Abaqus, genel amaçlı sonlu elemanlar tabanlı bir programdır. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda ve gerinimlerde, izotropik ve anizotropik metallerdeki gerilim ve deformasyonu simüle edebilen bir program olan Abaqus aynı zamanda kapsamlı malzeme modelleri kütüphanesine sahiptir. Abaqus, metallerin ötesinde kauçuk ve polimerleri, güçlendirilmiş betonu, camı ve seramiği, toprak gibi jeoteknik malzemeleri de simüle edebilmektedir. Abaqus ile iletken ve konvektif ısı transferi, kütle difüzyonu ve akustik gibi analizler de simüle edilebilmektedir. Tasarımların karmaşıklığı arttıkça tasarımları ayrıntılı bir şekilde işleyecek programlara ihtiyaç artmaktadır. Abaqus, modern bilgisayarların yüksek performanslı özelliklerinden yararlanır dolayısıyla karmaşık tasarımların simülasyonlarını kolaylıkla gerçekleştirebilir. Abaqus programında tasarım geometrisi olabildiğince gerçekçi modellenenilmekte, modelin çeşitli bileşenleriyle ilişkili malzeme davranışları tanımlanabilmektedir (Abaqus, 2023). Abaqus programında standart bir analiz aşağıdaki aşamalar ile yapılmaktadır;

1. Aşama: “Part”, Abaqus' deki düğümlerin, elemanların ve yüzeylerin tanımlanması gibi temel modellemeler yapılır.
2. Aşama: “Property”, malzeme modelleme seçeneklerini ve bazı daha gelişmiş malzeme modellerini tanımlamayı sağlamaktadır.
3. Aşama: “Assembly”, tanımlanan elemanların bir araya getirilmesini, modelin oluşturulmasını sağlamaktadır.
4. Aşama: “Step”, analiz türlerini, istenilen sonuçları elde etmeyi sağlamaktadır.
5. Aşama: “Interaction”, Abaqus'te mevcut olan iletişim ve etkileşim modellerini tanımlamayı sağlamaktadır.
6. Aşama: “Load”, dağıtılmış yükler ve düğüm hızları, modelin başlangıç koşullarını tanımlamak gibi önceden belirlenmiş koşulların tanımlanmasını sağlamaktadır.

7. Aşama: “Mesh”, modellenen sistemin ağ sıklığının belirlenmesini sağlamaktadır.
8. Aşama: “Job”, talep edilen sonuç çıktılarının istenmesini, sonuçları X- Y grafik verileri şeklinde almayı, simülasyonun görüntülenmesini sağlamaktadır (Abaqus V.6.6).

Abaqus ticari sonlu elemanlar kodlarının analizini gerçekleştiren bir yazılımdır. Genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus/Standard ve dinamik analiz için Abaqus/Explicit’ten oluşmaktadır. Sonlu elemanlar için veri girişi Abaqus/CAE aracılığıyla yapılmaktadır. Günümüzde karmaşık yapısal tasarım analizlerinin hemen hepsi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEA) büyük miktarda veri gerektirmektedir. Yöntem ilk olarak matris analizi olarak adlandırılmıştır. Daha sonra sürekli yapıların analizini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Sürekli yapılar karmaşık olduğundan basit bileşenlere veya düğüm noktalarında birbirine bağlanan elemanlara bölünmesi gerekmektedir (Khennane, 2013). Sonlu elemanlar yöntemi, bir problemin düğüm noktaları vasıtasıyla küçük elemanlara ayrılıp çözümlenmesinden oluşmaktadır. Basit ve küçük geometrilere bölünmüş yapısal problemde düğüm noktalarına kısıtlama getirilebilmekte, modele yükleme yapılabilen ve tüm problem üzerindeki davranışı hakkında sonuçlara ulaşılabilir (Sadıd, 2021). Sonlu Elemanlar Metodu'nun temel prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin türetilmesi ve ardından tüm sistemi temsil edecek biçimde bu eleman denklemlerinin birleştirilerek sistem için bir lineer denklem takımının elde edilmesidir. Bu metodun içerisinde, en yaygın olarak kullanılan dört temel yöntem şunlardır:

1. Direkt yaklaşım
2. Varyasyonel Yaklaşım
3. Ağırlıklı Kalanlar Yaklaşımı
4. Enerji Dengesi Yaklaşımı

Çözüm yöntemi adımları da şu şekildedir;

1. Cismin Sonlu elemanlara bölünmesi
2. İnterpolasyon fonksiyonunun seçimi
3. Eleman matrisinin teşkili
4. Sistem matrisinin hesaplanması

5. Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması
6. Sınır şartlarının belirlenmesi
7. Sistem denkleminin çözümü

3.2. Yapılan Çalışma

İnşaat sektöründe yapısal çelik malzemesine alternatif olarak kullanılmaya başlanan GFRP profillerin darbe yükü etkisi altındaki davranışı yapısal malzeme olarak tercih edilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada Abaqus programı ile GFRP profiller ve çelik profillerin darbe yükü altındaki davranışının karşılaştırılması sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla yapılmıştır. Günümüzde en çok tercih edilen 4 farklı profil çeşidi Fiberko firması ile görüşüldükten sonra seçilerek, 2000 mm yükseklikten 0,075 ton ağırlığındaki rijit cisim serbest düşme yaptırılarak profillere çarptırılması sağlanmıştır. 100*100*10 mm kutu profil için GFRP ve çelik malzeme modeli, 200*100*10 I profil için GFRP ve çelik malzeme modeli, 200*60*10 U profil için GFRP ve çelik malzeme modeli, 114.3/4.50 boru profil için GFRP ve çelik malzeme modeli oluşturulmuştur. 2000 mm yükseklikten serbest düşürülen rijit cisim için hız tanımlaması yapılmış, sert temas tanımlaması sonucunda profile çarpan rijit cismin profil içerisine girmemesi, çarpıp geri dönmesi sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile oluşturulan modellerin orta noktasında seçilen eleman üzerinden yer değiştirme değeri karşılaştırması, biri sabit mesnet diğeri kayıcı mesnet olarak kısıtlanmış düğümlerin mesnet reaksiyonu sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır.

3.3. ABAQUS Birim Kabulü

Bu çalışmada profillerin darbe yükü altındaki davranış analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Abaqus programı aracılığıyla yapılmıştır. Abaqus programı çok çeşitli birim kütüphanesine sahip olmakla birlikte bu çalışmada SI birim sistemi ve SI birim sisteminden türetilmiş birimler Tablo 3.1.'de gösterildiği şekilde kullanılmıştır.

Tablo 3.1. Abaqus Programı Kabul Edilen Birimler

MASS	LENGTH	TIME	FORCE	STRESS	ENERGY
Ton	mm	s	N	MPa	N-mm

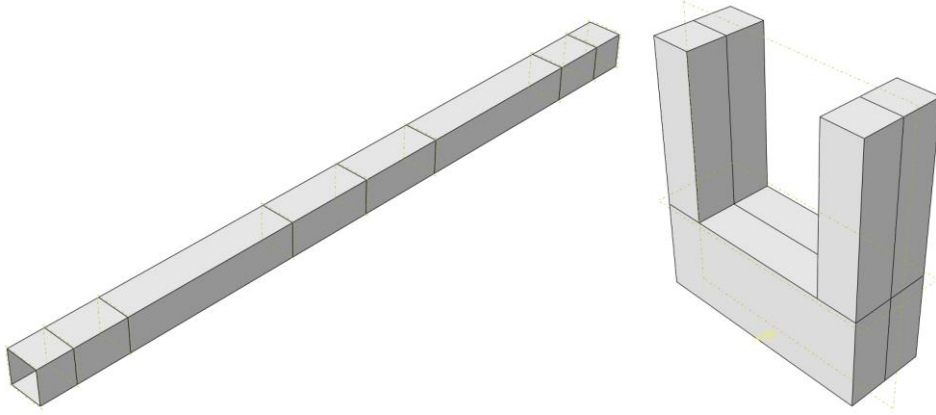
3.4. Analiz Modellerinin Geometrik Özelliklerinin Oluşturulması

3.4.1. Darbe cismi geometrik modellenmesi

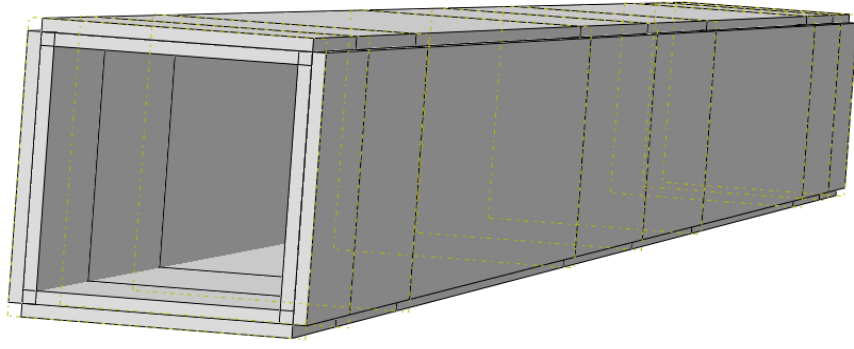
Darbe simülasyonu için serbest düşme yaptırılacak rijit cisim 620mm*550mm*200mm boyutunda modellenmiştir. Rijit cisim gerilme almayacak şekilde tasarlanmıştır. Modellenen geometrik cisme 0,075 ton kütle tanımlaması yapılmıştır. Analizin gerçekleştirilebilmesi için belli bir hız tanımlaması yapılmış, bu sayede profilin üzerine çarptırılması sağlanmıştır.

3.4.2. 100*100*10 GFRP kutu profil ve çelik kutu profil geometrik modellemesi

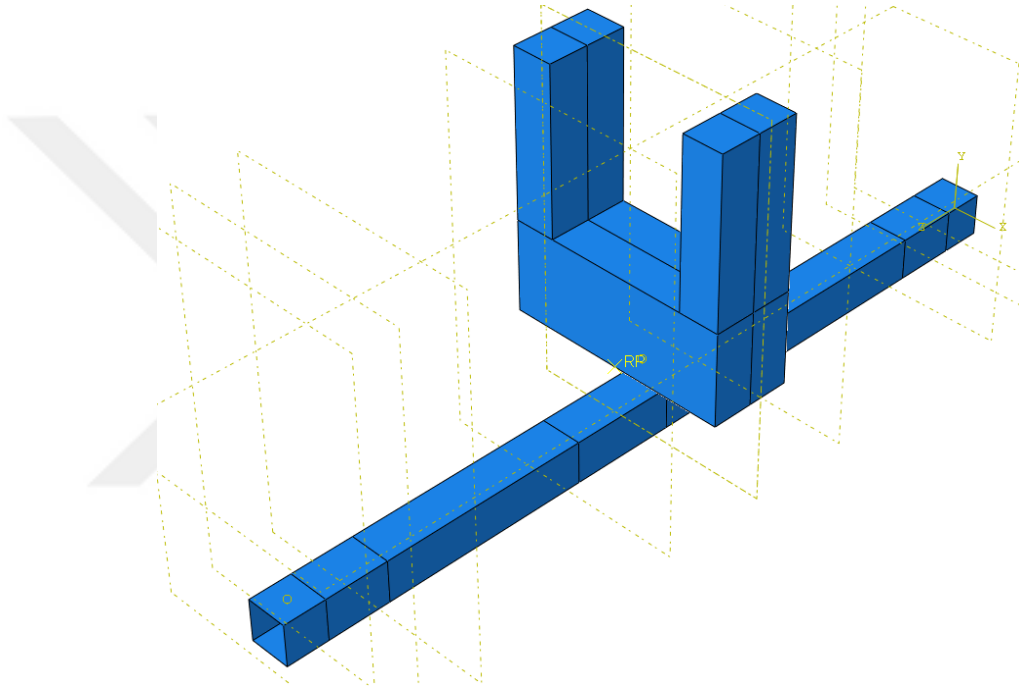
GFRP ve çelik profil darbe analizi için yapılan modellemede seçilen profiller ve serbest düşme yaptırılacak rijit cismin geometrik modellemesi tek tek yapılmış daha sonra Abaqus programı assembly bölümünde bir araya getirilmiştir. Kutu profil 100mm*100mm boyutunda, 10 mm kalınlığa sahip deforme olabilen Shell/Extrusion eleman olarak modellenmiştir. Rijit cismin 620mm*550mm*200mm boyutunda bilgisayar modellemesi Şekil 3.1.'deki gibi yapılmıştır. Şekil 3.2.'de kutu profilin üç boyutlu hali gösterilmiş olup, Şekil 3.3.'de Abaqus programı assembly bölümünde geometrik modellerin bir araya getirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellenmesi



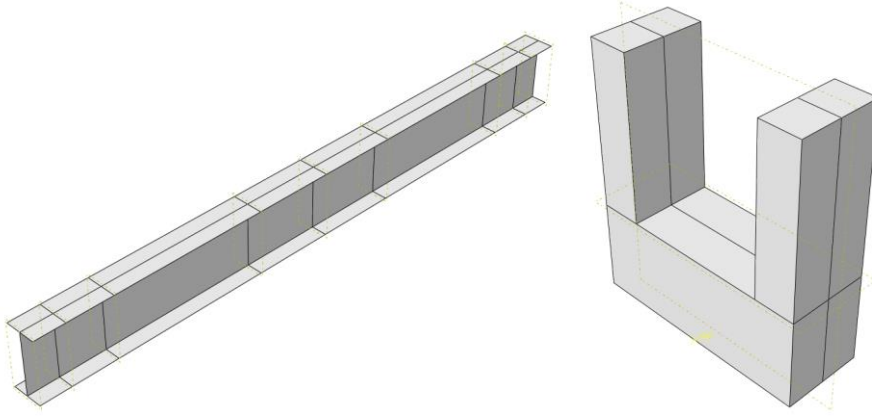
Şekil 3.2. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi



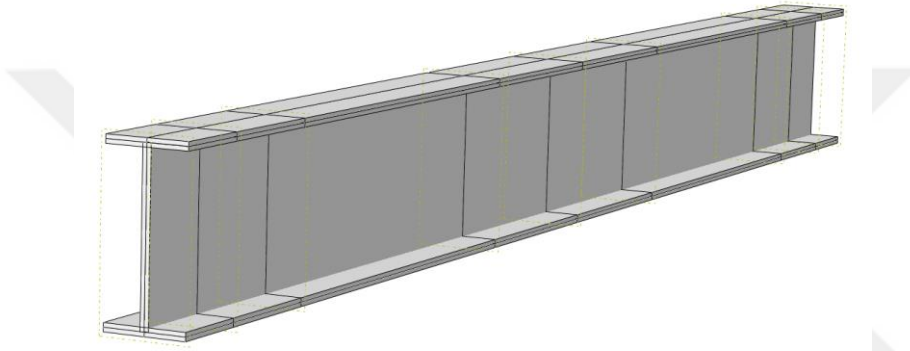
Şekil 3.3. Abaqus Programı Assembly Modellemesi

3.4.3. 200*100*10 GFRP I profil ve çelik I profil geometrik modellemesi

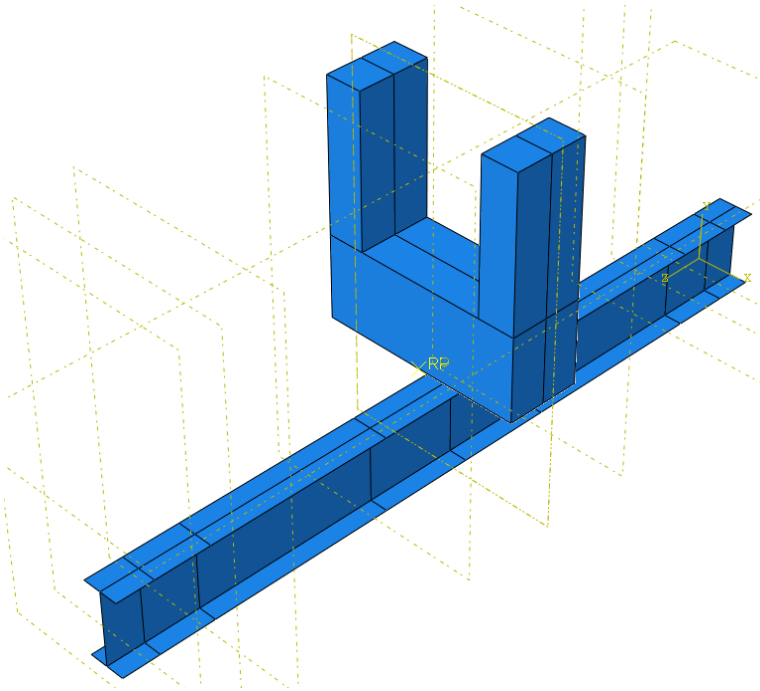
GFRP ve çelik profil darbe analizi için yapılan modellemelerde seçilen profiller ve serbest düşme yaptırılacak rijit cismin geometrik modellemesi tek tek yapılmış daha sonra Abaqus programı assembly bölümünde bir araya getirilmiştir. I profil 200mm*100mm boyutunda, 10 mm kalınlığa sahip deforme olabilen Shell/Extrusion eleman olarak modellenmiştir. Rijit cismin 620mm*550mm*200mm boyutunda bilgisayar modellemesi Şekil 3.4.'deki gibi yapılmıştır. Şekil 3.5.'de I profilin üç boyutlu hali gösterilmiş olup, Şekil 3.6.'da Abaqus programı assembly bölümünde geometrik modellerin bir araya getirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellenmesi



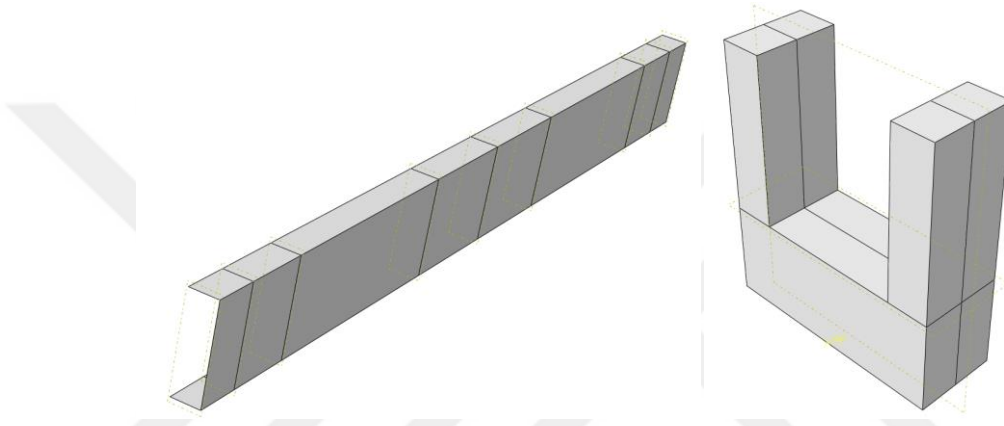
Şekil 3.5. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi



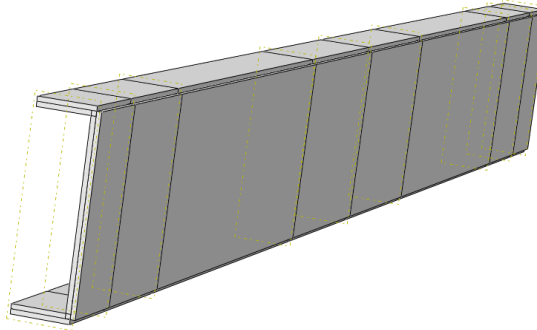
Şekil 3.6. Abaqus Programı Assembly Modellemesi

3.4.4. 200*60*10 GFRP U profil ve elik U profil geometrik modellemesi

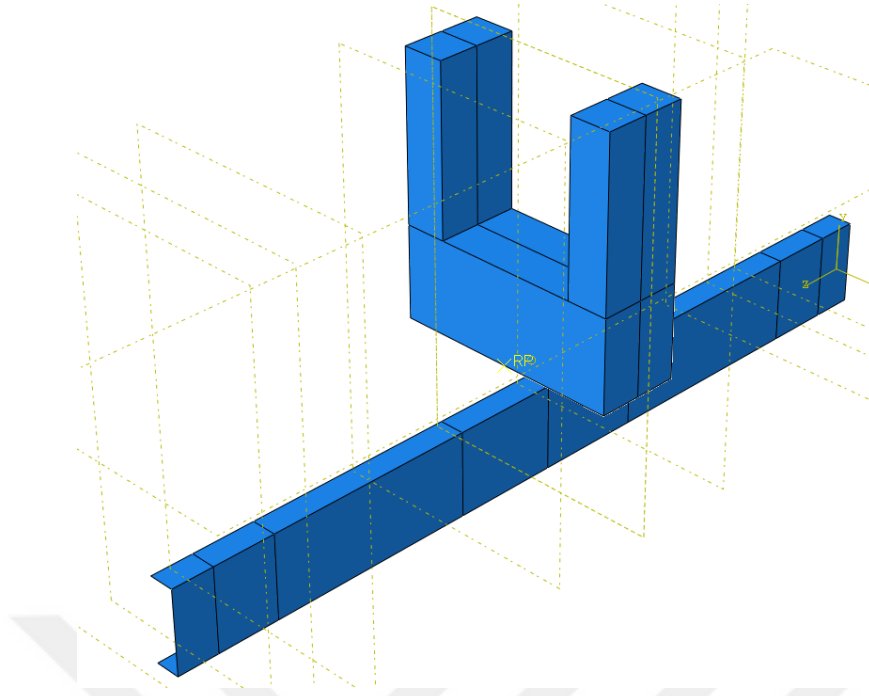
GFRP ve elik profil darbe analizi için yapılan modellemede seçilen profiller ve serbest düşme yaptırılacak rijit cismin geometrik modellemesi tek tek yapılmış daha sonra Abaqus programı assembly bölümünde bir araya getirilmiştir. U profil 200mm*60mm boyutunda, 10 mm kalınlığa sahip deforme olabilen Shell/Extrusion eleman olarak modellenmiştir. Rijit cismin 620mm*550mm*200mm boyutunda bilgisayar modellemesi Şekil 3.7.’deki gibi yapılmıştır. Şekil 3.8.’de U profilin üç boyutlu hali gösterilmiş olup, Şekil 3.9.’da Abaqus programı assembly bölümünde geometrik modellerin bir araya getirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellenmesi



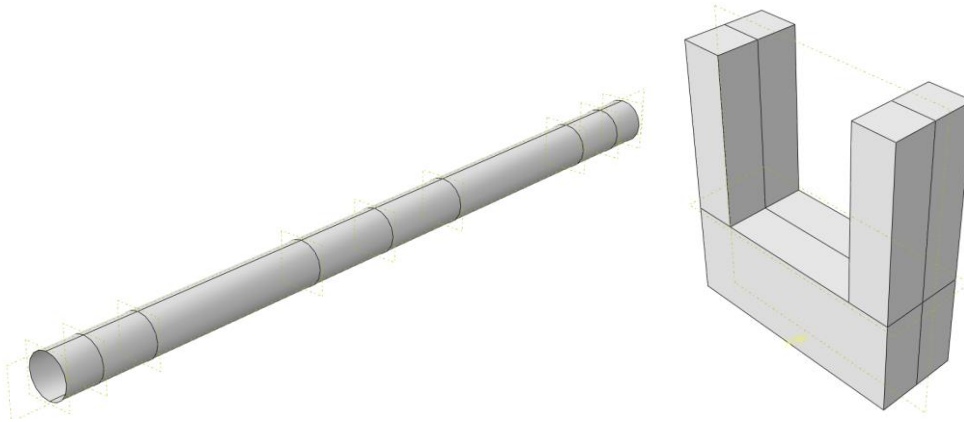
Şekil 3.8. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi



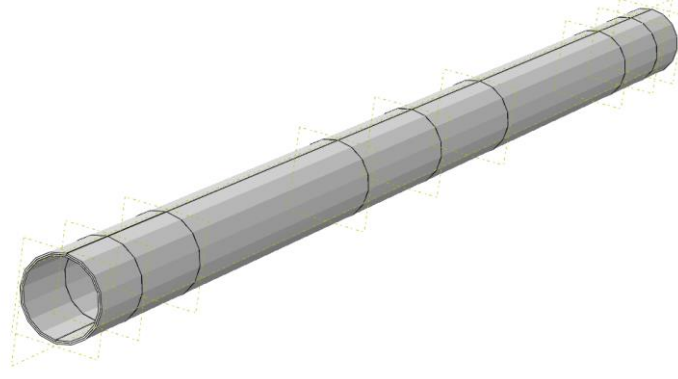
Şekil 3.9. Abaqus Programı Assembly Modellemesi

3.4.5. 200*60*10 GFRP boru profil ve çelik boru profil geometrik modellemesi

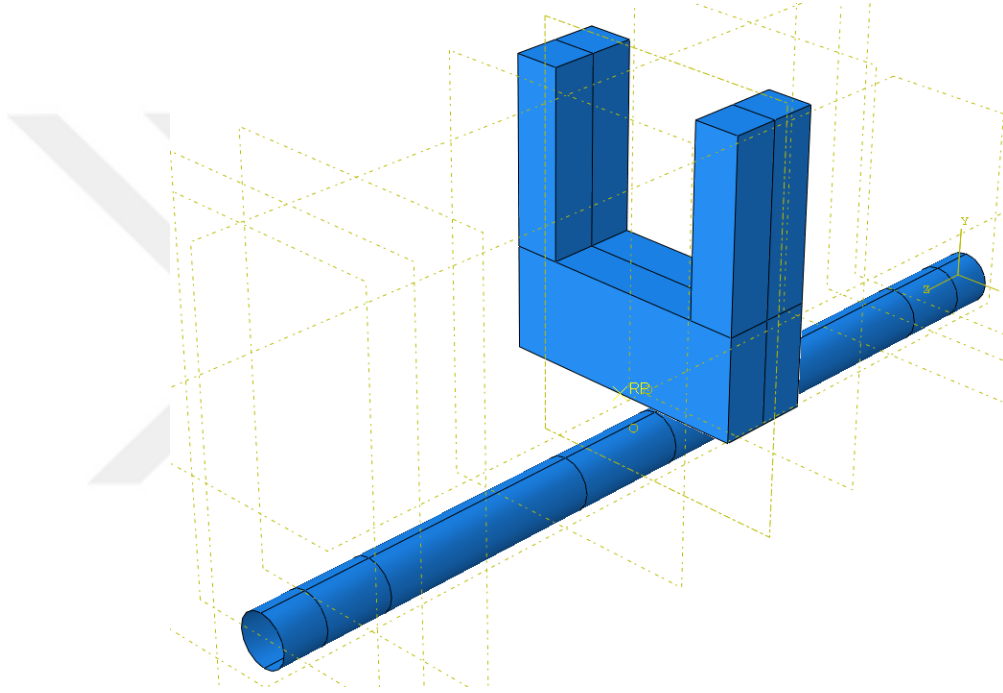
GFRP ve çelik profil darbe analizi için yapılan modellemelerde seçilen profiller ve serbest düşme yaptırılacak rijit cismin geometrik modellemesi tek tek yapılmış daha sonra Abaqus programı assembly bölümünde bir araya getirilmiştir. Boru profil 114.3mm/4.50mm boyutunda deforme olabilen Shell/Extrusion eleman olarak modellenmiştir. Rijit cismin 620mm*550mm*200mm boyutunda bilgisayar modellemesi Şekil 3.10.'daki gibi yapılmıştır. Şekil 3.11.'de boru profilin üç boyutlu hali gösterilmiş olup, Şekil 3.12.'de Abaqus programı assembly bölümünde geometrik modellerin bir araya getirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Abaqus Programı Part Bölümünde Elemanların Geometrik Modellemesi



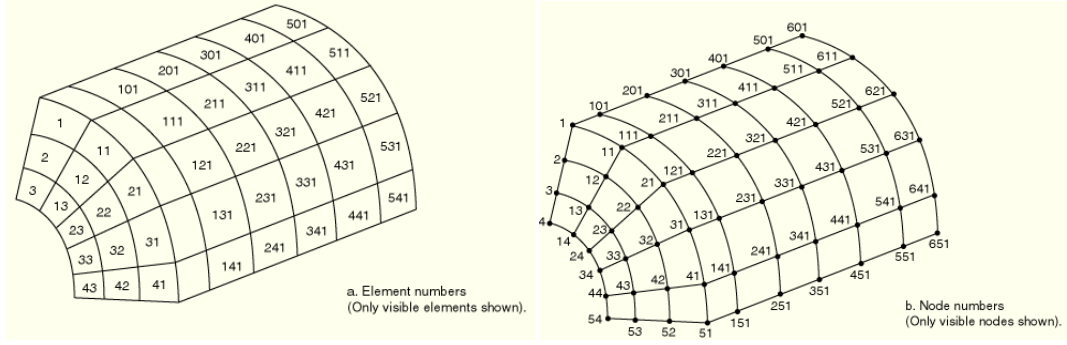
Şekil 3.11. Abaqus Programı Shell Elemanın Kalınlığının Gösterilmesi



Şekil 3.12. Abaqus Programı Assembly Modellemesi

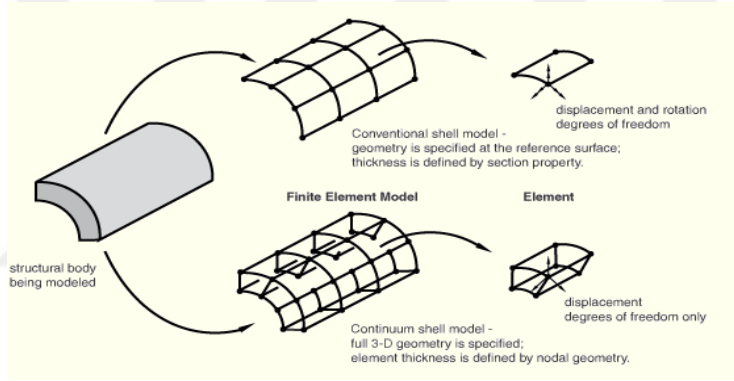
3.4.6. Eleman tipinin seçilmesi

Mevcut elemanlar kopyalanarak yeni elemanlar oluşturulabilmektedir. Kopyalanacak mevcut eleman seti tanımlanmalı ve yeni elemanların düğüm numaralarını tanımlamak için mevcut elemanların düğüm numaralarına eklenecek bir tamsayı sabiti belirlenmektedir. Benzer şekilde, oluşturulan elemanların eleman numaralarını tanımlamak için mevcut elemanların eleman numaralarına eklenecek bir tamsayı sabitinin Şekil 3.13.'de olduğu gibi belirlenmesi gerekmektedir (ABAQUS V.6.6 Documentation).



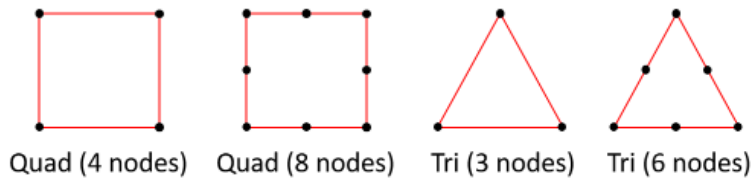
Şekil 3.13. Eleman Oluşturma Örneği (ABAQUS V.6.6 Documentation)

Şekil 3.14.'de kabuk elemanlar gösterilmiş olup, kabuk elemanlar kalınlığı diğer ölçülerine göre daha küçük olan yapıları modellemek için kullanılmaktadır. Modellenen yapıya kalınlık kesit özelliği ile tanımlanmaktadır. Kabuk elemanlardaki düğümler, dönme ve yer değiştirme serbestlik derecesine sahiptirler (ABAQUS V.6.6 Documentation).



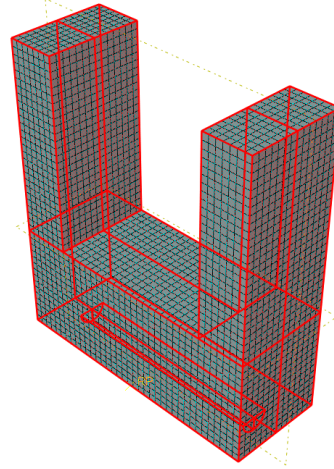
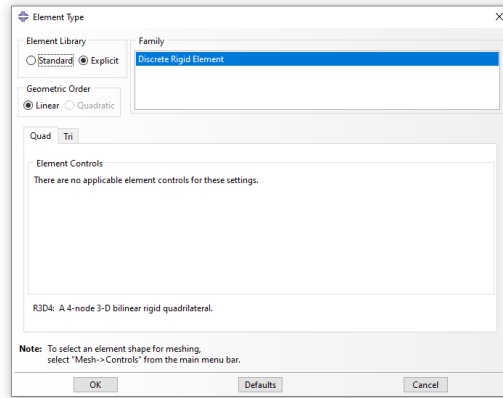
Şekil 3.14. Geleneksel Kabuk Elemanlar (ABAQUS V.6.6 Documentation)

Modellemeyi doğru yapmak, yakınsamayı arttırmak için elemanlar en iyi şekilde tanımlanmalıdır. Bazı eleman modelleri Şekil 3.15.'de gösterilmiştir. Deforme olabilen profiller S4R elemanı ile modellenmiştir ve S4R elemanı tanımı, dört düğümlü çift kavisli ince veya kalın kabuk, azaltılmış entegrasyon, kum saati kontrolü, sonlu membran gerilimi demektir. Rijit darbe cismi ise R3D4 elemanı ile modellenmiştir ve R3D4 elemanı tanımı 4 düğümlü 3 boyutlu çift doğrusal katı bir dörtgen demektir (Elements).

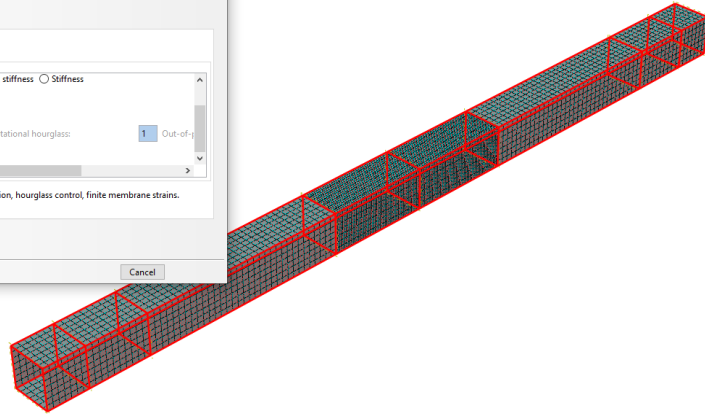
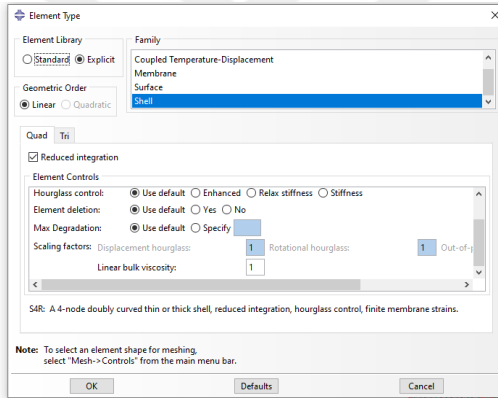


Şekil 3.15. Shell Eleman Tipleri (Elements)

Abaqus programında modellenen profillerin ve rijit cismin eleman tipi tanımlanması Şekil 3.16. ve Şekil 3.17’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Rijit Cisim Abaqus Shell Eleman Tanımlaması



Şekil 3.17. Profil Abaqus Shell Eleman Tanımlaması

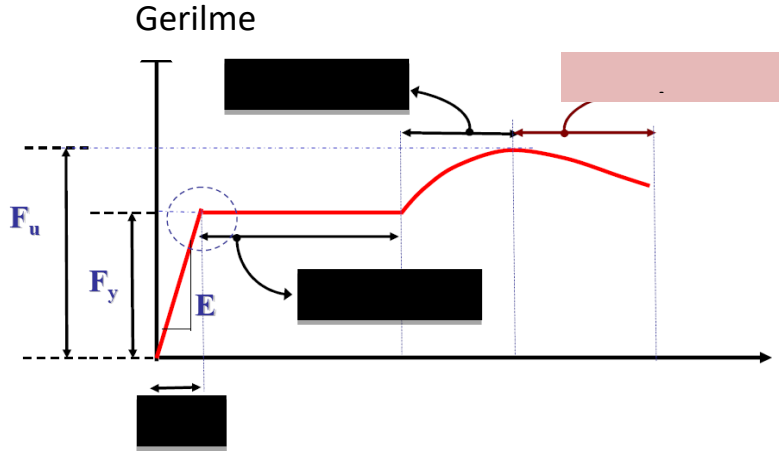
3.5. Analiz Modellerine Malzeme Tanımlaması

Abaqus’te malzeme tanımı, ilgili tüm özelliklerin girilmesi ile bir malzemenin nasıl davranacağını belirler. Bu çalışmada seçilen dört profile öncelikle çelik malzeme ataması yapılmış, daha sonra aynı boyutlardaki profillere GFRP malzeme ataması yapılmıştır.

3.5.1. Çelik malzeme modeli tanımlama

Çelik yapıların statik ve dinamik yükler altındaki dayanımını analiz etmek ve yapısal çeliklerin malzeme özelliklerini değerlendirmek için akma sınırının belirlenmesi

gereklidir. Şekil 3.18.'de elasto-plastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.18. Elasto-Plastik Çeliğin Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi

Bu çalışmada kullanılan profillere atanan çelik malzeme elastik bölge özelliği için bilgiler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Çelik Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Yoğunluk	7,85 gr/cm ³
Elastisite Modülü	178 450 MPa
Poisson Oranı	0,3

Çelik malzemesi için plastik bölge tanımlaması yer değiştirme ve gerilme fonksiyonu olarak tanımlanmıştır ve veriler Tablo 3.3.’de yer almaktadır. Plastik bölgede darbe yükü ortadan kaldıktan sonra malzeme eski halini alamamaktadır. Oluşan şekil değişimi kalıcıdır.

Tablo 3.3. Plastik Bölge Özelliklerinin Tanımlanması

Yield Stress (Mpa)	Plastic Strain (%)
277.61	0
278.93315	0.01887
285.8642	0.03176
301.97891	0.03626
321.55914	0.04082
365.22479	0.05599
376.83431	0.06163
415.82149	0.08096
438.86725	0.10256
458.44749	0.12109
465.37854	0.13209
475.60185	0.15062
483.74584	0.16237
485.99843	0.17297
491.71655	0.1919

3.5.2. GFRP malzeme modeli tanımlama

Cam elyaf takviyeli malzemelerin davranışının ortotropik olduğu varsayılmaktadır. Fiber yönü boyunca daha sert tepkiler matriste ise daha yumuşak davranış gözlemlenmektedir. Elastik özellikler boyuna ve enine elastisite modülü, boyuna ve enine kayma modülü ve poisson oranı ile Tablo 3.4.’de belirtilmiştir. “L” simgesi ile uzunlamasına fiber lif yönü, “T” simgesi ile fiber lif yönüne dik olduğu belirtilmektedir (ABAQUS V.6.6 Documentation).

Tablo 3.4. GFRP Malzemenin Elastik Özelliklerinin Tanımlanması

E_L (Mpa)	E_T (Mpa)	G_{LT} (Mpa)	G_{TT} (Mpa)	V	Density (gr/cm³)
55000	9500	5500	3000	0,45	2,2

Hasar Başlatma ve yayılma davranışında ortotropik olduğu kabul edilmiştir. Boyuna ve enine kopma gerilmeleri, enine kırılma gerilmeleri, düzlem içi kayma gerilmeleri Tablo 3.5.’de verilmiştir. “t” simgesi çekme dayanımını “c” simgesi basma dayanımını temsil etmektedir (ABAQUS V.6.6 Documentation).

Tablo 3.5. GFRP Malzemenin Özelliklerinin Tanımlanması

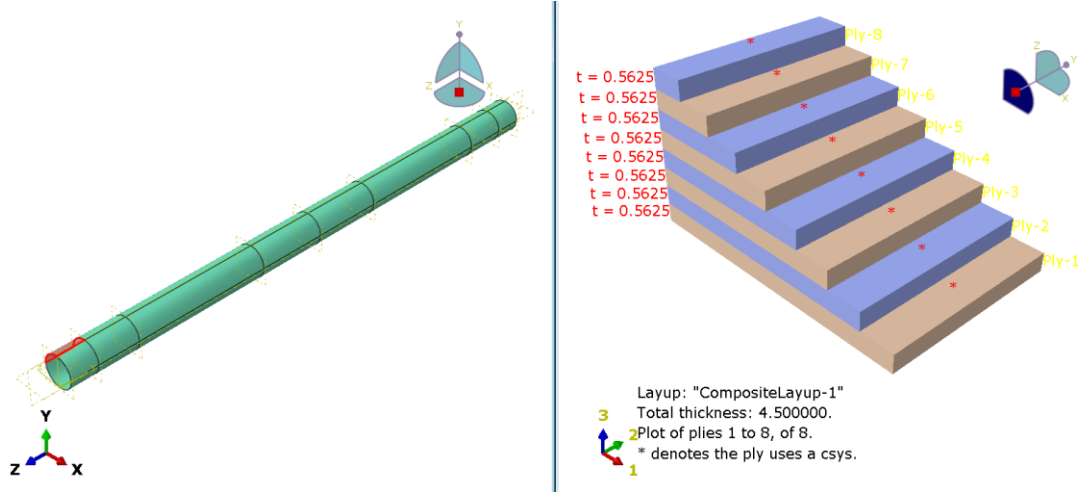
$\sigma_L^{f,t}$	$\sigma_L^{f,c}$	$\sigma_T^{f,t}$	$\sigma_T^{f,c}$	T_{LT}^f
2500	2000	50	150	50

Lif ve matrisin kırılma enerjileri Tablo 3.6.’de verilmiştir (ABAQUS V.6.6 Documentation).

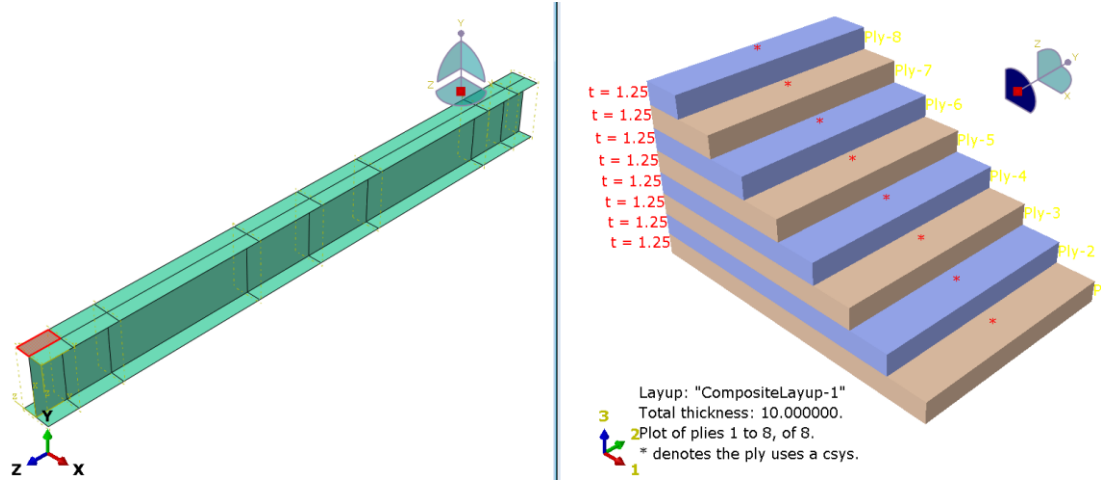
Tablo 3.6. GFRP Malzemenin Lif ve Matris Özelliklerinin Tanımlanması

G_f (N/mm)	G_m (N/mm)
12,5	1,0

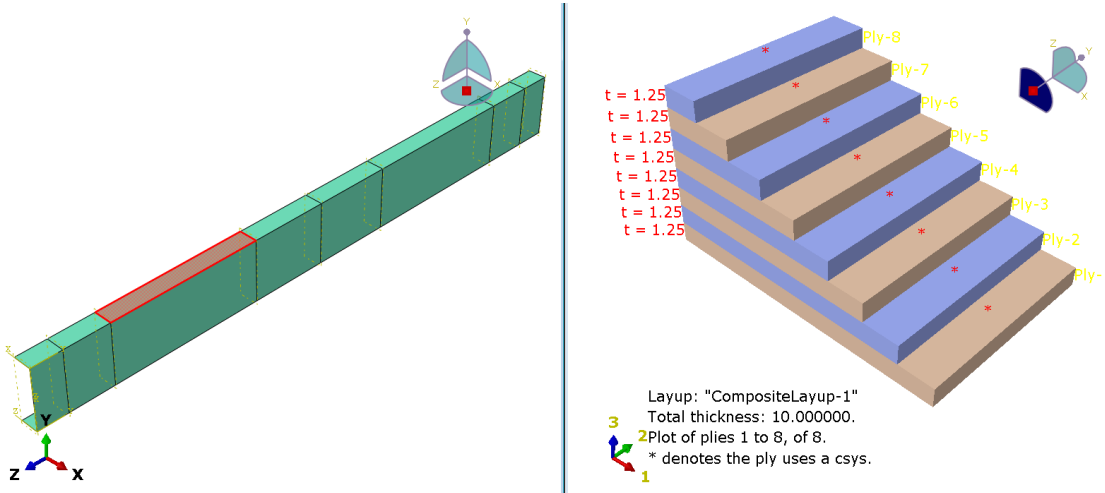
Katmanları birleştirmek için 0,001 m kalınlığında bir katman arayüz kullanılmıştır. Katmanlar arası delaminasyonu simüle etmek için arayüz katmanları yapışkan unsurlar olarak modellenmiştir. Elyaf takviyeli epoksi katmanlar için dikkate alınan birincil model Abaqus programında mevcut olan elyaf takviyeli kompozitler için yerleşik hasar modeline dayanmaktadır (ABAQUS V.6.6 Documentation). Katman kalınlığı, seçilen profil kalınlığına göre değişmekte olup lif dizilim yönelimi [0/-45/90/45/90/-45/0] şeklindedir ve Şekil 3.19.’da Abaqus programında katmanlar ve yönlerinin gösterimi yer almaktadır. Şekil 3.20’de kutu profilin, Şekil 3.21.’de boru profilin, Şekil 3.22.’de I profilin ve Şekil 3.23.’de U profilin lif katman dizilimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Boru Profil GFRP Malzeme Katman Dizilim Gösterimi



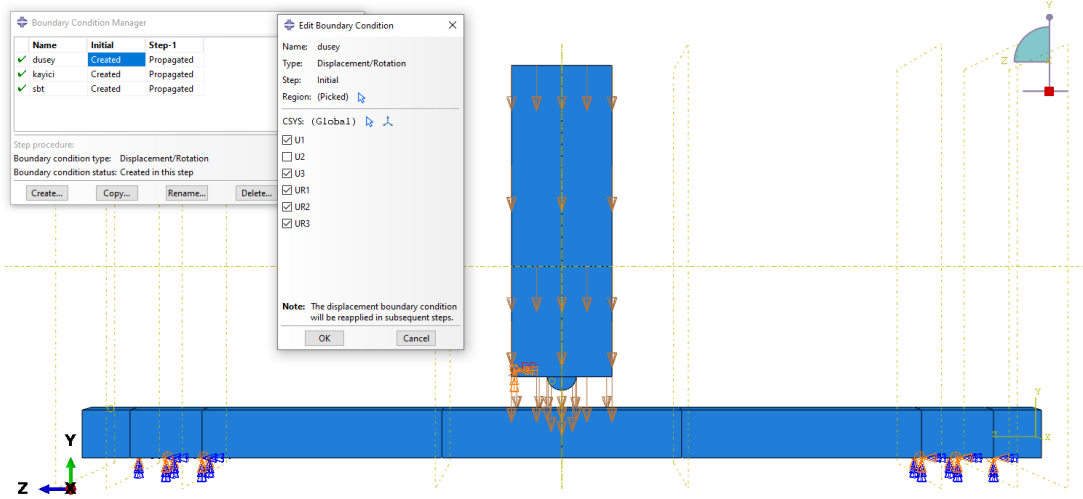
Şekil 3.22. I Profil GFRP Malzeme Katman Dizilim Gösterimi



Şekil 3.23. U Profil GFRP Malzeme Katman Dizilim Gösterimi

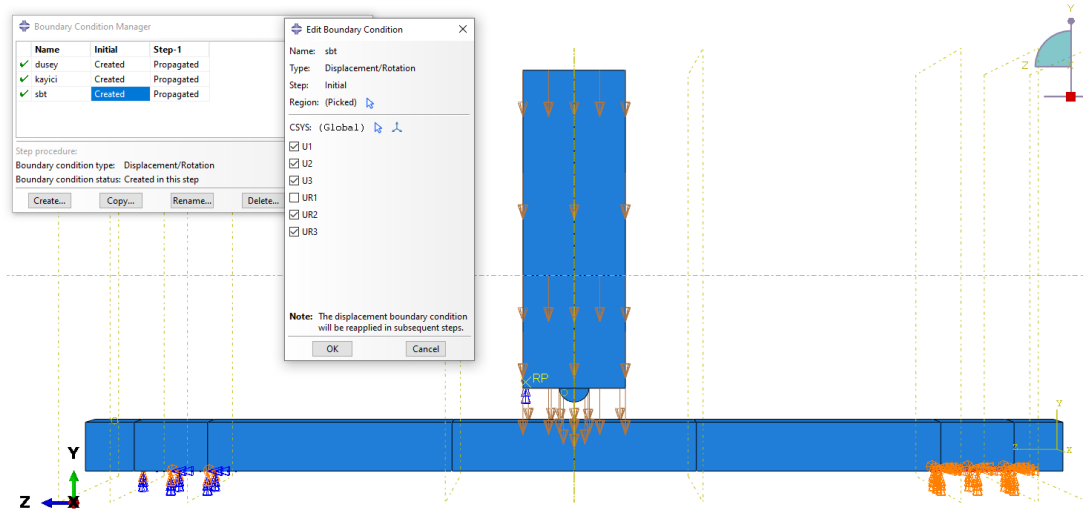
3.5.3. Yükleme ve sınır şartlarının belirlenmesi

Darbe cismi sadece y eksenı yönünde hareket edecek şekilde tutulmuştur. Darbe cisminde serbest düşme hareketi yaptırılmıştır. Şekil 3.24.'de rijit cismin mesnet tanımlaması görülmektedir.



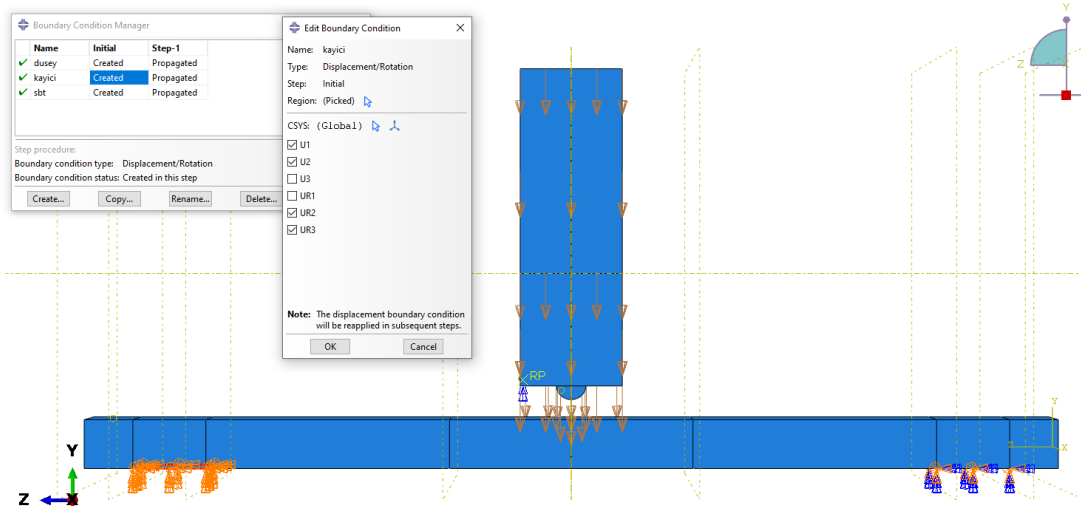
Şekil 3.24. Darbe Cisminin Mesnet Tanımlaması

Dört profil için de mesnet tanımlaması profilin sağ tarafında sabit mesnet, sol tarafında kayıcı mesnet olacak şekilde tanımlanmıştır. Şekil 3.25.'de Abaqus programında sabit mesnet tanımlaması, Şekil 3.26.'da kayıcı mesnet tanımlaması gösterilmiştir.



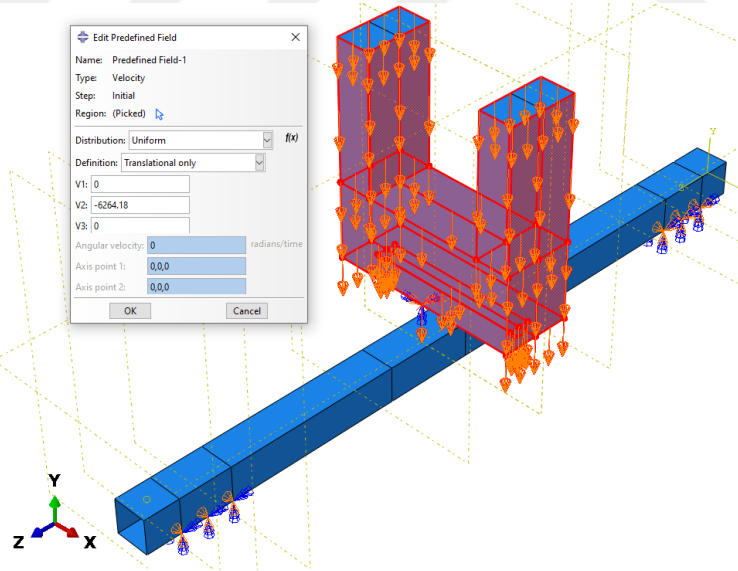
Şekil 3.25. Profillerin Sabit Mesnet Tanımlaması

Sabit mesnet, yatay ve düşey doğrultuda hareket etmesi engellenmiş dönme serbestliği olan mesnet türleridir. Kayıcı mesnet, sadece düşey yönde hareketi kısıtlanmış, yatay yönde yerdeğiştirme yapabilen dönme serbestliği olan mesnet türleridir. Mesnetler kısıtlandıkları yönde mesnet reaksiyonu oluştururlar.

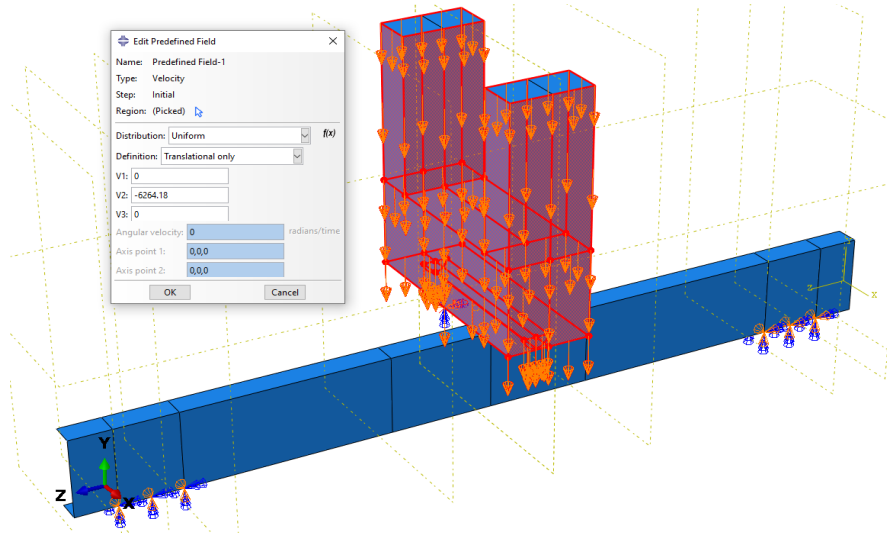


Şekil 3.26. Profillerin Kayıcı Mesnet Tanımlaması

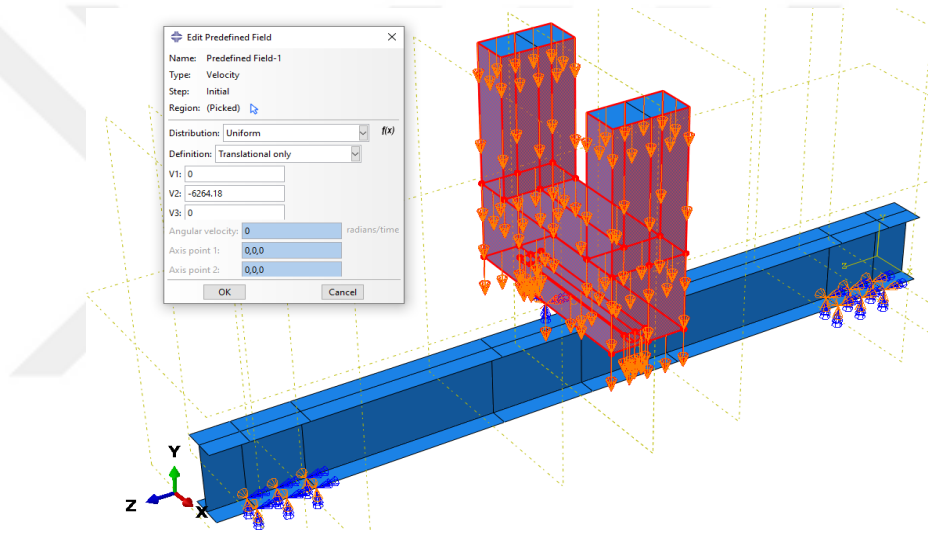
Darbe cisminin profil üzerine serbest düşme yaptırılması, belirli bir hız tanımlaması yapılarak y eksenini boyunca hareket ettirilerek sağlanmıştır. 2000 mm yükseklikten 0,075 ton ağırlığındaki rijit cismin serbest düşme hareketi tanımlaması abaqus programında, predefined field manager komutuyla düşey doğrultuda Şekil 3.27.'de kutu profil, Şekil 3.28.'de U profil, Şekil 3.29.'da I profil ve Şekil 3.30.'da boru profil üzerine 6264.18 mm/sn hız verilerek sağlanmıştır.



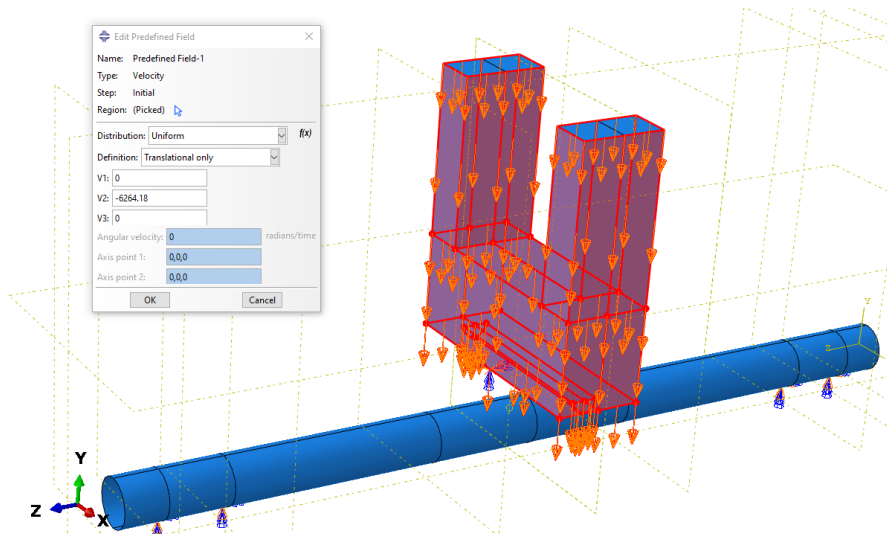
Şekil 3.27. Kutu Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması



Şekil 3.28. U Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması



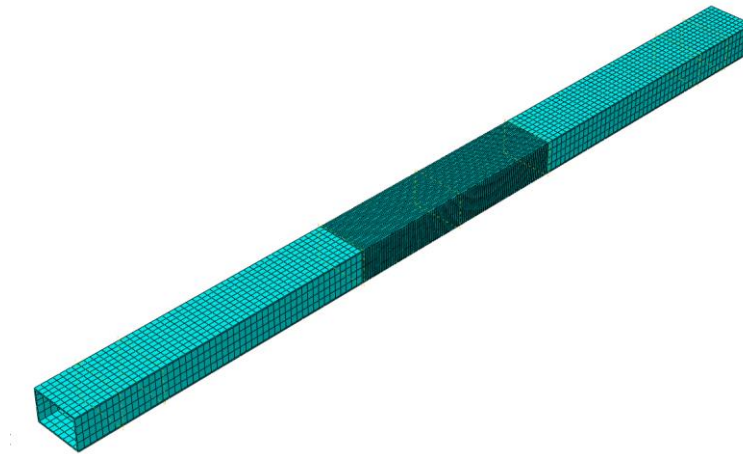
Şekil 3.29. I Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması



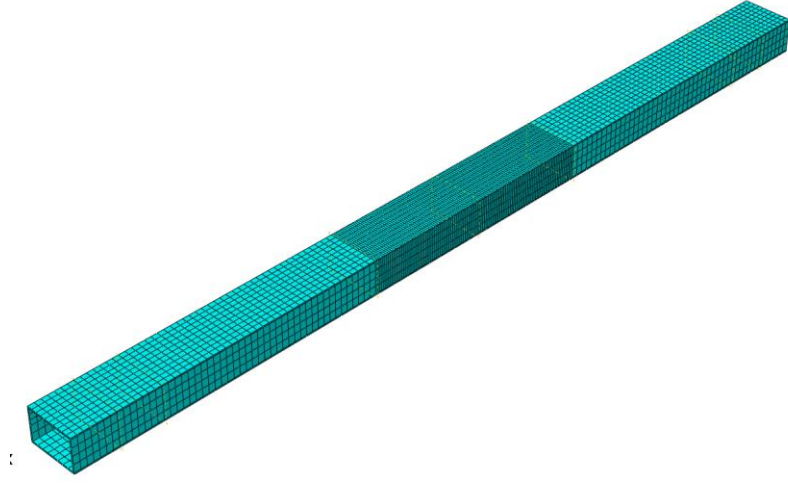
Şekil 3.30. Boru Profile Darbe Cismi Serbest Düşme Tanımlanması

3.6. Sonlu Eleman Ağ Sıklığı

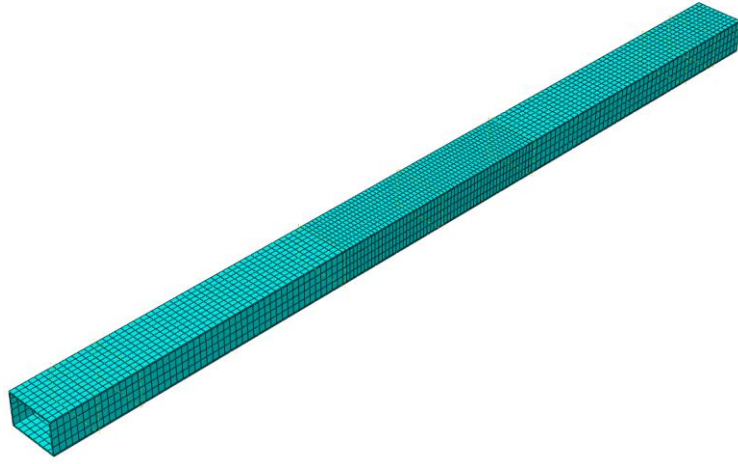
Model oluşturulduktan sonra daha küçük parçalara ayrılması işlemine mesh işlemi denir. Mesh işlemi ile ayırdığımız küçük parçalara eleman, elemanların köşe noktalarına düğüm noktası adı verilmektedir. Elemanlar ve düğüm noktaları üzerinden hesaplamalar yapılmakta ve bütün modele etki ettirilmektedir. Geometrik modele mesh işlemi yapıldıktan sonra yapılan yüklemeler ve alınan hesap sonuçları elemanlar ve düğüm noktaları üzerinden olmaktadır. Mesh işlemi yapılırken eleman tipi ve boyutuna karar vermek yapılan hesaplamayı etkilemektedir. Doğru sonuca ulaşmak için uygun küçüklükte elemanlar kullanılmalıdır. Eleman sayısının artması yapılan hesaplama işlemini karmaşık hale getireceği için çok fazla sayıda kullanmaktan kaçınılmaktadır. Optimum boyutta ve sayıda elemanlara bölünen geometrik model ile en doğru sonuca ulaşılabilir. Oluşturulan modelde yük uygulanan bölge bütün modele göre daha küçük sonlu elemanlara ayrılabilir. Bu sayede yeterli küçük eleman kullanılabilir, aynı zamanda modelin karmaşıklığı artmaz ve analiz işlemi daha kısa sürede tamamlanabilir (Bilgisayar Destekli Tasarım Ve Analiz-Ansys). Bu çalışmada sonlu eleman boyutları modellenen profil ve rijit cisimde 15x15 birim, profilin orta bölgesinde 5x5 birim mesh ağına sahiptir. Mesh aralıkları darbe kuvvetinin daha fazla etkili olduğu kısımda Şekil 3.31’de gösterilen 3x3 birim, Şekil 3.32.’de gösterilen 5x5 birim, 3.33.’de gösterilen 10x10 birim, 3.34.’de gösterilen 15x15 birim olarak farklı ağ sıklığında yapılmıştır. Deneylere en yakın sonucu veren orta bölge 5x5 birimlik, kenar bölgelerde 15x15 birimlik sonlu eleman sıklığı ile sağlanmıştır. Mesh aralıkları bilgisayar kapasitesi ve modelleme hassasiyeti dikkate alınarak belirlenmiştir.



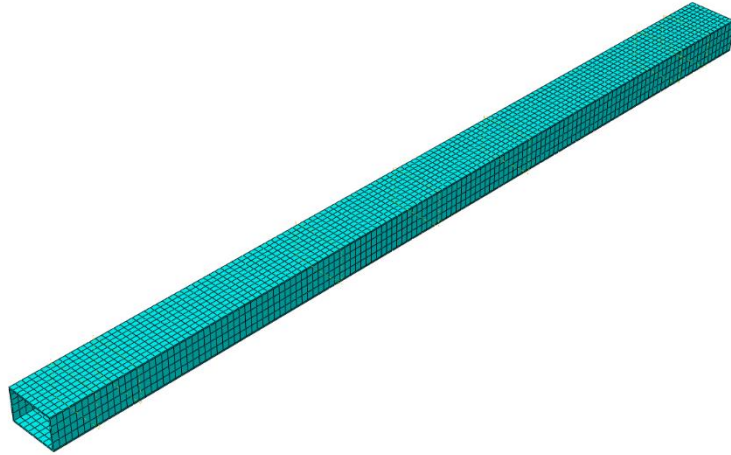
Şekil 3.31. 3x3 Sonlu Eleman Ağ Sıklığı



Şekil 3.32. 5x5 Birim Sonlu Eleman Ağ Sıklığı

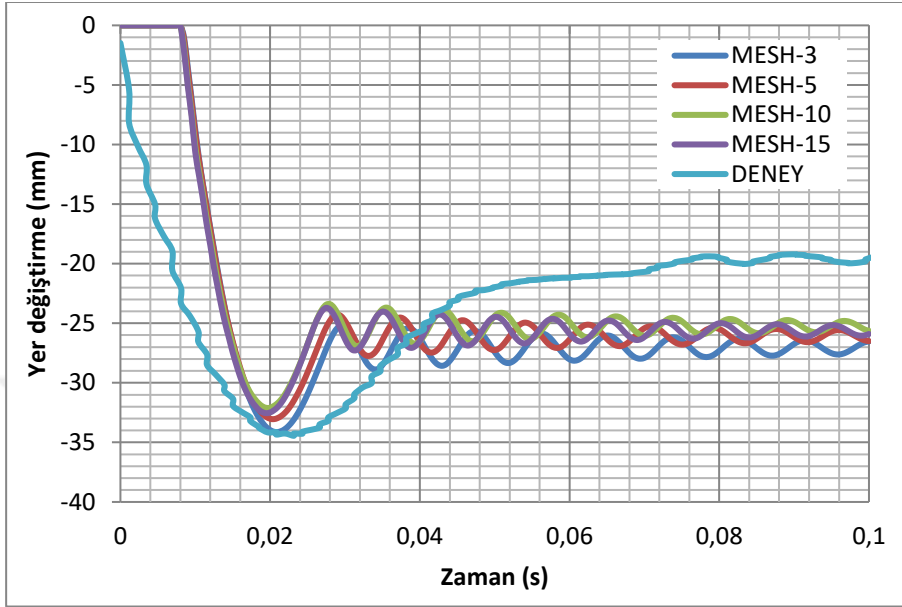


Şekil 3.33. 10x10 Birim Sonlu Eleman Ağ Sıklığı

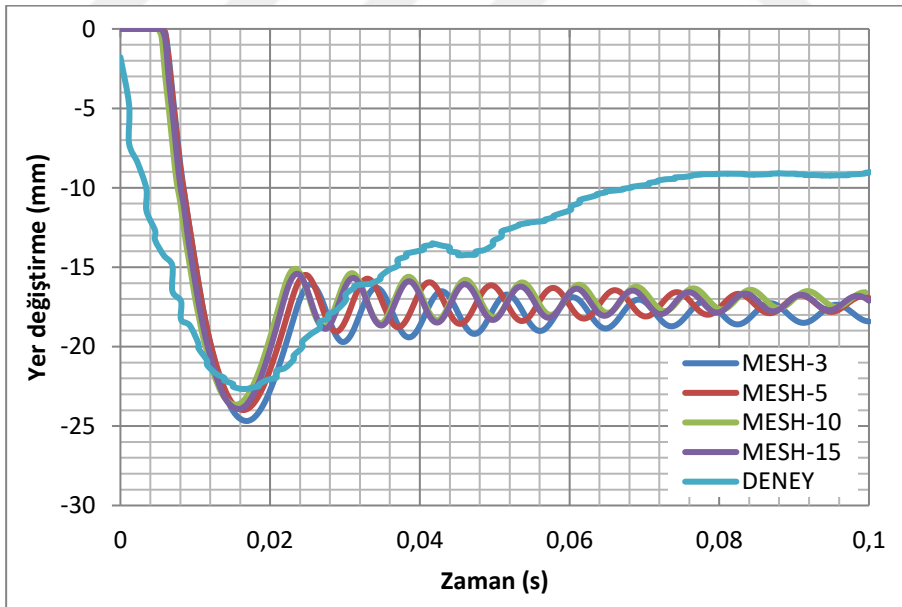


Şekil 3.34. 15x15 Birim Sonlu Eleman Ağ Sıklığı

Farklı mesh aralıklarıyla yapılan profilin darbe yükü altındaki davranışı analizi modellemesi sonucu elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği ile yapılan deney sonucunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği karşılaştırılması Şekil 3.35. ve Şekil 3.36’da verilmiştir.



Şekil 3.35. SPC#C1-Farklı Boyutlardaki Sonlu Eleman Ağ Sıklığının ve Deney Yerdeğiştirme-Zaman Grafiği (Nasery,2020)

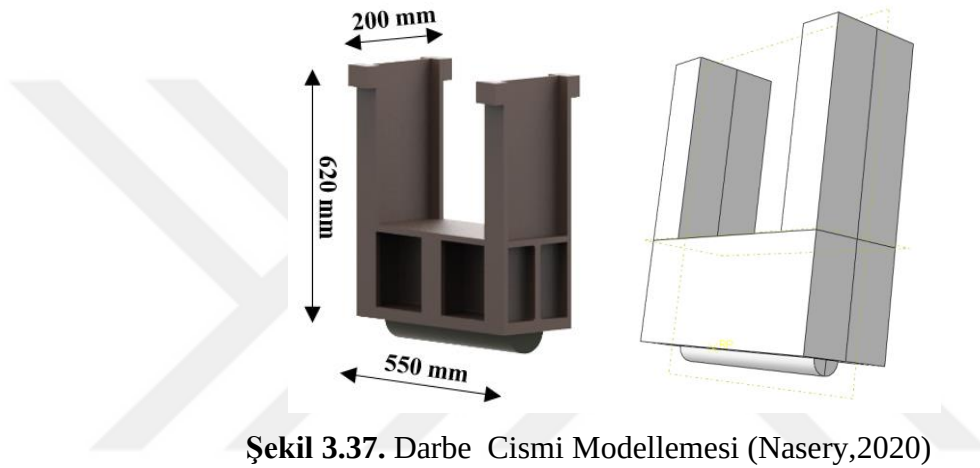


Şekil 3.36. SPC#C2-Farklı Boyutlardaki Sonlu Eleman Ağ Sıklığının ve Deney Yerdeğiştirme-Zaman Grafiği (Nasery,2020)

3.7. Analiz Adımları Sıralaması

3.7.1. Cisimlerin geometrik modellemesinin yapılması

Abaqus programı 'Part' bölümünde modelleme yapılmaya başlanmıştır. Rijit darbe cismi; yeni part oluşturma seçeneği ile 3D/Discreterigid/shell/extrusion komutları seçilerek 620*550*200 boyutlarında Şekil 3.37.'de gösterilen şekilde oluşturulmuştur. Abaqus programı tools seçeneğinden darbe cismine referans noktası ataması yapılmıştır. Part bölümü inertias alt başlığından rijit cismin referans noktasına cismin kütlesi 0,075 ton olarak atanmıştır. İkinci bir part oluşturma ile seçilen profil boyutları deformable/shell/extrusion komutları seçilerek oluşturulmuştur.

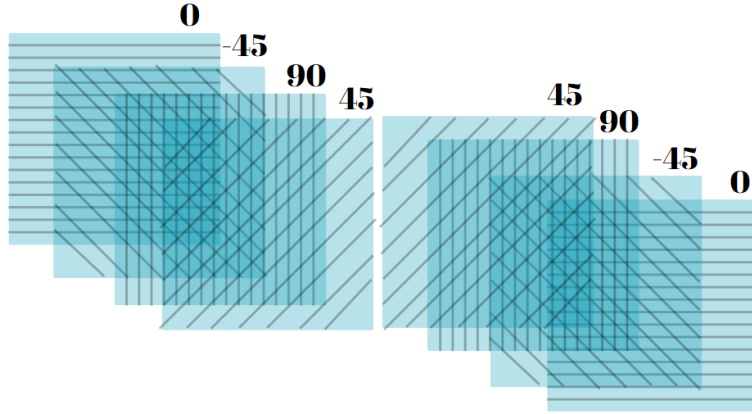


Şekil 3.37. Darbe Cismi Modellemesi (Nasery,2020)

3.8. Kullanılacak Malzemelerin Oluşturulması

Malzeme bilgileri Abaqus programında 'Materials' bölümündengirilmektedir. Bu çalışmada iki tür malzeme tanımlaması yapılmış olup çelik malzeme ve cam fiber takviyeli plastik malzeme olmak üzere başlıklandırılmıştır. Çelik malzeme için yoğunluk, elastik ve plastik malzeme özellikleri tanımlaması yapılmıştır. Elastik malzeme tanımlaması young's modülü ve poisson oranı ile, plastik malzeme tanımlaması akma noktası ve şekil değiştirme noktalarının belirtilmesi ile yapılmıştır. Cam fiber takviyeli kompozit malzeme için yoğunluk, elastik malzeme ve hasar başlatma kriterleri, hasar başladıktan sonra yayılımı için tanımlamalar yapılmıştır. Malzeme modellerini tanımlamak için gerekli sayısal veriler analiz modelleri malzeme tanımlanması başlığı altında verilmiştir. Çelik malzeme için, malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra createsection seçeneği ile çelik malzemesi ve profil kalınlığı geometrik modele atanmıştır. Cam fiber takviyeli kompozit malzeme için, create composite layup seçeneği ile farklı doğrultulara ait katmanlar [0/-45/90/45/45/90/-

45/0], katman kalınlığı da girilerek sekiz katman halinde Şekil 3.38'deki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.38. GFRP Malzemesi Lif Katman Doğrultuları

3.8.1. Oluşturulan modellerin birleştirilmesi

Modeller Abaqus programı 'Assembly' bölümünde bir araya getirilmektedir. Assembly bölümü Abaqus programının hazırlanan bütün geometrik modellerinin birleştirildiği, çalışma modelinin yerleşim düzeninin oluşturulduğu bölümdür. CreateInstance komutu ile geometrik modeller assembly ekranına taşınmakta ve burada yüklemelere maruz bırakılmaktadır.

3.8.2. Analizin adımlarının belirlenmesi

Analiz tercihleri Abaqus programı 'Step' bölümü aracılığıyla seçilmektedir. Step seçeneği ile yaptığımız analizin devam edeceği süreyi ve yapmak istediğimiz analizin türünü belirlemekteyiz. Cam elyaf takviyeli kompozit profillerin darbe yükü etkisi altındaki davranışının analizini yaptığımız bu çalışmada Dynamic, Explicit analiz türü seçilmiştir. Bu adımda yaptığımız analizden elde etmek istediğimiz verileri de seçebilmekteyiz. Rijit cismin profile çarptığı noktada oluşan yer değiştirme değeri, profilin serbestliğini kısıtlayan mesnetlerde oluşan tepki kuvvetleri gibi istediğimiz sonuçları History Output seçeneği ile alabilmekteyiz.

3.8.3. Geometrik modellerinin etkileşiminin belirlenmesi

'Interaction' modellemenin etkileşiminin girildiği bölümdür. Oluşturulan darbe deneyi analizinde istenilen rijit cismin profile çarptıktan sonra aynı yönde geri dönmesidir. Bu nedenle iki cismin nasıl etkileşim göstereceğini Abaqus üzerinden tanımlamak gerekmektedir. İki cisim arasında bir sürtünme katsayısı değeri belirtildi ve hard-

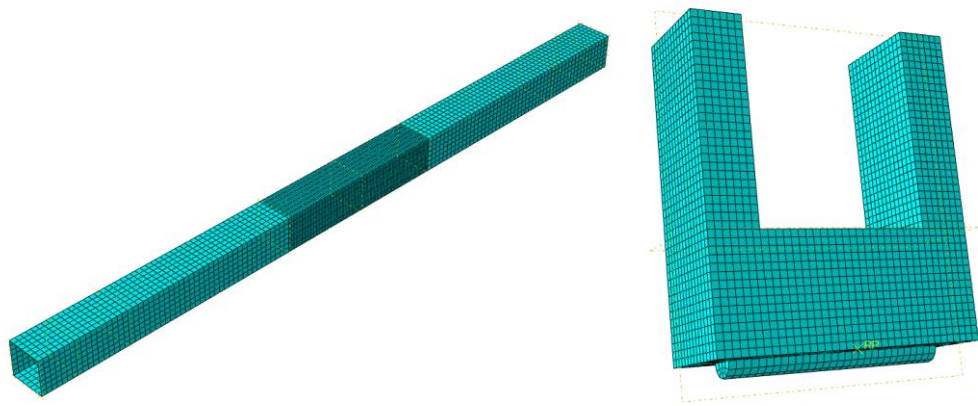
contact komutu ile rijit cismin profile sert teması yani içine girmeden çarpıp geri dönme davranışı tanımlanmıştır.

3.8.4. Modele gelen yüklerin belirlenmesi

‘Load’ bölümünde öncelikle profilin sınır koşulları belirlenmiştir. Profilin bir tarafı sabit mesnet olacak, diğer tarafı kayıcı mesnet olacak şekilde tutulmuştur. Darbe cisminin referans noktasına sadece düşey yönde hareket edebileceği şekilde mesnet ataması yapılmıştır. Serbest düşme yapacak olan rijit cisme yerçekimi yönünde belirli bir hız tanımlaması Predefined Field komutu ile yapılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında tekrarlı darbe analizi yapabilmek için yine Predefined Field komutu kullanılmıştır. İlk darbenin sonucu oluşan kalıcı deformasyon tanımlanarak sonraki darbe çarpması ile modelde meydana gelen değişimleri Predefined Field komutunu kullanarak görebilmekteyiz.

3.8.5. modele uygulanan sonlu elemanlar sıklığının belirlenmesi

Oluşturulan modelleri çözümleyebilmek için küçük parçalara ayırma işlemine mesh işlemi denilmektedir. Optimum mesh boyutu analizin en doğru sonuca ulaşmasını sağlamaktadır. Öncelikle mesh işleminde eleman tipini shell ve analiz türünü explicit olarak seçmekteyiz. Profil ve darbe cismi elemanları için sonlu eleman ağ sıklığı 15x15 birim seçilmiştir. Darbe cisminin profile çarptığı orta bölgede sonlu eleman ağ sıklığı 5x5 birim olarak ayarlanmıştır ve Şekil 3.39.’da geometrik modeller üzerinde mesh boyutları görülmektedir.



Şekil 3.39. Geometrik Modellerin Mesh Boyutu Seçimi

3.8.6. Modellemenin Sonuçlarını Alma

‘Visualization’ bölümü oluşturulan modelin analizi sonrasında her aşamasının sonucunun incelenebildiği kısımdır. Yapılan analizlerin simülasyonları bu bölümde

yapılabilmekte, oluşan gerilmeler modeller üzerinden görülebilmektedir. Elde edilmek istenen sonuçların, grafiklerin, maksimum veya minimum değerlerin incelenebildiği bölüm olup, elde edilen sonuçlar çalışmanın bulgular başlığı altında verilmiştir.

3.9. Doğrulama Çalışması

Sonlu elemanlar yöntemi çalışmasının doğruluğunu kontrol etmek için “Experimental and Numerical Analysis of Impactor Geometric Shape Effects on Steel Beams under Impact loading” makalesi ile doğrulama çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada darbe yükü şeklinin darbe davranışına etkisi araştırılmıştır. Makalede düşen ağırlığın kafa geometrisi dikdörtgen, dairesel ve üçgen olmak üzere üç farklı tipten oluşmaktadır. Doğrulama çalışması için düşen ağırlığın dairesel olanı seçilmiş, 1400 mm ve 2000 mm olmak üzere iki farklı düşme yüksekliğinden profilin zayıf ekseninde analiz gerçekleştirilmiştir. Darbe cisminin ağırlığı sabit tutularak profilin üzerine serbest düşme yaptırılmıştır. Çalışmanın doğruluğunu kontrol etmek için yer değiştirme, reaksiyon kuvvetleri ve gerilme dağılımı parametreleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada 120x80x3mm kesit ölçülerinde toplam uzunluğu 2000 mm, kalitesi S275 JR olan çelik profil kullanılmıştır. Analiz için kullanılan profil malzeme girdileri Tablo 3.7.’de gösterilmiştir (Nasery, 2020).

Tablo 3.7. Doğrulama Çalışması Malzeme Özellikleri (Nasery, 2020)

Malzeme özellikleri	
Yield stress(MPa)	277,61
Tensile stress (MPa)	491,71
ElasticModulus (GPa)	178,450
Density (g/cm ³)	7,85
Poisson Oranı	0,3
Darbe ağırlığı (kN)	0,75

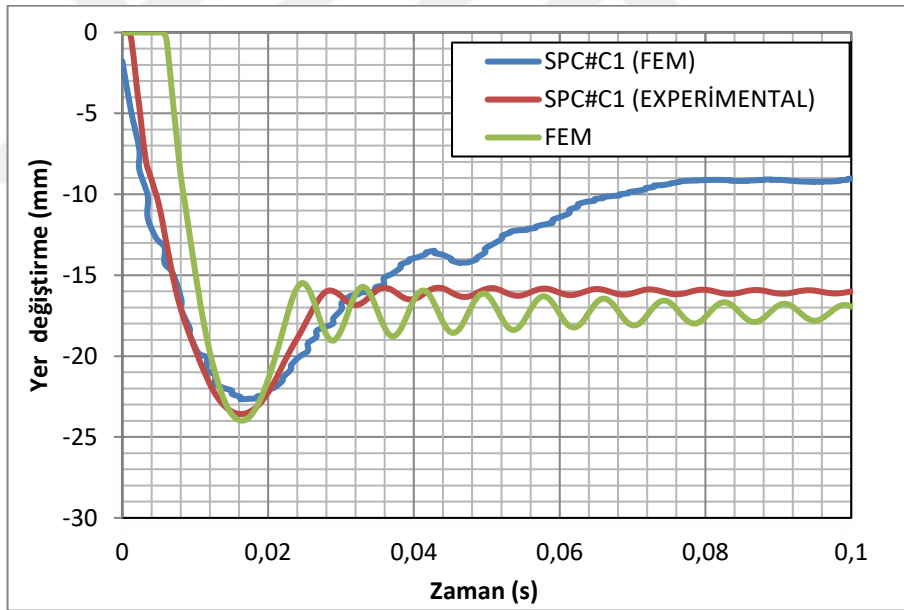
Abaqus/Explicit yazılım uygulaması doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yapmak için kullanılmıştır. Modelleme sürecinde çelik parça için sekiz düğümlü azaltılmış entegrasyonlu C3D8R tipi eleman kullanılmıştır. Çarpma tertibatı rijit gövde olarak modellenmiştir ve eleman C3D8R'dir. Bu çalışmada, çarpma yükü analizi sırasında, çarpma tertibatı ile çelik kiriş arasındaki temas için normal davranış ve teğetsel

davranış atanmıştır. Sert temas davranışında çarpma tertibatı ile çelik kiriş arasındaki sürtünme katsayısı $\mu_f=0,3$ olarak atanmıştır (Nasery,2020).

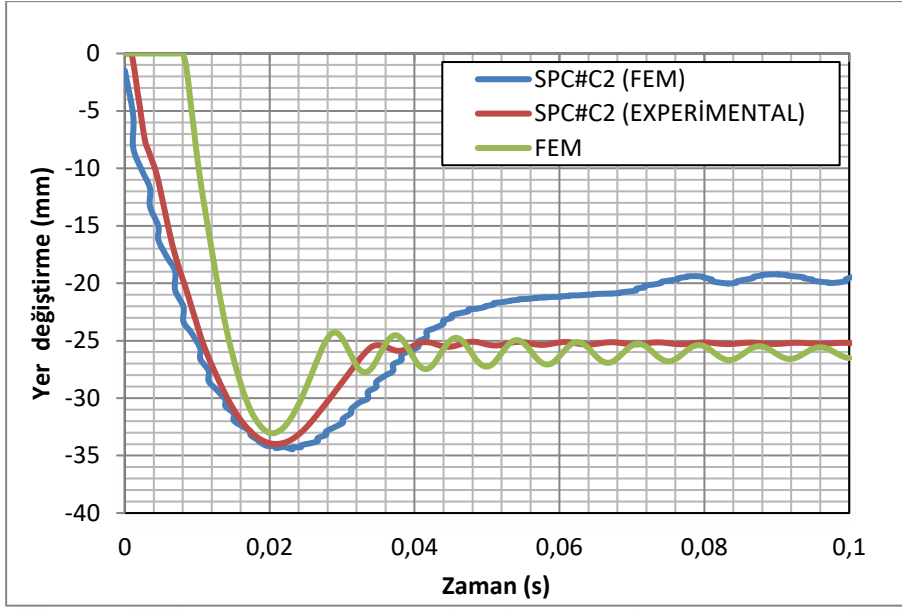
Tablo 3.8. Doğrulama Çalışması Analiz Sonuçları (Nasery,2020)

Model Adı	Yer Değiştirme Değeri Makale	Yer Değiştirme Değeri Denesel	Yerdeğiştirme Değeri Çalışma	Dif(%)
SPC#C1 - Circular	23,58	22,66	23,98	%5,82
SPC#C2 - Circular	33,99	34,45	33,04	%4,09

Doğrulama çalışması sonuçları Tablo 3.8.'de verilmiştir. Doğrulama çalışması kapsamında yapılan analiz sonucu gözlenen yer değiştirme davranışı ile deneysel çalışma sonucu gözlenen yer değiştirme davranışı benzerliği Şekil 3.40. ve Şekil 3.41.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Doğrulama Çalışması SPC#C1 Yer Değiştirme Sonuçları Karşılaştırması (Nasery,2020)



şekil 3.41. Doğrulama Çalışması SPC#C2 Yer Değiştirme Sonuçları Karşılaştırması (Nasery,2020)

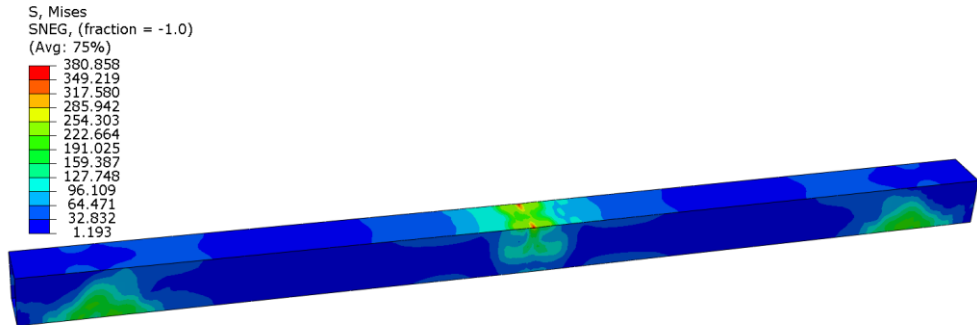
4. BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu araştırma, seçilen dört profil üzerine gerçekleştirilen darbe deney analizi sonuçları ile çelik profil ve GFRP profil karşılaştırmasını mümkün kılacak önemli bulgular sağlamıştır. Profillerin davranışlarını gözlemlemek amacıyla rijit bir cismin 2000 mm yükseklikten serbest düşmesi sağlanmıştır. Profil analizleri, Abaqus programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş, bu analiz sonuçları çerçevesinde profillerde meydana gelen yer değiştirme, mesnet reaksiyonu ve ivme değerleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca oluşan Von Mises, maksimum çekme gerilmesi, y eksenini boyunca oluşan asal gerilmeler (S11) ve kayma gerilmeleride (S12) dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Darbe analizi sonuçları, çelik profiller ile GFRP kompozit profiller arasında karşılaştırmalı bir değerlendirme için kullanılmıştır. Bu sayede GFRP profillerin darbeye karşı tepkileri ve performansları daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılmıştır.

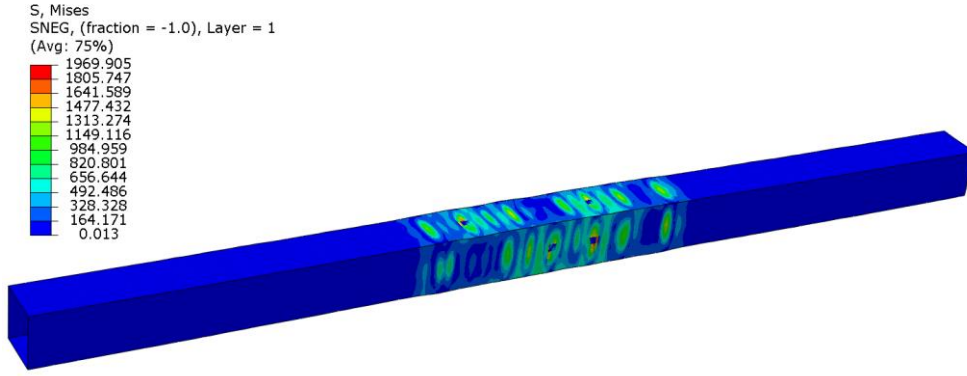
4.1. 100*100*10 Kutu Profil İncelemesi

4.1.1. Çelik kutu profil ve GFRP kutu profil gerilme dağılımları

Çelik kutu profilde ve GFRP kutu profilde oluşan Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de, oluşan maksimum çekme gerilmeleri Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de, y eksenindeki asal gerilme dağılımları Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da, analiz sonucu eleman bazında oluşan kayma gerilmeleri Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de gösterilmiştir.

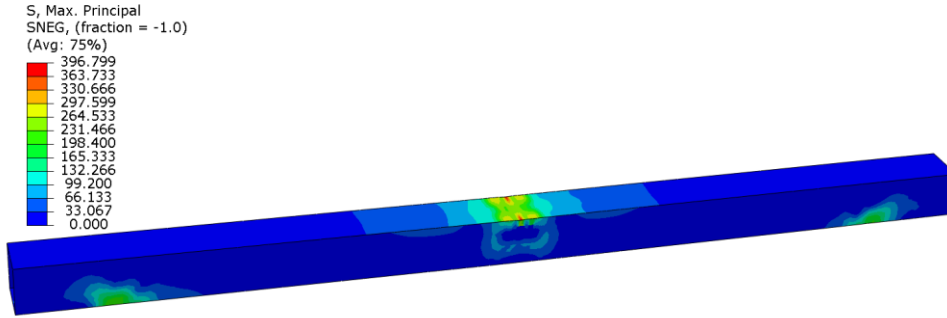


Şekil 4.1. Çelik Kutu Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

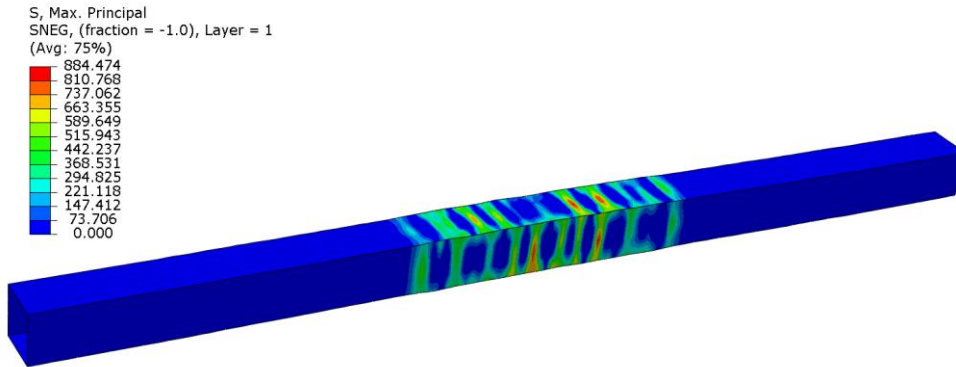


Şekil 4.2.GFRP Kutu Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

Von Mises gerilme sonuçlarına göre, çelik kutu profilinde maksimum 380,858 MPa, GFRP kutu profilinde 1969,905 MPa gerilme değerleri gözlemlenmektedir.

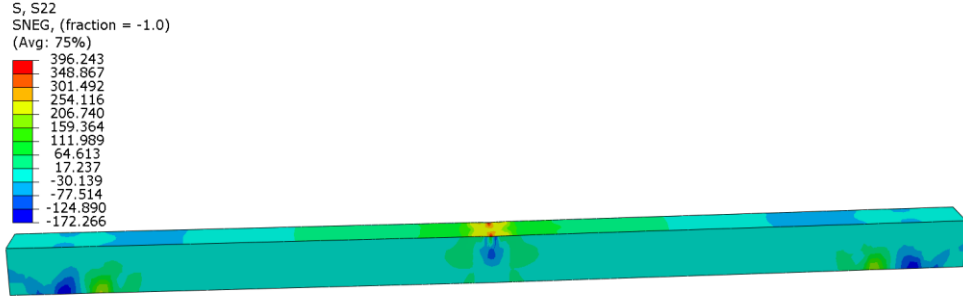


Şekil 4.3. Çelik Kutu Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

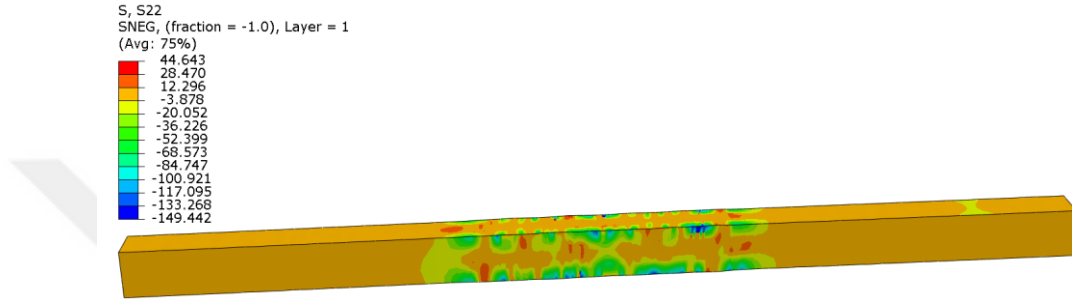


Şekil 4.4. GFRPKutu Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

Maksimum çekme gerilme sonuçlarına göre, çelik kutu profilinde 396,799 MPa ve GFRP kutu profilinde 884,474 MPa gerilme değerlerine ulaşılmıştır.

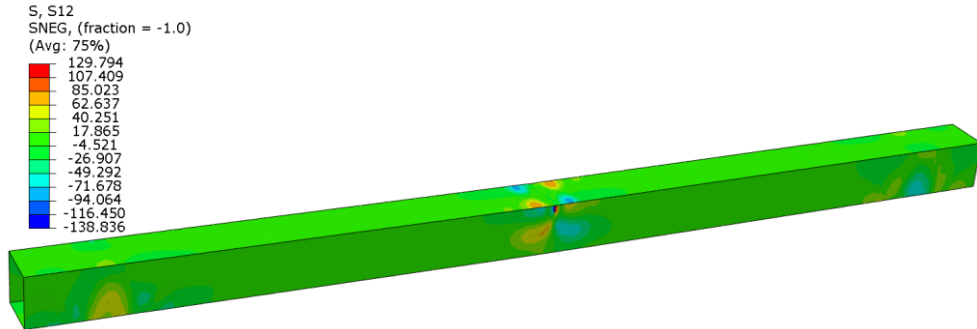


Şekil 4.5. Çelik Kutu Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

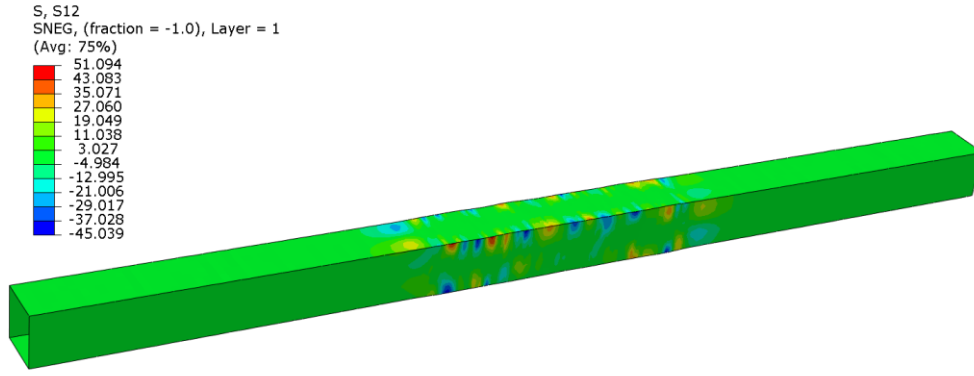


Şekil 4.6. GFRP Kutu Profil Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

Y ekseninde oluşan gerilme sonuçlarına göre, çelik kutu profilde maksimum 396,243 MPa ve GFRP kutu profilde 44,643 MPa gerilme değerleri bulunmuştur.



Şekil 4.7. Çelik Kutu Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

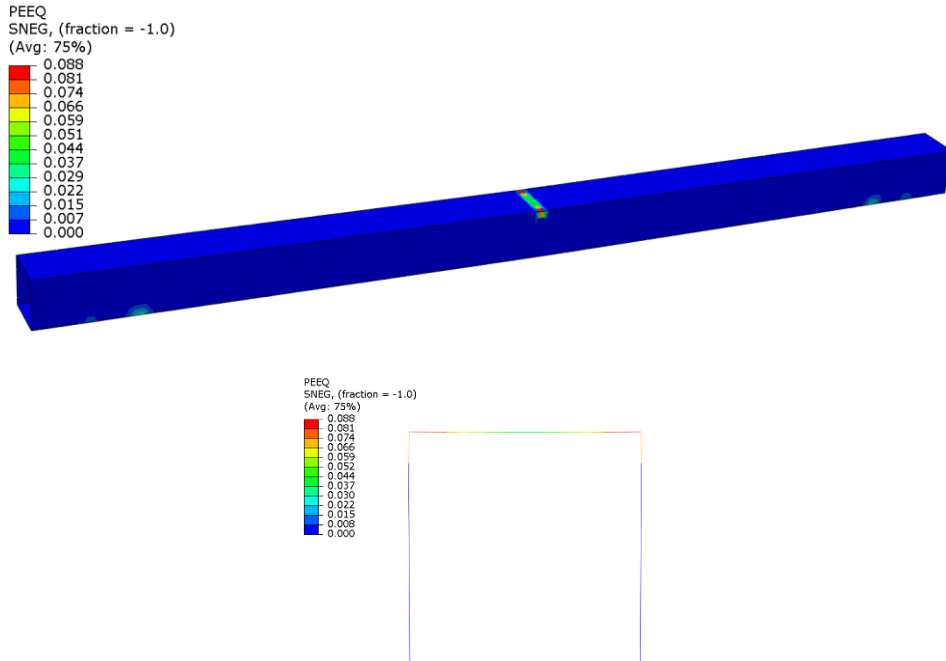


Şekil 4.8. GFRP Kutu Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

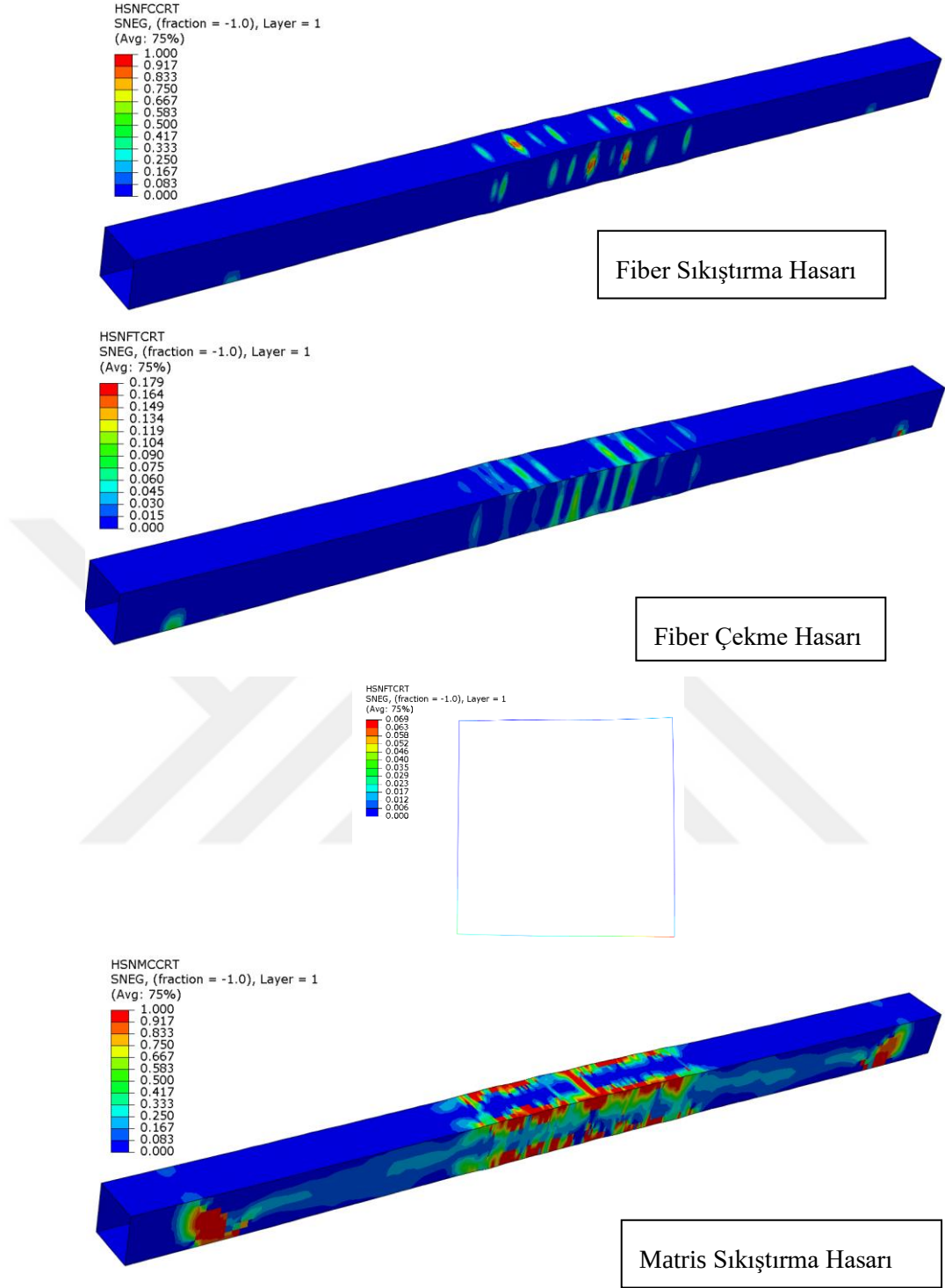
Kayma gerilmesi sonuçlarına göre, çelik kutu profilde maksimum 129,794 MPa ve GFRP kutu profilinde 51,094 MPa gerilme değerleri ortaya çıkmıştır.

4.1.2. Çelik kutu profil ve GFRP kutu profil plastik şekil değiştirme dağılımı

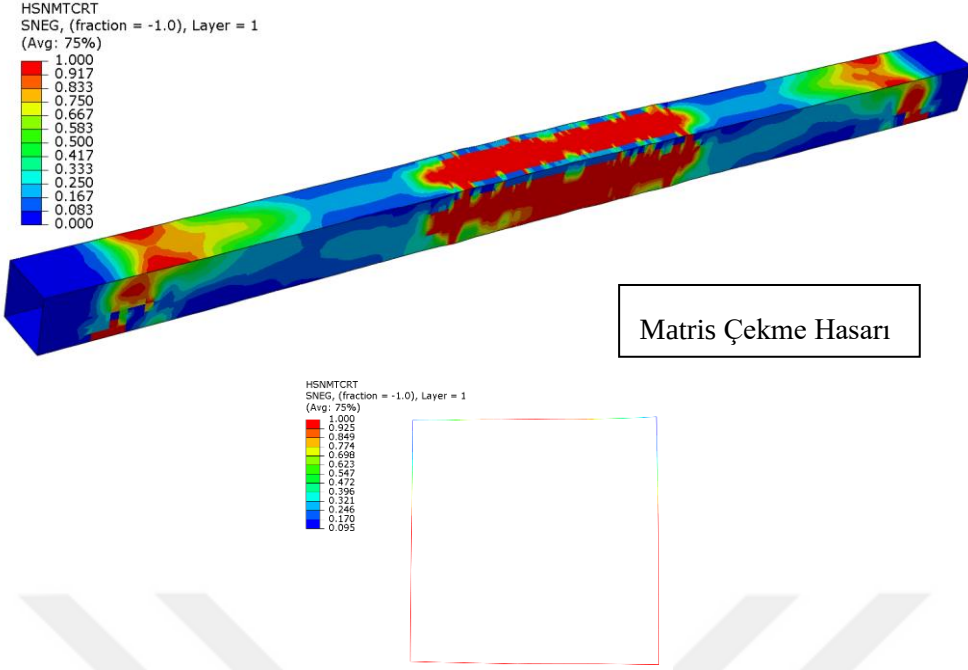
Darbe analizinin gerçekleşmesi sonucunda çelik kutu profilde ve GFRP kutu profilde oluşan plastik şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Çelik Kutu Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı



Şekil 4.10. GFRP Kutu Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımı



Şekil 4.10.(Devamı) GFRP Kutu Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımı

Çelik profilde plastik şekil değişirme dağılımı ile birlikte, GFRP kutu profilde fiber ve matris elemanları için çekme ve sıkıştırma hasar dağılımlarını gözlemleyebilmekteyiz. Rijit cismin profile çarpışması esnasında, çelik kutu profilde 8,21 mm, GFRP kutu profilde ise 25,04 mm yer değişirme meydana geldiği tespit edilmiştir. Darbenin sona ermesiyle birlikte, çelik kutu profil üzerinde kalıcı deformasyon olduğu gözlemlenirken, GFRP kutu profil üzerinde kalıcı deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu durum, Şekil 4.11' deki yer değişirme grafiğinde görülmektedir.

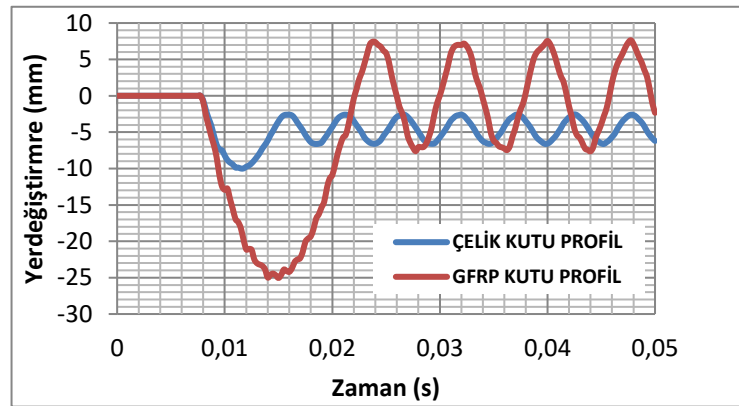
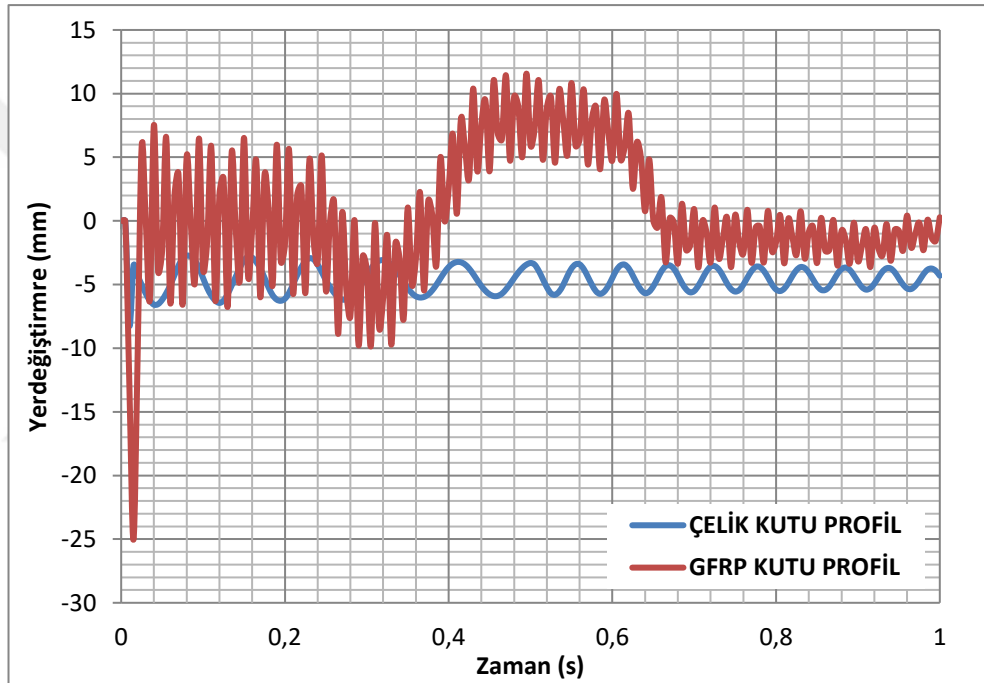
4.1.3. Çelik kutu profil ve GFRP kutu profil karşılaştırması

Yapılan analiz sonucunda profillerde oluşan maksimum yer değişirme, mesnet reaksiyonu ve ivme değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kutu Profil Analiz Sonuçları

	ÇELİK KUTU	GFRP KUTU
İVME (m/s ²)	10735,334	228555,856
YER DEĞİŞTİRME (mm)	8,21	25,04
MESNET REKSİYONU (kN)	264,766	57,508

Çelik kutu profil karşılaştığı darbe karşısında 8,21 mm yer değiştirme yaparken GFRP kutu profil 25,04 mm yer değiştirme yapmıştır. Çarpma sonrası GFRP kutu profilde kalıcı deformasyon gözlenmemiştir. Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi GFRP kutu profil darbe yükü ortadan kalktıktan sonra elastik davranış sergilemiştir. Çelik kutu profil maksimum yer değiştirme yaptıktan sonra profilde yaklaşık olarak 3-4 mm kalıcı deformasyon oluşmuştur. Aynı darbe yükü altında GFRP kutu profil elastik davranış sergilemiş, deplasman grafiği çelik malzemeye göre daha düzensiz seyretmiştir. Şekil 4.12.'de çelik kutu profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı, Şekil 4.13.'de GFRP kutu profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı yer almaktadır.



Şekil 4.11. Çelik-GFRP Kutu Profil Yer Değiştirme Grafiği

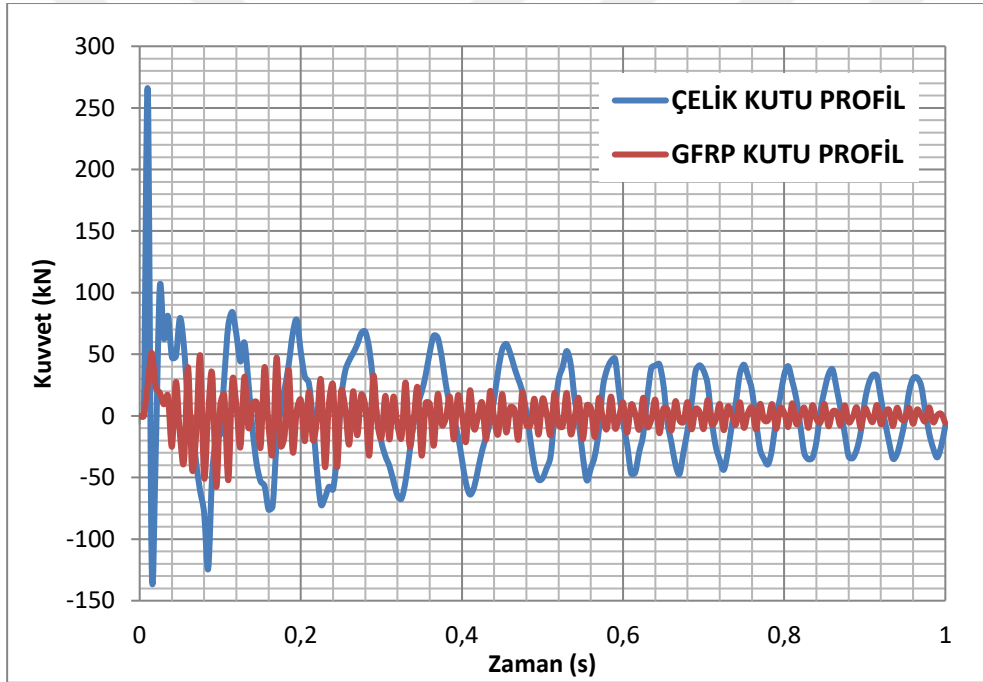


Şekil 4.12. Çelik Kutu Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı



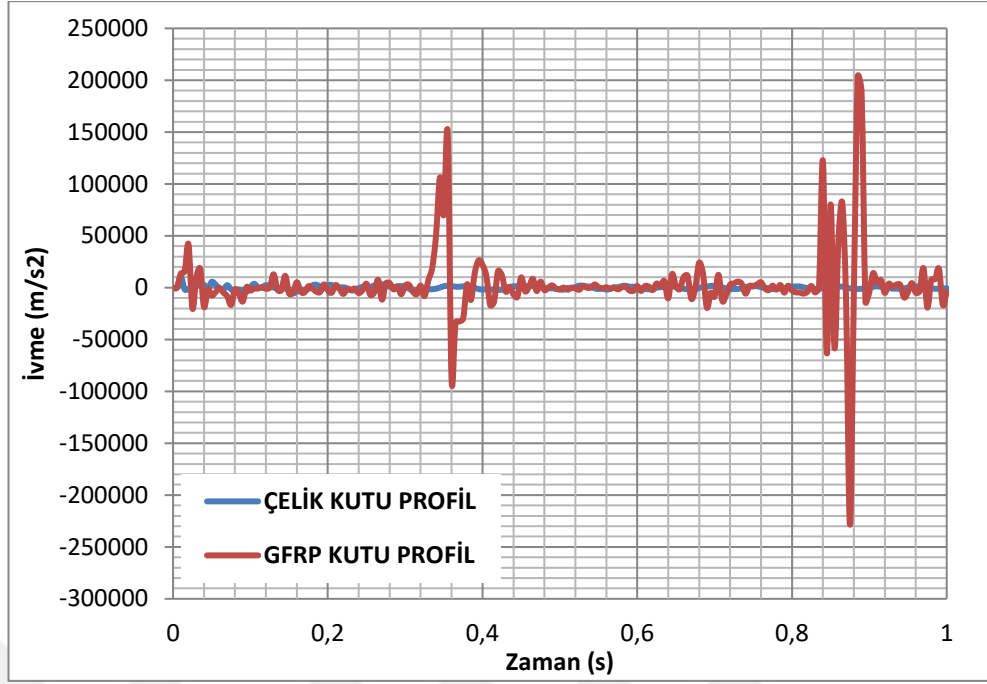
Şekil 4.13. GFRP Kutu Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı

Çelik kutu profilde darbe yükü sonucunda profilin sabit ve kayıcı mesnetlerinde 264,766 kN'luk reaksiyon kuvveti, GFRP kutu profil modelinde 57,508 kN'luk bir kuvvet oluşmuştur. GFRP kompozit malzemeden oluşan kutu profilde hesaplanan mesnet kuvvetleri çelik kutu profile göre daha küçük olup Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Çelik-GFRP Kutu Profil Mesnet Kuvveti Grafiği

Çelik kutu profilin ve GFRP kutu profilin orta noktasında meydana gelen ivme analizinin grafiği Şekil 4.15.'de verilmiştir. Çelik profilde maksimum ivme değerine darbe sonrası ulaşılmış ve $10735,334 \text{ m/s}^2$ değeri elde edilmiştir. GFRP profilde maksimum ivme değeri darbe yükü kalktıktan sonra ortaya çıkmış ve $228555,856 \text{ m/s}^2$ değeri elde edilmiştir.

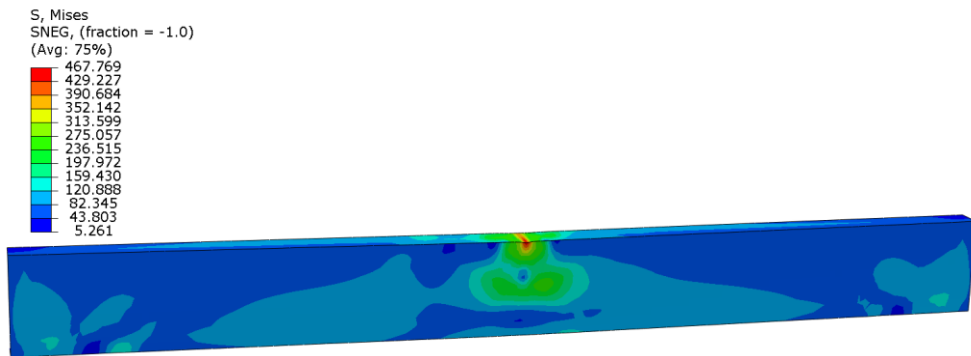


Şekil 4.15. Çelik-GFRP Kutu Profil İvme Grafiği

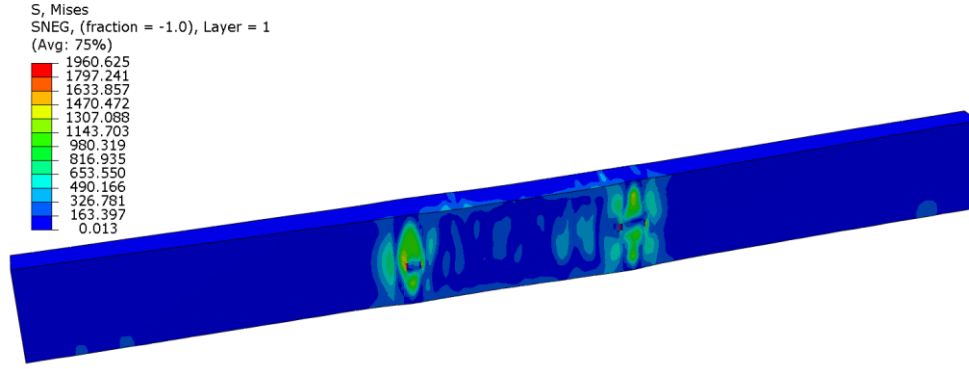
4.2. 200*60*10 U Profil İncelemesi

4.2.1. Çelik U profil ve GFRP U profil gerilme dağılımları

200*60 boyutlarında 10 mm kalınlığında modellenen çelik U profilde ve GFRP U profilde oluşan Von Mises gerilme dağılımları Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.'de, oluşan maksimum çekme gerilmeleri Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da, y eksenindeki asal gerilme dağılımları Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de, analiz sonucu eleman bazında oluşan kayma gerilmeleri Şekil 4.22. ve Şekil 4.23.'de gösterilmiştir.

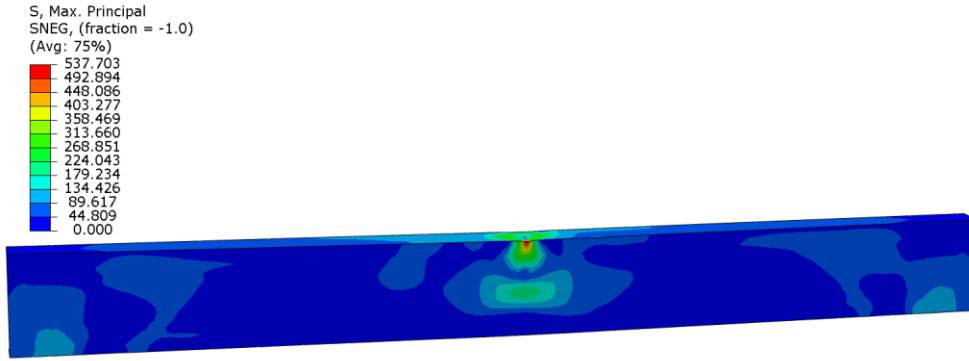


Şekil 4.16. Çelik U Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

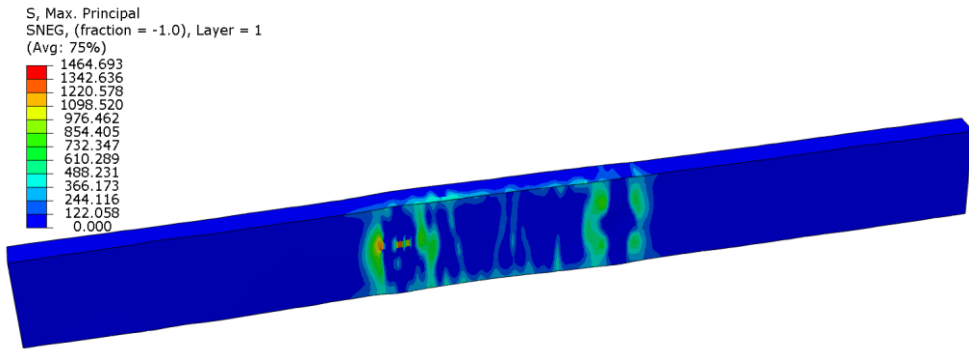


Şekil 4.17. GFRP U Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

Hesaplanan maksimum Von Mises gerilmesi, çelik U profilde 467,769 MPa iken, GFRP U profilde bu değer 1960,625 MPa olarak belirlenmiştir.

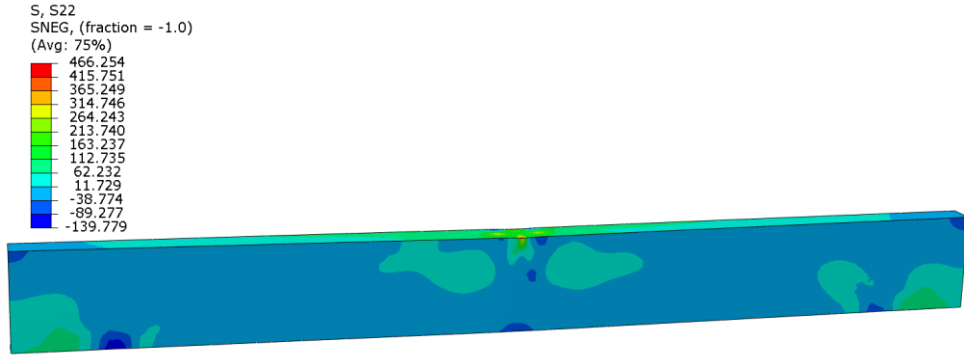


Şekil 4.18. Çelik U Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

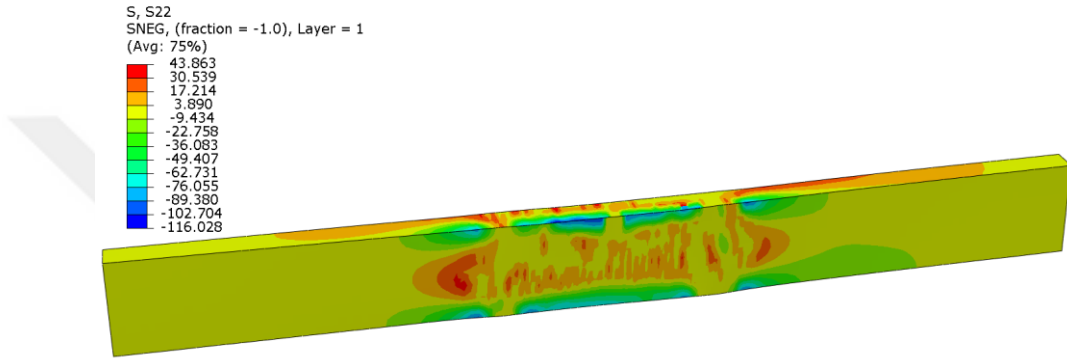


Şekil 4.19. GFRP U Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

Maksimum çekme gerilme sonuçlarına göre, çelik U profilde 537,703 MPa ve GFRP U profilde 1464,693 MPa gerilme değerleri gözlemlenmiştir.

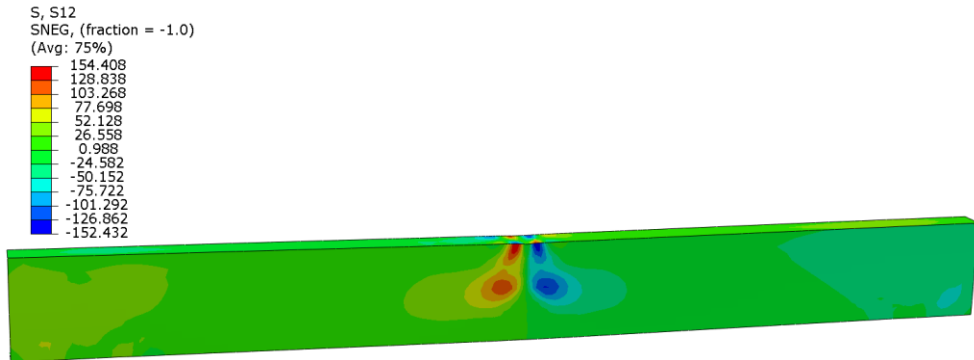


Şekil 4.20. Çelik U Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

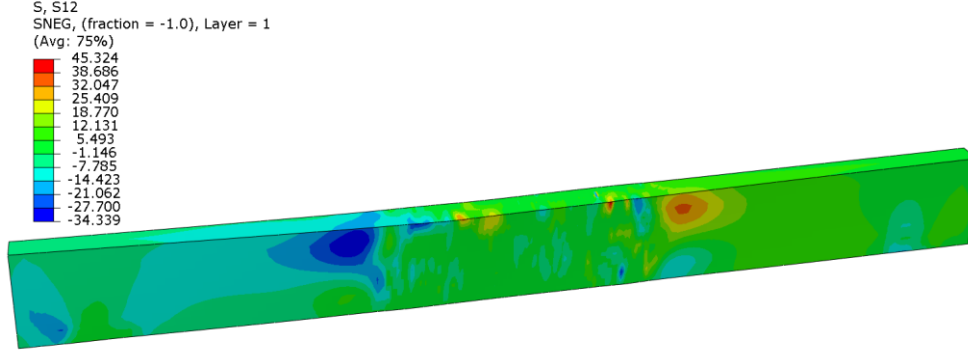


Şekil 4.21. GFRP U Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

Y ekseninde oluşan gerilme sonuçlarına göre, çelik U profilde maksimum 466,254 MPa ve GFRP U profilinde 43,863 MPa gerilme değerleri ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.22. Çelik U Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

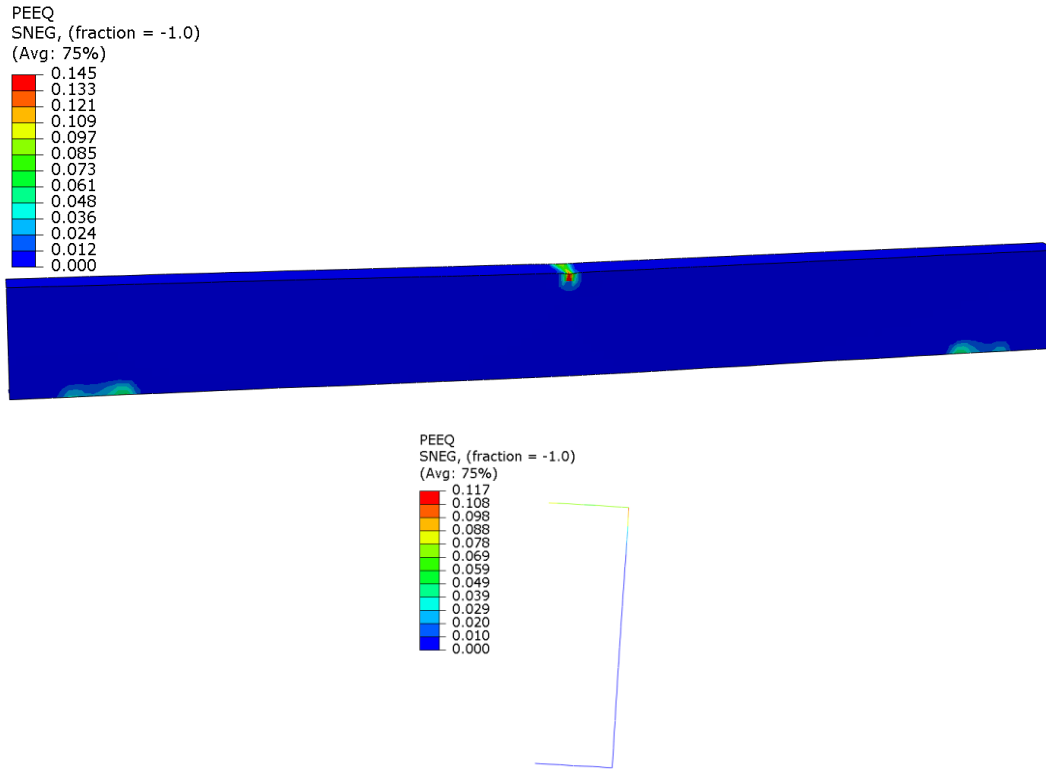


Şekil 4.23. GFRP U Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

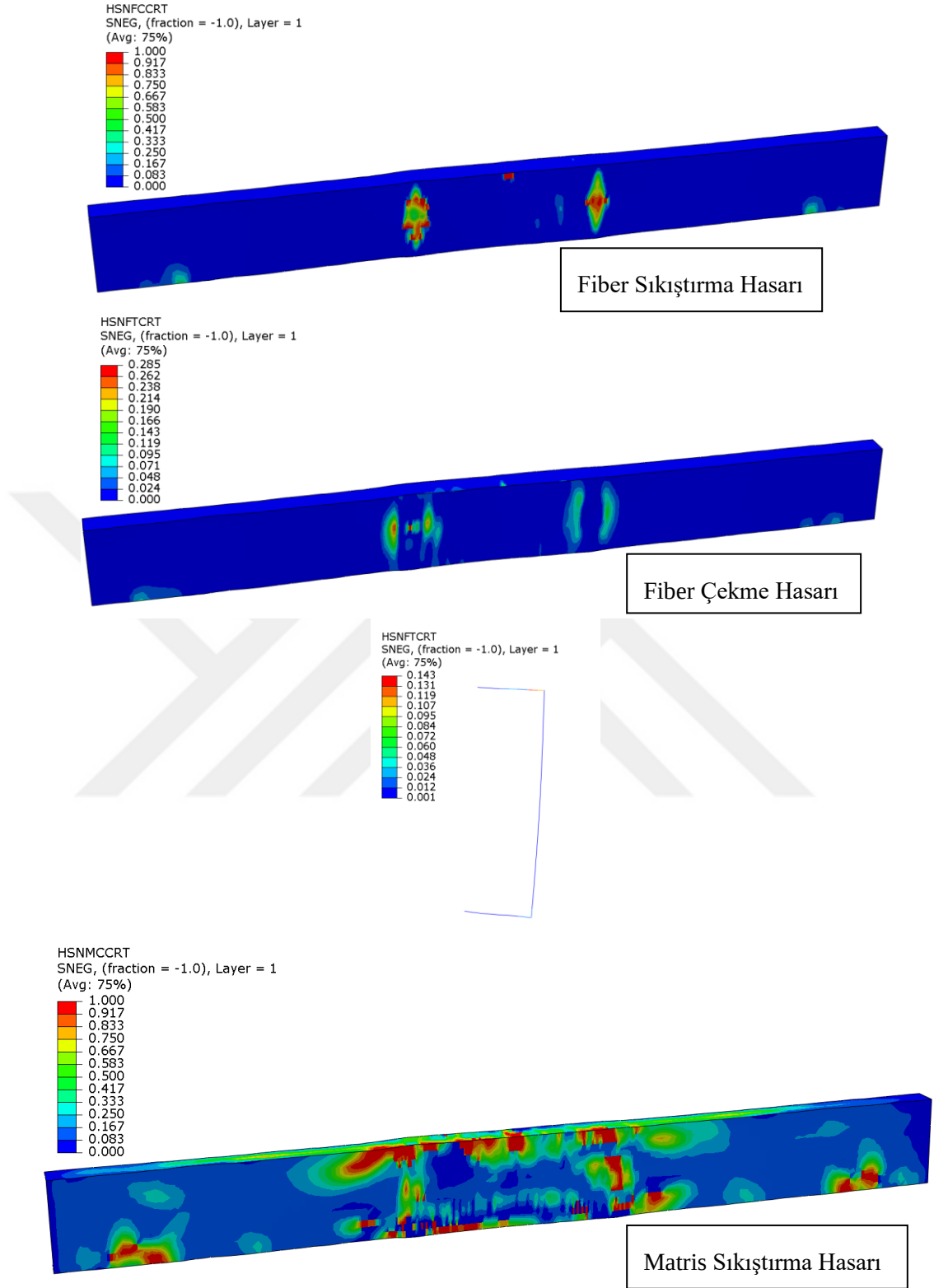
Kayma gerilmesi sonuçlarına göre, çelik U profilde maksimum 154,408 MPa ve GFRP U profilinde 45,324 MPa gerilme değerleri bulunmuştur.

4.2.2. Çelik U profil ve GFRP U profil plastik şekil değiştirme dağılımı

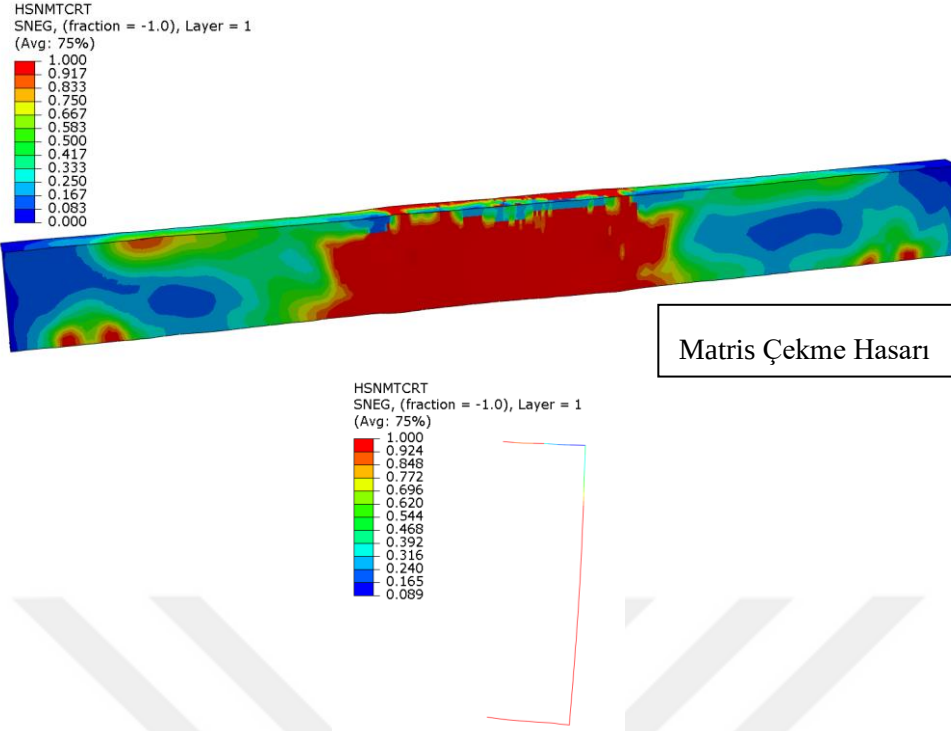
Çelik U Profil ve GFRP U Profilin plastik şekil değiştirmeleri ve hasar diyagramları Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Çelik U Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı



Şekil 4.25. GFRP U Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımları



Şekil 4.25. (Devamı) GFRP U Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımları

Çelik U profilin orta noktasındaki elemanlar üzerinde analiz edilen maksimum yer değiştirme 7,74 mm iken GFRP U profilin orta noktasındaki elemanlar üzerinde analiz edilen maksimum yer değiştirme 20,57 mm bulunmuştur.

4.2.3. Çelik U profil ve GFRP U profil karşılaştırması

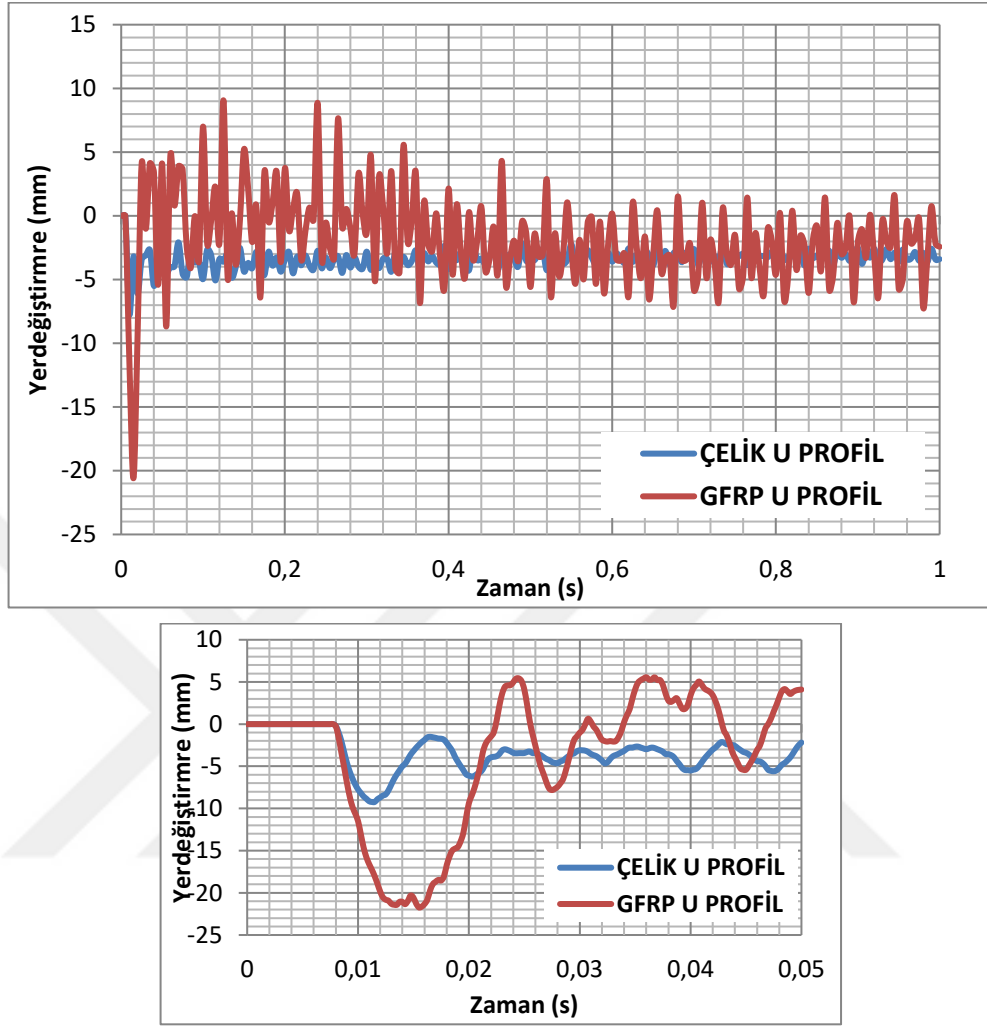
Yapılan analiz sonucunda profillerde oluşan maksimum yer değiştirme, mesnet reaksiyonu ve ivme değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kutu Profil Analiz Sonuçları

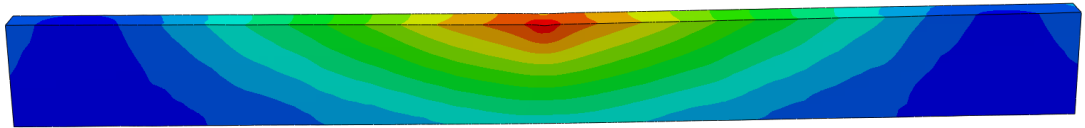
	ÇELİK U PROFİL	GFRP U PROFİL
İVME (m/s ²)	10522,055	198706,800
YER DEĞİŞTİRME (mm)	7,74	20,57
MESNET REKSİYONU (kN)	189,551	64,781

Şekil 4.26.’da çelik-gfrp U profil yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çelik U profilde hesaplanan maksimum yer değiştirme 7,74 mm bulunurken, darbe sonrası çelik profilde 2-3 mm kalıcı deformasyon oluşmuştur. GFRP U profilde hesaplanan maksimum yer değiştirme 20,57 mm iken 0-1 mm arasında darbe sonrası değişenlik

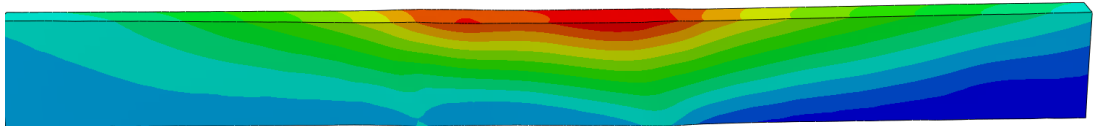
göstermektedir. Şekil 4.27.'de çelik U profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı, Şekil 4.28.'de GFRP U profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı yer almaktadır.



Şekil 4.26. Çelik-GFRP U Profil Yer Değiştirme Grafiği



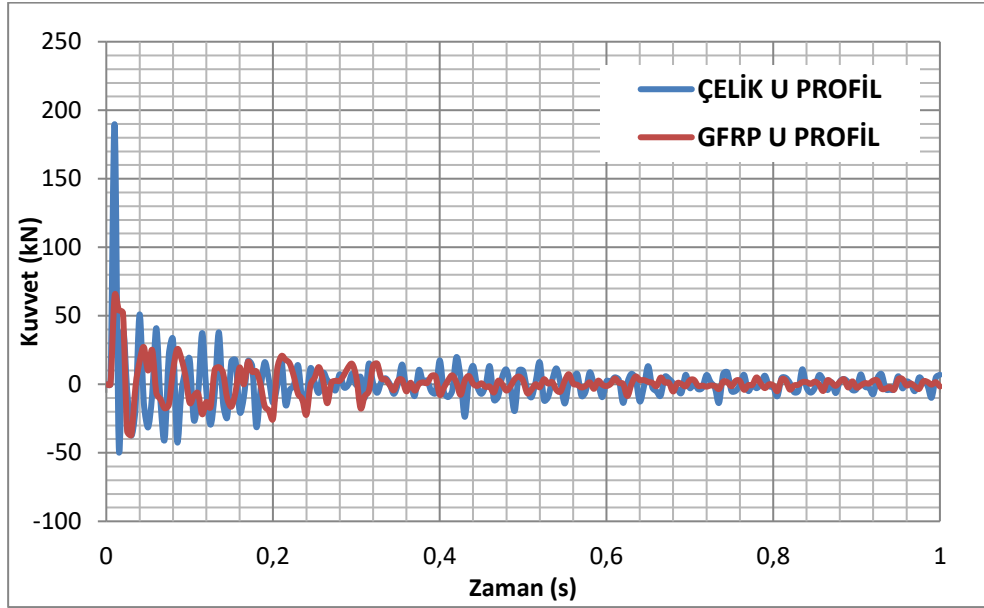
Şekil 4.27. Çelik U Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı



Şekil 4.28. GFRP U Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı

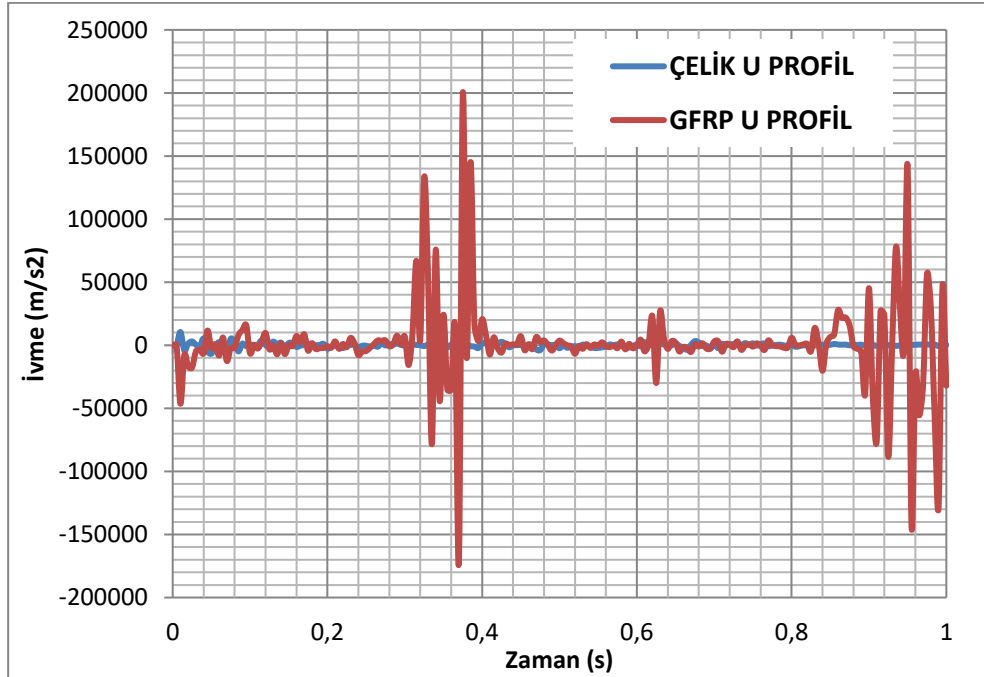
Çelik U profilde darbe yükü sonucunda mesnetlerde 189,551 kN'luk reaksiyon kuvveti, GFRP U profil modelinde 64,781 kN'luk bir kuvvet oluşmuştur. GFRP

kompozit malzemeden oluşan U profilde hesaplanan mesnet kuvvetleri çelik kutu profile göre daha küçük olup Şekil 4.29.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Çelik-GFRP U Profil Mesnet Kuvveti Grafiği

Çelik U profilin ve GFRP U profilin orta düğüm noktasında meydana gelen ivme değerinin dağılım grafiği Şekil 4.30.'da verilmiştir. Çelik U profilde maksimum ivme değeri $10522,055 \text{ m/s}^2$, GFRP U profilde maksimum ivme değeri $198706,800 \text{ m/s}^2$ bulunmuştur.

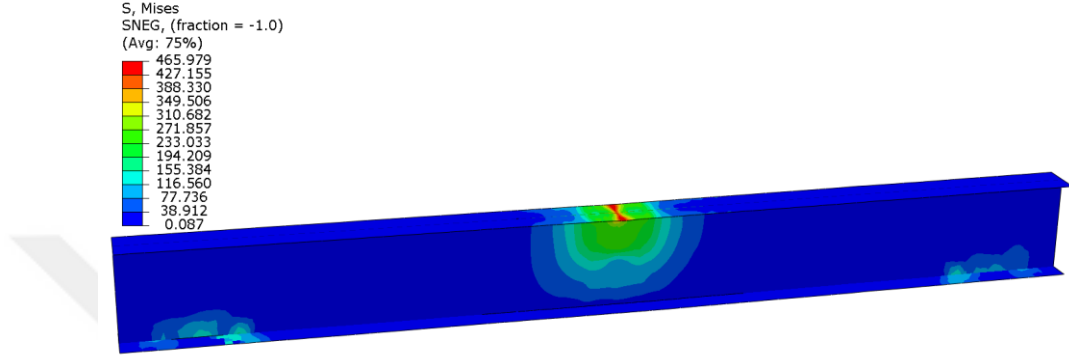


Şekil 4.30. Çelik-GFRP U Profil İvme Grafiği

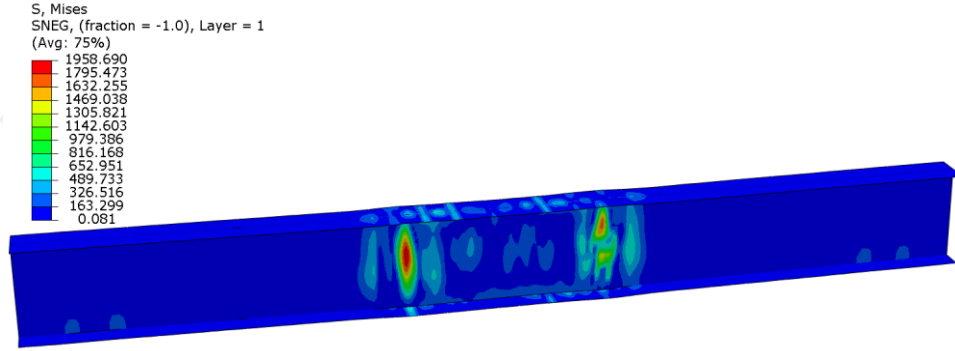
4.3. 200*100*10 I Profil İncelemesi

4.3.1. Çelik I profil ve GFRP I profil gerilme dağılımları

Çelik I profilde ve GFRP I profilde oluşan Von Mises gerilme dağılımları Şekil 4.31. ve Şekil 4.32.'de, oluşan maksimum çekme gerilmeleri Şekil 4.33. ve Şekil 4.34.'de, y eksenindeki asal gerilme dağılımları Şekil 4.35. ve Şekil 4.36.'de, analiz sonucu eleman bazında oluşan kayma gerilmeleri Şekil 4.37. ve Şekil 4.38.'de gösterilmiştir.

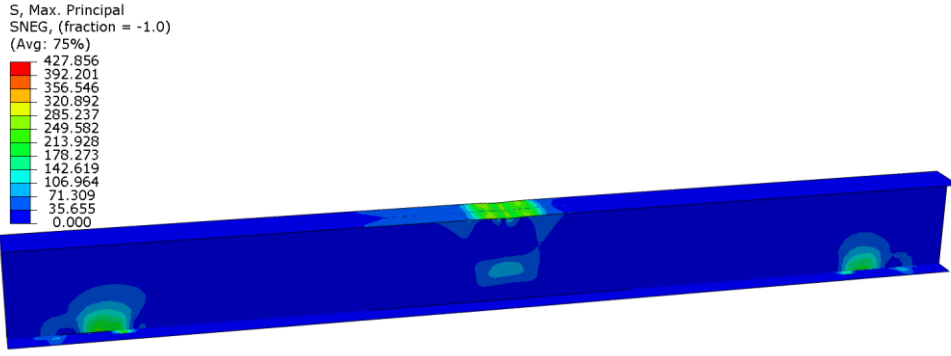


Şekil 4.31. Çelik I Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

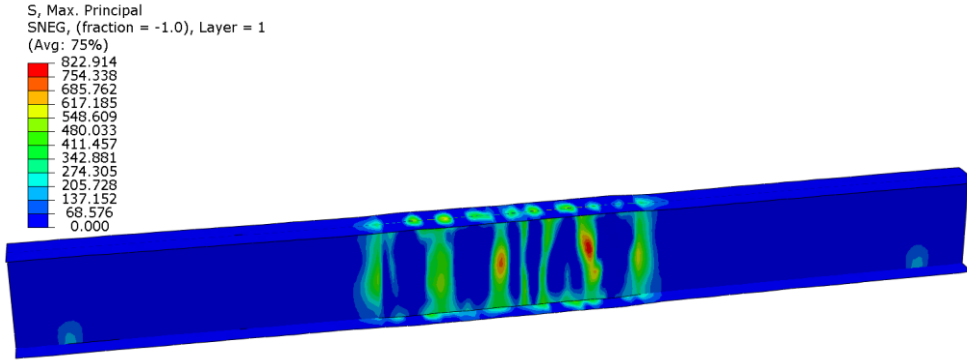


Şekil 4.32. GFRP I Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

Çelik I profilde oluşan Von Mises gerilmesinin 465,979 Mpa, GFRP I profilde oluşan Von Mises gerilmesinin 1958,690 Mpa olduğu görülmüştür.

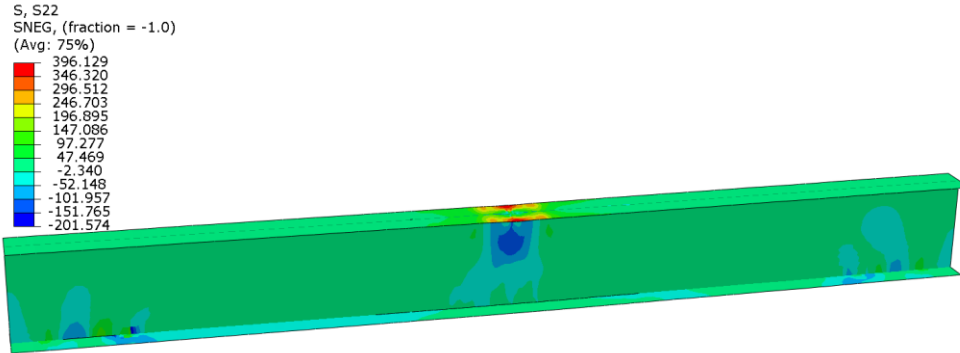


Şekil 4.33. Çelik I Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

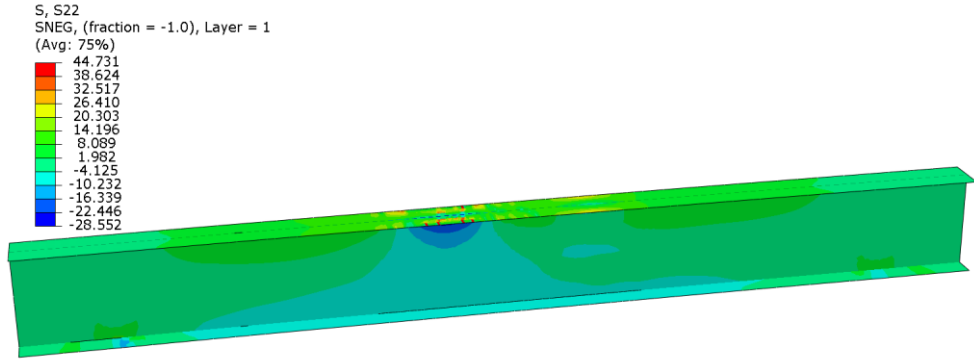


Şekil 4.34. GFRP I Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

Maksimum çekme gerilme sonuçlarına göre, çelik I profilde 427,856 MPa ve GFRP I profilinde 822,914 MPa gerilme değerleri gözlemlenmiştir.

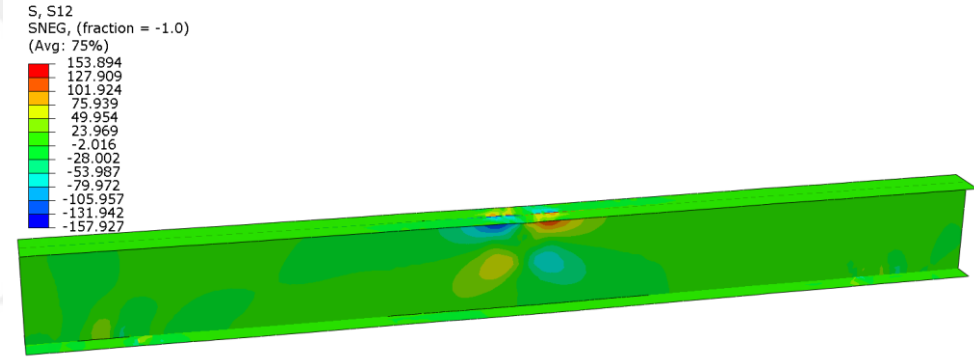


Şekil 4.35. Çelik I Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

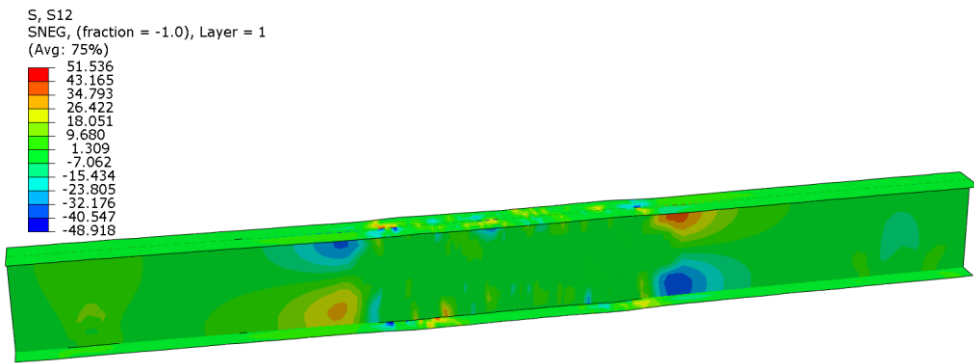


Şekil 4.36. GFRP I Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

Y ekseninde oluşan gerilme sonuçlarına göre, çelik I profilde maksimum 396,129 MPa ve GFRP I profilinde 44,731 MPa gerilme değerleri ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.37. Çelik I Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

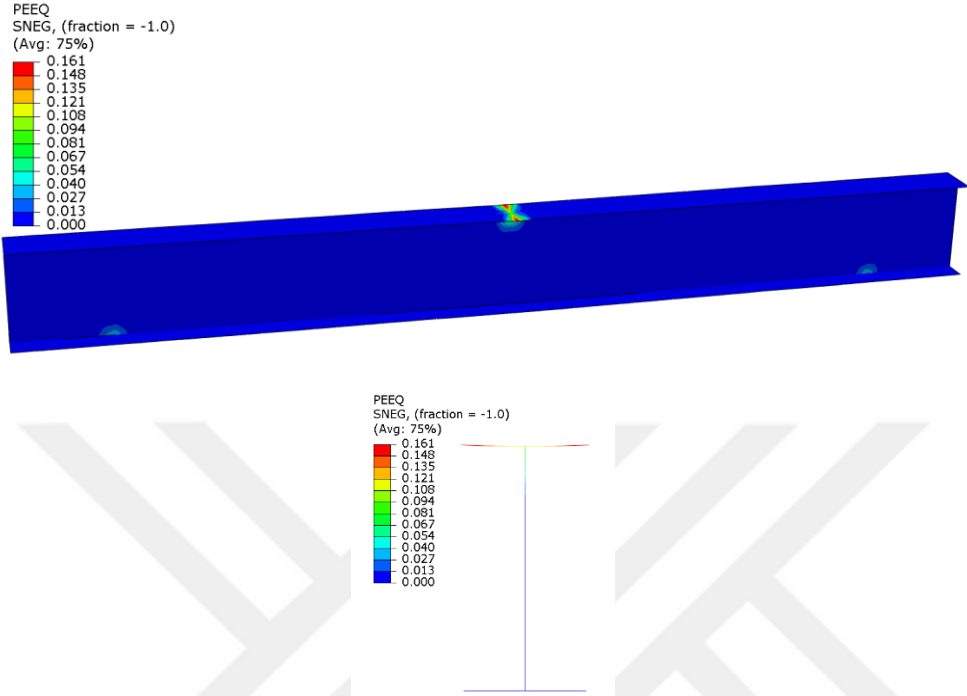


Şekil 4.38. GFRP I Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

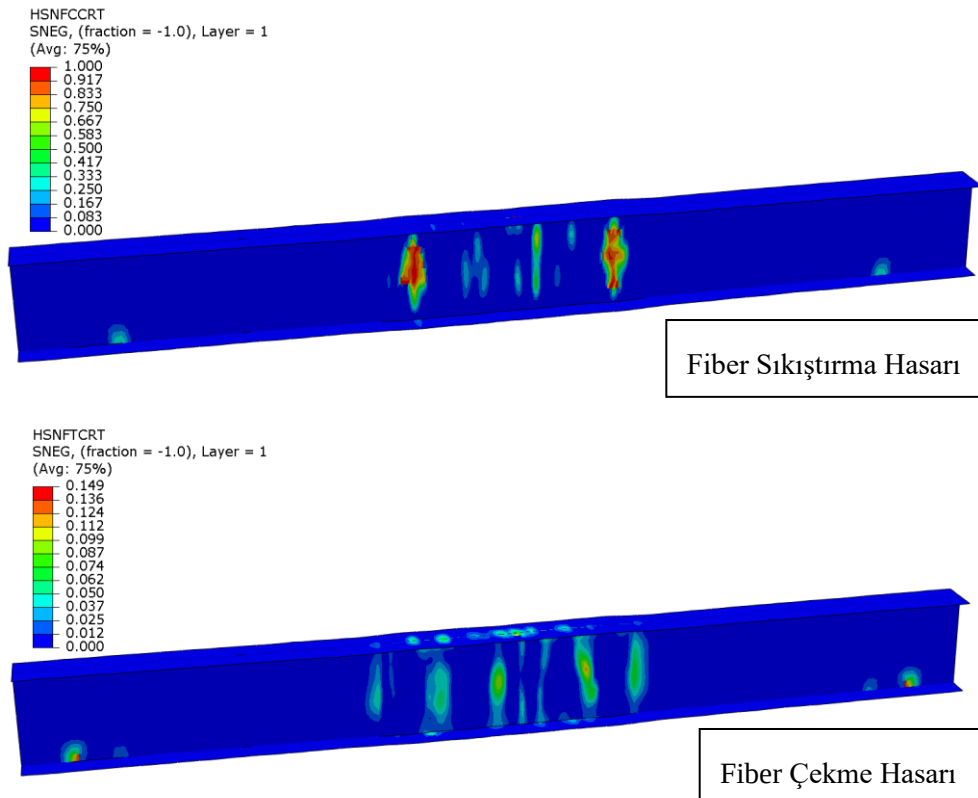
Kayma gerilmesi sonuçlarına göre, çelik I profilde maksimum 153,894 MPa ve GFRP I profilde 51,536 MPa gerilme değerleri gözlemlenmektedir.

4.3.2. Çelik I profil ve GFRP I profil plastik şekil değiştirme dağılımı

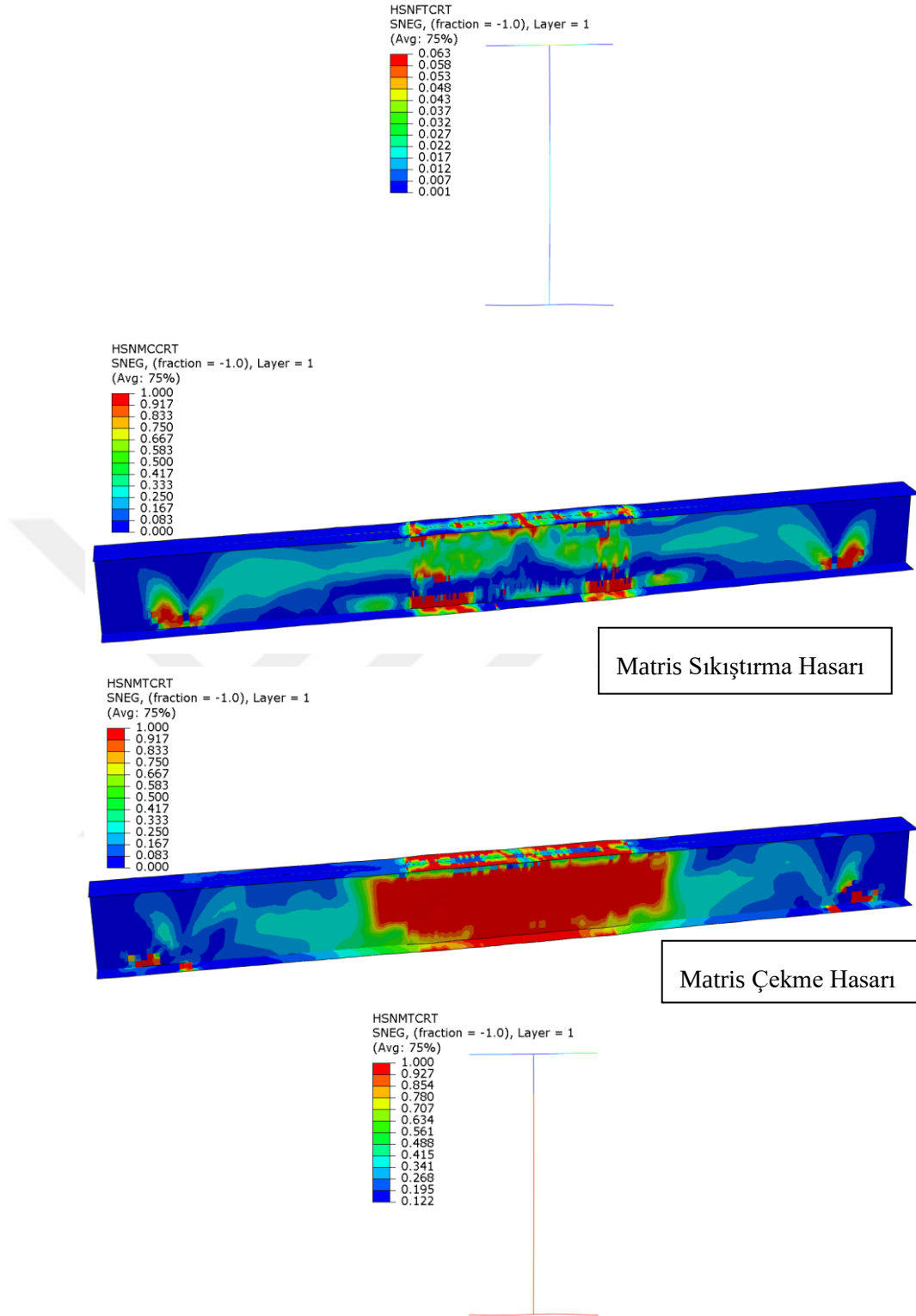
Çelik I Profil ve GFRP I Profilin plastik şekil değiştirmeleri ve hasar diyagramları Şekil 4.39. ve Şekil 4.40.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.39. Çelik I Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımı



Şekil 4.40. GFRP I Profil Plastik Şekil Değiştirme Dağılımları



Şekil 4.40. (Devamı) GFRP I Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımları

Çelik I profilde gözlemlenen maksimum yer değiştirme 6,24 mm iken, GFRP I profilde oluşan maksimum yer değiştirme 15,23 mm olmuştur.

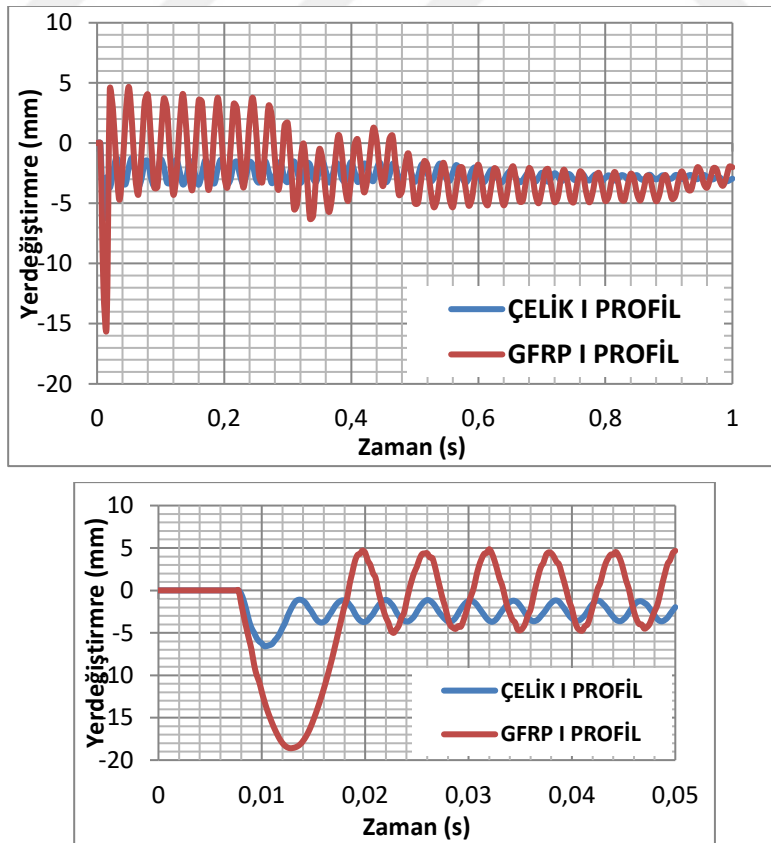
4.3.3. Çelik I profil ve GFRP I profil karşılaştırması

Yapılan analiz sonucunda profillerde oluşan maksimum yer değiştirme, mesnet reaksiyonu ve ivme değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

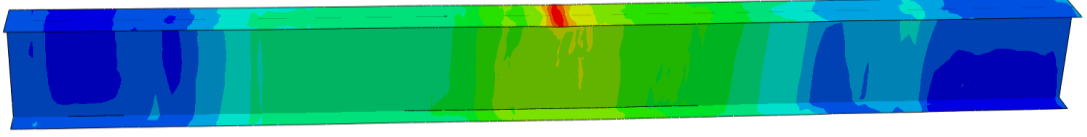
Tablo 4.3. I Profil Analiz Sonuçları

	ÇELİK I PROFİL	GFRP I PROFİL
İVME (m/s ²)	94268,072	35807,964
YER DEĞİŞTİRME (mm)	6,24	15,23
MESNET REKSİYONU (kN)	239,979	98,972

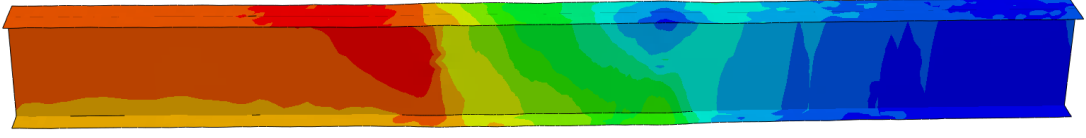
Çelik I profilin orta noktasındaki yer değiştirme analizi sonucu maksimum yapılan yer değiştirme değerinin 6,24 mm olduğunu Şekil 4.41’den görmekteyiz. Analiz sona erdiği zaman çelik profile yaklaşık olarak 3 mm kalıcı deformasyon olduğu görülmektedir. GFRP profil darbe anında 15,23 mm yer değiştirme yapmıştır. Darbe sonrası GFRP profil ve çelik profil benzer davranış göstermiştir. Şekil 4.42.’de çelik I profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı, Şekil 4.43.’de GFRP I profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı yer almaktadır.



Şekil 4.41. Çelik-GFRP I Profil Yer Değiştirme Grafiği

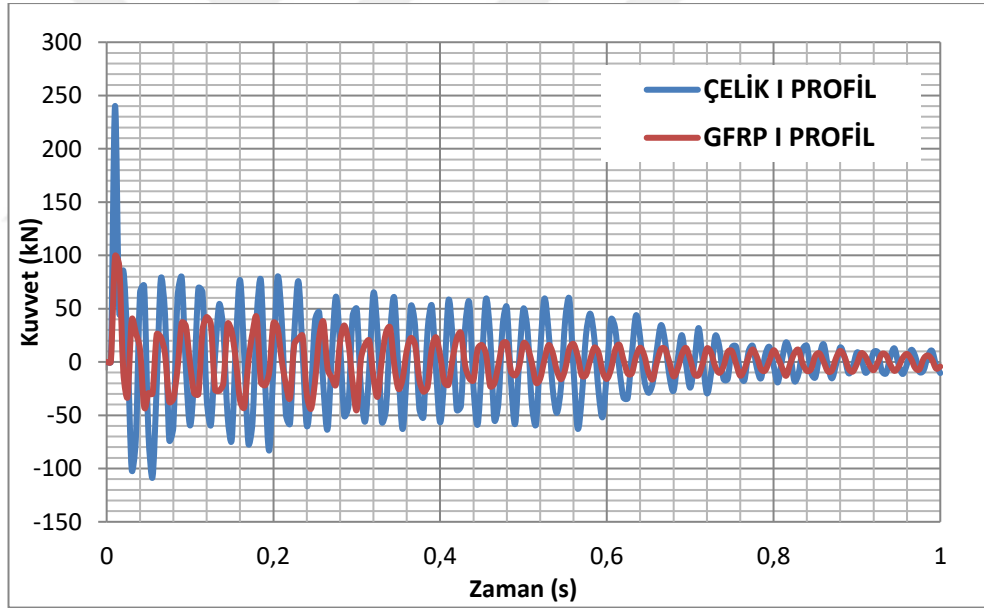


Şekil 4.42. Çelik I Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı



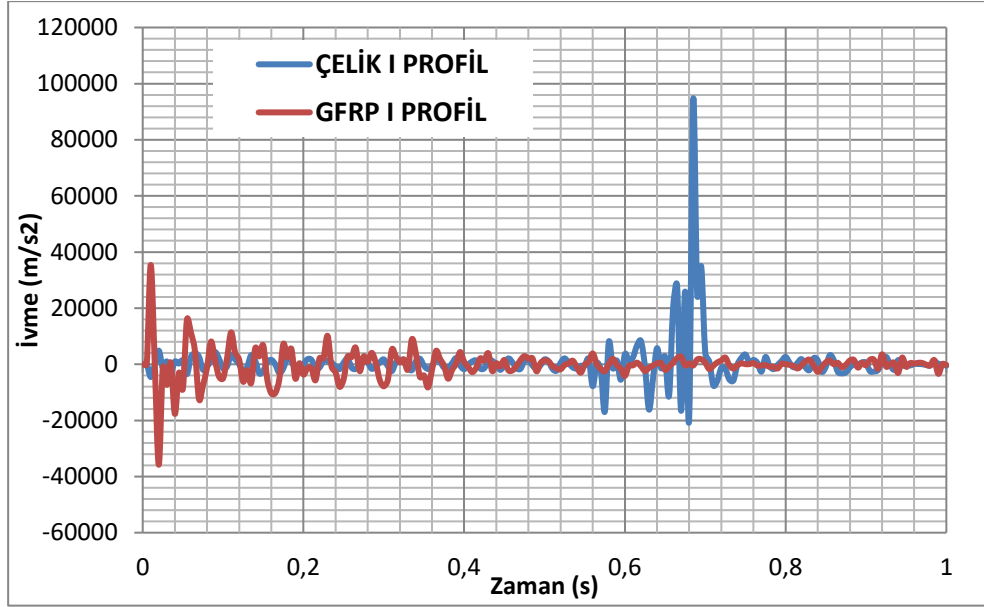
Şekil 4.43. GFRP I Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Diyagramı

Analiz sonucuna göreçelik I profil mesnet kuvvetideğeri Şekil 4.44’de görüldüğü gibi GFRP I profilde oluşan mesnet kuvveti değerlerinden daha büyük elde edilmiştir. Maksimum mesnet kuvveti çelik profilde 239,979 kN bulunmuş, GFRP profilde 98,972 kN bulunmuştur. Çelik I profil GFRP I profile göre mesnetlerde darbe yükü altında daha çok zorlanmıştır.



Şekil 4.44. Çelik-GFRP I Profil Mesnet Kuvveti Grafiği

Çelik I profilin ve GFRP I profilin orta noktasında meydana gelen ivme grafiği Şekil 4.45.’de verilmiştir. Çelik I profilde $94268,072 \text{ m/s}^2$ ivme değeri hesaplanırken, GFRP I profilde $35807,964 \text{ m/s}^2$ ivme değeri hesaplanmıştır.

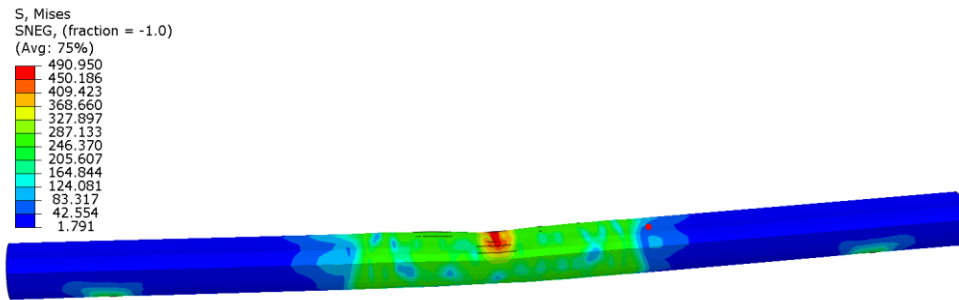


Şekil 4.45. Çelik-GFRP I Profil İvme Grafiği

4.4. 114,3*4,50 Boru Profil İncelemesi

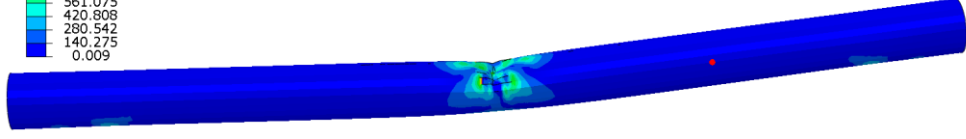
4.4.1. Çelik boru profil ve GFRP boru profil gerilme dağılımları

Çelik Boru profilde ve GFRP Boru profilde oluşan Von Mises gerilme dağılımları Şekil 4.46. ve Şekil 4.47.'de, oluşan maksimum çekme gerilmeleri Şekil 4.48. ve Şekil 4.49.'da, y eksenindeki asal gerilme dağılımları Şekil 4.50. ve Şekil 4.51.'de, analiz sonucu eleman bazında oluşan kayma gerilmeleri Şekil 4.52. ve Şekil 4.53.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.46. Çelik Boru Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

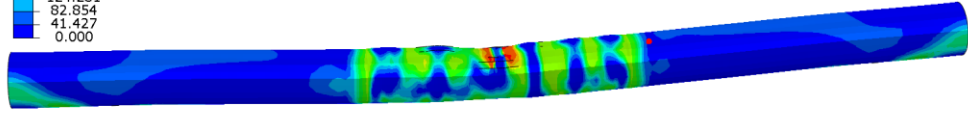
S, Mises
SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)
1683.207
1542.940
1402.674
1262.407
1122.141
981.874
841.608
701.341
561.075
420.808
280.542
140.275
0.009



Şekil 4.47. GFRP Boru Profil Von Mises Gerilme Dağılımı

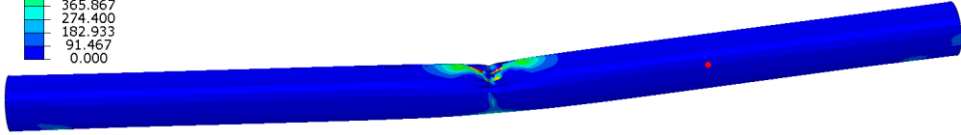
Çelik boru profilde oluşan Von Mises gerilmesinin 490,950 Mpa, GFRP boru profilde oluşan Von Mises gerilmesinin 1683,207 Mpa olduğu görülmüştür.

S, Max. Principal
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)
497.123
455.696
414.269
372.842
331.415
289.989
248.562
207.135
165.708
124.281
82.854
41.427
0.000



Şekil 4.48. Çelik Boru Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

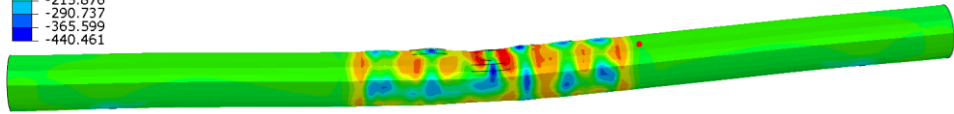
S, Max. Principal
SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)
1097.601
1006.134
914.667
823.201
731.734
640.267
548.800
457.334
365.867
274.400
182.933
91.467
0.000



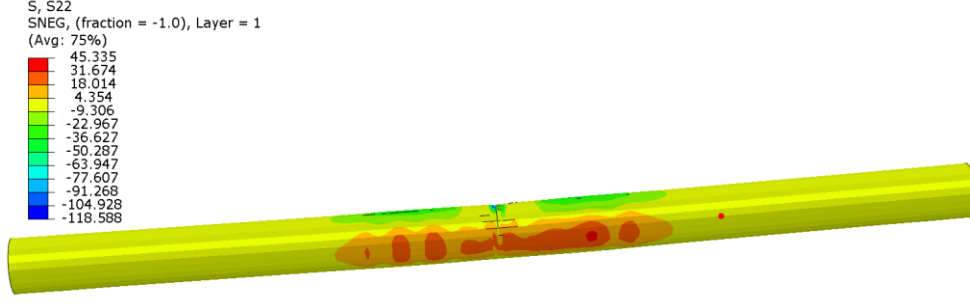
Şekil 4.49. GFRP Boru Profil Maksimum Çekme Gerilme Dağılımı

Maksimum çekme gerilme sonuçlarına göre, çelik boru profilde 497,123 MPa ve GFRP boru profilinde 1097,601 MPa gerilme değerleri gözlemlenmektedir.

S, S22
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)
457.880
383.018
308.156
233.295
158.433
83.571
8.709
-66.152
-141.014
-215.876
-290.737
-365.599
-440.461

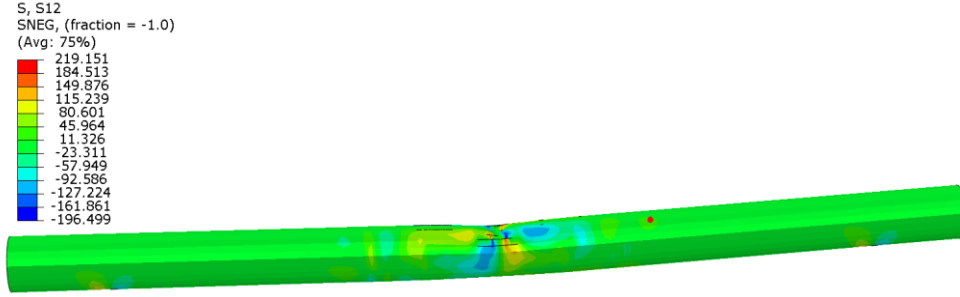


Şekil 4.50. Çelik Boru Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

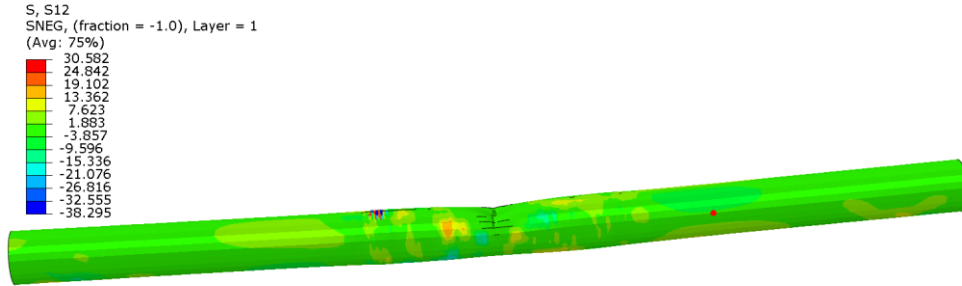


Şekil 4.51. GFRP Boru Profil Profil y Ekseninde Oluşan Asal Gerilme Dağılımı

Y ekseninde oluşan gerilme sonuçlarına göre, çelik boru profilde maksimum 457,880 MPa ve GFRP boru profilinde 45,335 MPa gerilme değerleri bulunmuştur.



Şekil 4.52. Çelik Boru Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

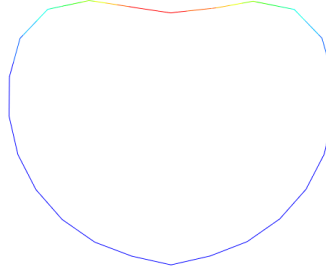
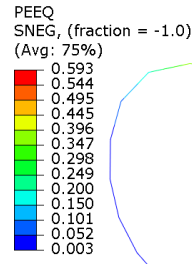
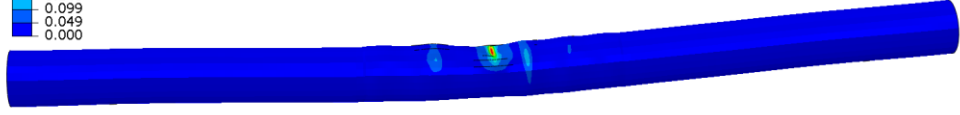
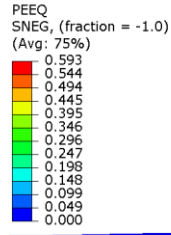


Şekil 4.53. GFRP Boru Profil Kayma Gerilmesi Dağılımı

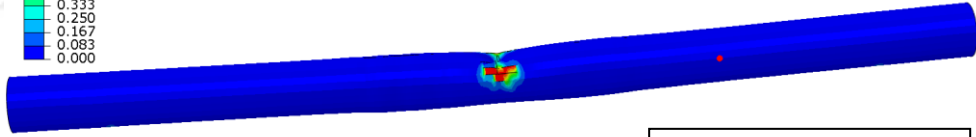
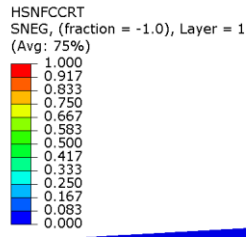
Kayma gerilmesi sonuçlarına göre, çelik boru profilde maksimum 219,151 MPa ve GFRP boru profilde 30,582 MPa gerilme değerleri ortaya çıkmıştır.

4.4.2. Çelik boru profil ve GFRP boru profil plastik şekil değiştirme dağılımı

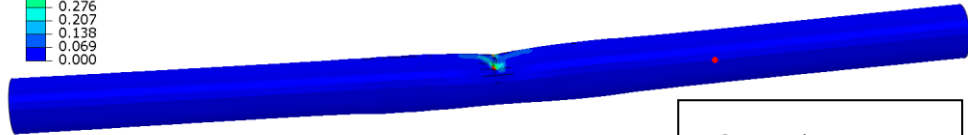
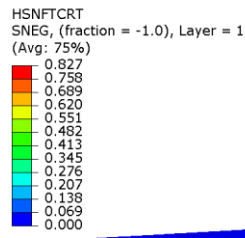
Çelik Boru Profil ve GFRP Boru Profilin plastik şekil değiştirmeleri ve hasar diyagramları Şekil 4.54. ve Şekil 4.55.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.54. Çelik Boru Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımı

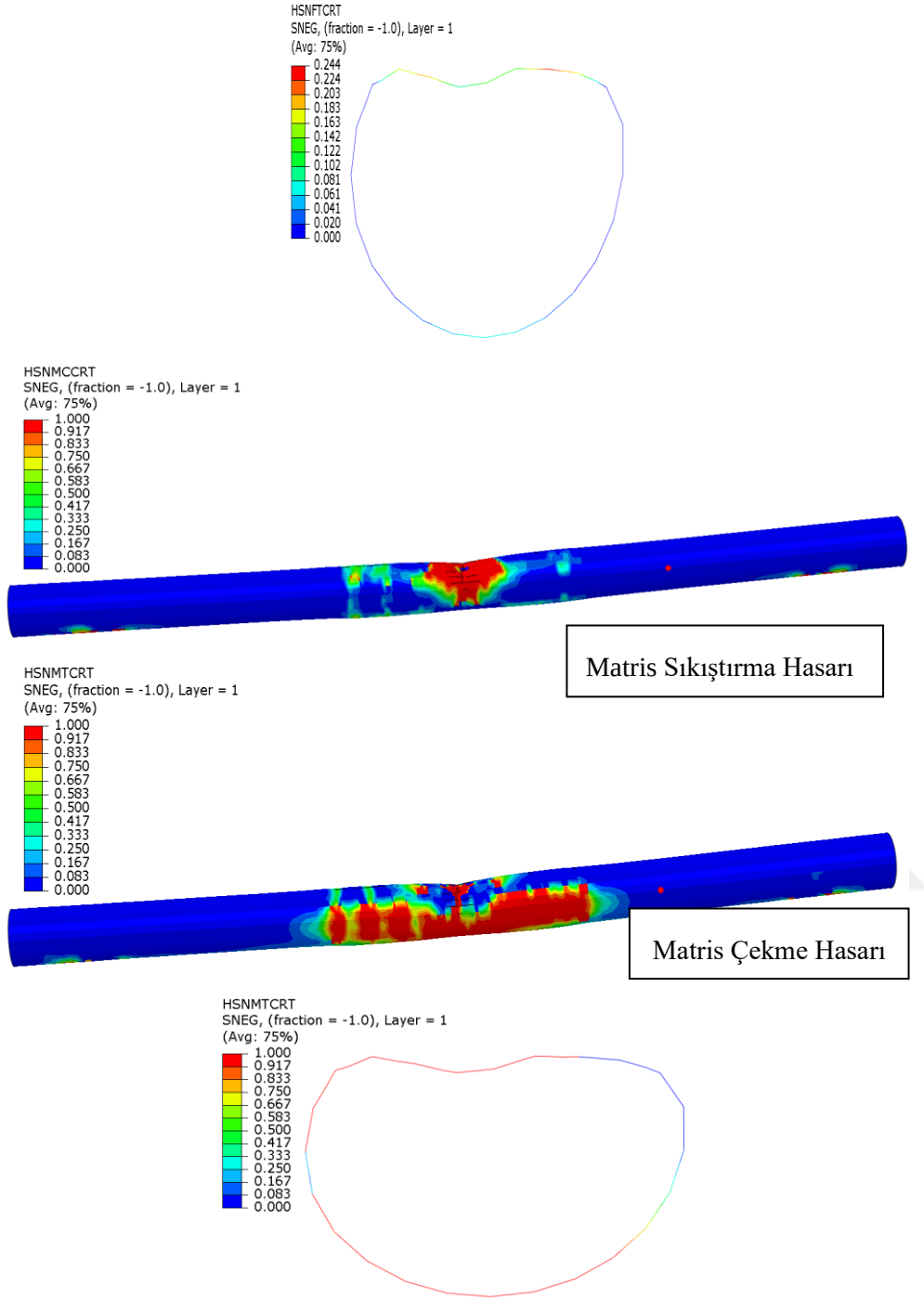


Fiber Sıkıştırma Hasarı



Fiber Çekme Hasarı

Şekil 4.55. GFRP Boru Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımları



Şekil 4.55. (Devamı) GFRP Boru Profil Plastik Şekil Değişirme Dağılımları

Çelik Boru profilde gözlemlenen maksimum yer değiştirme 30,46 mm iken, GFRP boru profilde oluşan maksimum yer değiştirme 54,63 mm olmuştur.

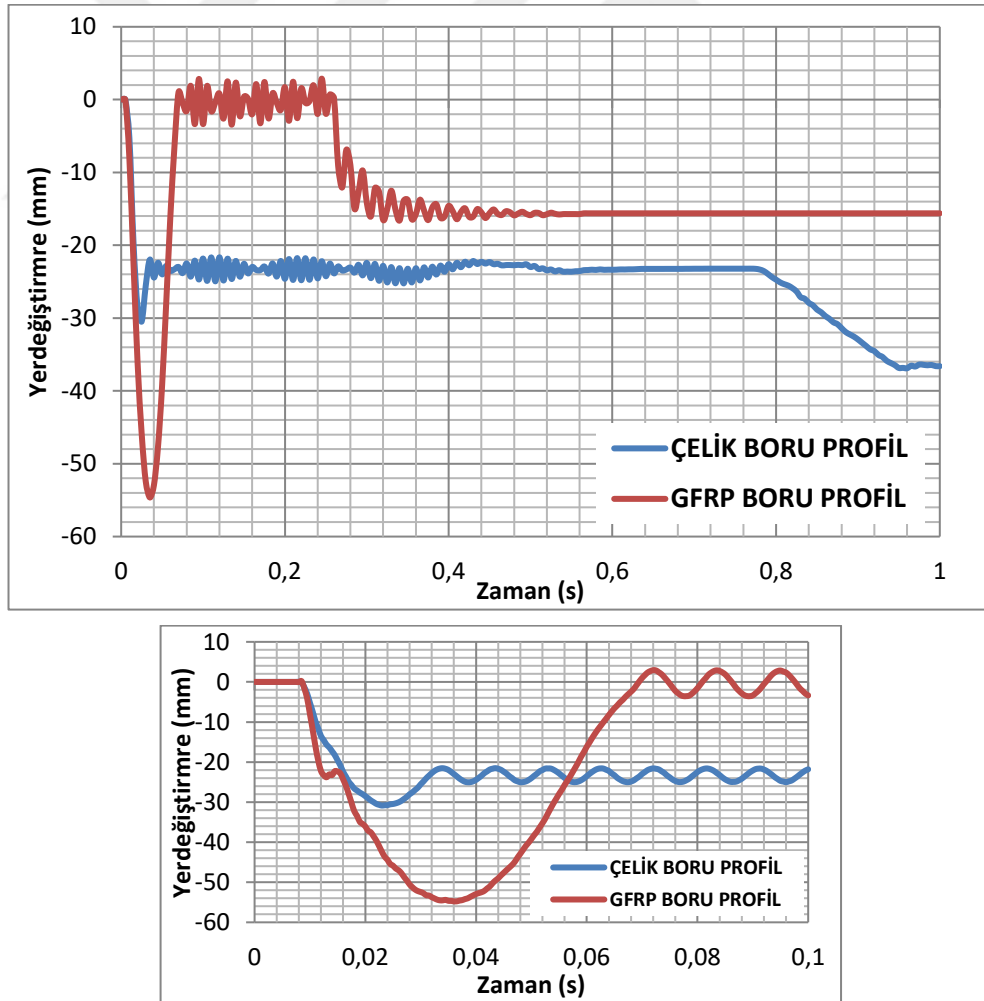
4.4.3. Çelik boru profil ve GFRP boru profil karşılaştırması

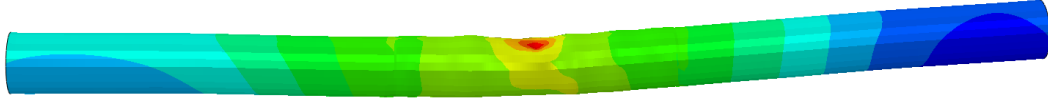
Yapılan analiz sonucunda profillerde oluşan maksimum yer değiştirme, mesnet reaksiyonu ve ivme değerleri Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Boru Profil Analiz Sonuçları

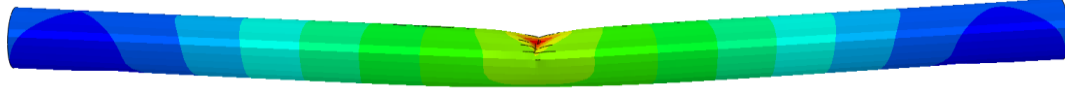
	ÇELİK BORU	GFRP BORU
İVME (m/s^2)	1551524,864	44496,992
YER DEĞİŞTİRME (mm)	30,46	54,63
MESNET REKSİYONU (kN)	28,091	23,235

Yer değiştirme analizi sonucu çelik boru profilin orta noktasındadarbe anında yaptığı maksimum yer değiştirmenin 30,46 mm olduğunu Şekil 4.56'dan görmekteyiz. Darbe yükünün profil üzerinden kalkması sonucu profilde yaklaşık olarak 22-24 mm değerinde kalıcı deformasyona oluşmuştur. GFRP boru profil 54,63 mm darbe anında yaptığı yer değiştirme sonrası darbe yükünün kalkmasıyla 15 mm kalıcı deformasyona uğramaktadır. Şekil 4.57.'de çelik boru profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı, Şekil 4.58.'de GFRP boru profilin orta nokta yer değiştirme diyagramı yer almaktadır.

**Şekil 4.56.** Çelik-GFRP Boru Profil Yer Değiştirme Grafiği

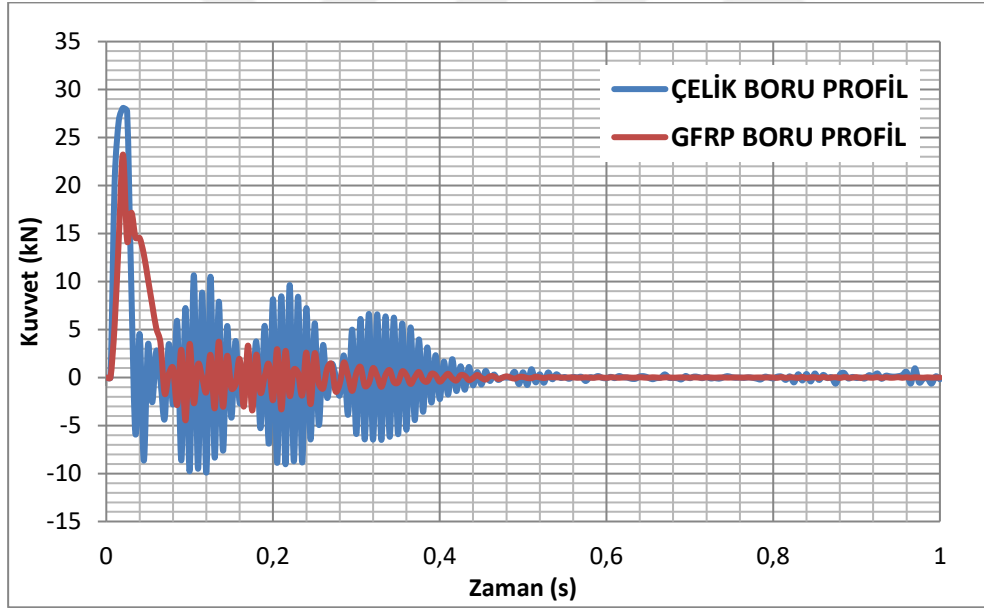


Şekil 4.57. Çelik Boru Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Grafiği



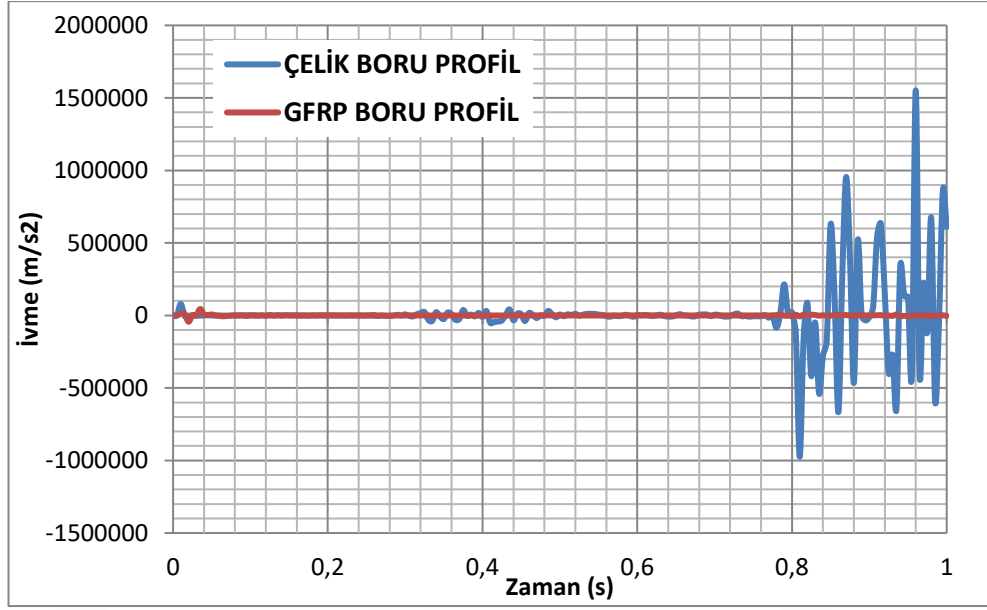
Şekil 4.58. GFRP Boru Profil Orta Nokta Yer Değiştirme Grafiği

Çelik boru profil mesnet kuvveti analiz sonucu Şekil 4.59’da görüldüğü gibi GFRP boru profil mesnet kuvvet değerlerinden daha büyük elde edilmiştir. Maksimum mesnet kuvveti, çelik profil üzerinde 28,091 kN olarak belirlenmişken, GFRP profil üzerinde bu değer 23,235 kN olarak ölçülmüştür. Bu durum çelik boru profilin mesnetlerinde GFRP boru profilinkine göre darbe yükü altında daha fazla zorlanıldığını göstermektedir.



Şekil 4.59. Çelik-GFRP Boru Profil Mesnet Kuvveti Grafiği

Çelik boru profilin ve GFRP boru profilin orta noktasında meydana gelen ivme grafiği Şekil 4.60.’da verilmiştir. Darbe anında çelik boru profil de oluşan ivme değeri $1551524,864 \text{ m/s}^2$, GFRP boru profilde $44496,992 \text{ m/s}^2$ bulunmuştur.



Şekil 4.60. Çelik-GFRP Boru Profil İvme Grafiği

Sonlu elemanlar analizi ile Abaqus programı yardımıyla yapılan 4 farklı çelik ve GFRP malzemelerinden oluşan profillerin darbe yükü altındaki davranışının nümerik analizi sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.5.'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Analiz Sonuçları

MALZEME	S MİSES (Mpa)	Max. Principal (Mpa)	S22 (Mpa)	S12 (Mpa)	YER DEĞİŞTİRME (mm)	MESNET REAKSİYONU(kN)	İVME (m/s ²)
ÇELİK-KUTU PROFİL	380,858	396,799	396,243	129,794	8,21	264,766	10735,334
GFRP-KUTU PROFİL	1969,905	884,474	44,643	51,094	25,04	57,508	228555,856
ÇELİK - I PROFİL	465,979	427,856	396,129	153,894	6,24	239,979	94268,072
GFRP - I PROFİL	1958,690	822,914	44,731	51,536	15,23	98,972	35807,964
ÇELİK - U PROFİL	467,769	537,703	466,254	154,408	7,74	189,551	10522,055
GFRP - U PROFİL	1960,625	1464,693	43,863	45,324	20,57	64,781	198706,800
ÇELİK - BORU PROFİL	490,950	497,123	457,880	219,151	30,46	28,091	1551524,864
GFRP - BORU PROFİL	1683,207	1097,601	45,335	30,582	54,63	23,235	44496,992

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sektörde yaygın olarak kullanılan dört profil üzerinde toplam sekiz adet darbe analizi sayısal olarak yapılmıştır. Cam elyaf takviyeli kompozit profiller ve çelik profiller Abaqus programında sonlu elemanlar metodu ile modellenmiş, 2000 mm yükseklikten 0,075 ton ağırlığındaki rijit cisim profil üzerine serbest düşme yaptırılmıştır. Belirli bir hızla profile çarpan rijit darbe cismi sonrası GFRP kompozit profillerin ve çelik kompozit profillerin davranışları incelenmiştir. Çelik profil ile GFRP kompozit profilin darbe yükü altındaki davranışları karşılaştırılmış GFRP kompozit profilin çelik yerine kullanılabileceği alanlar irdelenmiştir ve GFRP kompozit profillerin darbe yüküne maruz kalabilecek alanlarda kullanılabilirliği sorgulanmıştır. Cam elyaf takviyeli kompozit profiller darbe yüklemeleri gibi ani yüklemelere karşı elastik yanıt verme yeteneğine sahiptirler. GFRP kompozit profil ile çelik profil arasındaki malzeme farklılıkları, yapısal performanslarının ve dayanıklılıklarının farklı olduğunu göstermiştir. Yapılan analizler sonucunda yer değiştirme -zaman eğrisi, mesnet reaksiyonu-zaman eğrisi, ivme-zaman eğrisi ve Von Mises gerilme dağılımı incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve bazı öneriler aşağıda yer almaktadır:

- Çelik profiller ile GFRP kompozit profillerin karşılaştırılması sonucunda, dört çeşit profil için de maksimum yer değiştirme değerine GFRP kompozit profillerin orta noktasında ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Darbe anında çelik profiller daha az yerdeğiştirme yapmıştır. Çelik profiller, yüksek sünekliğe sahip malzemelerdir ve kopma aşamasına ulaşmadan önce plastik deformasyona uğrarlar yani çelik profillerin sünek davranış sergilediği, GFRP kompozit profillerin ise elastik davranış sergilediği görülmüştür.
- Çelik profiller darbe sonrası benzer yerdeğiştirme davranışı sergilerken GFRP kompozit profillerin darbe sonrası yerdeğiştirme davranış biçimlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir.
- Yapılan dört farklı profil analizi içinde geçerli olmak üzere maksimum mesnet reaksiyonunun çelik profillerde olduğu tespit edilmiştir. GFRP

kompozit profillerde dört profil çeşidi içinde aynı sonuca ulaşılmış; çelik profile göre oluşan kuvvet değerleri daha az bulunmuştur.

- Çelik profil çeşitlerinde ve GFRP profil çeşitlerinde darbe anında maksimum mesnet reaksiyonları oluşmuş darbe sonrası meydana gelen kuvvetler azalmıştır.
- Profilin orta noktasına göre yapılan ivme değeri analizi, profilin şekline göre farklılık göstermiştir. Kutu profil ve U profilde maksimum ivme değeri GFRP profillerde meydana gelirken, I profil ve boru profilde maksimum ivme değeri çelik profillerde meydana gelmiştir. Profillerde oluşan ivme dört profil içinde pik değerine farklı zaman aralıklarında ulaşmış olup profil şekli oluşan ivme değerini etkilemiştir.
- Dört çelik profil modeli ve dört GFRP kompozit profil modeli analiz sonuçlarına göre; GFRP kompozit profillerde Von Mises gerilmesi ve Max.Principal gerilmesinin yüksek olduğu, çelik profillerde y eksenini boyunca oluşan gerilmelerin ve kayma gerilmelerinin daha yüksek değerler olduğu gözlemlenmiştir.
- Darbe analizinin GFRP kompozit profillerde ve çelik profillerde gözlemlenen ortak sonucu; profil şeklinin profilin darbe yükü altındaki davranışına etkisi olduğudur. Çelik profiller ve GFRP profiller karşılaştırıldığında iki malzemenin darbe yükü altında farklı alanlarda avantaja veya dezavantaja sahip olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen verilere göre, sektörde kullanılan profiller darbe yüküne maruz kalacak alanlarda kullanılmadan önce ihtiyaçlar analiz edilmelidir. Yerdeğiştirmeye hassas, fazla deplasman istenmeyen kullanım alanlarında GFRP kompozit profiller tercih edilmemelidir. Farklı profil şekilleri darbe yükü altında farklı davranış sergilemiştir. Çelik profiller sünek davranış gösterirken GFRP kompozit profiller elastik davranış sergiledikleri için ihtiyaca uygun malzeme seçiminin titizlikle yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Mesnetlerde oluşan mesnet reaksiyonu değerlerini baz aldığımız alanlarda GFRP kompozit profiller tercih nedeni olabilmektedir. GFRP kompozit profiller korozyon dayanımı iyi, elektriği ve ısıyı iletmemesi, hafif olması gibi özellikleri ile tank, yer altı su depoları, demiryolu bağlantı elemanlarında tercih edilebilmektedir. Cephe kaplaması, sera gibi yapılarda iskeletin dayanıklı olması, hafif

ve geçirgen olmaması gibi özellikler arandığı baz alınarak GFRP kompozit malzemeler çelik malzemeye alternatif olabilmektedir.





KAYNAKLAR

ABAQUS V.6.6 Documentation

Abaqus. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>. 18 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.

Babu L.S., Kumar K.A., Jaya Christiyan K.G., Byary M.A., Puranic V.M., Jawad A.A.M., Poojary N., (2023). Effect of laminate thickness on low-velocity impact of GFRP/epoxy composites, *Materials Today*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.229>

Bazli M., Ashrafi H., Oskouei A.V.,(2016). Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles, *Composites Part B: Engineering*, 99, (203-215)

Bilgisayar Destekli Tasarım Ve Analiz (ANSYS). <http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/BilgisayarDestekliTasarim/BilgisayarDestekliTasarimVeAnaliz-2-hafta.pdf>. 18 Haziran 2023 tarihinde alınmıştır.

Cam Elyafı. https://tr.wikipedia.org/wiki/Cam_elyaf%C4%B1. adresinden 22 Ekim 2022 tarihinde alınmıştır.

Correia J. R., Cabral-Fonseca S., Branco F.A., Ferreira J.G., Eusébio M.I., Rodrigues M.P., (2005). *Civil Engineering Department, Instituto Superior Técnico (IST), Technical University of Lisbon*.

Correia J.R., Bai Y., Keller T. (2015). A review of the fire behaviour of pultruded GFRP structural profiles for civil engineering applications, *Composite Structures*, 127,(267-287).

Correia M.M., (2012). Structural Behavior Of Pultruded Gfrp Profiles Experimental Study And Numerical Modeling, *Instituto Superior Técnico*.

CTP Teknolojisi (2018)

Çavuşoğlu A.Y., (1978). Kompozit Malzemeler, *Sakarya Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Dergisi*, 3,(104-117).

Ekiz Y.,(2013). Yapı Elemanlarında Çelik Donatı Yerine Cam Elyaf Takviyeli Plastik (Ctp) Kullanılması, [Yüksek Lisans Tezi] *Sakarya Üniversitesi*.

Elements. <https://folk.ntnu.no/nilspv/TMM4175/elements.html>. 18 Haziran 2023 tarihinde alınmıştır.

Engin Afşar (2005). CTP Uygulama Örnekler. <file:///C:/Users/hp/Desktop/TEZ%20%20ABAQUS%20HERSEY/CTP/L%C4%B0TARETUR/CTP-Uyguluma-Ornekler.pdf>. adresinden 21 Ocak 2023 tarihinde alınmıştır.

Enşici, A.,(2009) Endüstriyel Tasarımda Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler, *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 178, (6-21).

- Fernandes L. A., Arruda M. R., Correia J. R., (2020). Compressive transverse fracture behaviour of pultruded GFRP materials: Experimental study and numerical calibration, *Composite Structures* 247.
- FIBERKO. <https://fiberko.com/>. adresinden 21 Ocak 2023 tarihinde alınmıştır.
- Fiberpull (2017). Uygulama Alanları. <http://www.fiberpull.com/uygulamaalanlari.html>. adresinden 4 Şubat 2023 tarihinde alınmıştır.
- Gliszczynskia A., Kubiaka T., Wawer K.,(2019). Barely visible impact damages of GFRP laminate profiles – An experimental study, *Composites Part B: Engineering* 158, 10-17.
- Impact Load. <https://byjusexamprep.com/gate-me/impact-load>. adresinden 26 Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.
- İlhan R., Feyzullohoğlu E., (2019). Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf ve Dolgu Maddeleri, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*,6-2,(355-381).
- Kaya A.İ.,(2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. *Putech & Composites*, 38-45
- Khennane A. (2013). Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. CRC Yayınları.
- Kompozit Malzemeler. https://tr.wikipedia.org/wiki/Kompozit_malzemeler. adresinden 15 Ekim 2022 tarihinde alınmıştır.
- Li Z., Ameri A.H., Hazell P. J., Khennane A., Escobedo-Diaz J. P., Aryal B., Wang H.,(2021). Effects of impactor mass on the low-velocity impact behaviour of thick GFRP pultruded laminates, *Construction and Building Materials*, 279.
- Li Z., Khennane A., Hazell P.J., Brown A. D.,(2017) Impact behaviour of pultruded GFRP composites under low-velocity impact loading, *Composite Structures* 168, (360-371).
- Madenci E., Özkılıç Y. O., Gemi L., (2020). Buckling and free vibration analyses of pultruded GFRP laminated composites: Experimental, numerical and analytical investigations, *Composite Structures* 254.
- Madewell (9 Mart 2021). What's The Difference Between Gfrp And Steel Reinforcement. <https://www.madewellproducts.com/blogs/msb-form/gfrp-vs-steel>. adresinden 10 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Md Abu Zaed Khan (2022). Explain different types of Impact Load in details with example of Impact load. <https://engineersblog.net/what-is-impact-load/> adresinden 26 Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.
- Mincigrucci L., Civera M., Lenticchia E., Ceravolo R., Rosano M., Russo S.,(2023). Comparative Structural Analysis of GFRP, Reinforced Concrete, and Steel Frames under Seismic Loads, *Journals Materials*,16,(14).
- Nasery M.M., Ağcakoca E., Yaman Z.,(2020). Experimental and numerical analysis of impactor geometric shape effects on steel beams under impact loading, *Structures*, 27,(1118-1138).

- Öndürücü A., Karacan A. (2018). Tabakalı Cam Elyaf/Epoksi Kompozitlerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6(3), 435-447.
- Prashanth S. , Subbaya KM. , Nithin K. and Sachhidananda S.,(2017). Fiber Reinforced Composites, *Journal of Material Sciences & Engineering*,6:3
- Roylance D.,(2001). Finite Element Analysis, *Massachusetts Institute of Technology Cambridge*.
- Sadıd M.S.,(2021). Guse Açısı Ve Berkitme Tipinin Statik Yük Etkisi Altındaki Kolon-Kiriş Birleşim Davranışına Etkisi, [Yüksek Lisans Tezi] *Sakarya Üniversitesi*.
- Sarıbıyık M., Sarıbıyık A., Aydın F., Akgül T., (2012). Use of GFRP in Lighweight Constructions, *International Workshop on Earthquake and Sustainable Materials Sakarya Universty, Technology Faculty*.
- Singh H., Namala K. K., Mahajan P.,(2015) A damage evolution study of E-glass/epoxy composite under low velocity impact, *Composites Part B: Engineering* 76, (235-248).
- Siwowski T., Rajchel M., Wlasak L.(2021). Experimental Study on Static and Dynamic Performance of a Novel GFRP Bridge Girder, *Composite Structures*,259.
- Structural Load. https://en.wikipedia.org/wiki/Structural_load. adresinden 22 Ekim 2022 tarihinde alınmıştır.
- Structural Steel. [ps://en.wikipedia.org/wiki/Structural_steel](https://en.wikipedia.org/wiki/Structural_steel). adresinden 15 Ekim 2022 tarihinde alınmıştır.
- Sutherland L.S., Sá M.F., Correia J.R., Soares C.G., Gomes A., Silvestre N.,(2017) Impact response of pedestrian bridge multicellular pultruded GFRP deck panels, *Composite Structures*, 171, (473-485).
- Wu C., Ding Y., Almeida-Fernandes L., Gonilha J., Sivestre N., Correia J. R., (2023). State-of-the-art review on the web crippling of pultruded GFRP profiles, *Thin-Walled Structures*,192,111128.
- Yüce İ.,(2007). Dairesel Kompozit Tabakalarda düşük Hızlı Darbe Hasarının İncelenmesi, Kullanılması [Yüksek Lisans Tezi] *Selçuk Üniversitesi*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Tuğçe ÇİMŞİR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2018, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** :Devam Ediyor, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı , Yapı Bilim Dalı
- **Yükseklisans** : Devam Ediyor, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü/Bankacılık -Tezsiz Yüksek Lisans

MESLEKİ DENEYİM

- 2019-2023 yılları arasında Asya Asbest Danışmanlık Firmasında İnşaat Mühendisi- Akustik Raporlama Sorumlusu olarak çalıştı..
- 2023-Halen devam ediyor - Ziraat Bankasında Gayrimenkul ve Ekspertiz Yönetimi Bölüm Başkanlığı - Uzman Yardımcısı olarak çalıştı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Çimşir T., Yaman, Z. , Nasery, M. M., Sadid M. S., (2022, Aralık) CTP Kompozit Profillerin Darbe Yüğü Etkisi Altındaki Davranışının Sonlu Elemanlar Metodu İle İncelenmesi, 10. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Güven Plus Yayınevi, İstanbul, Türkiye.