

**KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ
YIĞMA TONOZLARIN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

İsmail Hakkı TARHAN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Doç. Dr. Habib UYSAL**

2018

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA TONOZLARIN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

İsmail Hakkı TARHAN

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2018**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA TONOZLARIN SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Habib UYSAL danışmanlığında, İsmail Hakkı TARHAN tarafından hazırlanan bu çalışma 31/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Habib UYSAL

İmza :

Üye : Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun 01/02/2018 tarih ve 5/52 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA TONOZLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

İsmail Hakkı TARHAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Habib UYSAL

Yıllarca çeşitli yüklere maruz kalmasına rağmen günümüze kadar gelebilmiş olan tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi uygulamaları tarihi mirasımızın gelecek nesillere aktarımı bakımından önemli bir konudur.

Bu amaçla kullanılagelmiş yöntemler beraberinde başka dezavantajlı durumlarda getirmektedir. Son yıllarda teknolojinin ilerlemesine paralel olarak üretilen yeni malzemeler bu dezavantajlı durumları aşmada yardımcı olabilmektedir. Bu malzemelerin güçlendirme uygulamalarında kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Lif takviyeli polimer malzemeler olarak tabir edilen bu malzemeler karbon, aramid, cam, bazalt gibi mekanik özellikleri iyi liflerden üretilmektedir. Fakat diğer liflere nazaran daha iyi mekanik özelliklere sahip karbon lifi ile üretilen malzemeler daha çok uygulama bulmakta ve daha aktif güçlendirme sunmaktadır.

Bu çalışmada, dünya hammadde rezervlerinin %72'si ülkemizde bulunan bor elementinden elde edilen ve bor lifi takviyeli polimer yani BFRP (Boron Fiber Reinforced Polymer) olarak isimlendirilen malzemenin karbon lifi ile üretilen ve CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) olarak isimlendirilen malzemeye iyi bir alternatif olabileceği hatta CFRP den daha üstün mekanik özellikleri ile daha aktif bir güçlendirme malzemesi olabileceği düşünülmüş ve tarihi yığma yapıların kritik elemanlarından tonozlar üzerindeki etkinlikleri araştırılmıştır. Erişime açık literatürde bor lifinden üretilen BFRP malzemesinin inşaat mühendisliği araştırmalarında veya güçlendirme çalışmalarında kullanıldığına henüz rastlanmamıştır. Bu anlamda bu tez çalışması literatüre katkı sağlayacak öncü bir çalışma niteliği taşımaktadır.

Erzurum ilinde bulunan aziziye tabyasındaki tuğla tonoz örnekleri incelenmiş, belirlenen bir tuğla tonoz üzerinde ölçüler alınıp Ansys Workbench 17.0 programı aracılığıyla güçlendirilmemiş tonoz üzerinde analizler yapılmış ve çekme gerilmesinin olduğu bölgeler incelenmiştir. Buna göre belirlenen 9 güçlendirme tipi üzerinde hem BFRP hem de CFRP malzemelerle yapılan güçlendirme uygulamalarının analizleri yapılmıştır. Analizlerde literatüre bağlı olarak belirlenen statik çizgisel yükten dolayı meydana gelen toplam deformasyon ve çekme gerilmesi sonuçlarıyla birlikte modal analiz yapılarak frekans değerlerindeki değişim incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki malzeme içinde tüm güçlendirme şekillerinde toplam deformasyonun bir miktar sınırlandığı ve frekans değerlerinin artış gösterdiği tespit edilmekle birlikte her iki malzemeninde güçlendirme şekline bağlı olarak çekme gerilmesini karşılamadaki etkinliğinin artış gösterdiği ve kaydadeğer çekme gerilmesi sınırlaması sağlayabildikleri belirlenmiştir. Ayrıca alternatif olarak sunulan BFRP malzemesinin tüm analiz sonuçlarında CFRP ye göre daha etkin fayda sağladığı tespit edilmiştir.

2018, 129 sayfa

Anahtar kelimeler: Bor lifi takviyeli polimer, karbon lifi takviyeli polimer, prepreg, tonoz, yığma yapı, güçlendirme, ansys workbench, sonlu elemanlar yöntemi, kompozit malzemeler

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION BY FINITE ELEMENT METHOD OF MASONRY VAULTS THAT REINFORCED WITH COMPOSITES

İsmail Hakkı TARHAN

Ataturk University,
Institute of Science and Technology
Department of Civil Engineering
Department of Geotechnical

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Habib UYSAL

Even though it has been exposed to various loads for years, the applications of restoration and strengthening of historical structures that have been arrived up to present day are an important issue in terms of transferring our historical heritage to future generations.

The methods used for this purpose bring with it other disadvantages. New materials produced in parallel with the progress of technology in recent years can help overcome these disadvantages. The use of these materials in strengthening applications has become widespread. These materials, which are called fiber-reinforced polymer materials, are produced from fibers with good mechanical properties such as carbon, aramid, glass and basalt. However, materials produced using carbon fibers with better mechanical properties than other fibers find more applications and provide a more active reinforcement.

72% of the world's boron raw materials are in our country. The material obtained from this element, known as BFRP (Boron Fiber Reinforced Polymer), may be a good alternative to the CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) material produced using carbon fiber. BFRP materials were also thought to be more active reinforcement materials with superior mechanical properties than CFRP, and their activity on the vaults was investigated from critical elements of historic masonry buildings. It has not yet taken place in the open access literature that BFRP material produced from boron fibers is used in civil engineering surveys or retrofits. In this sense, this thesis study is a pioneering work which will contribute to the literature.

The samples of brick vaults on the redoubts in Erzurum province were examined, the measurements were taken on a determined brick vault and analyzed on the unreinforced vault by Ansys Workbench 17.0 program and the regions where tensile stress occurred were examined. On the 9 strengthening types determined according to this, 9 reinforcement types were analyzed for reinforcement applications made with both BFRP and CFRP materials, respectively. In the analyzes, the changes in the frequency values were investigated by performing modal analysis together with the results of the total deformation and tensile stresses due to the static linear load determined according to the literature. According to the results obtained, the total deformation of all reinforcements in both materials is limited. Frequency values increased for all types of reinforcement. The composites reduced the tensile stress value significantly. It has also been found that the alternative BFRP material provides more effective results than CFRP in all analysis results.

2018, 129 sayfa

Keywords: Boron fiber reinforced polymer, carbon fiber reinforced polymer, prepreg, vault, masonry building, retrofit, ansys workbench, finite element method, composite materials

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde bilgisi ve tecrübesiyle beni yönlendirirken sabrını ve desteğini esirgemeyerek bana olan inancını derinden hissettiren değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Habib UYSAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarımda yapmış olduğum analizlerin olgunlaşmasına katkıda bulunmak amacıyla değerli vakitlerini ayıran Sayın Doç. Dr. İlker KAZAZ ile Sayın Prof. Dr. Mustafa YAMAN hocalarıma yapmış oldukları değerli katkılarından ötürü teşekkür ederim.

Yine yaptığım analizler konusunda değerli bilgilerini paylaşan Sayın Arş. Gör. Yunus İŞIKLI'ye teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince varlıklarıyla moral motivasyon ve destek sağlamış olmakla birlikte yeri geldiğinde fikirlerini aldığım kıymetli dostlarım başta Emrah TURAN olmak üzere İlhan ASLAN, Cengiz BEKTAŞ ve Arş. Gör. Nur SUNAR'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde maddi manevi destekleri ile dualarını eksik etmeyen başta annem Baniye TARHAN ve babam İbrahim TARHAN olmak üzere abim Kerem TARKAN ile ablam Zehra KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm zorlu süreçlerimde olduğu gibi bu tezi oluşturmamda da sabırla bana katlanarak yanımda duran, desteğini her daim hissettiğim, sayın hocam ve sevgili eşim Arş.Gör. Yeşim TARHAN'a ve mevcudiyeti ile mevcudiyetimizi anlamlandıran canım oğlum Emir Arslanalp TARHAN'a tüm sevgimle teşekkür ederim.

İsmail Hakkı TARHAN

Ocak, 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
1.2. İnşaat Sektöründe Güçlendirme Uygulamalarının Önemi	4
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1. Yığma Yapılar	6
2.1.1. Yığma tonozlar	7
2.1.2. Yığma tonozların tarihçesi	9
2.1.3. Yığma tonozların taşıma kapasitesi.....	11
2.2. Kompozit Malzemeler	22
2.2.1. Kompozit malzemelerin tarihçesi.....	23
2.2.2. Yaygın olarak kullanılan matris ve takviye çeşitleri	24
2.2.3. Kompozit malzemelerin çeşitleri ve sınıflandırılması.....	28
2.2.4. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri	32
2.2.5. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları	33
2.2.6. Kumaş ve prepreg kompozitler	35
2.3. Yığma Kemer ve Tonozların Kompozitlerle Güçlendirilmesi Üzerine Literatürdeki Çalışmalar	39
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	47
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	47
3.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Modelleme Teknikleri.....	49
3.2.1. Detaylı mikro modelleme	53
3.2.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme	53
3.2.3. Makro modelleme.....	54

3.3. Çalışma Kapsamında Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri.....	55
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	58
4.1. Doğrulama Analizleri	58
4.1.1. Literatürden faydalanılarak yapılan doğrulama	58
4.1.2. Mikro ve makro modelleme analiz karşılaştırması	60
4.2. Analiz Sonuçları	69
4.2.1. Alttan boyuna güçlendirme - 1.tip.....	72
4.2.2. Üstten boyuna güçlendirme - 2.tip	79
4.2.3. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme - 3.tip	84
4.2.4. Alttan eğrisel güçlendirme - 4.tip.....	89
4.2.5. Üstten eğrisel güçlendirme - 5.tip	94
4.2.6. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme - 6.tip	100
4.2.7. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme - 7.tip	105
4.2.8. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme - 8.tip.....	110
4.2.9. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme - 9.tip	115
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	121
5.1. Sonuçlar.....	121
5.2. Öneriler.....	125
KAYNAKLAR	126
ÖZGEÇMİŞ	130

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

e_1	Kemer kalınlığı
E_a	Yeni malzemeye ait elastisite modülü
E_m	Harcın elastisite modülü
E_u	Yığma elemanların elastisite modülü
R	Kemer dış yarıçapı
r	Kemer iç yarıçapı
t_m	Harç kalınlığı
t_u	Yığma elemanın kalınlığı

Kısaltmalar

BFRP	Bor fiber takviyeli polimer
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer
FRP	Fiber takviyeli polimer
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tonoz biçimlenmeleri.....	8
Şekil 2.2. İlkel tonoz	9
Şekil 2.3. Tonozun gelişim şeması	11
Şekil 2.4. Tonoz tiplerine göre yük atarımı	12
Şekil 2.5. Silindirik tonoz yük aktarımı	12
Şekil 2.6. Manastır tonoz yük aktarımı.....	13
Şekil 2.7. Çapraz tonoz yük aktarımı.....	13
Şekil 2.8. Genel olarak tonozlu sistemlerde yük aktarımı	14
Şekil 2.9. Kemer ve tonozla etki eden kuvvetler ile itki çizgisinin konumu	15
Şekil 2.10. Kemer kesitinde yük dağılım çizgileri.....	16
Şekil 2.11. Kemerde çekme gerilmelerinden oluşan çatlaklar.....	17
Şekil 2.12. Bazı kemer sistemlerinde moment sıfır eğrisi	17
Şekil 2.13. Kemerdeki bozulmaları önlemek için çözüm önerileri	20
Şekil 2.14. Kemer kalınlığı- açıklık oranının stabiliteye etkisi	21
Şekil 2.15. Beşik tonozların kırılma mekanizması	22
Şekil 2.16. Kompozit malzeme türleri	29
Şekil 2.17. Polimer kompozit üretim yöntemleri.....	33
Şekil 2.18. Prepreg üretim şekilleri.....	35
Şekil 2.19. Prepreg üretim yöntemlerinden elle yatırma	36
Şekil 2.20. Prepreg üretim yöntemlerinden otomatik şerit yatırma	37
Şekil 2.21. Prepreg üretim yöntemlerinden otomatik lif yerleştirme.....	37
Şekil 2.22. Tek ve çift yönlü prepreg kompozitler	38
Şekil 2.23. Prepreg kompozitlerde lif yönlenmesi.....	38
Şekil 3.1. Yapı modellerinin oluşturulması için sonlu eleman tanımlanması.....	49
Şekil 3.2. Yığma yapılarda kullanılan modelleme teknikleri	52
Şekil 3.3. Solid 186 elemanın geometrisi	56
Şekil 3.4. SHELL181 elemanın geometrisi	56
Şekil 4.1. 1m açıklıklı kemerin statik analiz sonucu	59
Şekil 4.2. Yaptığımız doğrulama analizi sonucu	59

Şekil 4.3. (a)Çalışma kapsamında analizleri yapılacak yarım daire beşik tonoz ölçüleri (b)Tonozun kemer enkesitindeki harç ve tuğla birleşim detayı(Ölçüler mm'dir.) (c)Tonozun kemer kesiti ölçüleri	61
Şekil 4.4. 20 mm lik sonlu eleman ağına bölünmüş tonoz	64
Şekil 4.5. 50 mm'lik sonlu eleman ağına bölünmüş tonoz	64
Şekil 4.6. Mikro modele ait toplam deformasyon	65
Şekil 4.7. Makro modele ait 50mm boyutundaki sonlu eleman ağı.....	66
Şekil 4.8. Makro modele ait toplam deformasyon	66
Şekil 4.9. Mikro ve makro modellere ait çekme gerilmesi dağılımı.....	66
Şekil 4.10. Makro modele ait mod şekilleri	67
Şekil 4.11. Mikro modele ait mod şekilleri.....	68
Şekil 4.12. (a).Güçlendirilmemiş tonoz (b).Alttan boyuna güçlendirme-1.tip (c).Üstten boyuna güçlendirme-2.tip (d). Alttan ve üstten boyuna güçlendirme-3.tip (e). Alttan eğrisel güçlendirme-4.tip (f). Üstten eğrisel güçlendirme-5.tip (g). Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme-6.tip (h).Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme-7.tip (ı).Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme-8.tip (i).Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme-9.tip.....	71
Şekil 4.13. Alttan boyuna güçlendirme şekli ve bu şekilde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları.....	73
Şekil 4.14. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	74
Şekil 4.15. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	74
Şekil 4.16. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	75
Şekil 4.17. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde	75
Şekil 4.18. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilme durumunda tonoz üzerinde meydana gelen gerilmeler;	76
Şekil 4.19. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilme durumunda tonoz üzerinde meydana gelen gerilmeler;	76
Şekil 4.20. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ve CFRP malzemesi ile	

yapılan güçlendirmenin ilk 5 mod şekli	78
Şekil 4.21. Üstten boyuna güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	80
Şekil 4.22. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	80
Şekil 4.23. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	81
Şekil 4.24. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	81
Şekil 4.25. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde (a)BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	82
Şekil 4.26. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	82
Şekil 4.27. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	83
Şekil 4.28. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları.....	85
Şekil 4.29. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	85
Şekil 4.30. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	86
Şekil 4.31. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	86
Şekil 4.32. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler.....	87
Şekil 4.33. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde a)Üst kısımdaki (a)BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler ((b) Üst kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	87
Şekil 4.34. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	88
Şekil 4.35. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş	

tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı	88
Şekil 4.36. Alttan eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	90
Şekil 4.37. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	91
Şekil 4.38. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	91
Şekil 4.39. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	92
Şekil 4.40. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde (a) BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b) CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	92
Şekil 4.41. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	93
Şekil 4.42. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	93
Şekil 4.43. Üstten eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	95
Şekil 4.44. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	95
Şekil 4.45. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	96
Şekil 4.46. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları	96
Şekil 4.47. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde (a) BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b) CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	97
Şekil 4.48. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	97
Şekil 4.49. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	98
Şekil 4.50. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde İlk 5 moda ait mod şekilleri.....	99

Şekil 4.51. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları.....	101
Şekil 4.52. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları.....	101
Şekil 4.53. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	102
Şekil 4.54. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	102
Şekil 4.55. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler.....	103
Şekil 4.56. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	103
Şekil 4.57. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	104
Şekil 4.58. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	104
Şekil 4.59. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları.....	106
Şekil 4.60. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	106
Şekil 4.61. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	107
Şekil 4.62. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	107
Şekil 4.63. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	108
Şekil 4.64. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki boyuna BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki boyuna CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	108
Şekil 4.65. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile	

güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	108
Şekil 4.66. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	109
Şekil 4.67. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	111
Şekil 4.68. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	111
Şekil 4.69. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	112
Şekil 4.70. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	112
Şekil 4.71. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler.....	113
Şekil 4.72. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki boyuna BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki boyuna CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	113
Şekil 4.73. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	114
Şekil 4.74. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı.....	114
Şekil 4.75. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	116
Şekil 4.76. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları	116
Şekil 4.77. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde	

BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	117
Şekil 4.78. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları.....	117
Şekil 4.79. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısım eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	118
Şekil 4.80. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	118
Şekil 4.81. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki boyuna BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki boyuna CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	119
Şekil 4.82. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde a)Üst kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b) Üst kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler	119
Şekil 4.83. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı	119
Şekil 4.84. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı	120
Şekil 5.1. Güçlendirme uygulamalarının güçlendirme malzemesi ve şekline göre toplam deformasyon değerini sınırlamaya olan katkılarının yüzdesel olarak gösterimi	121
Şekil 5.2. Güçlendirme uygulamalarının güçlendirme malzemesi ve şekline göre maksimum çekme gerilmesi değerini sınırlamaya olan katkılarının yüzdesel olarak gösterimi	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bazı polimer kompozitlerin özellikleri.....	31
Çizelge 4.1. Nissar(2017) çalışmasında kullandığı malzeme özellikleri.....	59
Çizelge 4.2. Malzeme özellikleri	60
Çizelge 4.3. Modellemede kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	62
Çizelge 4.4. Mikro ve makro modellere ait frekans değerleri (a).Mikro modele ait frekans değerleri (b)Makro modele ait frekans değerleri	69
Çizelge 4.5. Güçlendirme tiplerine göre kullanılan eleman ve düğüm noktası sayıları.....	72
Çizelge 4.6. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 1.tip güçlendirmenin frekans değerleri.....	79
Çizelge 4.8. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 3.tip güçlendirmenin frekans değerleri	89
Çizelge 4.9. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 4.tip güçlendirmenin frekans değerleri.....	94
Çizelge 4.10. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) VE CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 5.tip güçlendirmenin frekans değerleri	100
Çizelge 4.11. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 6.tip güçlendirmenin frekans değerleri.....	105
Çizelge 4.12. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 7.tip güçlendirmenin frekans değerleri.....	110
Çizelge 4.13. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 8.tip güçlendirmenin frekans değerleri.....	115
Çizelge 4.14. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 9.tip güçlendirmenin frekans değerleri	120

Çizelge 5.1. Güçlendirme uygulamalarının güçlendirme malzemesi ve şekline göre ilk 5 moda ait frekans değerleri	124
---	-----

1. GİRİŞ

Ülkemizde geçmişten günümüze kadar uzanan pek çok medeniyet barınmıştır. Dolayısıyla bu medeniyetlerin tarihi özelliklerini taşımakta olan çok sayıda kale, sur, cami, köprü, kilise gibi tarihi yapı mevcudiyetimiz bulunmaktadır. Bu yapılar geleneksel malzemelerle inşa edilmiş olup var olduklarından beri yangınlar, atmosferin malzemeler üzerindeki yıpratıcı etkileri, farklı yüklemeler ve depremler gibi birçok olumsuz etkiye maruz kalmışlardır. Zarar görmelerine ve hatta yıkılmalarına sebebiyet verebilen bu olumsuzluklara rağmen günümüze kadar ayakta kalmayı başarabilmiş olan tarihi yapılara gereken önem verilmeli, zarar gören kısımları onarılmalı ve gerekli güçlendirmeler yapılarak geleceğe de güvenle aktarımı sağlanmalıdır (Değirmenci vd 2015). Tarihi eserlerin korunmasındaki temel amaç da tam olarak budur. Ancak, bu yapılırken yapının özgün niteliklerinin bozulmaması ve belge değerinin korunmaya çalışılması konularına hassasiyet gösterilmesi gerekmektedir (Örmecioğlu 2010). Öte yandan bir yapının korunumunun ancak işlevselliğinin artırımı sayesinde mümkün olduğu kapalı halde tutulan veya kullanılmayan tarihi bir yapının zamanla aşınarak, doğal ve diğer etkilerden dolayı hasara uğrayarak kullanılamayacak hale geleceği bilinmelidir. Bu nedenle tarihi yapıların korunarak ve kullanılarak kültürel hayata kazandırılması, dönemini yansıtması ve geleceğe güvenle aktarılması açısından son derece önemlidir (Koçak vd 2007).

Tarihi yapıların önemli bir çoğunluğunu yapının taşıyıcı görevini üstlenecek olan taş veya tuğla birimler ile inşaa edilip yığma yapı olarak isimlendirilen yapılar oluşturmaktadır. Tarihi yığma yapılarda; Çimento Enjeksiyonu, Betonarme Mantolama, Gergi Demirleriyle Güçlendirme, Betonarme Hatıllarla Güçlendirme, Ahşap Dikme ve Çaprazlarla Güçlendirme, Çelik Profillerle Güçlendirme, FRP (Fiber Reinforced Polymer) Kompozitlerle Güçlendirme kullanılan başlıca onarım ve güçlendirme yöntemleridir. Bu yöntemlerden FRP(Fiber Reinforced Polymer) Kompozitlerle Güçlendirme yeni bir yöntem olup pek çok açıdan diğer yöntemlere göre avantajlıdır. FRP malzemesi olarak karbon, cam, aramid lifler kullanılabilir. Fakat üstün

mekanik özelliklerinden dolayı genellikle karbon lifi tercih edilmektedir (Değirmenci vd 2015).

Yığma duvarlar belli bir basınç dayanımına sahip elemanlardır. Fakat donatı içermediklerinden çekme kuvvetleri altında herhangi bir dayanım göstermezler ve hasara uğrarlar. Bu nedenle eğilme etkisine maruz kalacak döşeme, çatı vb. taşıyıcı elemanlar kemer, kubbe ve tonoz gibi eğrisel elemanlar olarak tasarlanırlar. Ancak asimetrik yüklemeler, zeminde meydana gelen farklı oturmalar ve deprem etkileri taşıyıcı elemanlarda çekme gerilmelerinin artmasına ve yoğunlaşmasına neden olur. Çekme gerilmelerinin yoğunlaştığı kısımlarda çekme gerilmelerine dik doğrultularda çatlaklar oluşur. Bu durum yük aktarımının sürekliliğinin kaybolmasına ve bölgesel göçmeler/çatlamalar ve dökülmelerin meydana gelmesine sebep olur. Bilhassa eğilme etkisine maruz kalacak kemer, tonoz ve kubbe gibi eğrisel taşıyıcı elemanlarda meydana gelecek oturma ve dönmeler ciddi düzeyde tehlike arz etmektedir. Bu nedenle oluşan hasarlar kalıcı olmakla birlikte yapının o bölgede tamamen göçmesine neden olabilir. Bu sebeple yığma yapılarda kemer ve tonoz gibi taşıyıcı elemanların güçlendirilmesi ayrıca önem arz etmektedir. Bu güçlendirme işlemi geleneksel malzemeler ve yöntemlerle yapılabilmesine rağmen geleneksel malzemelerin düşük dayanıma sahip olması ve çekme gerilmesini alacak eleman teşkilinin güçlüğü yeni teknolojik malzemelerin de kullanılması fikrini doğurmuştur (Döndüren vd 2017).

Güçlendirme uygulamalarında bu gibi problemlerle başa çıkabilmek için çeşitli liflerin tek ve çok yönlü olarak kullanılmasıyla kumaş şeklinde üretilen kompozit malzemeler uygulamada sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. Buna paralel olarak gelişen teknolojiyle yeni bir malzeme olan prepreg kompozit malzemesi üretilmekte olup güçlendirme uygulaması üzerine birkaç akademik çalışmada kullanılmıştır. Sonlu elemanlar paket programı kullanılarak yığma yapıların ve kompozit malzemelerin modellenmesindeki güçlüklerden dolayı literatürde kompozit malzemelerle güçlendirilmiş yığma yapıların statik ve dinamik analizlerinin eksiklikleri görülmektedir. Bu çalışmada karbon liflerden ve bor liflerinden elde edilmiş olan piyasadaki prepreg kompozitlerin özellikleri alınıp bu malzeme özellikleri Ansys Workbench sonlu elemanlar programına tanıtılmıştır. Bu

özelliklerdeki malzemelerle çeşitli şekillerde güçlendirilmiş yığma tonozlar modellenerek bunların statik yükler altındaki davranışları incelenmiştir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Tarihi yapılar yıllarca dış yüklere maruz kalmışlardır. Bir kısmı bu dış yüklerin etkisiyle yıkılmış ve günümüze kadar ulaşamamıştır. Günümüze kadar ulaşabilmiş olan kültürel ve tarihi mirasımızı gelecek nesillerimize aktarmamız, kültürel ve tarihi değerlerimize sahip çıkılmasının önemine binaen elzemdir.

Tarihi yapılarımızın geleceğe güvenle aktarımının sağlanması için çeşitli onarım ve güçlendirme uygulamalarından geçmesi gerekmektedir. Bu onarım ve güçlendirme uygulamaları için gelenekselleşmiş yöntemler süregelmektedir. Fakat geleneksel yöntemler çeşitli konularda beraberinde bazı dezavantajlarda getirmektedir. Bu dezavantajlarıyla baş edebilme amacıyla araştırmacılar çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar.

Gelişen malzeme teknolojisi ile üretilen fiber takviyeli kumaşlar bu dezavantajların üstesinden gelmekle birlikte çok daha üstün avantajlar sağlayabilmektedirler. Bu malzemelere alternatif olarak yeni bir malzeme olan prepreg malzemeler üretilmektedir. Bu malzemelerin ince ve şekil verilebilir oluşu ile üstün mekanik özelliklerinden dolayı güçlendirme amaçlı kullanılabilirliği düşünülmüştür. Nitekim bu amaçla literatürde çalışmalarda başlamıştır. Fakat yeni malzeme oluşu nedeniyle literatürde eksiklikler mevcuttur.

Bu tez; literatürdeki bu eksiklikleri gidermek, farklı prepreg kompozitlerin güçlendirme amaçlı uygulamasını karşılaştırarak güçlendirme uygulamalarında kullanıldığında en etkin faydanın sağlanacağı malzemeyi tespit etmek, çeşitli güçlendirme yöntemlerini karşılaştırarak en etkin güçlendirme şeklini belirlemek ve daha önce hiç güçlendirme amaçlı düşünülmemiş bor prepreg malzemesinin güçlendirme amaçlı kullanımının getireceği faydaları incelemek amaçlarıyla hazırlanmıştır.

Tez kapsamında; Tarihi yapılarda büyük açıklıkları geçmek için inşaa edilen hasara maruz kaldığında yıkıcı etkiye sebep olabilecek yani tarihi yapıların kritik elemanları olan tonozların güçlendirilmesi üzerinde durulacaktır. Farklı kompozit malzemelerin yığma tonozlar üzerinde her bir malzeme için belirlenen belli sayıda güçlendirme uygulamasının Ansys Workbench paket programıyla analizleri yapılacak olup alınan sonuçların karşılaştırılmasıyla en etkin güçlendirme malzemesi ve yapılacak güçlendirme şekilleri içerisinde en etkin güçlendirme şekli belirlenecektir.

1.2. İnşaat Sektöründe Güçlendirme Uygulamalarının Önemi

Ülkemiz dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Deprem Bölgeleri Haritası'na göre, yurdumuzun %92'si deprem bölgeleri içerisinde bulunmakta olup nüfusumuzun %95'inin deprem tehlikesi altında yaşamakta olduğu bilinmekle birlikte büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajlarımızın %93'ü deprem bölgelerinde konumlanmaktadır. Bu veriler göz önüne alındığında yapılarımızın olası bir depremde zarar görmesi ve/veya yıkılma tehlikesi bulunduğunu söylemek zor değildir. Geçmişte birçok yıkıcı depremlere maruz kalan yurdumuz, gelecekte de sık sık oluşacak depremlerle büyük can ve mal kaybına uğrama riskini taşımaktadır (Anonim-II 2017). Bu kayıpların azalmasını ve hatta önüne geçilebilmesini sağlayabilmek adına onarım ve güçlendirme uygulamaları ön plana çıkmaktadır.

Hasar görmüş bir yapıyı ya da yapı elemanını öngörülen bir güvenlik düzeyine getirmek için yapılan işlemlere “onarım” hasar görmemiş bir yapıyı ya da yapı elemanının performansını yürürlükteki Deprem Yönetmeliğinin belirlediği ve depremde toptan göçmeyi önleyecek düzeye çıkarmak için yapılan işlemlere “güçlendirme” denilmektedir. Onarımdaki amaç önceki durumu geri getirmektir, bu kullanım bakımından olabileceği gibi yapının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve dayanıklılığını artırmak şeklinde olabilir. Güçlendirmedeki amaç ise, yapının dayanım ve benzeri karakteristiklerini önceki düzeyinin üstüne çıkartmaktır.

Deprem gibi güçlü yıkım potansiyeline sahip felaketler modern yapılarımızı da tehdit

etmekle birlikte daha çok tarihi yığma yapılar üzerinde olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Tarihi yapıların korunarak gelecek nesillere güvenle aktarılması, insanlık tarihinin gelişimine dair verilerin saklanması bakımından önemli bir olgudur. Bu yapılar yapıldıkları dönemin kültürleri, inanışları, sosyolojik yapıları ve yapım teknikleri hakkında bilgiler sunarlar. İnsanlık için bu bilgi akışının sürdürülebilirliği önemlidir (Çavuş vd 2013). Bir deprem ülkesi olup tarihi miras açısından oldukça zengin olan ülkemizde, sahip olduğumuz tarihi mirasımızı tüm diğer zorlamalarla birlikte, olası deprem afetlerine karşı da korumamız gerekmektedir (Peker 2003). İnşa edildiği zamanının teknolojisinin yetersiz olması dolayısıyla sadece basınca çalışacak şekilde tasarlanıp inşaa edilen tarihi yığma yapılar deprem gibi yanal yüklerin oluşturduğu çekme kuvvetleriyle başa çıkamamakta ve kolaylıkla yıkılabilmektedir. Güçlendirme uygulamalarıyla bu problemlerle başa çıkılabilmekte olup kullanılan güçlendirme malzemelerinin eleman teşkilinin güçlüğü, paslanmaya karşı dirençsiz olmaları, yapı ağırlığını artırmaları gibi dezavantajları da oluşabilmektedir. Ancak gelişen teknoloji ile üretilen yeni malzemelerin güçlendirme amaçlı kullanılmasıyla bu dezavantajların da üstesinden gelinmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yığma Yapılar

Taş, tuğla, kerpiç, briket, ahşap gibi yapı malzemelerinin üst üste konulup kendi ağırlıkları ile ya da harç ile birleştirilerek taşıyıcı özellikte duvar, kemer, kubbe, tonoz, sütun gibi elemanlarla oluşturulan yapılar yığma yapı olarak tabir edilmektedir (Özer 2006). Yığma, günümüze kadar yapılagelmiş en eski yapı yapma biçimidir. M. Ö. 9000-8000 yıllarına ait olan İsrail’de Hullen Gölü yakınlarında bulunmuş taş yığma yapılar en eski yığma yapılar olarak bilinmektedir. Antik Roma ve Bizans dönemi yapılarında taş işçiliğinin gelişimi ivme kazanmıştır.

Yığma duvarlar tarih boyunca birçok yapının vazgeçilmez taşıyıcı elemanları olarak kullanılmışlardır. Bu tür yapılarda duvarlar, mekânları birbirinden ayırma işlevi görmekle birlikte aynı zamanda taşıyıcıdırlar. Geleneksel taşıyıcı sistem düşey taşıyıcılar ile örtü elemanlarının birleşmesinden oluşmaktadır ve geleneksel yapı malzemelerinin olanakları dâhilinde biçim almıştır. İnsanoğlu, barınma gereksinimini karşılamak için ilk olarak ağaç ve saman gibi dayanıksız malzemeleri kullanmış olup zamanla taş ve mermer gibi daha dayanıklı malzemelere geçiş yapmıştır. İnşa edilen ilk yapılar, büyük ve kaba taşlar ile taşların birleşim yüzeylerinde bağlayıcı bir malzeme kullanılmaksızın taşların üst üste bindirilmesiyle inşa edilmiştir. Daha sonraları taşların arasında çamur gibi bağlayıcı malzeme kullanılırken, sonraki dönemlerde ise taşların arasına bağlayıcı malzeme olarak harç yerleştirilerek yığma yapılar oluşturulmuştur.

Büyük taş blokların ağır ve kaba olması sebebiyle insanlar yapıların inşası için yeni malzemeler geliştirmeye yönelmiştir. Bu amaçla topraktan elde edilen kil malzemeler pişirilerek tuğla yapılmıştır. Tuğla, günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geçmişten günümüze kadar ulaşmış tarihi yapılar incelendiğinde, bu yapılarda kullanılmış olan taş, tuğla ve harç malzemelerinin özelliklerinin çok fazla çeşitlilik

gösterdiği görülmektedir. Hatta bazı yapılarda kendi içinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri bile değişiklik gösterebilmektedir. Bu, yapıların yapıldıkları dönemde ve bölgelerde en kolay bulunan malzemelerin yapı malzemesi olarak seçilmesine bağlanmaktadır. Tarihi yapılarda kullanılan harç, yapının yapıldığı döneme, yapıldığı yere ve bölgenin iklim durumuna bağlı olarak farklılıklar göstermesi buna örnek olarak verilebilir. Yığma yapıları oluşturan malzemelerin genel olarak özellikleri; dış etkilere dayanıklı, sünekliği az, gevrek, basınca dayanımlı, çekmeye karşı çok zayıf olarak sıralanabilir.

Yığma yapı elemanları; duvarlar, kemerler, tonozlar ve kubbeler olarak sınıflandırılabilen olup mimarlık tarihi incelendiğinde kemerlerin, insanların daha büyük açıklıklı mekanlarda olma isteğinin yapı tasarımını etkilemesinin bir sonucu olarak duvar yüzeylerinde büyük boşluklar elde etmek amacıyla yapılan ilk uygulamalardan biri olduğu görülmektedir.

“Tarih boyunca insanoğlu genellikle dini ve sosyal ihtiyaçlarına hizmet edecek geniş açıklıkları geçme çabası içinde olmuştur. Günümüzde de başta büyük toplulukları bir mekân altında toplamak ve çok çeşitli fonksiyonları içinde barındırmak amacıyla geniş açıklıklı yapılara ihtiyaç duyulmaktadır” (Kayalar 2010). Bu ihtiyaca cevap verme isteği kemer, tonoz ve kubbe gibi yapı elemanlarının inşa edilme amaçlarından biri olarak gösterilebilir.

2.1.1. Yığma tonozlar

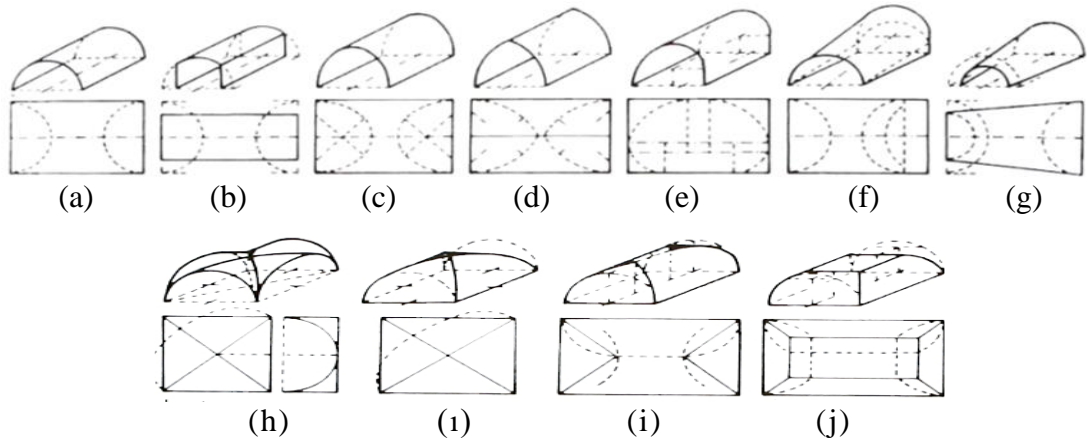
Tarihi yapılarda taşıyıcı elemanlar açısından en önemli gelişmelerin başında, düz kirişler yerine eğri forma sahip kirişlerin kullanılması gelmektedir. Temel taşıyıcı elemanlar arasında yer alan bu kirişler, tarihi yapıların taşıyıcı sistemi açısından oldukça önemli bir yere sahip kemerlerdir. Kemerler, küçük mekânların genişletilmesinden büyük açıklıkların geçilmesine kadar birçok farklı yapıda kendini göstermekte ve tarihi yapıların geleceğe güvenle devredilmesi konusunda oldukça önemli bir rol oynamaktadırlar. Eğri forma sahip bir kiriş olan kemerlerin daha büyük açıklıkların

geçilmesi amacıyla bir doğrultuda uzatılmasıyla tonoz elemanlar, orta kısmından geçen bir eksen etrafında 180° döndürülmesiyle kubbe elemanlar türetilmiştir.

Türk Dil Kurumu'nun tanımına göre Yunanca'dan Türkçe'ye geçmiş olan, tonoz “tuğla ve harçla örülmüş, alttan obruk, yarım silindir biçiminde tavan örtüsü ve bir kemerin aralıksız devam etmesiyle oluşan örtü biçimi” şeklinde tanımlanmıştır.

“Biçimi alttan içbükey olmak üzere taş ya da tuğla ve harçla örülmüş yarım silindir biçimde tavan, bir kemerin aralıksız olarak devam etmesi ile meydana gelen örtü” (Kayalar 2010) olarak tanımlanan tonoz, bir kemerin kendi düzlemine dik doğrultuda ötelenmesiyle oluşan örtü sistemidir. Tonoz yapımında, kubbede olduğu gibi basınç direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. İşlenmiş doğal taşlar, tuğla ve özel hazırlanmış beton bloklar tonoz yapımında kullanılabilir.

Tonozun strüktürel özelliği, dayanak noktasında sürekli taşıyıcı elemanları gerektirmesidir. Erken Mezopotamya döneminde elde edilen, çok geniş duvarlardan oluşan alt yapı üzerine konumlandırılan beşik tonozun ardından, zamanla çeşitli tonoz türleri elde edilmiştir. Bunlar: beşik tonoz, sivri tonoz, konik tonoz, verrev tonoz, eğik tonoz, haç tonoz, manastır tonoz, tekne tonoz ve aynalı tonoz olarak sıralanabilir.



Şekil 2.1. Tonoz biçimlenmeleri

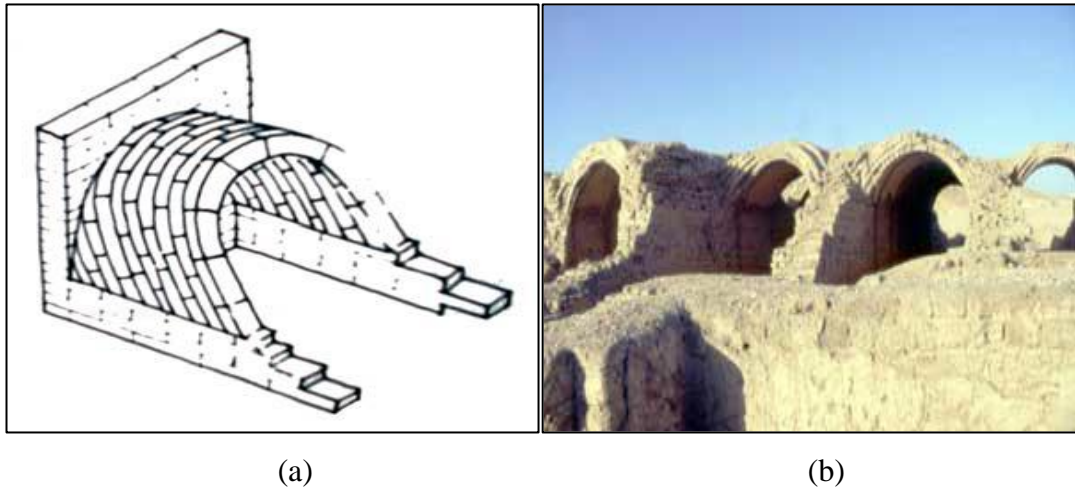
(a) Beşik Tonoz (b) Basık Tonoz (c) Yüksek Tonoz (d) Sivri Tonoz (e) Eğri (Verrev) Tonoz (f) Eğik Tonoz (g) Konik Tonoz (h) Haç Tonoz (ı) Manastır Tonozu (i) Tekne Tonoz (j) Aynalı Tonoz

Tonozlar, tek ve çift eksenli olmak üzere iki grupta incelenebilir: Tek Eksenli: Bir kemerin, merkezi yönünde ötelenmesiyle meydana gelir. Beşik, sivri, verev, eğik, konik tonozlar bu gruba dâhildir.

Çift Eksenli: Birbirini dik kesen tonozlardan oluşur. Çapraz tonozda yükler yalnızca dört köşede toplandığı için dört sütunla ayakta kalabilir. Diğer bütün tonozlar, aldıkları yükü duvarlara iletirler. Manastır tonozu, tekne tonoz, aynalı tonoz ve çokgen tonoz bu gruptadır.

2.1.2. Yığma tonozların tarihçesi

Tonozların en ilkelleri, Mezopotamya ve Mısır'da, bir duvara eğri yaslanan kemere bitişik olarak örülen birbirinden bağımsız kemerlerden oluşmuştur. Bu şekilde yapılmış ve günümüzde ayakta duran en eski tonoz, M. Ö. 1300'lerde Mısır'da yapılmış olan Ramasseum tonozlarıdır. Firavunun tahıl ambarı olarak kullanıldığı bu tonozlar kerpiçten yapılmıştır ve 4 m. açıklık geçer.



Şekil 2.2. İlkel tonoz

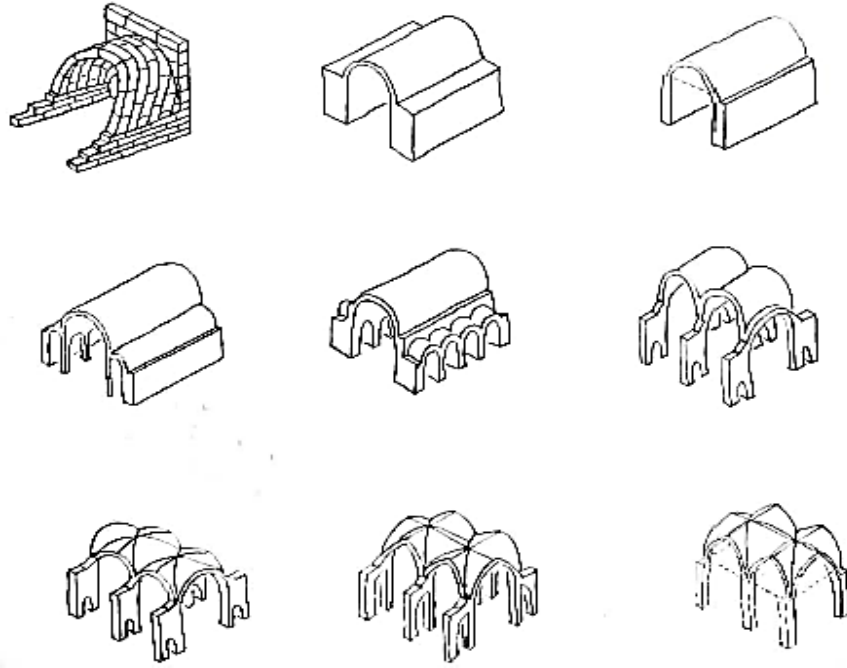
(a) Ramasseum- Gurna, Mısır (b)

Gerçek tonozun strüktürel özelliği, dayanak noktasında sürekli taşıyıcı düzlem gerektirmesidir. Örneğin Mezopotamya'da tekniğin fazla gelişmemesinden dolayı beşik

tonoz, masif bir alt yapı gerektirmiştir. Bundan dolayı tonozu taşıyan duvarlar çok geniştir. Sasani döneminde, taşıyıcı duvar biraz daha hafiflemiş ve iç mekan düzeni daha gelişmiştir.

Roma'da tek hacimli mekânlardan birkaç bölümü olan mekânlara doğru bir gelişme olur. Bu gelişmeyi sağlayan örtü elemanı, iki beşik tonozun dik açıyla birleşmesiyle oluşan, çoğu zaman sütun ve ayaklarla taşınan çapraz tonozdur. Çapraz tonoz duvarlarla taşındığında, itme kuvvetleri duvarın dört köşesinde toplandığından, dört köşedeki payandalardan başka diğer kuvvetler kaldırabilmiş, böylece kemerlerin altında büyük pencereler açılabilmiştir. Tonozun, zor taş yontma işleri olmadan inşa edilebilmesi için, tonoz inşaatlarında taştan çok beton kullanılmış, tonozlar tuğla kaburgalar arasına beton dolgu ile inşa edilmiştir.

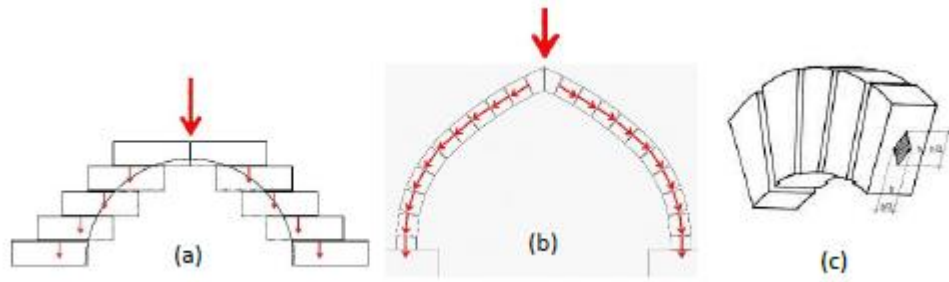
Daha sonraları bu sistem geliştirilerek gotik dönemde uygulanmıştır. Gotik yapılarda, dikdörtgen planlar üzerinde aynı yükseklikte fakat farklı açıklıkta sivri kemerli tonozların kullanıldığı görülür. Sivri kemerlerle yapılan çapraz tonoz ise mekânsal gelişimi de sağlamıştır. Bu sayede kare olmayan mekânlar oluşturulabilmiş ve birden fazla bölümü olan yapılar biçimlendirilebilmiştir. Geç gotik dönemde uygulanan yıldız tonoz ise daha çok bezeme amaçlı yapılmış parçalı tonozdur. Şekil 2.3'te tonozların gelişim şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Tonozun gelişim şeması

2.1.3. Yığma tonozların taşıma kapasitesi

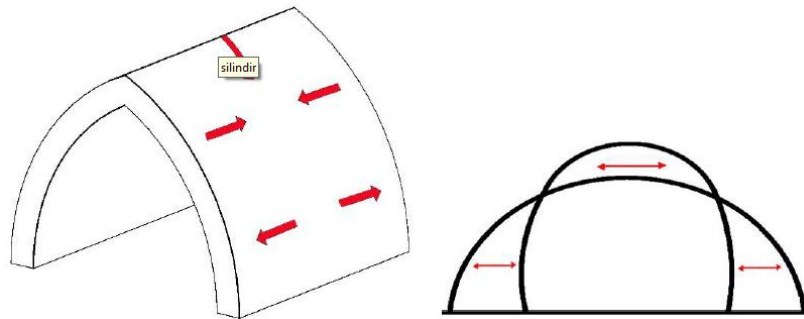
Yığma yapıların yapısal davranışı malzeme ve yapı şeklinin özelliklerine göre değişmektedir. Kemer, tonoz ve kubbelere gelen yüklerin zemine iletiminde bu elemanların şekli, elemanlardaki yığma birimlerin dizilim şekli ve mesnetlenme biçimleri önemli faktörlerdir. Kemer, tonoz ve kubbelerin bindirmeli ve radyal dizilim olarak isimlendirilen iki farklı dizilim tipine göre inşası mevcuttur. Bindirmeli dizilim yönteminde yük iletimi duvarda olduğu gibi düşey yöndedir ve basınç yükü olarak yığma birimlerden mesnetlere doğru aktarılmaktadır. Radyal dizilim yönteminde ise, bir yay formu üzerinde radyal olarak dizilmiş yığma birimlere en tepe noktadan etkiyen yük alt birimlere, birimlerin çekirdek bölgesinden basınç şeklinde ve itki olarak mesnetlere eğik itki şeklinde iletilmektedir. İtki kemer, tonoz, kubbe ve mesnetlerde çekirdek bölgesinde kaldığı sürece güvenli bir şekilde zemine aktarılmaktadır. Kuvvetin çekirdek alanının dışında bulunması durumunda enkesit içinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Çekme gerilmelerinin malzemenin dayanımını aşması durumunda, yapı elemanında çatlaklar meydana gelmektedir.



Şekil 2.4. Tonoz tiplerine göre yük atarımı

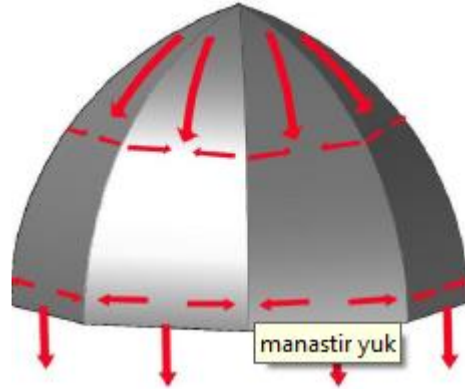
a) Bindirmeli dizilime göre b) Radyal dizilime göre c) Çekirdek yük aktarımı yük aktarımı

Tonoz tiplerine göre yük aktarımına değinecek olursak; Silindirik tonozları oluşturan eğri ve doğru asal eksenleri üzerindeki asal gerilmeler; eğri eksen üzerinde basınç (kemer çalışması), doğru eksen üzerinde üst kısımda basınç, alt kısımda çekme (kiriş çalışması) şeklindedir. Konik tonozun eksenlerinden biri doğru, diğeri eğri geometriye sahip olup çalışması silindirik tonoz gibidir.



Şekil 2.5. Silindirik tonoz yük aktarımı

Silindirik ve konik tonozların kesiştirilmesiyle oluşturulan manastır tonozun asal gerilmeleri ise; eğri eksen üzerinde basınç (kemer çalışması), doğru eksen üzerinde üst kısımda basınç, alt kısımda çekme (kiriş çalışması) gibidir. Tonozlar ard arda sıralanarak düzenlendiğinde dış gözler dışındaki komşu tonozlar arasındaki mesnetlerde oluşan eşit itkinin yatay bileşenleri aynı büyüklükte ve zıt yönde olacağından birbirini götürecektir buralarda sadece düşey bileşeni alacak kemerlerin düzenlenmesi yeterli olacaktır.



Şekil 2.6. Manastır tonoz yük aktarımı

Silindirik ve konik tonozların kesiştirilmesiyle oluşturulan bir başka tonoz tipi çapraz tonozlardır. Çapraz tonozlarda da asal gerilmeler; eğri eksen üzerinde basınç, doğru eksen üzerinde üst kısımda basınç, alt kısımlarda çekme gerilmeleri şeklindedir. Yüzey üzerinde meydana gelen bu gerilmeler tonozların kesişme doğrultusunda toplanmakta ve kemer itkisi şeklinde ayaklara iletilmektedir. Çapraz tonozlar ard arda sıralanarak düzenlendiğinde dış gözler harici komşu tonozlar arasındaki mesnetlerde eşit itkinin aynı büyüklükte ve zıt yöndeki yatay bileşenleri birbirini götürmektedir. Buralarda sadece kesişme yönündeki itkiyi karşılayacak şekilde mesnetlerin düzenlenmesi yeterli olacaktır.

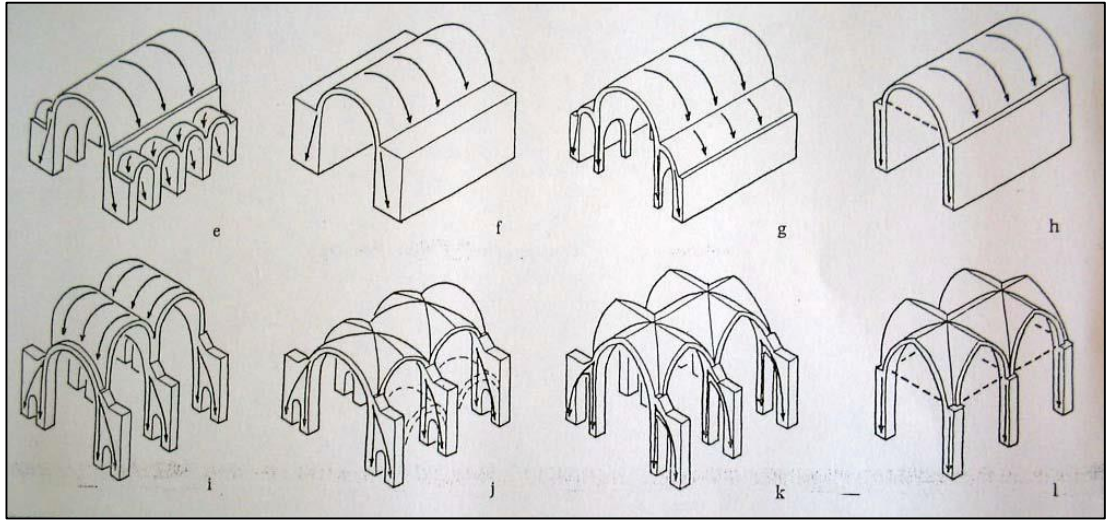


Şekil 2.7. Çapraz tonoz yük aktarımı

Nervürlü yöntem ile inşa edilen tonozlarda, tonozlara gelen yükler ayaklara

iletilmektedir. Yığma yapılarda büyük tonoz bozulmaları ve mesnetlerde açılmaya sebep olabilecek itki, tonoz yeterli kalınlıkta ise yutulur. Tonoz itkisini karşılamak amacıyla yeterli kalınlıkta bir duvar, itkiyi azaltmak amacıyla alt seviyede tonozla paralel başka bir tonoz ya da itkinin yatay bileşenini karşılamak amacıyla gergiler kullanılmaktadır. Tonoz ağırlığı ve dış yükler tonoz uçlarına kesme kuvvetleri olarak iletilmektedir. Bu kuvvetler, buralarda düzenlenen duvar ya da kemer ile karşılanabilmektedir. Bu elemanlar yatay basınç kuvvetlerine karşı tonozun burkulmasını önlemektedir (Bashbolagh 2016).

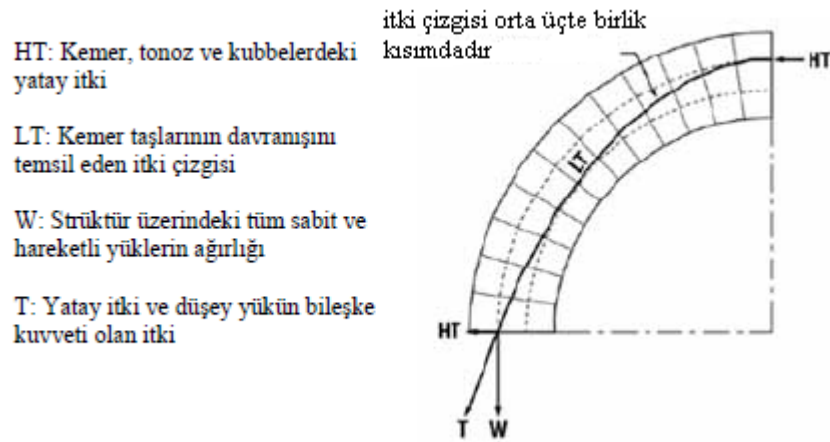
Yukarıda bazı sık karşılaşılan tonoz tiplerinin yük aktarımları ayrı olarak incelenmiş olup tonozlu sistemlerde genel olarak yük aktarımı Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Genel olarak tonozlu sistemlerde yük aktarımı (Özer 2006)

Burada genel bir tabirle kemerden söz edilecektir, ancak kemer üzerindeki tüm çalışmaların kemerlerin birleşmesiyle oluşan tonoz için de geçerli olduğu unutulmamalıdır. Tonoz, üzerine gelen yükleri taşıırken kemer gibi davranış göstermekle birlikte yatay yükler karşısında kemerlerde stabilite problemi oluşabilirken, birbirine yaslı şekilde örülen kemerlerden oluşan tonozda sürekli biçiminden dolayı bu problemin giderilmiş olması ile daha büyük açıklıkların geçilebilmesi yapı türü olarak tonozları ön plana çıkarmaktadır. Kemer kesitinde oluşacak yük dağılım çizgilerinin doğru bir

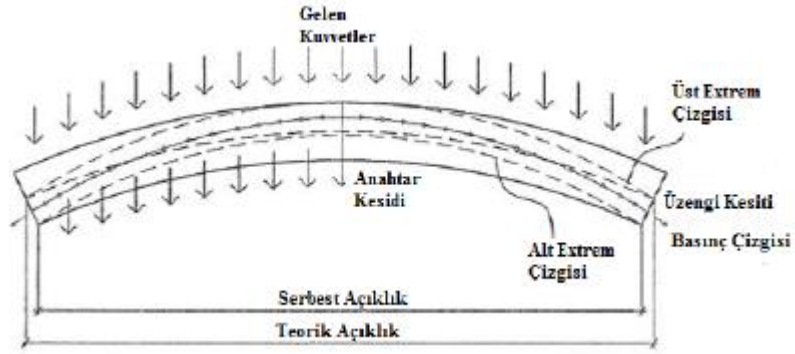
şekilde tanımlanması kemerlerin yük taşıma şeklini doğru bir şekilde tanımlayabilmek için gereklidir. ‘Kemerlerin şeklini düşey kuvvet tesirleriyle hesap edilen eğilme momenti fonksiyonunun her bir kesitinde momentleri sıfır olan çizgi denkleminin eğrisi oluşturmaktadır’ (Çakır 2014). Moment sıfır eğrisi, itki çizgisi olarakta isimlendirilmekte olup kemer kesitinin ortalarında bulunması gerekmektedir. Kemer ve tonozun stabilitesini etkileyen en önemli ölçüt moment sıfır eğrisinin açısı ve buradan etkileyen itkinin şiddetidir. Ayrıca moment sıfır eğrisi, (Bayraktar 2006) kemerde tamamen basınç oluşan noktaları göstermektedir. Moment sıfır eğrisi kemeri oluşturan düşey kesit içerisinde kalırsa yani kemer karnı ve sırtı arasında, kemer alt ve üst kesitlerinde çekme gerilmesi meydana gelmemektedir. Bu itki her zaman kemerin şekline ve ağırlığına bağlı olarak belirli bir açıyla aşağı doğru inmektedir. Yatay itkinin şiddetini kemer biriminin ağırlığı oluşturmaktadır ve bu itki birimler tarafından birbirine iletilerek kemer eğrisinin başladığı yere doğru taşınmaktadır (Özer 2006; Çakır 2014).



Şekil 2.9. Kemer ve tonozu etki eden kuvvetler ile itki çizgisinin konumu

Bir kemere etki eden yükler kendi ağırlığı ve üzerinden gelen yükler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kendi ağırlığı, yapıldığı malzemenin özelliklerine bağlıdır. Üzerinden gelen yükler ise kemere gerilme ve burkulma olmak üzere iki türlü etkimektedir.

Düşey yüklere karşı oldukça dayanımlı yapı elemanları olan kemerler deprem gibi yatay yüklere karşı düşük dayanım göstermektedirler.



Şekil 2.10. Kemer kesitinde yük dağılım çizgileri (Bayraktar 2006)

Moment ve basınç kuvvetlerinin kemer kesitinde oluşturduğu gerilmeler, kemerin taşıma kapasitesini ve dayanımını belirlemektedir. Moment ve basınç yüklerinin sebebiyet verdiği gerilmeler ile aşağıdaki şekilde kemeri zorlamaktadır.

$$\sigma = \frac{P}{F} \pm \frac{M}{W} \quad (2.1)$$

Burada;

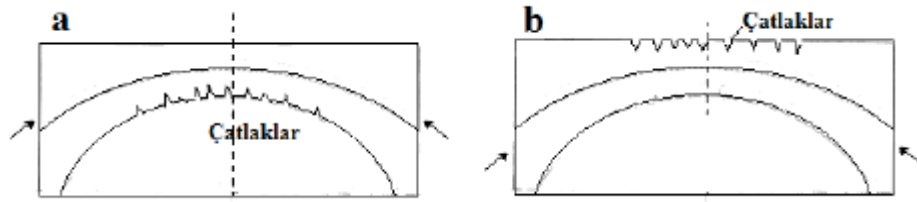
P kuvveti; kemerdeki kesme kuvvetinin moment sıfır diyagramına teğet izdüşümü

M; kemerde oluşan eğilme momentidir.

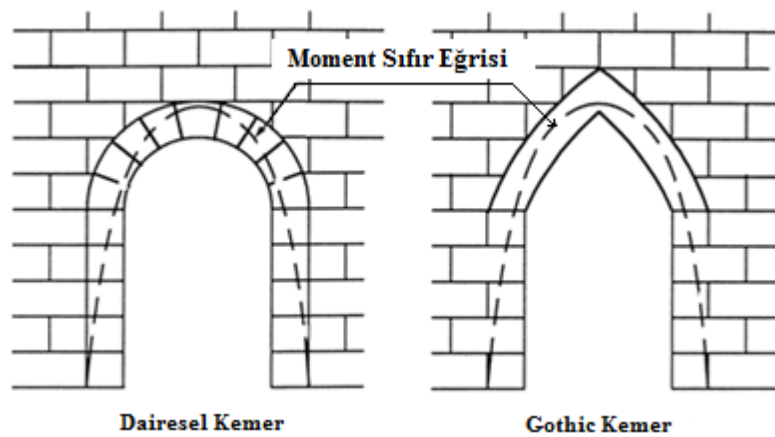
Moment değerinin P yükünün oluşturduğu basınç değerinden yüksek olması durumunda kemerde çekme gerilmeleri oluşmaya başlar ve kemer kesitinin alt kısmında çekme gerilmesinden dolayı çatlamlar meydana gelir. Kemer sistemlerin tamamen basınca çalışması için uygun eğrilik formuna sahip olması gerekmektedir. Bu eğrilikten yukarıda “İtke Çizgisi” "Moment Sıfır Eğrisi" olarak bahsedilmiş olmakla birlikte eğriliği belirlemenin en kolay yolu kemer inşası sırasında hayali bir Hooke Zinciri'nin kemeri oluşturan duvar örgüsü içerisinde kalmasını sağlamaktır.

Moment sıfır eğrisi, doğru kemer şeklinin belirlenmesi amacıyla mühendisler ve

mimarlar için önemli bir kılavuzdur. Eğer moment eğrisi ana çekirdek olarak isimlendirilen kesitin dışına çıkarsa, çekme gerilmeleri meydana gelecek bu gerilmeler sebebiyle de çatlaklar oluşacaktır (Şekil 2.11). Bu nedenle, itki çizgisinin kemer sırtı ve kemer karnı arasındaki kalınlık içinde olması kemerin tamamen basınca çalıştığını göstermektedir. İnşasının yapıldığı malzemelerin çekme gerilme taşıma kapasitelerinin çok düşük ve yetersiz olduğu bununla birlikte çekme gerilmesini alabilecek eleman teşkilinin olmadığı yığma kemer ve tonozlarda moment sıfır eğrisinin kemer sırtı ve kemer karnı arasındaki kalınlık içinde kalmasının sağlanamaması kemer ve tonoz elemanların çekme gerilmelerine maruz kalacağını ve ciddi hasara uğrayacağını bize anlatmaktadır. İki farklı kemer yapısı için moment sıfır eğrisinin süper pozisyonu Şekil 2.12’de gösterilmektedir (Gedik 2008; Ramage *et al.* 2008).



Şekil 2.11. Kemerde çekme gerilmelerinden oluşan çatlaklar (Bayraktar 2006)



Şekil 2.12. Bazı kemer sistemlerinde moment sıfır eğrisi (Çakır 2011)

Kemer şeklinin belirlenmesi akabinde taşıma kapasitesi açısından en önemli adım

kemer kalınlığını belirlemektir. Birçok mühendis ve bilim adamı farklı kemer şekillerini analiz etmişler ve uygulanan yükleri taşıyacak şekilde kalınlık tasarımı yapmışlardır. Fakat bu süreç kemerin temellere bağlantı noktaları, açıklık boyu ve yükleme noktaları gibi birtakım kısıtlamaları beraberinde getirmiştir. Kemerlerdeki minimum kalınlık belirlenmesi yönünde çeşitli denklemler oluşturulmuştur. 1669 yılında, Fransız bilim adamı Honoré Fabri geometrik kemer modeli için birçok denklem yayınlamış olup Fabri'ye göre, bir kemerin kalınlığı aşağıdaki formüllerle tahmin edilebilir (Kurrer 2008).

$$e_1 = 2R(3 - 2\sqrt{2}) = 0.343R \quad (2.2)$$

Burada, e_1 kemer kalınlığı olup R ise kemerin dıştan ölçülen yarıçapıdır. Ayrıca Fabri'ye göre kemerin dış yarıçapından aşağıdaki formül aracılığıyla iç yarıçapı (r) belirlenebilir.

$$r = R(4\sqrt{2} - 5) = 0.657 \cdot R \quad (2.3)$$

1730 yılında Pierre Couplet kemer kalınlığı hakkında aşağıdaki formülü önermiştir.

$$e_{u,Couplet} = 0.101 \cdot R \quad (2.4)$$

1982 yılında Jacques Heyman minimum kemer kalınlığını belirlemek amacıyla aşağıdaki formülü önermiştir.

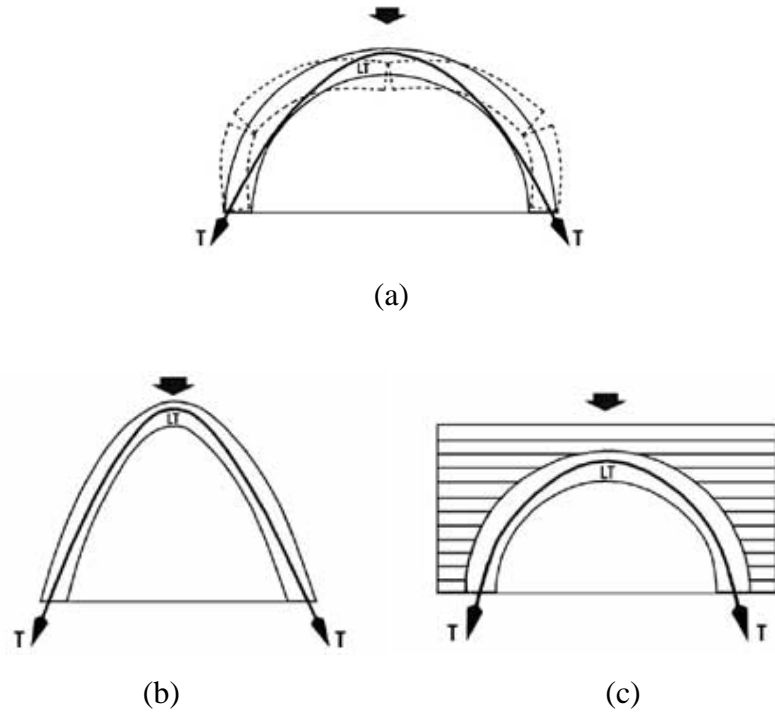
$$e_{u,Heyman} = 0.106 \cdot R \quad (2.5)$$

Kurrer'e göre (2008), Couplet'ın kemer kalınlığı için önerdiği formülden elde edilen kalınlıktan daha az kalınlığa sahip yığma kemerler stabil olmamaktadır (Çakır 2014).

Ayrıca bir kemer, tonoz ya da kubbenin alması gereken ideal biçimin ve oturacağı duvar ya da ayağın genişliğinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi için bilinmesi gerekenler aşağıda sıralanmıştır;

- Kemerin ağırlığı ve yatay itkinin bileşkesi olan moment sıfır çizgisi, kemerin eğrisel kesiti üç bölmeye ayrılıp ortasında kalan üçte birlik kısmının içinde kalırsa kemer veya tonoz stabildir.
- Eğer İtki çizgisi, kemerin içe bakan üçte birlik kısmının üstüneyse yan taraf dışa doğru kırılır.
- İtki çizgisi, kemerin dışa bakan üçte birlik kısmının üstüneyse yan taraf içe doğru çöker.
- İtki çizgisi eğer kemer kesiti dışına çıkmaktaysa kemerde kemerin göçmesine yol açacak çekme gerilmeleri meydana gelir.
- Kemerlerin boyutu ve şekli nasıl olursa olsun itki çizgisi, basınç gerilmesi çizgisidir bunun sonucunda itki çizgisi kemeri oluşturan düşey duvar örgüsü içinde kalırsa (kemer sırtı ve kemer karnı arası), kemer alt ve üst kesitlerinde çekme gerilmesi oluşmaz ve kemer geometrisi mutlaka kâgir yapılarda doğal yük aktarımı eğrisi olan ters çevrilmiş zincir eğrisi şeklindedir (Özer 2006).

Şekil 2.13.(a)'daki kemerin tepe noktasına ağır bir merkezi yük uygulanması ya da kemerin biçiminin orantısız olması yani kemerin stabil olmaması durumunda itki çizgisi iç kısımdan geçtiği için kemerde bozulmalar meydana gelmektedir. Böyle bir bozulmanın önlenmesi amacıyla başvurulacak iki yol bulunmaktadır. Ya kemerin şekli değiştirilmeli ya da şeklini korunması durumunda üzerine duvar örülerek düşey yük artırılmalıdır.



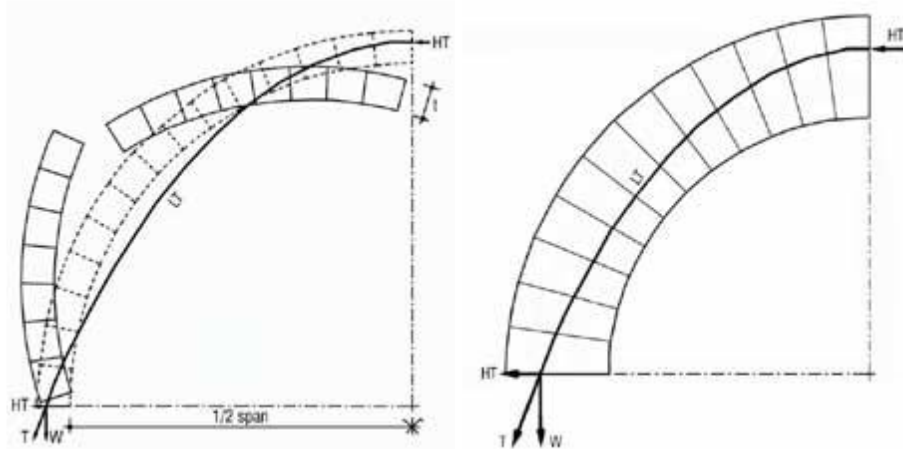
Şekil 2.13. Kemerdeki bozulmaları önlemek için çözüm önerileri

(a) Merkezi yük altında kemerdeki bozulmalar (b) Zincir eğrisi kemer (c) Kemer üzerine duvar örülmesi

Zincir eğrisi geometrisine sahip kemere göre çok farklı kesitte olan yarım daire kemerde itki çizgisinin merkezden uzakta olması kemerde çok fazla çekme gerilmesi oluşturmaktadır. İtki çizgisini, kemer kesitinin ortasında bulunan üçte birlik kısmına alıp stabiliteyi sağlamak için kalınlık, açıklıkla orantılı olmalıdır.

Şekil 2.14'te görüldüğü üzere yarım daire kemerlerde: $\text{Kalınlık} > \text{Açıklık} / 5$ olmalıdır.

Bu denkleme göre, üzerinde duvar bulunmayan yarım daire kemerin stabilitesinin sağlanabilmesi için çok kalın inşaa edilmesi gerekmektedir. Bu kalınlık - açıklık ilişkisi, üzerinde duvar bulunmayan beşik tonozun da çok kalın olması gerekliliğini açıklamaktadır.



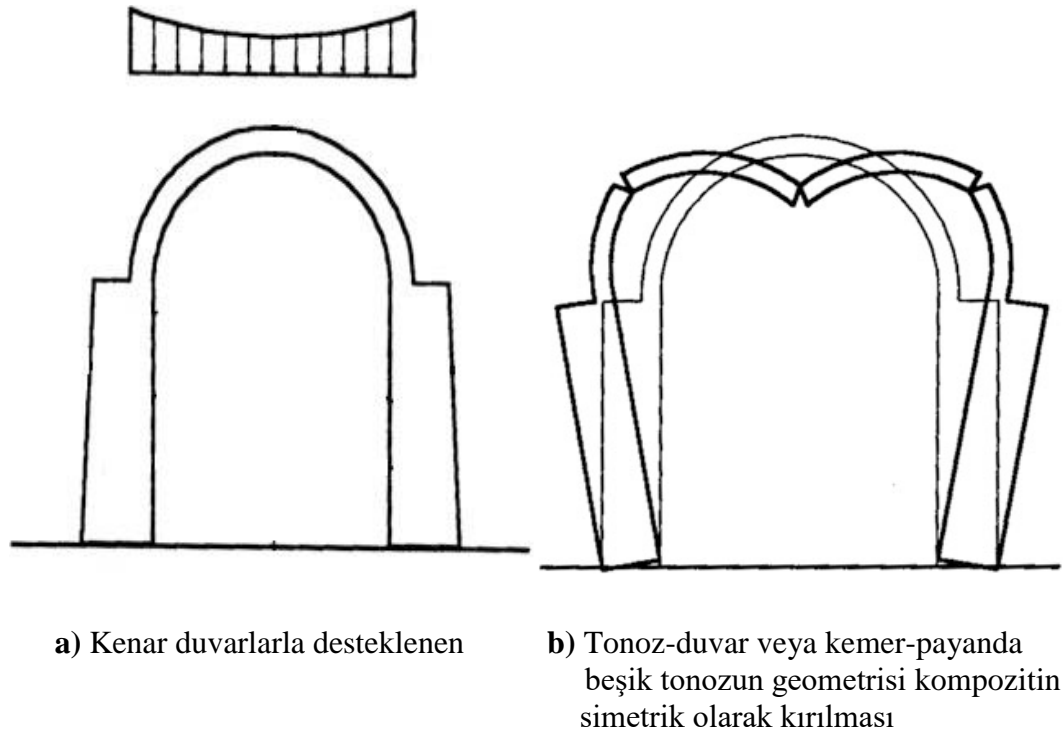
Şekil 2.14. Kemer kalınlığı- açıklık oranının stabiliteye etkisi

İnce kemerde oluşan bozulmalar Uygun kalınlıktaki bir kemer

Kalınlık = Açıklık / 20 Kalınlık = Açıklık / 5

Eğrisel geometrileri sebebiyle kemere gelen gerilmeler, düzgün bir biçimde mesnetlere iletilmektedirler. Bu nedenle kemerlerde eğilme momenti meydana gelmemektedir. Taş, tuğla gibi elemanlardan oluşan kemer ve tonozlar çekmeye karşı dayanım gösteremediklerinden, çekme kuvvetinin şiddetini azaltmak amacıyla kemerin ve tonoz ağırlıklarının artırılması bu elemanların yatay yüke karşı stabilitelerinin artmasını sağlamaktadır (Özer 2006; Anonim-III 2017).

Tonoz yapısal özelliği gereği, mesnet noktalarında sürekli taşıyıcı elemanları gerektirmektedir (Gardeshi 2015). Kemer ve tonozların geometrisi ve bu elemanlarda kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri gerilme iletebilme yeteneklerini yani yük taşıma kapasitesini belirlemektedir. Kemer ve tonozlar dikey etki eden yüklere karşı oldukça mukavemetli olmasına karşın deprem gibi yatay olarak etkiyen yüklere karşı dirençleri düşüktür. Bu sebeple, kemerlerin yük taşıma şekillerinin doğru bir biçimde analiz edilmesi gerekmekte olup bu amaca istinaden kemer kesitinde oluşacak yük dağılım eğrilerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Şekil 2.15’de kemer ve tonozların düşey yükleme durumundaki muhtemel göçme mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.15. Beşik tonozların kırılma mekanizması (Como 2017)

2.2. Kompozit Malzemeler

Malzemeler; seramikler, metaller ve polimerler olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu üç gruba giren, iki veya daha çok malzemenin birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde edilmesi amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir. Cam elyafı polyester levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, otomobil lastikleri ve seramik metal karışımı olan sermentler bunlara örnektir (Anonim-V 2017). Aynı gruba giren iki malzeme de, örneğin iki farklı metal de bir araya getirilerek kompozit oluşturulabilir, nitekim metal saçlar yüzeylerine başka bir metal tabaka giydirilerek (kaplanarak) korozyona karşı korunurlar. Kompozitler metal alaşımlarından farklıdır. Alaşımlama malzemelerin mikro düzeyde (atom alışverişi şeklinde) çözünmesiyle oluşurken; kompozitte ise farklı malzemeler birbiri içinde çözünmezler; tabaka, lif veya parçacık halinde birlikte bulunurlar. Ayrıca malzemelerin karıştırılma işlemi nano boyutlarda olursa ortaya çıkan kompozit nanokompozit adını alır. Nanokompozitler

nanometre (10^{-9} m) ölçeğindeki materyallerden oluşmaktadır (Zor 2015).

Kompozitler matris adı verilen bağlayıcı bir malzeme ve takviye elemanı denilen daha mukavemetli bir malzemenin birleştirilmesiyle oluşmaktadırlar. Takviye malzemesi malzemenin yük taşıma, mukavemet gibi özelliklerini kontrol ederken, matris malzeme takviye malzemeleri yük altında bir arada tutarak şekil değiştirmelere direnerek çatlak oluşumunu sınırlandırır (Zor 2015).

Kompozit malzemeleri oluşturan matris fazı çoğunlukla termoset ve termoplastik reçinelerden oluşurlar. Termoset grubunda ağırlıklı olarak polyester ve epoksi reçineler kullanılırken, termoplastik grubunda ise poliamid ve polipropilen kullanılmaktadır. Takviye fazında ise; karbon, grafit, aramid, bor, silisyum karbür, alümina, cam, polietilen gibi malzemelerin çeşitli boyutlarda lif formuna getirilmesiyle oluşturulan malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca matrisin ve takviye elemanın özelliklerini iyileştirmek için çeşitli kimyasal katkı malzemeleri de ilave edilebilir (Arıcasoy 2006).

Bir kompozitin özellikleri; matrisin özellikleri, takviye (lif) elemanın özellikleri, lif-matris ara yüzeyindeki yapışma kabiliyeti, lif/matris oranı, lif elemanın geometrisi ve matris içindeki yöneliminden etkilenir (Anonim-V 2017).

2.2.1. Kompozit malzemelerin tarihçesi

İnsanlık tarihinin ilk çağlarından beri malzemelerin içine çeşitli doğal lifler eklenerek malzemelere elastikiyet özelliği kazandırılmaya çalışılmıştır. Bu konudaki ilk örneklerden biri kerpiçtir. Kerpiç üretilirken içine katılan saman sap gibi lifler, kerpicing dayanımını artırmaktadır. Başka bir örnek ise farklı ağaç levhaların üst üste bindirilmesiyle yapılan ok yaylarıdır. 19. yy başlarında elyaf malzemeler ve hidrolik bağlayıcılar kullanılarak üretilen yapay taş plakalarına dair patentler bulunmaktadır. Çimento ve asbest kompozitleri kullanılarak üretilmiş ince levha kompozitleri yıllarca kullanılmış ve hala kullanılmaktadır (Zor 2015). 1800'lü yıllarda bambu ile takviyeli çamur duvarlar, yapıştırılmış tabakalı tahtalar ve dövme kılıçlardaki tabakalı metaller

yine kompozit malzemelerin tarihi örneklerindendir (Ataş 2017).

İlk modern sentetik plastikler 1900'li yıllardan itibaren geliştirilmeye başlanmıştır. 1930'ların sonlarında plastik malzemelerin özellikleri giderek iyileştirilmiştir. Kolay şekil verilebilir olması, özgül ağırlığının oldukça düşük olması, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı mukavemetli olması gibi özellikleri plastiğin yükselmesinde önemli roller oynamıştır. Bunlar gibi çeşitli üstün özelliklerine rağmen durabilite ve sertlik problemleri olması plastiklerin güçlendirilmesi gerektiği sonucunu doğurmuştur. Bu amaçla 1950'lerden itibaren polimer esaslı-liflerle takviye edilmiş kompozit malzemeler üretilmeye ve endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) bu alanda en çok bilinen kompozit grubudur. Fiber-glass olarak da bilinen bu malzemeler 1960'lı yıllardan itibaren sıvı tankları, spor araçları, çatı levhaları, araba gövdeleri, deniz tekneleri gibi malzemelerin üretiminde kullanılmışlardır. Bugün üretilen tüm kompozit malzemelerin yaklaşık olarak %85'i CTP'dir. 1970'lerden itibaren karbon, boron ve aramid gibi yeni fiberler ile metaller ve seramiklerden yapılan matrislerin kullanıldığı yeni kompozit uygulamaları kullanılmaya başlanmıştır. Takviye elyaflar sayesinde mukavemetli, sert ve hafif olan bu malzemeler, plastik nedeniyle de kolay şekil verilebildiğinden her geçen gün yeni uygulama alanlarında yerlerini almaktadırlar. Günümüzde uzay, havacılık, gemicilik, spor aletleri, enerji, endüstri gibi birçok sektörde çok çeşitli kompozitler geliştirilmektedir. (Arıcasoy 2006; Zor 2015; Anonim-V 2017; Ataş 2017)

2.2.2. Yaygın olarak kullanılan matris ve takviye çeşitleri

A. Matrisler:

a) Epoksiler: Sıvı, viskoz veya katı durumlarda bulunabilen epoksi reçineleri bifenol A ile epiklorhidritin reaksiyonu sonucu oluşur. Günümüzde mevcut termoset reçineler arasında en yüksek performansa sahip olan reçine epoksi'lerdir. Mekanik performansları ve çevresel etkilere karşı dirençleri diğerlerinden daha yüksektir. Mekanik özelliklerinin yanı sıra elektrik, ısı ve kimyasal dirençleri de iyidir. Hava şartlarından etkilenmezler.

Ayrıca, epoksi reçineler endüstride; yapıştırma, döküm, sızdırmazlık, boya ve vernikleme gibi amaçlarla da kullanılmaktadırlar. Yapışma kabiliyetlerinin ve su dirençlerinin (su etkisi ile bozunma) yüksek olması nedeni ile de özellikle yat, tekne gibi deniz araçlarında kullanılabilecek en ideal malzemelerdir. Havacılık, spor, ulaşım, askeri materyaller gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadırlar. Maliyetleri yüksektir.

b) Polyesterler: Katı, sıvı, termostat, termoplast gibi türlerde bulunabilen polyesterler, dibazik asitlerle gliserin glikol gibi polialkollerin reaksiyonundan elde edilir. Sert kimyasallara ve hava şartlarına oldukça dirençlidirler. Katı durumlarında darbe dayanımları yüksektir. İnşaat ve denizcilik alanında çok kullanılan polyester reçineler polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyarlar. Düşük maliyetlidirler ve orta derece mekanik özelliklere sahiptirler.

c) Fenolik Reçineler: Yüksek ısıya direnç gerektiren alanlarda kullanılan fenolik reçineler, uçakların iç bölümlerinde, deniz araçlarının motorlarında ve demiryollarında kullanılırlar. Fenol, formaldehit kondenzasyon ürünü olup, bu ham maddelerin bazen türevleri de kullanılabilir. Katı ve sıvı türlerde bulunabilirler. Düşük maliyetli olmalarının yanı sıra kırılgan ve düşük yüzey kalitesine sahiptirler.

d) Vinil Ester: Molekül yapıları polyestere benzerdir. Kimyasal ve çevresel dirençleri yüksektir aynı zamanda tok ve esnek olan bu reçineler polyesterden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen aşırı stiren (sağlığa zararlı madde) içermesi, polyesterden pahalı olması, ikincil kür işlemlerine ihtiyaç duyması ve sertleşme sırasında yüksek oranda çekmesi gibi dezavantajları da vardır. Boru hatlarında ve kimyasal depolama tanklarında sıklıkla vinil ester reçineler kullanılmaktadır.

e) Üretan Reçineler: İzosiyanatla polialkolün polimerizasyonu ile elde edilen üretanlar köpük, lastik gibi malzemelerin yapımında kullanılırlar. Kimyasal dirençleri yüksektir.

f) Silikonlar: Yüksek ateş dayanımı, yüksek ısılarda ürün özelliklerini muhafaza edebilme ve düşük maliyete sahip olan silikonun kür işlemi için yüksek ısı gerekmektedir.

Yukarıda özellikleri belirtilen matris malzemelerinin yanı sıra; bismaleimid (BMI), cynate ester, poliamidler vb. gibi çeşitli matris reçineleri de bulunmaktadır ve her geçen gün sayıları artmaktadır (Arıcasoy 2006; Anonim-V 2017).

B. Takviye Çeşitleri:

Günümüz şartlarında en çok kullanılan takviye eleman çeşitleri elyaflardır. Matris malzeme içinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Yüksek elastite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. İnce çaplı olarak üretilmeleri kusur bulundurma ihtimallerini azalttığından üstün mekanik özelliklere sahiptirler.

Yaygın olarak kullanılan elyaf çeşitleri:

- Cam elyafı
- Karbon (Graphite) elyafı, (PAN -polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
- Aramid (Aromatic Polyamid) elyafı, (Ticari ismi; Kevlar-DuPont)
- Bor elyafı
- Oksit elyafı
- Yüksek yoğunluklu polyetilen elyafı
- Poliamid elyafı
- Polyester elyafı
- Doğal organik elyaflar

a. Cam elyaflar: Amorf bir malzeme olan ve polimerik yapıdaki cam elyafın esasını silis-kum (SiO_2) meydana getirmektedir. Diğer bileşenler ise sodyum (Na), Kalsiyum

(Ca), Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al), Baryum (Ba) ve Demir (Fe) gibi elementlerin oksitleridir. Silis kumu, katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde iken 1260°C civarına ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir. Kompozitin mukavemeti, reçine-cam bağının kuvveti ile orantılıdır. Çekme mukavemetleri yüksektir. Yanmazlar ancak yüksek ısı karşısında yumuşarlar. Kimyasal dirençleri yüksektir ve yalıtkan özelliktedirler. Silis kumuna farklı katkı malzemelerinin eklenmesiyle farklı özelliklerde dört tip cam elyaf üretilmektedir. Genellikle plastik veya epoksi reçineler kullanılarak imal edilirler.

1. A (Alkali) Camı: En yaygın cam tipidir. Kimyasal direnci yüksek, yalıtkanlık özelliği kötüdür. Alkali oranı yüksektir.
2. C (Korozyon) Camı: kimyasal çözeltilere karşı yüksek direnç gösterir.
3. E (Elektrik) Camı: alkalinitesi düşüktür bu nedenle yalıtkanlık özelliği iyidir. Mukavemeti ve suya karşı direnci yüksektir.
4. S (Mukavemet) Camı: Havacılıkta ve uzay sanayiinde tercih edilen S camının çekme mukavemeti E camından %33 daha yüksektir.

b. Bor elyaflar: Çekirdek olarak, genellikle Tungsten kullanılan, ince bir flamanın üzerine bor elementinin kaplanmasıyla elde edilirler. Değişik çaplarda üretilen bor elyaflar (0,05mm-0,2mm) çok yüksek çekme mukavemetine ($\Sigma 2500-3500$ Mpa) ve elastisite modülü ($\Sigma 400$ Gpa) değerlerine sahiptirler. Erime sıcaklıkları 2000°C civarındadır. Bu üstün özellikleri nedeniyle havacılık ve spor sektöründe kullanılmaktadırlar ancak maliyetleri oldukça yüksektir.

c. Silisyum karbür elyaflar: Silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile 0,1 mm ila 0.14 mm çaplarında üretilebilirler. Yüksek sıcaklıklara direnci bor elyaflardan iyidir. Fakat bor elyaflara göre yoğunlukları yüksektir. Genellikle titanyum matrisle Jet motor parçalarında kullanılırlar.

d. Alumina elyaflar: Elyaf formundaki alümina (Al_2O_3) flamanın silisyum dioksit (SiO_2) ile kaplanması ile elde edilirler. Çekme dayanımları yüksek olmamasına rağmen basınç dayanımları oldukça yüksektir. Sıcaklığa dirençlerinin de iyi olması nedeniyle uçak motorlarında kullanılırlar.

e. Grafit (Karbon) elyaflar: Cam elyaflardan sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan elyaf grubudur. Karbon ve Grafit elyaflar organik maddelerden üretildikleri için organik fiberler olarak da adlandırılırlar. Ham madde olarak Poliakrilonitril (polyacrylonitrile, PAN), Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) kullanılır. Günümüzde daha çok PAN esaslı fiberler kullanılmaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri kazanmaktadır. Karbon elyaflar sürekli geliştirilmektedir. Temel özellikleri düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Suya karşı dirençleri iyi olan karbon elyafların sürünme mukavemetlerinin yanı sıra aşınma ve yorulma mukavemetleri de çok yüksektir. Maliyeti yüksek olması nedeniyle askeri ve sivil uçak sanayinde ve spor gereçlerinde kullanılırlar.

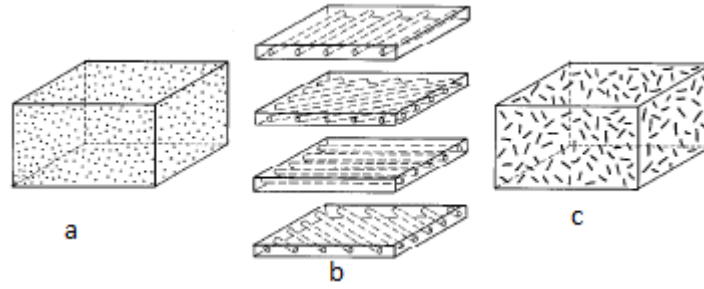
f. Aramid elyaflar: Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Aramid elyafı piyasada daha çok ticari isimleri Kevlar (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir. Aramid polyamidler uzun zincirlidir ve altı karbon atomunun hidrojen ile bağlanmasıyla elde edilirler. Mekanik özellikleri elyaf eksenine doğrultusunda iyi iken dik doğrultularda zayıftır. Düşük yoğunluk (cam ve karbon elyaftan düşük), yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet avantajlarının yanı sıra asit ve alkalilerden etkilenebilmektedirler. Yalıtkan malzemelerdir. Basınç dayanımları düşüktür. Balistik koruma uygulamaları, askeri kasklar, kurşun geçirmez yelekler, koruyucu giysiler, eldiven, motosiklet koruma giysileri, avcılık giysi ve aksesuarları, yelkenliler ve yatlar için yelken direği, hava araçları gövde parçaları, tekne gövdesi, endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum, fiber optik ve elektromekanik kablolar, debriyajlarda bulunan sürtünme balataları gibi alanlarda kullanılmaktadırlar (Arıcasoy 2006; Anonim-V 2017).

2.2.3. Kompozit malzemelerin çeşitleri ve sınıflandırılması

Kendilerini oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin şekillerine göre kompozit malzemeler iki şekilde sınıflandırılabilir.

a. Yapı bileşenlerinin şekillerine göre;

Kompozit malzemeler donatılı veya pekiştirici türüne göre üç gruba ayrılır(Şekil 2.16):



Şekil 2.16. Kompozit malzeme türleri

(a: Taneli Kompozit, b: Tabakalı Kompozit, c: Lifli Kompozit) (Chawla *et al.* 1999)

Tanecik takviyeli kompozitlerde, alaşım ve seramik gibi matrislerin içinde partiküller yer alır. Tanecikler yönlenmeden, rastgele dağıldığı için genellikle izotropik özelliktedirler. Yüksek dayanım, arttırılmış çalışma sıcaklığı, korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptirler. Beton yapımında kullanılan agrega (tanecik) ve çimento (matris) örnek olarak verilebilir.

Uygulamada en önemli kompozitler küçük çaplı fiberlerle (grafit, aramid, bor gibi) takviye edilmiş bir polimerden (epoksi, polyester, üretan gibi) oluşan grafit/epoksi gibi lifli kompozitlerdir. Liflerin çapları yaklaşık 0,1mm civarındadır ve tek başlarına kullanılmazlar. Kalınlıkları arttığında kusur oluşma olasılığı nedeniyle mukavemetleri çok azalır. Bu lifler uygun bir malzemeyle istenen boyutta taşıyıcı kütlelere dönüştürürler. Polimer matrisli kompozitlerin en önemli avantajları, düşük maliyetli ve yüksek dayanımlı olmalarıdır. Takviye liflerin oranı artıkça kompozitin mukavemeti de yükselir (Anonim-V 2017; Ataş 2017).

Tabakalı kompozit yapı ise, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit türüdür. Farklı lif yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek dayanım değerleri elde etmek mümkündür. Çevresel şartlara dayanıklıdır. Özgül ağırlıkları

metallere göre düşüktür fakat mukavemetlerinin yüksek olmaları bu malzemeleri cazibeli kılmaktadır. Uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanım alanları vardır. Yine uçak yapılarında geniş kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme (laminated composite materials) örneğidirler. Düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilen sandviç yapılar yük taşımazlar sadece izolasyon özelliğine sahiptirler (Zor 2015).

b. Matris Malzeme Cinsine Göre Sınıflandırma

- Metal matrisli kompozitler (MMC):

Matris ögenin metal, takviye elemanın da sürekli fiber veya kısa fiber, whisker veya partikül malzemeler olan kompozit çeşididir. Bu takviye elemanları metal veya seramik olabilir. Metallerin çoğu yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini kaybetmektedirler. Fakat özellikle metalik liflerle takviye edilen metal matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda da yüksek dayanım özellikleri sağlamaktadırlar. Eritme vakum emdirme, sıcak presleme ve difüzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak MMC'ler elde edilirler. MMC'ler daha çok uzay ve havacılık alanlarında, örneğin uzay teleskobu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları, savunma ve otomotiv sanayi gibi alanlarda kullanılırlar.

- Seramik matrisli kompozitler (CMC):

Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B_4C , CbN, TiC, TiB, TiN, AlN gibi seramik malzemelerin matris olarak kullanıldığı bu kompozitler seramik veya metalik takviye elemanlarıyla üretilirler. Çok sert ve kırılgan olan seramik malzemelerin ısı şok direnci ve tokluğu da düşüktür. Dolayısıyla karbon, seramik ve cam fiber gibi takviye elemanlarıyla bu zayıf özellikleri giderilerek üstün mekanik, yüksek sıcaklık ve kimyasal saldırılara dirence sahip yeni malzemeler oluşturulmaktadır. Seramik fiberler ile takviye edilmesi

durumunda toklukları da artmaktadır. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı malzemeler ve uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir. Ayrıca son yıllarda alümin ve zirkonya esaslı seramik kompozitler üretilerek insan vücudunda da biomalzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır.

- Polimer matrisli kompozitler (PMC):

Endüstride çok geniş kullanım alanına sahip olan polimer matrisli kompozitler termoset ve termoplastik matrisli olarak üretilebilirler. Polyester ve epoksi reçineli olanları en yaygın olanlarıdır. Pekiştirici olarak cam, karbon, kevlar ve bor lifleri gibi lifler kullanılır. Pekiştirici liflerin oranı arttıkça kompozitin dayanımı da artmaktadır. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerinden dolayı diğer malzemelere üstün durumundadırlar. Korozyon direnci sebebiyle denizcilik uygulamaları, hafifliği sebebiyle otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrileri ile spor malzemeleri, yanmazlık özelliği istenen otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlar başlıca kullanım alanlarıdır.(Onat 2015; Zor 2015; Anonim-V 2017).

Çizelge 2.1’de bazı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı polimer kompozitlerin özellikleri (Anonim- V 2017)

Malzeme	Özgül ağırlık gr/cm ³	Çekme mukavemet N/mm ²	Elastik mukavemet N/mm ²
Cam lifi – polyester	1,5 – 2,1	200 – 340	55000 – 130000
Karbon lifi – epoksi	1,5 – 1,8	1860	145000
Kevlar – epoksi	2,36	2240	76000
Boron lifi - epoksi	1,4	1240	176000

2.2.4. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Kompozit malzemenin üretim tekniği, takviye malzemesine (elyaf), matris malzemeye (reçine), parça şekline, istenen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Üretim yöntemi de bir kompozit malzemenin nihai özelliklerini belirlemede önemli rol oynar. Her üretim yönteminin avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Geleneksel malzeme üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında kompozit malzeme üretimindeki karışıklıklardan dolayı daha dikkatli olunması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Aşağıda kompozit malzemelerin üretim yöntemleri belirtilmiştir (Onat 2015).

Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri şu şekilde sıralanabilir;

a. Katı Faz Üretim Yöntemleri:

- Toz Metalürjisi Teknikleri
- Difüzyon Bağı Yöntemi

b. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

- Sıvı Metal İnfiltrasyon
- Sıkıştırma Döküm
- Sıvı Metal Karıştırma
- Plazma Püskürtme

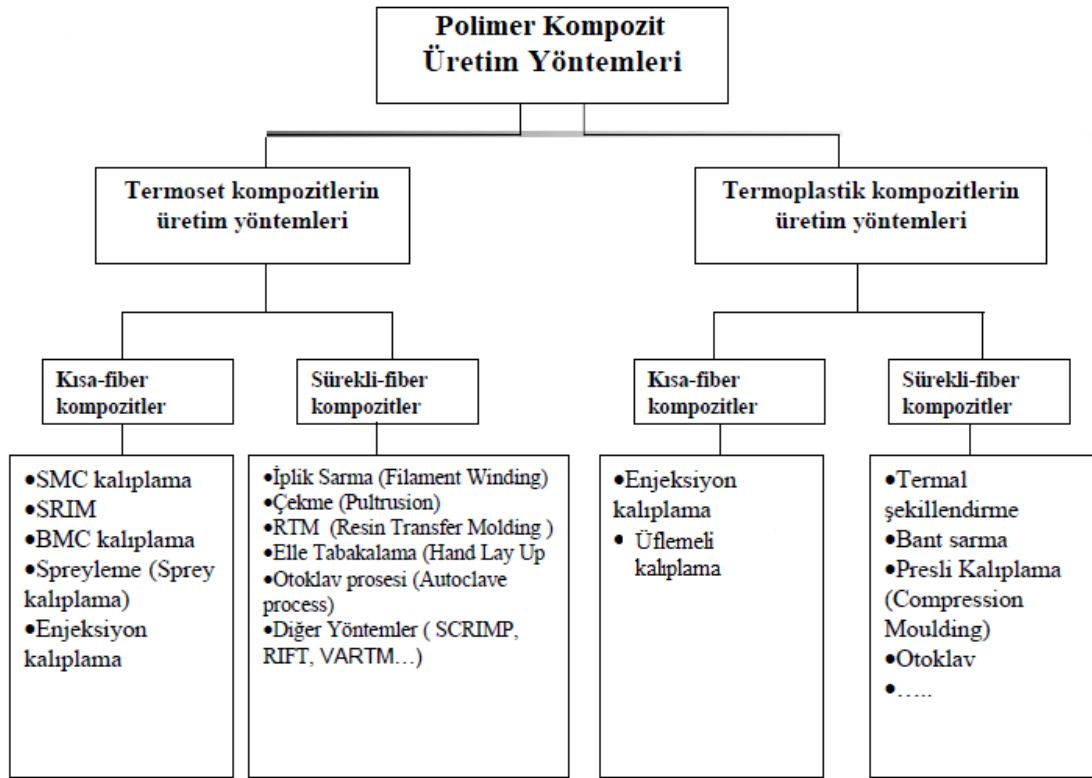
c. Diğer Yöntemler

- Rheocasting ve Compocasting Döküm Teknikleri
- Vidalı Ekstrüzyon
- In-Situ Tekniği
- XD Tekniği

Seramik kompozitlerin üretim yöntemleri ise şu şekilde sıralanabilir;

- a. Ergitilmiş Matrisin Sızdırılması ve Sıcak Preslenmesi
- b. Sıcak İzostatik Presleme tekniği (HIP)
- c. Kimyasal Buhar Kaplama ve Sızdırma
- d. Kimyasal Reaksiyonla Bağlama

Günümüzde yaygın olarak kullanılan polimer kompozitlerin üretim yöntemleri ise Şekil 2.17 de özetlenmiştir.



Şekil 2.17. Polimer kompozit üretim yöntemleri (Anonim-V 2017)

2.2.5. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları

Kompozit malzemelerin sağladığı avantajlar;

- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı (Özgül Mukavemet)

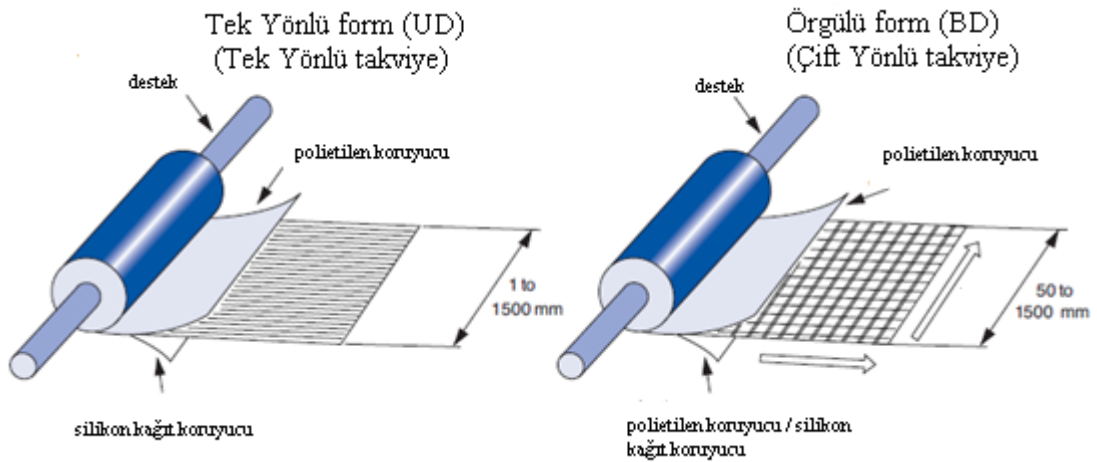
- Yüksek rijitlik/yoğunluk oranı (Özgül Rijitlik)
- Titreşim sönümleme
- Hafiflik, esneklik
- Yüksek dielektrik direnç
- Korozyon dayanımı, kimyasal direnç
- Çeşitlilik, geniş renk ve desen çeşitliliği
- Kalıplama kolaylığı, tasarım esnekliği
- Şeffaflık özelliği
- Beton, ahşap, metal yüzeylere uygulama
- Yanmazlık özelliği, ısıl dayanım
- Tamir edilebilirlik, montaj kolaylığı
- İşlenebilirlik
- Sızdırmazlık (su izolasyonu),
- U.V. ışınlarına dayanım (Onat 2015; Zor 2015)

Dezavantajları ise;

- Hammaddenin pahalı olması
- Tabakalı kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kayma gerilmelerine karşı hassastırlar ve kalınlık yönünde düşük dayanıklılık gösterirler. Dolayısıyla delaminasyon görülebilir.
- Üretim yöntemlerinin kaliteli ve hassas olması gerekmektedir.
- Çoğu gevrek malzeme olduğundan kolaylıkla zarar görürler, onarılmaları yeni problemler oluşturabilirler.
- Sınırlı raf ömürleri vardır.
- Değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterebilirler.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde hasara neden olduğundan, hassas imalat yapılması zordur.
- Onarılmadan önce çok iyi temizlenmeleri ve sıcak kurutulmaları gerekir. Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilir. (Arıcasoy 2006; Onat 2015; Zor 2015).

2.2.6. Kumaş ve prepreg kompozitler

Prepregler karbon, aramid veya cam gibi çeşitli yapay liflerle güçlendirilmiş özel formüle edilen reçine matrisli sistemlerdir. Yani genel olarak reçine emdirilmiş güçlendirme malzemelerine prepreg (resin-impregnated fiber) denmektedir. Prepreg en üst düzey kompozit malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda kür edilen termoset reçinesi, tepkimeye girerek oldukça durabil, yüksek sıcaklıklara dirençli, son derece sert ve son derece hafif, sağlam bir yapısal malzemeye dönüşür(Anonim-I 2013). Dikkatli bir şekilde depolanması gereken bu malzemelerin belirli bir kullanım ömrü vardır. Şekil 2.18. de görüldüğü gibi tek yönlü bant (unidirectional tape), örgülü kumaş (wovenfabric) veya bükülmüş iplik (roving) şekillerinde üretilebilir. Prepreg malzemeler için en yaygın kullanılan reçine türü epoksidir (Anonim-V 2017).



Şekil 2.18. Prepreg üretim şekilleri (Anonim-I 2013)

Prepreglerin üretiminde, ilk olarak takviye malzemesi iplik şeklinde şeritler halinde çekilerek reçine banyosuna tabi tutulur. Daha sonra reçineden geçen şeritler merdaneler arasından geçirilerek üzerlerindeki fazla reçineden arındırılır. Son olarak ise reçineye bulanmış şeritler belli bir sıcaklık altında yuvarlak bir kalıba sarılır ve kür işlemine tabi tutulur.

1980'lerin başlarında özel malzeme olarak prepregler üretilmeye başlandı. Fakat yalnızca %5'lik oranda uçak yapılarında veya kritik olmayan ikincil yapılarda kullanılmaktaydı. Fakat günümüzde Airbus A350 XWB ve Boeing 787 gibi uçak temel yapılarının %50'den fazlasını oluşturmaktadır. Havacılık, enerji, otomotiv, spor malzemeleri ve hatta rüzgâr enerjisi de dâhil olmak üzere birçok sektörde bu malzemeler kullanılmaktadır. Prepreg kompozit kullanımındaki bu büyüme, metallerin daha yüksek mukavemet, daha iyi yorulma direnci, daha fazla kullanım alanı ve tasarım kolaylığı özelliklerini kazanmasını sağlamıştır (Anonim-I 2013).

Üç çeşit prepreg üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

- Elle Yatırma (Hand Lay-Up): Manuel yani otomatik olmayan yatırma işlemidir. Cam, karbon, kevlar gibi tek yönlü veya örgü kumaş şeklindeki her çeşit elyaf takviyeli prepregler için uygundur. Uygun şekilli kompleks parçalar, monolitik ve sandviç paneller gibi düşük-orta hacimli üretim gerektiren alanlarda polietilen veya kâğıt koruyucularla üretimi yapılmaktadır.



Şekil 2.19. Prepreg üretim yöntemlerinden elle yatırma

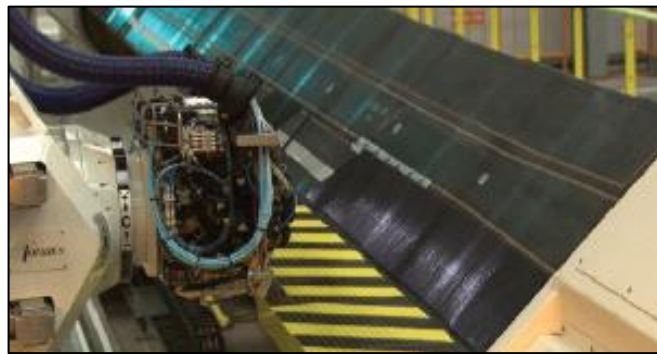
- Otomatik Şerit Yatırma (Automatic Tape Laying (ATL)): Tek yönlü prepreg tabakaların ve diğer bazı güçlendirilmiş materyallerin örneğin, cam dokuma prepreg, ıslak kabuk katları ve metalik örgü gibi prepreglerin otomatik yerleştirme işlemidir.

Tipik olarak 150-300 mm kalınlığındadırlar. Tekli çift taraflı serbest kâğıt, büyük, düşük ve düşük orta monolitik parçaların üretimi için uygundur.



Şekil 2.20. Prepreg üretim yöntemlerinden otomatik şerit yatırma

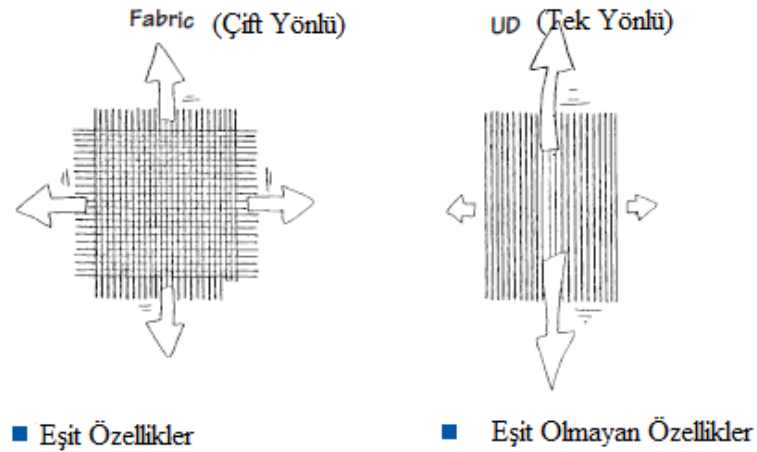
- Otomatik Lif Yerleştirme (Automatic Fibre Placement (AFP)): Dar, tek yönlü prepreg tabakaların otomatik yerleştirilmesidir. Tipik olarak, 3,175mm-6,35mm veya 12,7 mm kalınlıklarında olurlar. Tekli polietilen koruyucuyla üretilen bu prepregler orta ila büyük arası kompleks eğri monolitik parçaların üretimi için uygundur.



Şekil 2.21. Prepreg üretim yöntemlerinden otomatik lif yerleştirme

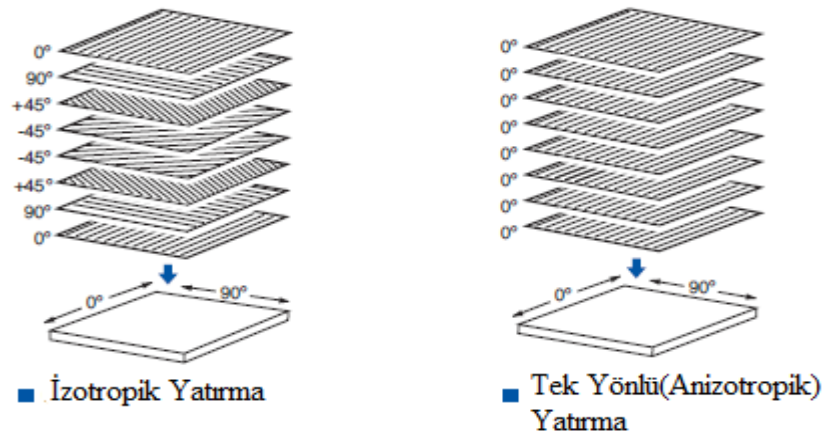
Yukarıda üretim yöntemlerinden bahsedilen prepreg kompozitlerin izotropik yani yöne bağlı özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. Bir kompozitteki lifler güçlüdür, serttir ve

servis yüklerinin çoğunu karşılar. Matris kısmı ise servis sıcaklığına, tokluğuna ve çevresel direncine katkıda bulunur. Tek yönlü kompozitler (UD) bir yönde baskın mekanik özelliklere sahiptir yani anizotropiktir. Fiber takviyeli kompozitlerden yapılan bileşenler, fiber ürünlerin optimum mekanik özellikleri sağlaması için tasarlanır ancak sadece metallerin gerçek izotropik doğasına yaklaşabilirler.



Şekil 2.22. Tek ve çift yönlü prepreg kompozitler

Fiber yönleri oryantasyon değiştirilerek kompozitin özel mekanik performans gereksinimlerini karşılamak için düzenlenebilir (Anonim-I 2013).



Şekil 2.23. Prepreg kompozitlerde lif yönlenmesi (Anonim-I 2013)

2.3. Yığma Kemer ve Tonozların Kompozitlerle Güçlendirilmesi Üzerine Literatürdeki Çalışmalar

Frunzio *et al.* (2001), tarafından yapılan çalışmada, Roma döneminde inşa edilmiş tarihi bir kemer köprü üzerinde 3-boyutlu sonlu eleman modeliyle analiz yapılmıştır. Nümerik analizler yardımıyla kemer davranışını modellendiği çalışmada analizler sonucunda köprü kemerinin ve kemer dolgularının doğrusal olmayan davranışları araştırılmıştır.

Zhang *et al.* (2001), yaptıkları çalışmada Çin’de bulunan Kap Shui Mun köprüsünün sonlu eleman modeli üzerinde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Köprünün sayısal modeli oluşturularak dinamik parametreler belirlenmiştir. Ayrıca köprü üzerinde deneysel analizler yapılmış ve elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır. Neticede sonlu eleman yöntemiyle oluşturulan model ile deneysel veriler arasında tutarsızlıklar olduğu tespit edilmiştir. Daha sonrasında deneysel veriler doğrultusunda sonlu eleman iyileştirme yöntemi kullanılarak nümerik analizler tekrar yapılmıştır.

Aktan (2008), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında daire eksenli çubukların düzlem içi serbest titreşim frekanslarının elde edilmesini araştırmış ve dinamik analizini yapmıştır. Timoshenko kiriş teorisinden yola çıkarak yapmış olduğu çalışmada dönme ataleti etkisini incelemiştir. Literatürde yapılmış olan çalışmalardan esinlenerek çözülen bazı problemleri, ANSYS ve Fortran90 paket programlarını kullanarak tekrardan çözümleme yapmış ve sonuçları öncekilerle karşılaştırarak, yapmış olduğu modelin olumlu ve olumsuz yönlerini ortaya koymaya çalışmıştır.

Ali Ural vd (2008), belirttiği üzere tarihsel yapıların koruma ve muhafazası tarihin devamlılığı için önemli bir noktadır. Bu nedenle benzersiz kültür değerlerini özelliklerini dikkate alarak uygun restorasyon projeleri geliştirmek için bu yapıların mevcut koşullarının belirlenmesi çok önemlidir. Bu amaçla bu makalede Türk tarihi kemer köprülerinin mimari ve mühendislik özellikleri anlatılmıştır. Bu kapsamda, yığma kemer köprülerde oluşan hasar ve kırılma Şekilleri ve yapı materyallerinde meydana gelen bozunmalar çeşitli fotoğraflar kullanılarak sınıflandırılmış ve

incelenmiştir. Ayrıca köprüler için Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılmış olan bazı restorasyon uygulamaları kısaca tartışılmıştır.

Taranu *et al.* (2010), tarafından yapılan çalışmada cam lifinden elde edilen tek yönlü cam lifi takviyeli kompozit membranlar yığma tonoz elemanın dış kabuğunun eğrisel yüzeyine paralel olacak şekilde belirli aralıklarla serilerek bir güçlendirme yöntemi uygulanmış ve bu numune üzerinde yapılan statik deneyler ile ANSYS Workbench programında yapılan sayısal modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve birbiriyle uyumlu bir şekilde olan sonuçlarda düşey deplasmanın önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Deneysel olarak dinamik etkisini ölçmek için yığma tonozla LVDT (lineer variable differential transformer) ler ve ivme ölçerler yatay ve düşey yerdeğiştirme ile ivmeleri ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. Bir titreşim üretici tarafından titreşim verilmiş ve deneysel olarak güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş tonozların frekansları belirlenmiştir. Belirlenen frekans değerlerinin ANSYS Workbench ile yapılan analiz sonucunda belirlenen frekans değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Güçlendirilmiş numune sarsma tablasına yerleştirilmiş ve gerçek deprem simülasyonları uygulanıp kırılma mekanizması incelenmiştir. GFRP kompozit membranlarla güçlendirilmiş tonozların dinamik özellikleri ve sismik davranışı kayda değer bir gelişim göstermiştir.

Siddiqui *et al.* (2011), yaptıkları çalışmada karbon nano tüp takviyeli karbon fiber epoksi prepregler üretmiş ve bu üretim aşamasında nano partikül takviyesinin prepreg üretimine ve kurlenme karakteristiğine olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmaya göre üretimde yüksek hızlı karıştırma yapılması ve yüzey gruplarına sahip karbon nano tüp kullanımında kompozitin viskozitesinin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, kütlece %1 oranından fazla CNT katkısının epoksinin kurlenme performansını iyileştirdiği anlaşılmıştır.

Çavuş (2011), tarafından yapılan doktora tez çalışmasında hasar görmüş prototip tonoz modelleri üretilmiş ve üzerinde farklı hasar durumlarına göre üç farklı çelik konstrüksiyon ile sağlamlaştırma önerisi sunulmuştur. Bu öneriler, SAP2000 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek analiz edilmiştir. Analizler

neticesinde elde edilen sonuçlardan da yola çıkılarak, üst yapıda benzer sorunu olan bir tarihi yapının (Tokat Deveci Hanı) yapısal modelleri üretilmiş ve çelik ile üst örtü güçlendirme önerileri hazırlanmış ve analiz edilmiştir. Bu analiz neticesinde, malzeme gerilmeleri ve yapısal davranış bakımından, örnek yapının çelikle güçlendirilmesinde geleneksel malzemeye göre daha olumlu sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

Kolyvas *et al.* (2011), depreme karşı güçlendirmede kullanılan donatılı harç (RM-Reinforced Mortar) sistemlerinin son zamanlardaki gelişimini incelemiştir. Bu sistemlerin hem tarihi yapıların özellikleri ile uyumlu hemde epoksi reçinesi gibi yapay polimer matriksler yerine harcın kullanılması nedeniyle yangın gibi çeşitli etkilere karşı da oldukça dayanıklı olduğu vurgulanmıştır. Bu sistemlerin geliştirilmesine yönelik Avrupa’da birkaç örnek proje tamamlanmıştır. Bu sistemler genellikle çimento esaslı veya çimentosuz inorganik harç ve çift yönlü bazalt, karbon veya cam elyaf kumaştan (FRP) oluşmaktadır. Bu makalede Petras’ta başlatılan ve Petras üniversitesinde yürütülen yerinde üretilen numuneler ve karot numuneler üzerinde yapılan dayanım, çekme, elastisite modülü gibi deneyler ile ilgili özet bilgiler sunulmuştur.

Caporale *et al.* (2012), yığma bir kemere fiberlerle güçlendirilmiş polimer (FRP) kompozit malzemeleriyle dış yüzeyden güçlendirme yapmış ve kompozit malzemenin sıkışma ve basınç dayanımını limit analiz yöntemleriyle incelemiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında FRP kompozitle güçlendirilmiş yığma kemerler, nümerik olarak doğrusal modelleme teknikleriyle modellenmiş ve kemerlerin lineer olmayan davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılarak incelenmiştir. Araştırmalar neticesinde FRP kompozitin kemerlerin güçlendirmesinde pozitif sonuçlar sergilediği ve dolayısıyla da kemer dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.

Zhang *et al.* (2012), tarafından yapılan çalışmada ise karbon fiberler ve epoksi reçinesiyle oluşturulan kompozitlerin arayüzey dayanımını arttırmak için karbon fiberlere grafen oksit nano partikül aşılması yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda öncelikle scanning electron microscope (SEM) yardımıyla kompozitin yüzey yapısı ile incelenmiştir. Karbon fiber ve epoksi arasında oluşan arayüzey dayanımı, mikro

yapışma kapasitesi ve kısa kiriş kayma deneyleriyle araştırılmıştır. Neticede nano ölçekli grafen oksit partiküllerinin kompozitin katmanları arasındaki kesme dayanımını arttırdığı ve bu artmanın da kompozitin diğer mekanik özelliklerini etkilediği belirtilmiştir.

Acar vd (2013), iki farklı grafen oksit katkılamaıyla epoksi nano kompozitler oluşturulması ve bu kompozitlerle tek tabakalı prepreg malzemelerin üretilmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Ayrıca, çalışma kapsamında prepreg kompozitleri tabakalar halinde presleyerek çok katlı prepreg kompozitler elde etmiş ve elde edilen çok katlı prepreg kompozitler üzerinde temel mekanik özellikleri inceleyerek tabakalar arasındaki ara yüzey bağlantılarını araştırmıştır.

Karaca (2014), yüksek lisans tez çalışmasında daire eksenli çubukların statik ve dinamik analizlerini düzlemi içinde ve düzlemine dik yüklenmiş olarak teorik açıdan incelemiştir. Timoshenko çubuk teorisini kullanarak elde ettiği denklemleri, burulmuş ve eğilmiş uzaysal ve daire eksenli çubuklar için tekrar düzenlemiştir. Ampirik olarak, eksenel ve kayma deformasyonu etkilerini dikkate almamıştır. Birinci mertebeden adi diferansiyel denklemleri rijitlik matrisi ve taşıma yöntemi ile çözmüştür. Düzlemi içinde ve düzlemine dik yüklü daire eksenli çubukların statik ve dinamik analizleri ayrı ayrı olarak araştırılmış ve yaygın olarak kullanılan MATHEMATICA dilinde bir bilgisayar programı hazırlamıştır. Literatürde yapılmış olan örneklerden yola çıkarak daire eksenli çubukların statik ve serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Elde edilen model sonuçlarını, ANSYS program verileri ve literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırmıştır ve uyum içinde olduğunu göstermiştir.

Fırat vd (2015), tarafından yapılan çalışmada pres tuğla ve tarihi yapılardaki gibi kireç esaslı düşük dayanımlı harçtan imal edilen hasar verilmiş 6 kemer numunesine 6 farklı güçlendirme tekniği uygulanıp, düşey yükleme altında en iyi sistem dayanımının eldesi amacıyla deneye tabi tutulmuştur. Manuel kontrollü hidrolik pompa yardımıyla 500 KN kapasiteye sahip hidrolik krika ile yükleme yapılmış yükleme ile meydana gelecek yatay ve düşey deplasmanlar tüm deneylerde aynı geometrik bölgeye yerleştirilen 7

LVDT (lineer variable differantial transformer)yardımıyla ölçülmüştür. Deneylere ilave olarak numuneler LUSAS sonlu elemanlar programında makro modelleme yöntemiyle modellenmiş yapılan analiz sonuçları deneylerle uyumlu çıkmıştır. Yapılan güçlendirme uygulamaları referans numuneye göre yük taşıma kapasitesini en az %58 artırmıştır.

Corradi *et al.* (2015), tarafından yapılan çalışma FRP takviyeli tuğla yığma tonozların dinamik yük altında davranışını araştırmak için laboratuvarında ve yerinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarını sunmaktadır. Tuğla tonozlar dolu gövdeli pres tuğla ve zayıf çimento hamurundan inşa edilmiş ve dinamik yükleme ile deney yapılmıştır. Deneyler zarar görmemiş, zarar görmüş ve güçlendirilmiş tonoz olarak 3 aşamada tonoz yapıların dinamik analizini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Çalışmada tarihi yapıların statik düşey yüklere göre tasarlandığı bu yüzden de depremlerin neden olduğu dinamik yatay yüklerin çoğunlukla önemli bir zarara veya yapının çökmesine sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Çalışmada 3 tam ölçekli tonoz inşa edilmiştir. Tonozlar sol taraflarından düşey yönde hareket etmelerini sağlayacak kancalar tarafından kaldırılıp bırakılmış ve oluşturulan serbest titreşimlerin ölçümüyle doğal modal frekansları belirlenmiştir. Her numune için zarar görmeden önceki hali deney sonrası zarar görmüş hali için frekanslar belirlenmiş ve zarar görmüş numune çeşitli yöntemlerle iyileştirilip eski haline döndüğü varsayımı yapılarak FRP güçlendirme uygulanıp tekrar titreşime tabi tutulup güçlendirilmiş numunenin doğal modal frekansı belirlenmiştir. GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer) güçlendirme malzemesi olarak kullanılmıştır. GFRP numunenin zarar görmeden önceki dinamik tepkisini tekrar oluştururken çekme dayanımını artırmıştır. Deney prosedürleri uygulanırken kompozit malzemenin yığma tonozdan sıyrıldığı gözlenmemiştir. Bunun üzerine kompozit malzemenin uzun dönem adhezyonunun araştırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Alecci *et al.* (2016), yaptıkları çalışmada; yığma yapıların yapısal performansının güçlendirmesini FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) ve PBO (polybenzoxazole) kullanarak yapmaya çalışmışlardır. Yükleme boşaltma kapasitesi, gerilme davranışı ve kırılma mekanizması CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ile kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmalar güçlendirilmemiş ve hem kemer içi güçlendirilmiş

hemde kemer sırtı güçlendirilmiş yığma kemer modeller(1/2 ölçekli) üzerinde yapılmıştır. Deneysel programda ilk olarak yığma kemerin mekanik karakterizasyonu ve onu oluşturan çimento-kireç harcı ve tuğlaların özellikleri incelenmiştir. Her iki kompozitin bağ davranışını belirlemek için kiriş testleri yapılmış ve PBO tekstil ve çimeno tabanlı matriks üzerinde göreceli olarak çekme, basınç ve kesme dayanımları ölçülmüştür. Kemere uygulanan testler neticesinde temel mekanik parametreleri (yükleme-boşaltma kapasitesi, sertlik ve düktilite) ve kırılma mekanizması tahmin edildiği gibi bulunmuştur. PBO-FRCM kompozitleri güçlendirilmemiş kemere göre %400 daha fazla maksimum yük taşıma kapasitesi göstermiştir. Düktilite bakımından kompozitleri kemerin içine ve sırtına uygulanmasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Kinematik düktilitenin güçlendirilmemiş örneklerle göre 13 kat daha fazla olduğu bulunmuştur. Kemer sırtı ile içi arasında ise iki kat fark olduğu görülmüştür. CFRP ile kıyaslanmalarında ise; CFRP maksimum yük kapasitesi her iki kompozitten de çok daha fazla olduğu görülmüştür.

Aslan (2016), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında geometrik özellikleri eksen boyunca değişen, düzlemi içinde ve düzlemine dik yüklü eğrisel eksenli çubukların, silindirik tonozların ve eksenel dönel simetrik yapı elemanlarının statik ve dinamik yükler altındaki analizlerini araştırmıştır. Analizlerde izotropik, homojen, elastik veya viskoelastik malzemeler kullanılmıştır. Bu tarz yapı elemanlarının statik yükler altındaki davranışını ifade eden temel denklemler kısaca belirtilmiş, kanonik formda elde edilen birinci mertebeden adi diferansiyel denklem takımlarının çözümleri Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile yapılmıştır. Viskoelastik malzeme analizleri Kelvin tipi sönüm modeli kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, düzlemi içinde yüklü olan dairesel eksenli çubukların farklı tip dinamik yükler altındaki titreşimi Laplace uzayında analiz edilmiştir. Düzlemsel yapı elemanlarının statik ve dinamik analizleri için Mathematica ve Fortran dillerinde bilgisayar programları kullanılmıştır. Elde edilen bu bilgisayar programlarının verdiği sonuçların kontrolü, literatürde yapılmış olan değişik yöntemlerin sonuçları ve analitik çözümler ile karşılaştırılarak, literatür ile uyumlu ve kullanılabilir oldukları gösterilmiştir.

Santis (2017), tarafından yapılan çalışma konveks yığma yüzeylere uygulanan SRG' (çelik takviyeli enjeksiyon= steel reinforced grout) nin bağ davranışı üzerine deneysel bir araştırmayı içermektedir. Küçük ölçekli tuğla duvar örnekleri üzerinde etkili eğrilik yarıçapını belirlemek için çift katlı kesme bağ testleri uygulanmıştır. Ayrıca varolan yığma tonoz kemer sırtına SRG uygulanarak direnç mekanizması araştırılmıştır. Öncelikli olarak kireç tabanlı küçük harç numuneleri üzerine çelik lifler (SRG) ilave edilmiş ve küp numunelerin basınç dayanımı, elastisite modülü ve çekme dayanımı ölçülmüş. Ardından laboratuvar ortamında kil tuğlalar ve hidrolik kireçle üretilen diktörtgen ve dikey elips şeklindeki duvarlar üzerinde deneyler uygulanmıştır. Duvarın ortasına 420mm uzunluğunda ve 14 mm çapında çelik çubuk yerleştirilmiş duvarın ince kenarlarına ise SRG şeritler yerleştirilmiştir. Duvarların gerilme davranışları ölçülmüş ve etkili eğrilik yarıçapı araştırılmıştır. Son olarak gerçek bir yığma tonoz yapı üzerine SRG uygulanarak bağ kuvveti davranışı incelenmiştir. Çift katlı kesme bağ testleri uygulanmış ve SRG nin direnç mekanizmasını ölçmek için tüm yüzey alanına testler uygulanmıştır. Neticede en yüksek eğrilik, en yüksek basınç dayanımı, en uzun bağ uzunluğu, en geniş alan sürtünme direnç mekanizmasının aktif olduğu yerde bulunmuştur. Yani (harç-tekstil veya harç-çelik çubuk) birleşim noktalarında. SRG uygulanan kemer sırtının bağ davranışının (bond) yığma yüzeyin mekanik özelliklerinden bağımsız olduğu görülmüştür. Sonuç olarak SRG ile güçlendirme tüm kemer yüzeyine uygulanması yerine şeritsel olarak uygulanması, yüksek performans gösterdiğinden tavsiye edilmiştir.

Valvona *et al.* (2017), tarafından yapılan çalışma yığma tonozların sismik güçlendirmesi için cam elyaf takviyeli çimento matrisi ile (GFRCM- Glass Fiber Reinforced Cement Matris) fiber optik algılama sisteminin birlikte kullanımını önermektedir. Çalışmada yapışma matriksi olarak hidrolik kireç harcı (HLM-Hydraulic Lime Mortar) kullanılmıştır. Polimerik reçinelere göre daha düşük yapışma kapasitesi olmasına ve yük taşıma özelliklerinin iyi bilinmemesine rağmen ekonomik olması dolayısıyla böyle bir tercih yapılmıştır. GFRCM takviyesinin özellikleri gelişmiş fiber optik algılama sistemi ile yani ızgara tabanlı sensörler (FBG- Fiber Bragg Grating) yoluyla takip edilmiştir. FBG sensörlerinin kullanımı küçük sensör boyutları, düşük ağırlık ve ayrıca ölçülen

değerlerin yüksek statik ve dinamik çözünürlüğü, matriks ve lif arasında yük aktarımında anormallikleri tespit etmesi gibi birçok avantaj sağlamıştır. Bu güçlendirme ve izleme tekniği eski bir taş kaplama yığma tonozu uygulanmıştır. Güçlendirilmiş tonozun doğru bir şekilde gözlemlenebilmesi için ayrıca GFRCM güçlendirme tabakasının etkinliğini ölçmek ve optik fiberlerin uygun pozisyonunu bulmak için bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Önerilen güçlendirme ve algılama stratejisinin davranışını doğrulamak için deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel ve analiz sonuçlarının tutarlılığı neticesinde FBG sensörlerinin kullanılması, yığma yapılarda yerinde hasar tespiti imkânı sağladığı için tevsie edilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Yığma yapıların yapısal analizi için genellikle sonlu eleman yöntemi kullanılmaktadır (Kaya 2010). SEY; kompleks bir yapıya sahip olan mühendislik yapı ya da yapı elemanlarının daha basit alt kısımlara ayrılması ile her bir kısmın kendi içinde davranışının belirlenmesi yoluyla sistem davranışının çözümlendiği sayısal yaklaşımlar bütünü olarak tanımlanmaktadır (Jafarov 2012). Bu yöntem ile analiz, yapının tamamı ya da belirli bir elemanın matematiksel modelinin oluşturulmasıyla başlamaktadır. Yapının, analizin amacına uygun şekilde ve sayıda elemanlara ayrılması geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesinin sonlu elemanlar olarak isimlendirilen geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılmasıyla gerçekleşmektedir. Daha sonra her elemandaki şekil değiştirme, yer değiştirme vb. dağılım alan fonksiyonları, cebirsel polinomların doğrusal kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır. Yapının geometrik boyutları, yapı üzerine etki eden yükler, mesnet şartları, elemanların birleşim noktalarının hareket yetenekleri ve serbestlik derecesi göz önünde bulundurularak model tanımlanmaktadır (Kaya 2010; Jafarov 2012).

Sonlu elemanlar yöntemi uygulanış şeklinin açıklanmasından da anlaşılacağı üzere sürekli bir sistemi problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayırarak elde edilen elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin potansiyel enerjisinin minimize edilmesi ve sonra bu elemanların birleştirilmesi esasına dayalı bir uygulama getirmektedir. Bu sayede mesnet şartları, sisteme ait özellikler, dış yüklerin sürekli ya da ani değişimleri rahatlıkla göz önüne alınabilmekte olup yöntem analitik metotlarla çözülmesi mümkün olmayan kompleks problemlere uygulanabilmektedir. Yüzeysel sistemin kritik bölgelerinde eleman boyutları küçültülebilmekte ve o bölgenin daha detaylıca incelenmesi sağlanabilmektedir. Sınır şartlarının problem çözüm sırasında en son aşamada hesaplara dâhil edilmesi sayesinde çeşitli sınır şartları probleme uygulanırken çözümün ilk aşamalarındaki yoğun hesaplara girilmemesi de başka bir avantajı olarak

sayılabilir (Köksal 1995; Kaya 2010).

Sonlu elemanlar yönteminin avantajlarının yanı sıra; bazı problemlere uygulanmasında karşılaşılabilen zorluklar, elde edilen sonucun doğruluk değerinin kullanılan verilerin doğruluğuna bağlı olması, çıkabilecek sonucun önceden tahmin edilme ve sonucun tahmine göre test edilmesi gerekliliği gibi eksi yönleri de mevcuttur.

SEY, değişik ve karmaşık özelliklere sahip her türlü malzemelerde kullanılabilir. Örneğin, anizotropi, doğrusal olmayan, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleri dikkate alınabilir.

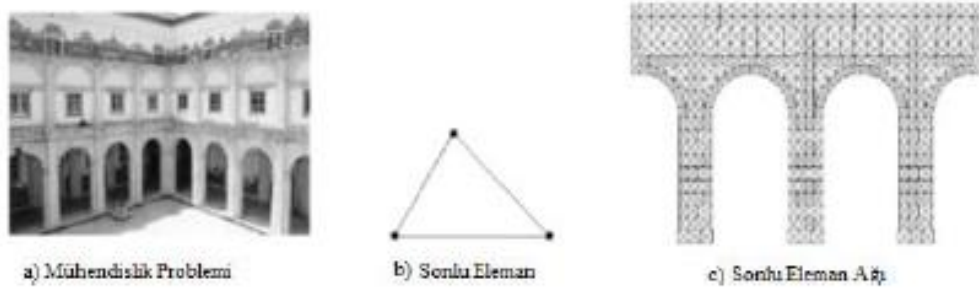
Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre temel olarak üç kısma ayrılabilir:

- a) Tek boyutlu elemanlar:** Tek boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.
- b) İki boyutlu elemanlar:** Asıl elemanı üç düğümlü üçgen eleman olup iki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. İki üçgen elemanın bir araya gelmesiyle oluşan dörtgen elemanın kullanımı problemin geometrisiyle ne kadar iyi uyum sağlarsa o derece kullanımı uygundur. Dört veya daha fazla düğüm noktasına sahip olabilmekte olan dörtgen eleman çoğu zaman özel durum olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılmaktadır.
- c) Üç boyutlu elemanlar:** Üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmakta olan eleman tipleridir. Asıl elemanı üçgen piramit olmakla birlikte dikdörtgenler prizması veya daha genel bir ifadeyle altı yüzeyle elemanlardan oluşmaktadır.

Bir problemde sisteme etki edebilecek kuvvetler; tekil, yayılı ve kütle kuvvetleri olarak sıralanabilir (Jafarov 2012).

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin hızla ilerlemesiyle sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz yapan ANSYS, LUSAS, PLAXİS vb. birçok paket program

mevcuttur. Bu paket programlar aracılığıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizin gelişimi şu şekildedir; Öncelikle sistem sonlu sayıda elemana ayrılarak ‘meshleme’ işlemi dediğimiz sonlu eleman ağı oluşturulmaktadır. Sonlu eleman boyutları küçüldükçe analiz hata oranı azalmakta, fakat problemin çözüm süresi uzamaktadır. Sonlu eleman ağını oluşturan elemanların her birine sonlu eleman denmektedir ve birleştikleri köşe noktaları da fiktif düğüm noktaları olarak isimlendirilmektedir. Her elemanın düğüm noktalarında bazı serbestlik dereceleri tanımlanmaktadır. Bu serbestlik derecelerini içeren denklemler eleman davranışının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Hem düğüm noktalarında hem de eleman sınır yüzeylerinde bazı süreklilik şartları sağlandığında yapının matematiksel bir modeli elde edilmekte ve her bir sonlu eleman parçasının davranış denklemlerinin çözülmesi sonucunda tüm taşıyıcı sistemin davranışı belirlenmiş olmaktadır (Bagcı 2003; Kaya 2010).



Şekil 3.1. Yapı modellerinin oluşturulması için sonlu eleman tanımlanması (Çakır 2014)

Bu sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz yapan paket programlar üzerinde yapı yada yapı elemanları makro modelleme, mikro modelleme ve basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemleriyle modellenebilmektedir.

3.2. Yığma Yapılarda Kullanılan Modelleme Teknikleri

Yığma, zayıflık düzlemi gibi davranan harç derzlerinden dolayı belirgin yönsel

özellikler sergileyen bir malzemedir (Lourenço 2002). Çoğu tarihi yığma yapı kubbe ve tonoz gibi eğrisel taşıyıcı sistem elemanlarından oluşmaktadır. Yığma yapıların yapısal koruma ihtiyaçlarını tespit etmek için, bu yapıların yapısal davranışları ile bütünlüklerinin ve göçme mekanizmalarının etkin bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir (Çakır 2014). Yığma yapı sistemleri, ülkemizde hala kullanılmakta olan bir yapı türüdür. Bu yapıların hesaplarıyla ilgili bir araştırma yapıldığında ya hesaplarının hiç yapılmadığı ya da arşivlenmediği görülmektedir. Günümüzdeki bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerin sağlamış olduğu kolaylık sebebiyle sayısal modellemelerin kullanıldığı bilimsel araştırmalar hız kazanmış ve daha kompleks yapı sistemlerine ilişkin modellerin çözümü eskiye nazaran daha az zamanda elde edilebilir hale gelmiştir. Tarihi yapıların ve anıtların yapısal analizlerinin en önemli safhası sayısal modellemedir. Sayısal modelleme, üretim malzemesi farklı ve değişken kesit geometrisine sahip taşıyıcı sistem elemanlarının mekaniğin temel kurallarına göre doğru ve uyumlu bir şekilde matematiksel terimlere dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. Sayısal modelleme(matematiksel modelleme) yapının geometrik boyutlarını, mesnetlerin ve taşıyıcı sistem elemanlarının birleşim noktalarının hareket meziyetleri ile serbestlik derecesini ve yapı üzerine etki eden yükleri göz önüne alarak, yapının tanımlanması şeklinde gerçekleştirilmektedir (Can vd 2012).

Sonlu elemanlar yöntemiyle analizde kullanılan eleman ve kabuller yığma yapılarda betonarme yapılar için kullanılanlardan oldukça farklıdır. Yığma yapı bloklarında taş ve tuğla gibi yığma birimlerin ve farklı özelliklere sahip harcın mevcudiyeti tek tip sonlu eleman kullanmayı zorlaştırmaktadır. Bu durumda ya kabule uygun ve gerçeğe yakın bir modelleme tekniği geliştirmemiz ya da bu birimleri ayrı ayrı modellememiz gerekmektedir. Ayrı ayrı modellemeye girildiğinde yığma birimler ve ara yüzey elemanların ayrı ayrı modellenmesi gerekte bu gereksinim bilinmeyen sayısını oldukça artırmaktadır. Doğrusal olmayan çözümlemelerde iterasyonların da işleme katıldığı göz önünde bulundurulursa, sistemin çözüm süresi ciddi şekilde artmaktadır (Kaya 2010).

“Sayısal modellemenin amacı, yapının tamamının, belli bir bölümünün ya da taşıyıcı

sistem elemanlarının çeşitli yük veya çevresel etkiler altında gerçek davranışının belirlenmesini sağlamaktır.” Tarihi yapıların ve anıtların taşıyıcı sistemi genellikle karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sebeple, yapı modellenirken birçok sadeleştirmenin yapılması gerekmektedir. Yalın ve sade bir model elde etmek için, taşıyıcı sistem elemanlarının malzeme özellikleri de doğru bir şekilde tanımlanmalıdır. Bir sayısal modellemenin doğru olabilmesi için genel prensipler şöyledir:

- En doğru sonuç her zaman en basit modelden alınır. Hesapların amaç ve kapsamını aşabilecek daha detaylı ve karmaşık modellerden sakınılmalıdır.
- Sayısal modeldeki elemanların boyut ve geometrisi belirlenirken, hesap için gerekli olan bütün yapısal etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, bir kemerin yapısal analizinde eğer burulma momentinden dolayı meydana gelen şekil değiştirmenin değeri hesaplanacaksa, modelde kemeri tanımlayan eleman eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti hesaplanacak şekilde belirlenmeli ve kesit özellikleri bu değerlerin sonuçlarını verecek şekilde tanımlanmalıdır.
- Yapının tamamını içeren büyük bir modelin küçük bir kısmını ayırarak oluşturulan model, o kısmın ya da taşıyıcı sistem elemanının detaylı davranışını incelemeye yeterli olmamaktadır. Detaylı davranış için sınır koşullarını ve bağlantı şekillerini doğru olarak tanımlayan modeller gereklidir.
- Yapının tamamının nispeten daha az hassas bir şekilde modellenmesine “makro model”, yapının strüktürel açıdan daha kritik davranış gösteren bölümlerinin detaylı modellenmesine “mikro model” denir. Bu modelleme tipleri gelecek bölümde detaylandırılacaktır.
- Sayısal modellerle yapılan hesaplarda güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için sade ve düzgün bir sonlu elemanlar örüntüsünün oluşturulması gereklidir. Sayısal modelde kullanılan elemanların bireysel davranışı, hesapların güvenilir sonuçlar vermesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Ancak sayısal modeli (sonlu elemanlar modeli) oluşturan bireysel sonlu elemanın modelde doğru bir şekilde kullanılması gerekmektedir.

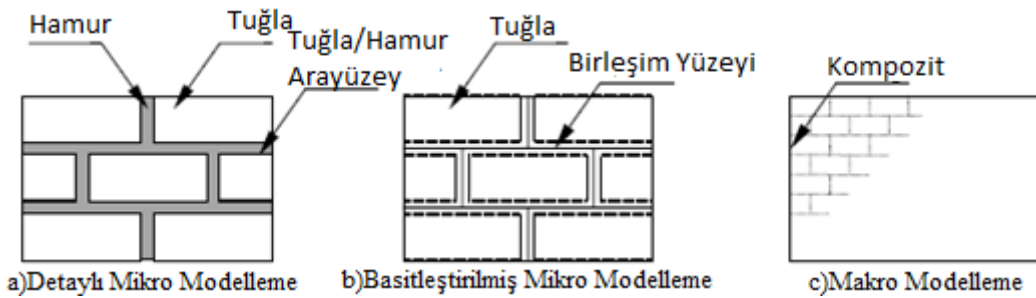
“Sonlu Elemanlar Modeli olarak da adlandırılan sayısal model, yapının tamamının davranışını yansıtmayı için sonlu elemanların bir araya getirilmesiyle elde edilir.” Sonlu

elemanlar analizinde ilk olarak modelin tamamını oluşturan elemanların bireysel davranışı, sonra da sayısal modelin tamamının davranışı önemlidir (Can vd 2012).

Gelişmiş bilgisayar analizi teknikleriyle taş ve tuğla yığma taşıyıcı sistem elemanlarının kendi düzlemi içindeki davranışını incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda karşılaşılan önemli sorun; yığma yapıların sahip olduğu süreksizliklerden dolayı heterojen ve anizotropik olması, yapım sürecinin uzunluğuyla ilgili olarak işçilik ve malzeme kalitesinin değişebilmesi ve mevcut hasar durumunun tam olarak kestirilememesi sebebiyle (Kanit 2007) sayısal modelde malzemenin mekanik özelliklerini tam olarak yansıtan bir modeli oluşturmaın güç oluşudur. “Yığma yapı elemanları genellikle, izotropik doğrusal elastik malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak modellenirler” (Can vd 2012).

Genelde yığma yapıların sayısal temsiline olan yaklaşım bileşenlerin(tuğla, taş, harç vb.) ayrı olarak yani mikro modellenmesi veya bir kompozit gibi makro modellenmesi üzerine odaklanmıştır (Lourenço 2002). Yığma yapıların analizinde sistemin büyüklüğüne bağlı olarak üç farklı modelleme tekniğinin kullanıldığı söylenebilmektedir. Bu modelleme teknikleri aşağıda sıralanmış olup Şekil 3.2’de görünümleri verilmiştir;

- a) Mikro modelleme
- b) Basitleştirilmiş mikro modelleme
- c) Makro modelleme



Şekil 3.2. Yığma yapılarda kullanılan modelleme teknikleri

3.2.1. Detaylı mikro modelleme

Blok, harç ve harç-blok arasındaki ara yüz süreksiz düğüm noktalarının ayrı ayrı modellenerek, detaylı bir şekilde analiz edilmesine detaylı mikro modelleme denir (Kuruşcu 2012). Detaylı mikro modellemede hem yığma birimin hem de hamurun elastisite modülü, poisson oranı ve seçeneğe bağlı olarak inelastik özellikleri dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla yığma yapılarda detaylı mikro modelleme her bir yapı elemanının ayrı ayrı modellenmesi ve çözümleme aşamasında her bir elemanın mühendislik özelliklerinin ayrı ayrı verilerek analizlerin bu şekilde yapılması esasına dayanmaktadır (Lourenço 1996). Ara yüz, sürekliliğin içe nüfuz etmesini önleyen potansiyel bir çatlama / kayma düzlemini temsil etmektedir (Lourenço 2002). Yani bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Lourenço 1996). Anılan teknik kullanılırken yığma birimler ile harç arasındaki ilişkinin çok iyi ve doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir (Kaya 2010).

3.2.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Detaylı mikro modelleme tekniği her ne kadar yığma duvarların gerçek davranışlarının anlaşılmasında kullanılan en iyi modelleme tekniklerinden biri olsa da, günümüzdeki bilgisayar teknolojisinin durumu da göz önüne alındığında büyük sistemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılamadığı görülmektedir. Sistem rijitlik matrisinin çok büyük boyutlarda olması yapılan analizin çözüm süresini uzatmakta ve bilgisayarlarda büyük sonuç dosyaları üretmektedir. Detaylı mikro modellemenin bu gibi dezavantajlarından dolayı çeşitli modelleme teknikleri geliştirilmiş, daha büyük yığma sistemlerin daha kısa zamanda ve daha düşük kapasiteli bilgisayarlarda çözümü mümkün kılınmıştır. Bu tekniklerden birisi de basitleştirilmiş modelleme tekniğidir.

Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde, taş ve tuğla gibi yığma elemanlar aralarında bağlantı elemanı olarak harcın olmadığı varsayılarak ve yığma birimlerin boyutları, harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek modellemelerde harç

tabakası ihmal edilmekte ve yığma birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır. Bu ortalama ara yüzey çizgisi meydana gelmesi muhtemel çatlakların meydana geleceğinin kabulü yapılan yerdir. Bu yaklaşımda, harcın mühendislik özellikleri kullanılmayıp direkt olarak yığma birimin mühendislik özellikleri baz alınır ve analizler bu yaklaşımla yapılır (Lourenço 1996). Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Tekniği kullanılarak yapılan modellemelerde, muhtemel göçme mekanizmalarının tümünün dikkate alınmaması önemli bir sorunu teşkil etmektedir. Model oluşturulurken tanımlanacak olan ara yüzeylerde hem çekme hem de kayma davranışlarının birlikte tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple yığma duvarlarda meydana gelebilecek olan çekme ve kayma çatlakları ile tüm hasarın ara yüzeylerde oluşacağı ve tuğlalarda meydana gelmesi muhtemel potansiyel çatlakların ise tuğlanın orta kısmında düşey olarak meydana geleceği kabul edilmektedir (Ali 2009).

Basitleştirilmiş mikro modellemede yığma, blok ve düğümlerden oluşur. Düğümler ise harç ve iki tane harç-blok ara yüzünden oluşur ve ortalama bir ara yüz teşkil eder. Modelin şeklini tamamlamak için ise blok boyutları genişletilmektedir. Bu yöntemde bloklar düğüm noktalarından potansiyel kırılma-kayma yüzeyleri ile birbirine bağlanmıştır. Harcın poisson etkisi göz ardı edildiğinden basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinin doğruluk payı düşüktür (Lourenço 2002; Kuruşcu 2012).

3.2.3. Makro modelleme

Önceki başlıklarda detaylı mikro modellemenin analiz sonuçlarının uzun sürmesi ve büyük boyutlu sonuç dosyası üretmesi gibi dezavantajlarına değinilmiş ve bu dezavantajları ortadan kaldırabilmek adına çeşitli modelleme tekniklerinin geliştirildiğinden bahsedilmiştir. Bu modelleme tekniklerinden bir diğeri de makro modellemedir. Makro modellemede, yığma birim ve harcın özellikleri çeşitli homojenleştirme işlemlerine tabi tutulduktan sonra yığma elemanlar ve harçlardan oluşan yapı bir bütün gibi düşünülerek modellemeye konu olan yığma yapının tek bir kompozit malzemeden oluştuğu kabul edilmektedir. Bu modelin mekanik özellikleri yığma elemanların ve harcın yapıdaki kullanım oranlarına bağlı olarak homojenleştirme

işlemleri sonucunda elde edilmektedir. (Lourenço 1996; Ali 2009; Çakır 2014).

Uygulamaya yönelik çalışmalarda, büyük sistemlerin analizinin gerekli olduğu durumlarda tüm sistem modellenirken yığma birimler ile harç arasındaki etkileşim ihmal edilmektedir. Bunun esas sebebi mevcut bilgisayar teknolojisi ile özellikle doğrusal olmayan veya zaman-tanım alanında yapılacak olan analizlerde tüm bir yapının mikro modellemeyele oluşturulmasındaki güçlüklerdir. Çok büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi ve yapısal analiz programların oluşturacakları sonuç dosyalarının boyutunun çok büyük olmasından dolayı büyük sistemler için özelliklede yığma yapıların modellenmesi çalışmalarında oldukça pratik bir yaklaşım olup diğer modelleme tekniklerine nazaran daha kullanışlı (Ural vd 2007) olan en elverişli modelleme tekniği makro modellemedir (Ali 2009). Bu nedenle, günümüzde yığma yapıların üzerine yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde bu teknik uygulanmakta ve çalışmalar makro modelleme ile yapılmaktadır (Çakır 2014).

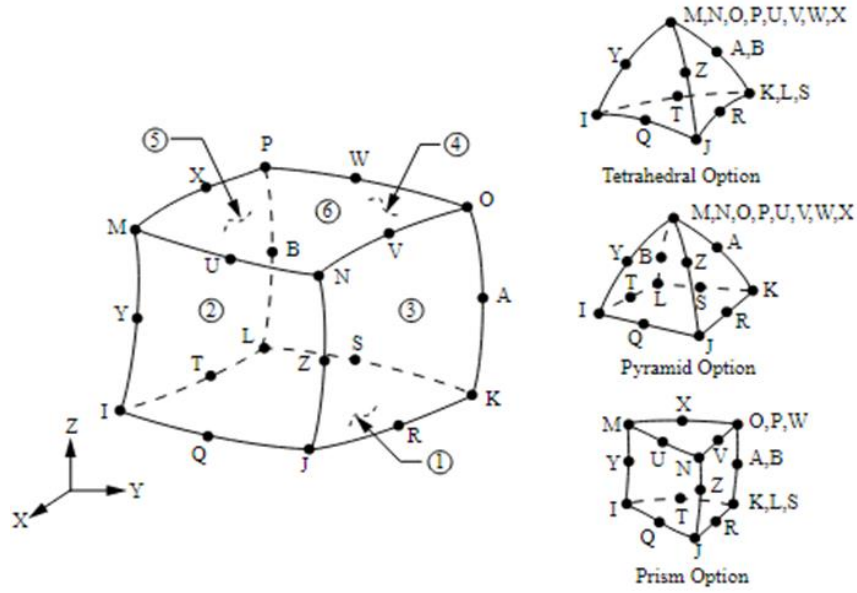
Makro modelleme tekniği uygulanırken yığma homojen, izotrop veya anizotrop sürekli kabul edilir. Genellikle karmaşık sistemli tarihi yapıların duvar parçalarının, ayak, payanda, kemer ve tonozlarının modellenmesine uygundur. Tarihi yapıların duvar örgüsündeki düzen makro modelleme yaparken kabul edilen deneysel verilere dayanan homojenleştirmenin çok umut verici sonuçlar verdiğini göstermektedir (Kuruşcu 2012).

3.3. Çalışma Kapsamında Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri

Yığma yapı üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile meshleme işlemi literatürde de genellikle yığma yapı modellemek için tercih edilen SOLID186 eleman tipi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

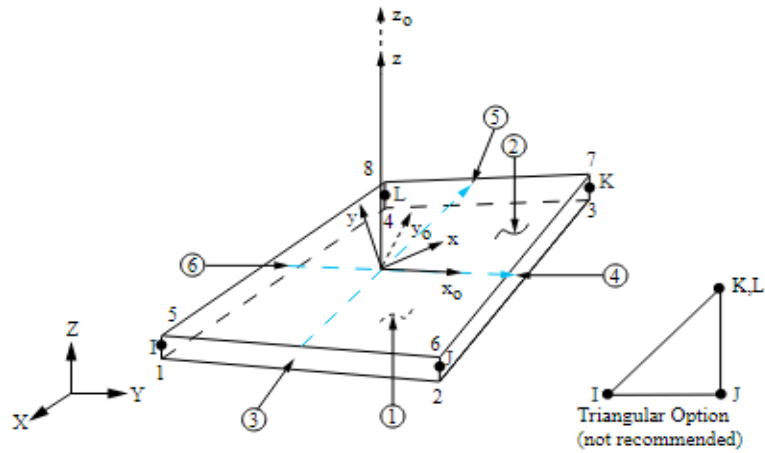
SOLID186 20 düğüm noktalı 3 boyutlu üst seviye bir katı elemandır. Eleman, her noktasında 3 serbestlik derecesine sahip olan 20 nokta tarafından tanımlanır. Şekil 3.3. de bu eleman için geometri nokta yerleşimleri ve eleman koordinat sistemi gösterilmiştir. Şekildende görüleceği üzere SOLID186 eleman tipi ile oluşturulan sonlu

elemanlar ağında modellenen yapının geometrisine göre küp, dörtyüzlü, piramit ve prizma elemanlar kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Solid 186 elemanın geometrisi

Prepreg güçlendirme malzemelerinin sonlu elemanlar ağı SHELL181 elemanlarla teşkil edilmiştir. SHELL181 eleman tipi inceden orta kalınlığa kadar tabakalı yapıların analizi için uygundur. Tabakalı uygulamalar için kompozit tabakaların modellenmesinde kullanılabilmektedir (Anonim-IV 2017).



Yukarıdaki Şekil 3.4’de bu elemanın geometrisini, nokta yerleşimlerini ve eleman koordinat sistemleri gösterilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma kapsamında sonlu elemanlar metoduna dayalı analiz yapan paket programlardan Ansys Workbench 17.0 prgramı kullanılmıştır. Tonoz ve güçlendirme modelleri solidworks programında oluşturulup Ansys Workbench'e atılarak analiz adımlarına geçilmiştir.

4.1. Doğrulama Analizleri

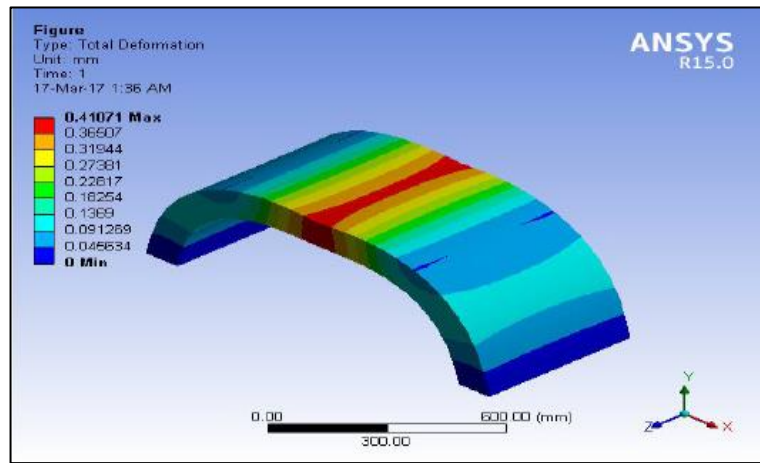
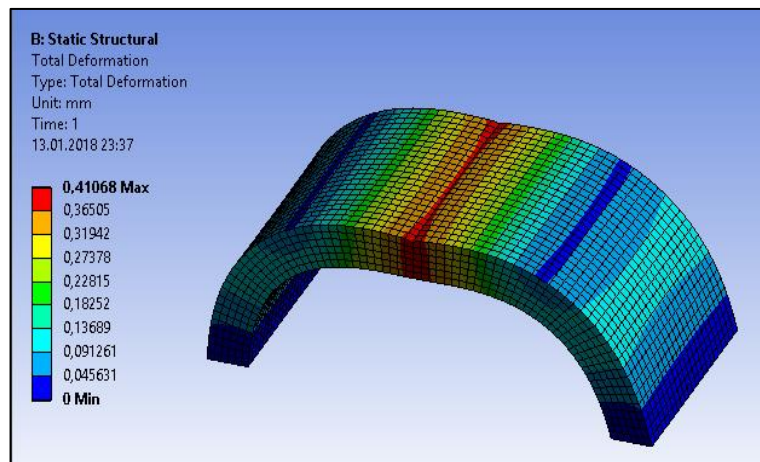
4.1.1. Literatürden faydalanılarak yapılan doğrulama

Bu çalışma kapsamında oluşturulan modellerin doğruluğunu teyit etmek için literatürdeki çeşitli çalışmalardan faydalanılmıştır. İncelenen makalelerdeki modeller bire bir Ansys Workbench programında oluşturulmuş ve analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar makalede verilen değerlerle karşılaştırılmıştır, deformasyon ile çekme gerilmesi değerlerindeki tutarlılık görüldükten sonra tez kapsamındaki analizlere geçilmiştir. Doğruluk teyidi maksatlı faydalanılmış olunan Nissar(2017)'ın çalışmasında ; 1000 mm çapında 400 mm yüksekliğinde ve 500 mm derinliğindeki 110 mm kalınlıklı kemerler üzerinde tepe çizgisi boyunca yükleme yapılmış olup deney esnasında yük-deplasman sonuçları kaydedilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmaya ek olarak Ansys Workbench programında makro modelleme yöntemiyle model oluşturulup analizsel olarak deneysel çalışma doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlara göre kemerin 10 kN luk bir yükte göçtüğü belirlenmiş ve modellemede bu yük, deneylerde olduğu gibi çizgisel olarak 20 N/mm olarak yüklenmiştir. Makro modelleme yöntemiyle oluşturulan modeller üzerinde doğrusal elastik izotrop varsayımla statik analiz yapılmıştır. Modellemede kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Nissar(2017) çalışmasında kullandığı malzeme özellikleri

Malzeme	Tuğla	Harç	Kemer Malzemesi
Elastisite Modülü(MPa)	2289	3750	1183

Makalede verilen kemere ait mekanik özellikler ile oluşturduğumuz modelin analiz sonuçlarıda makalede sunulan sonuçlarla uyum içerisinde olup Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de her iki analizde sunulmuştur.

**Şekil 4.1.** 1m açıklıklı kemerin statik analiz sonucu (Zaid Bin Nissar 2017)**Şekil 4.2.** Yaptığımız doğrulama analizi sonucu

4.1.2. Mikro ve makro modelleme analiz karşılaştırması

Bu çalışmada kullanılan tonozla ait tuğla-harç birleşim detayı Şekil 4.3'te ölçüleri ise Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de belirtilen yığma tonoz hem mikro modelleme yöntemi hem de makro modelleme yöntemiyle modellenmiştir.

Yığma tonoz modellenirken modellemede yapı birim elemanlarının özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özellikler için önce kullanılacak malzemelerin seçimi gerekmektedir. Buna istinaden yığma tonozların bir örneğinin mevcut olduğu Erzurum Aziziye tabyalarında yerinde gözlemler yapılmış ve yapı elemanlarını oluşturan birimler buradaki tonozu yansıtacak şekilde harman tuğlası ve horasan harcı olarak seçilmiştir. Horasan harcı ve harman tuğlası mekanik özellikleri literatürdeki araştırmalar sonucunda belirlenmiş ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Malzeme özellikleri (Binici vd 2014; Çakır 2014)

Malzeme	Harman Tuğlası	Horasan Harcı
Elastisite Modülü(Mpa)	2232	3200
Birim Hacim Ağırlık(kg/m ³)	1650	1500
Poisson Oranı	0,2	0,2

Sunulan bu değerler herbir yapı elemanının ayrı ayrı modellendiği mikro modelleme yöntemiyle yapılan modellerin analizinde kullanılmıştır. Ayrıca bu değerler Lourenço *et al.* (2002) tarafından önerilen (4.1) formülünde yapının tek bir malzeme olarak tanımlandığı makro modelleme yöntemiyle yapılan analizlerde kullanılacak elastisite modülünün hesabında kullanılmıştır.

$$E_a = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \quad (4.1)$$

Burada;

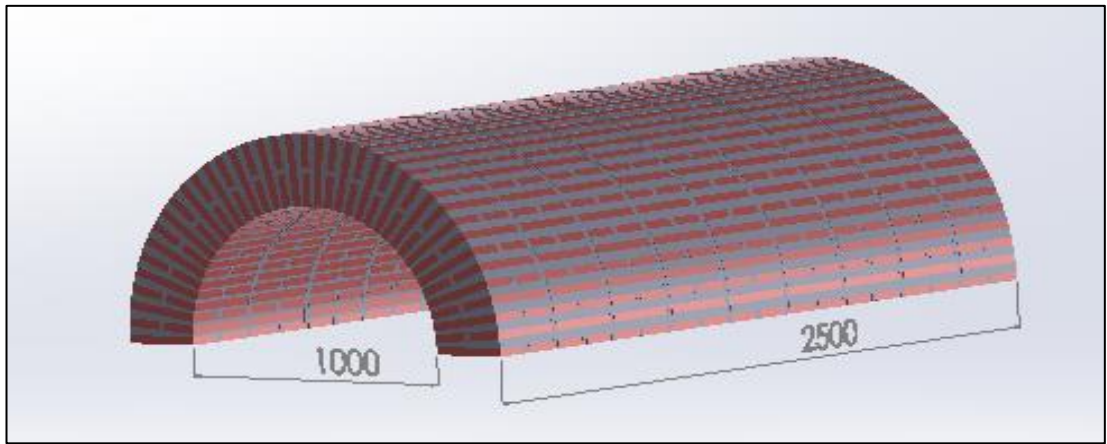
t_m :harcın kalınlığını,

t_u : yığma elemanın kalınlığını,

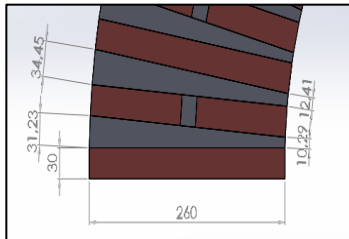
E_m : harcın elastisite modülünü,

E_u : yığma elemanın elastisite modülünü,

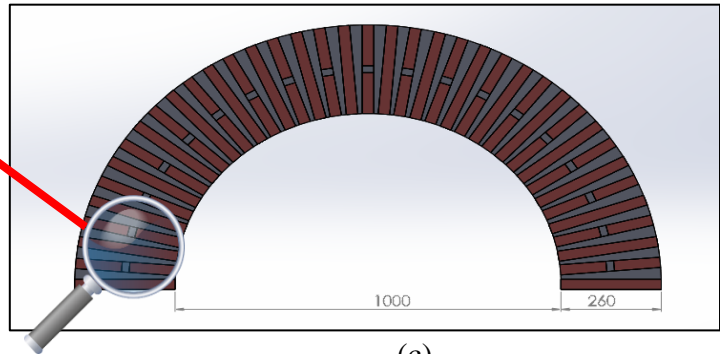
E_a : yeni kompozit malzemeye ait elastisite modülünü temsil etmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3. (a)Çalışma kapsamında analizleri yapılacak yarım daire beşik tonoz ölçüleri (b)Tonozun kemer enkesitindeki harç ve tuğla birleşim detayı(Ölçüler mm'dir.) (c)Tonozun kemer kesiti ölçüleri

Kompozit malzemenin elastisite modülü hesabı;

$$t_m = 31,23 + 34,45 + 10,29 + 12,41 = 88,38 \text{ mm}$$

$$t_u = 4 \cdot 30 = 120 \text{ mm}$$

$$E_m = 3200 \text{ MPa}$$

$$E_u = 2232 \text{ MPa}$$

$$E_a = 2560,511 \text{ MPa olarak hesaplanır.}$$

Güçlendirme amaçlı kullanılıp etkinlikleri mukayese edilecek olan malzemeler aynı basınç ve sıcaklık şartlarında üretilmiş olup üretiminde kullanılan lif yoğunluğu eşit olacak şekilde seçilmiştir. Malzemelerin kalınlığı 0,125 mm olup malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Modellemede kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzemeler	Elastisite Modülü(N/mm ²)	Birim Hacim Ağırlığı(kg/m ³)	Poisson
Yığma Malzemesi	2560,511	1543,68	0,2
BFRP Prepreg	207000	2000	0,23
CFRP Prepreg	135000	1600	0,3

Yığma yapılar üzerine literatürdeki analizler genellikle malzemelerin lineer elastik izotrop varsayımıyla yapılmaktadır. Bu çalışmada da tonozlarda kullanılan malzemeler lineer elastik izotrop olarak kabul edilmiştir.

Çalışma kapsamında statik ve modal analizleri yapılacak yarım daire beşik tonoz elemanın model geometrisi ölçüleri ile birlikte Şekil 4.3’de verilmiştir. Fransız bilim adamı Honoré Fabrinin stabil bir kemerin kalınlık ve yarıçap tahminin yapılabileceğini öne sürdüğü daha önceki bölümlerde verilen (2.2) ve (2.3) formüllerinde kemer en kesitine sahip beşik tonoz kalınlık ve yarıçapını tahmin etmede de kullanılabilir. (4.2)

$$e_1 = 2R(3 - 2\sqrt{2}) = 0.343R \quad (4.2)$$

Burada, e_1 kemer kalınlığı ve R kemerin dıştan ölçülen yarıçapıdır.

Şekil 4.3(c) de verilen tonoz kemer kesiti ölçüleri üzerinden dış yarıçap değerimiz 760 mm (2.2) formülünde yerine konulursa ;

$$0.343R = e_1 \approx 260 \text{ mm}$$

tonozun kalınlık değerini verdiği görülmektedir.

Ayrıca Fabri'ye göre (4.3) formülüyle kemerin dış yarıçapı kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla iç yarıçapı (r) belirlenebilir.

$$r = R(4\sqrt{2} - 5) = 0.657 \cdot R \quad (4.3)$$

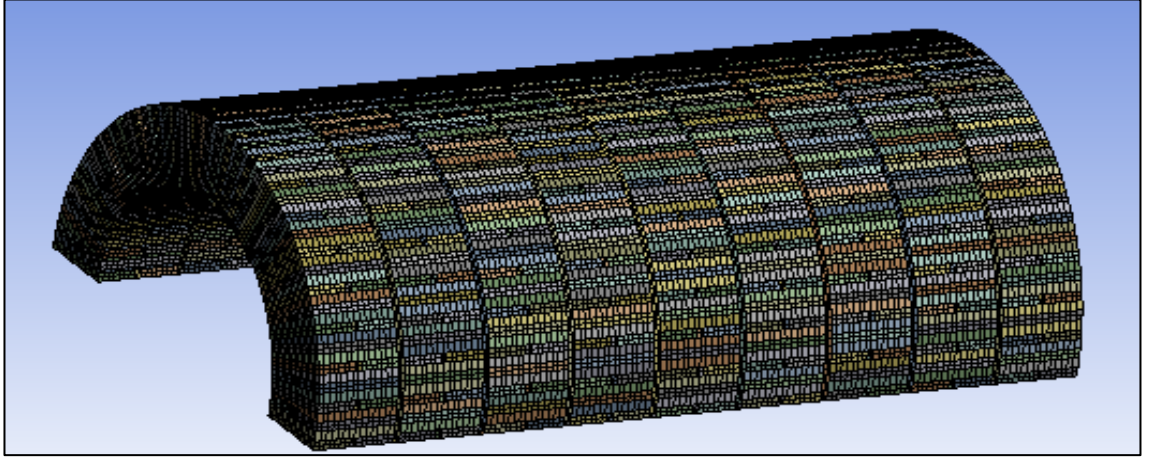
dış yarıçap değeri 760 mm (4.3) formülünde yerine konulursa ;

$$r \approx 0,657 \cdot 760 \approx 500 \text{ mm}$$

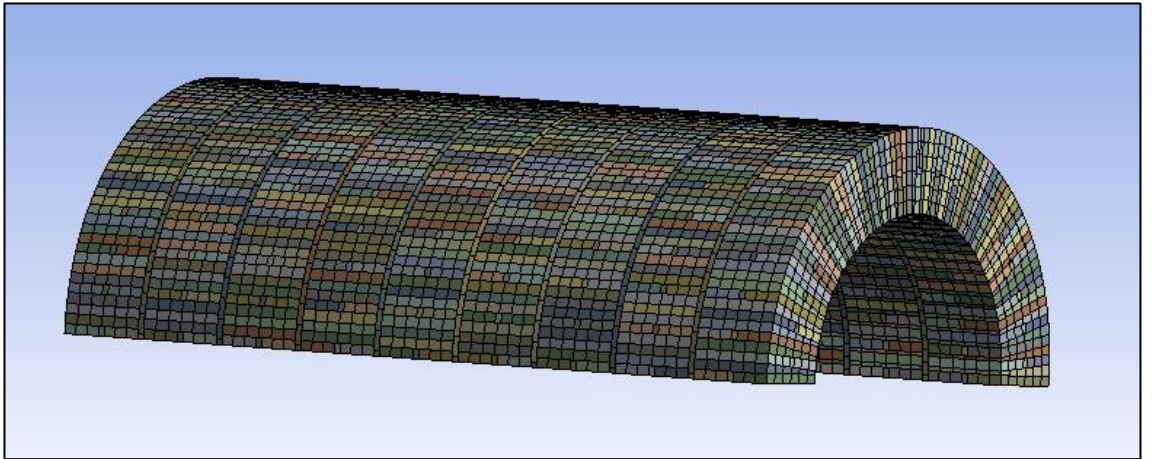
tonozun iç yarıçapının verdiği görülmektedir.

Alınan ölçüler stabilite açısından bu formüllerle kontrol edilmiş ve tam eşitlik sağlanarak geometri ölçülerinin stabilite açısından uygun olduğu görülmüştür.

Analizde tonoz malzemelerini saracak olan sonlu eleman ağı SOLID186 eleman tipiyle, güçlendirme malzemelerini saracak olan sonlu eleman ağı ise SHELL181 eleman tipiyle oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. 20 mm lik sonlu eleman ağına bölünmüş tonoz



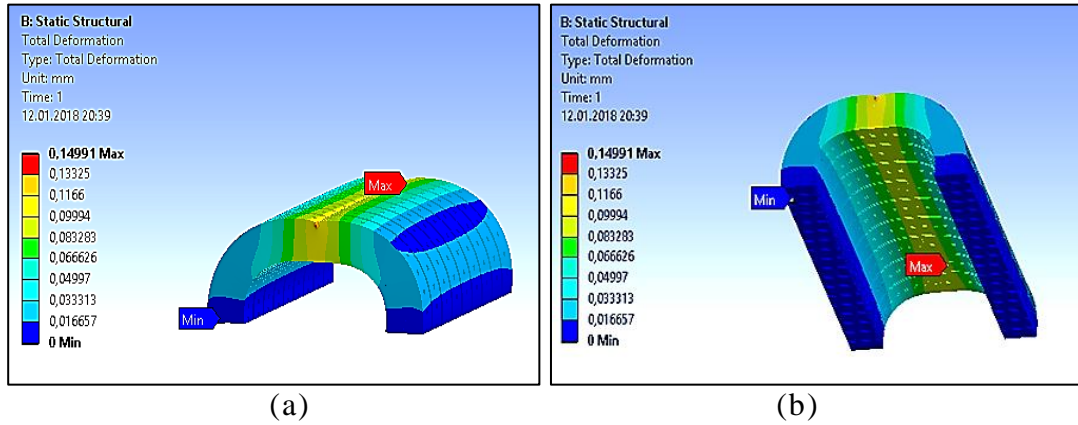
Şekil 4.5. 50 mm'lik sonlu eleman ağına bölünmüş tonoz

Analizin selahiyeti için sonlu eleman boyutu oldukça önemli olabilmektedir. Bu sebeple eleman boyutu ilk olarak mikro modelleme için 20 mm olarak seçilmiştir. Şekil 4.6. de mikro modelleme yöntemiyle oluşturulan tonozun SOLID186 eleman tipiyle 20mm'lik sonlu elemanlar ağına bölünmüş hali görülmektedir. Fakat mikro modelin karmaşık yapısı, eleman boyutunun küçük, yapının büyük olması sebebiyle eleman sayısının çok fazla olması ve dolayısıyla oluşan eleman ve düğüm noktası sayısı çok yüksek rakamlarda olduğundan analiz yapılması istendiğinde işlem çok uzun sürmüş olmakla birlikte analiz işlemi, analizlerin yürütüldüğü bilgisayarın ram kapasitesini aşmasından dolayı çözdürülememiştir. Bunun üzerine Şekil 4.5'deki sonlu eleman boyutu 50 mm

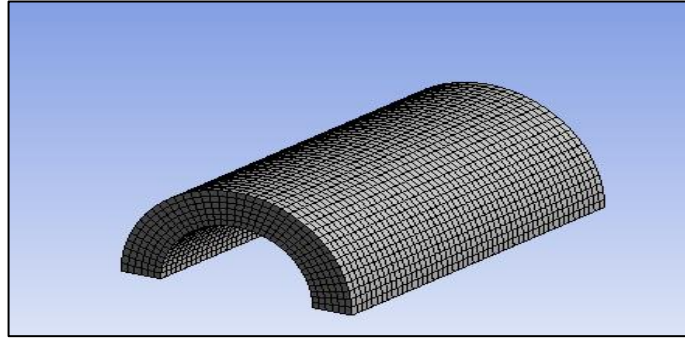
olan ağ oluşturulmuştur. Bu oluşturulan ağ üzerinde analiz yaptırılabilmiş olmakla beraber analiz uzun süre almıştır.

Çalışma kapsamında yığma yapıların modelleme teknikleri bölümünde anlatılan detaylı mikro modelleme ve makro modelleme yaklaşımlarını kullanarak her iki yaklaşım için de analiz yapılması arzulanmıştır. Fakat mikro modellemenin karmaşık yapısı, eleman sayısının çok fazla olması ve güçlendirme durumunda bu eleman sayısının daha da artacağı düşünülerek mikro modelleme yönteminden vazgeçilmiş olup yeter doğrulukta sonuç alınabilecek bir yöntem olarak literatürde önerilen yaklaşım doğrultusunda makro modelleme yöntemi ile güçlendirilmiş tonozların analizleri yapılmıştır. Şekil 4.7. da bu analizlerde kullanılan makro modele ait 50 mm boyutundaki sonlu eleman ağ gösterilmiştir. Her iki yöntemle ayrı ayrı modelleri oluşturulan tonoz için yapılan analizlerin birbirine yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

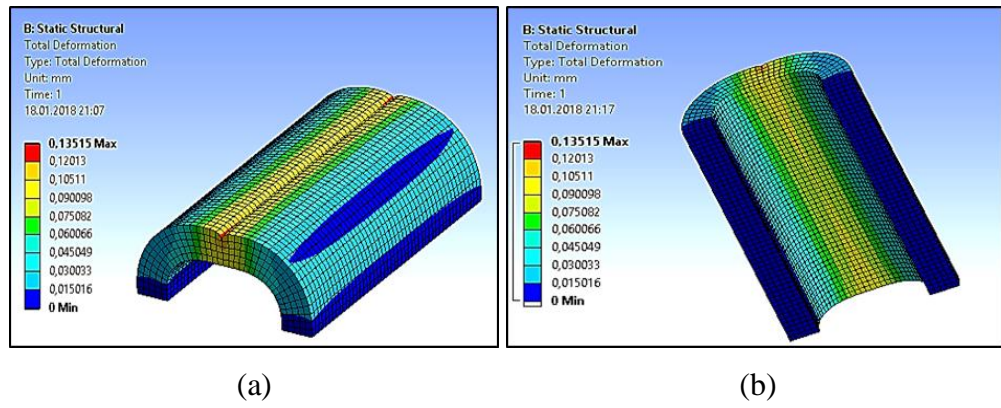
Güçlendirme uygulanmamış makro ve mikro modele ait statik analiz sonuçları Şekil 4.6 ile Şekil 4.8’de modal analiz sonuçları ise Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.6. Mikro modele ait toplam deformasyon
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm



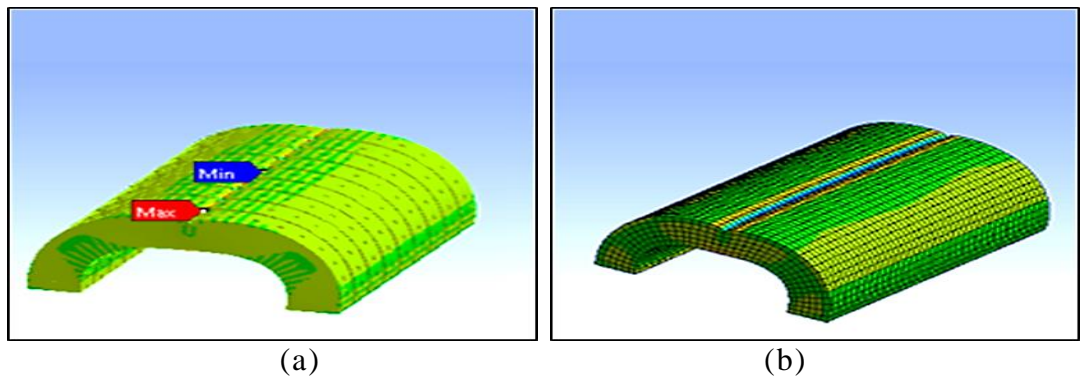
Şekil 4.7. Makro modele ait 50mm boyutundaki sonlu eleman ağı



Şekil 4.8. Makro modele ait toplam deformasyon

(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

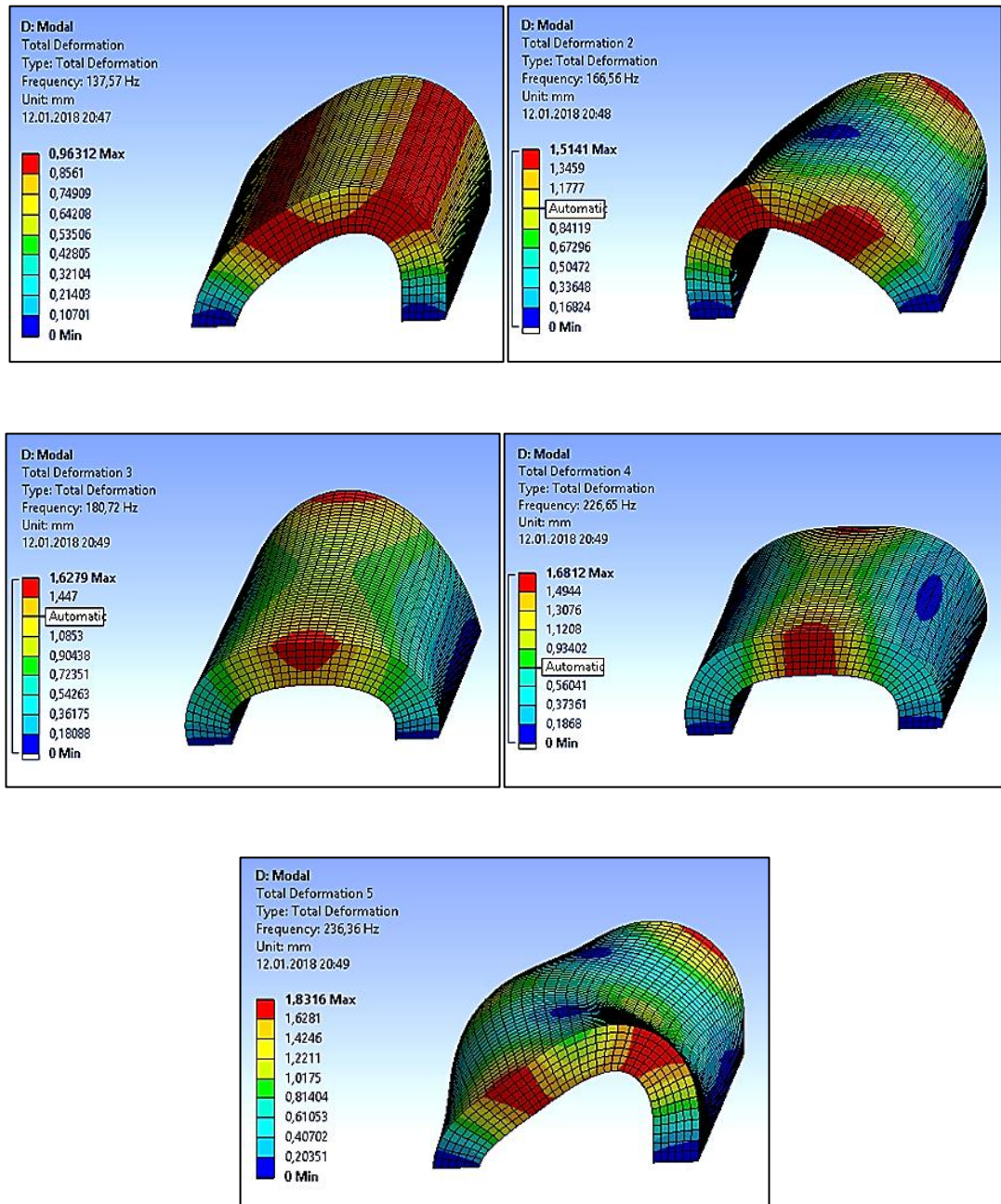
Mikro ve makro modelin toplam deformasyon değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu yukarıda verilen şekillerde açıkça görülmektedir.



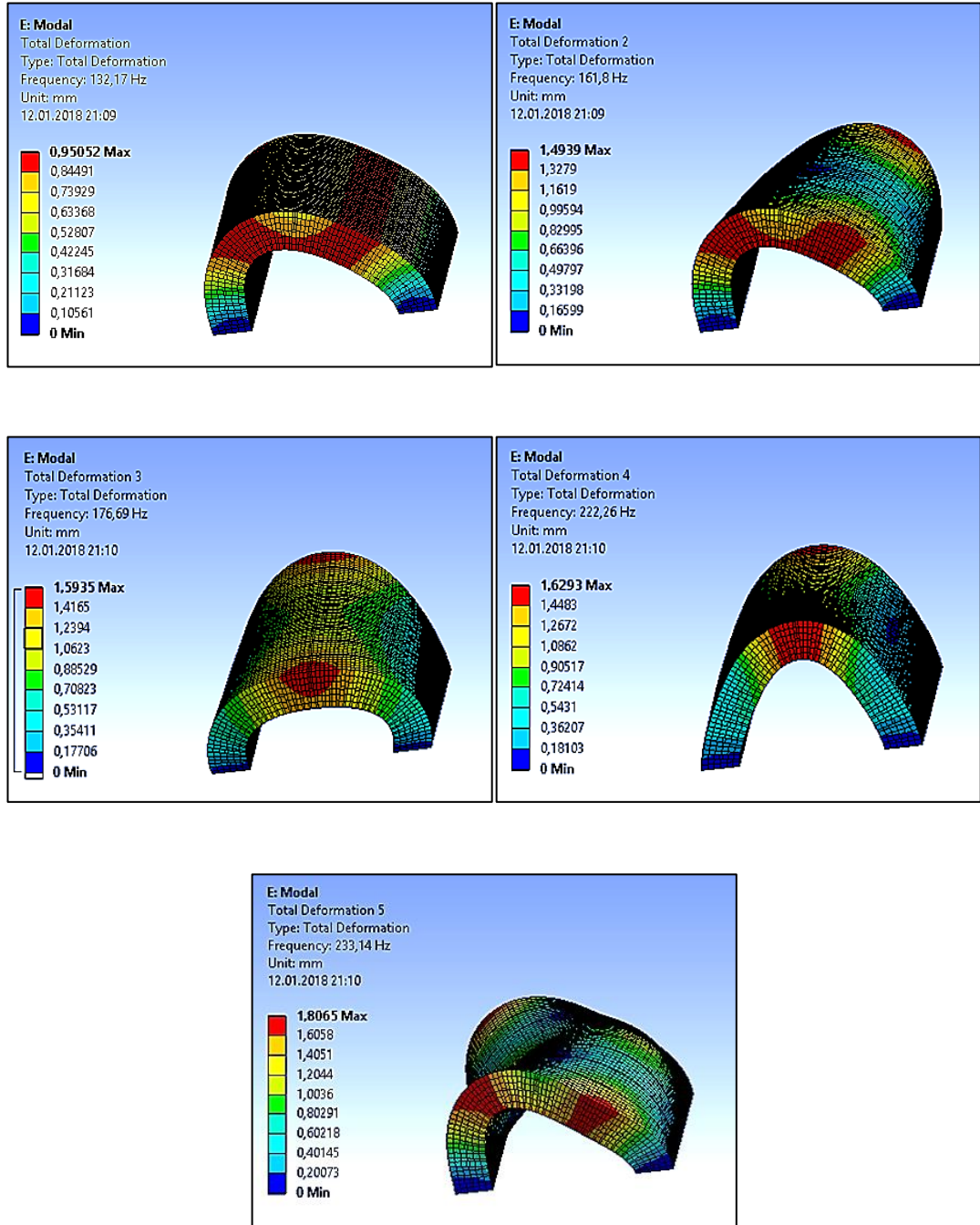
Şekil 4.9. Mikro ve makro modellere ait çekme gerilmesi dağılımı

(a) mikro modele ait (b) makro modele ait

Mikro ve makro modele ait çekme gerilmesi dağılımları Şekil 4.11. de görüldüğü üzere birbirlerine yakındır ve max çekme gerilmesi değeri 0,3396 MPa olarak belirlenmiştir. Makro modelleme yöntemiyle oluşturulan tonozların mod şekilleri Şekil 4.12.'de mikro modelleme yöntemiyle oluşturulan tonozların mod şekilleri ise Şekil 4.13.'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Makro modele ait mod şekilleri



Şekil 4.11. Mikro modele ait mod şekilleri

Mikro ve makro modele ait mod şekilleri ve bu modlarda meydana gelen deformasyon miktarları incelendiğinde, şekillerin birbirinin aynısı olduğu deformasyon miktarlarının da birbirlerine yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu mod şekilleri için elde edilen frekans değerleri Çizelge 4.4’de sunulmuştur.

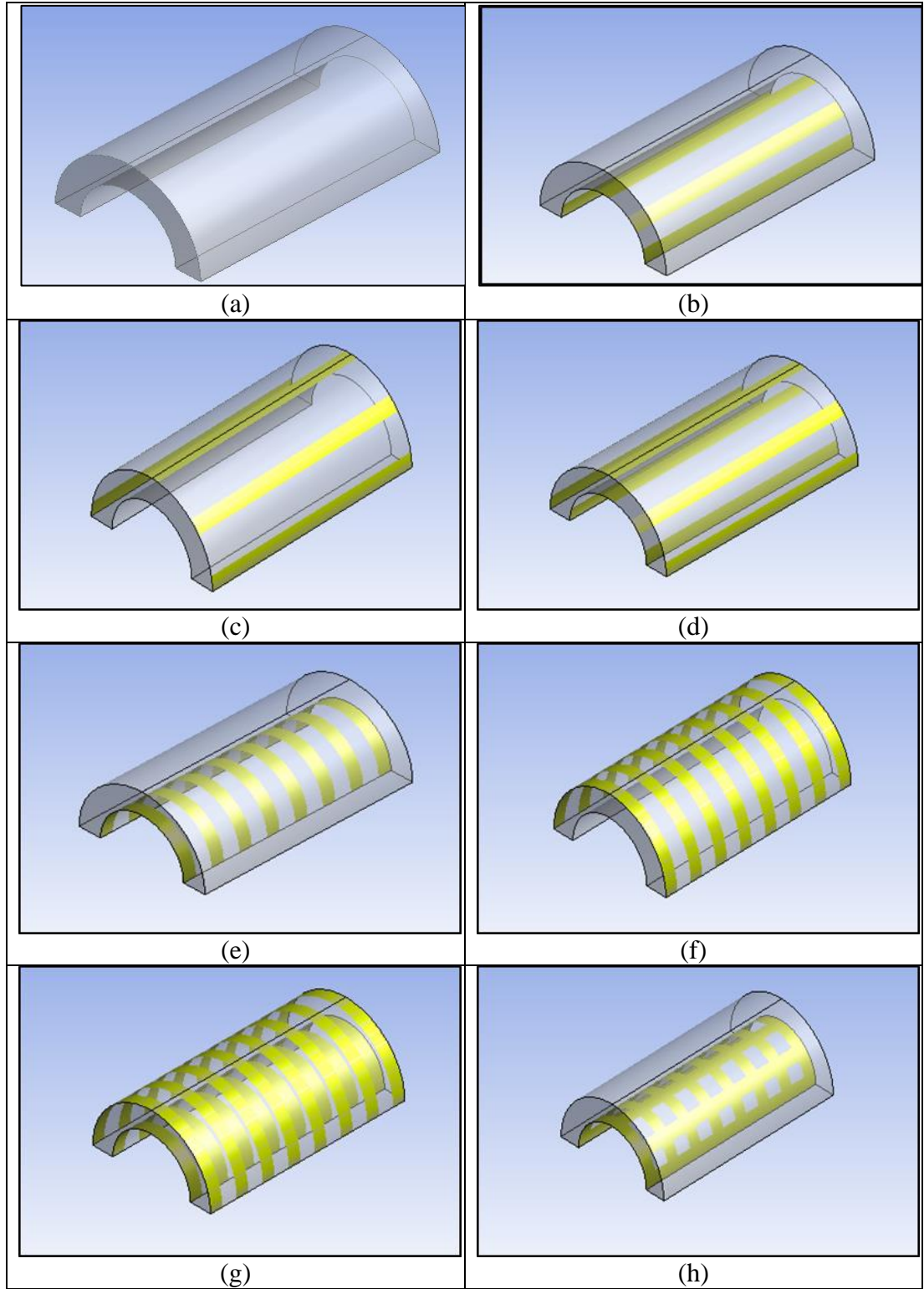
Çizelge 4.4. Mikro ve makro modellere ait frekans değerleri (a).Mikro modele ait frekans değerleri (b)Makro modele ait frekans değerleri

(a)			(b)		
	Mode	✓ Frequency [Hz]		Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	132,17	1	1,	137,59
2	2,	161,8	2	2,	166,57
3	3,	176,69	3	3,	180,73
4	4,	222,26	4	4,	226,67
5	5,	233,14	5	5,	236,37
6	6,	244,86	6	6,	249,15

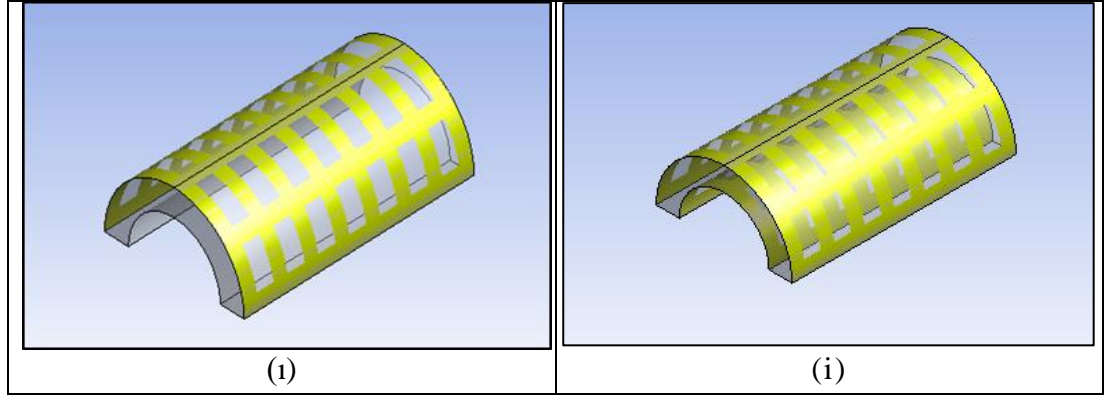
Çizelge 4.4’de görüldüğü üzere iki modelin frekans değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Bu sonuçlardan hareketle makro modelleme yöntemi ile oluşturulacak tonozlar için yapacağımız statik ve modal analiz sonuçlarının doğru değerleri yansıtacak olduğu kanaatine varılmış olup ve modeller makro modelleme yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur.

4.2. Analiz Sonuçları

Tonozun kompozitlerle güçlendirme şekillerini belirlemek amacıyla güçlendirme uygulanmamış tonozlar üzerinde daha önceden yapılmış analiz sonuçlarından çekme gerilmesi dağılımını gösteren ‘maximum principal stress’ analiz sonuçları kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre çekme gerilmesi yüksek olan kısımlar güçlendirme elemanı ile desteklenmesini sağlamak üzere 9 farklı tip güçlendirme tipi belirlenmiş ve Şekil 4. 12. de sunulmuştur.



Şekil 4.12. (devam)



Şekil 4.12. (a).Güçlendirilmemiş tonoz (b).Alttan boyuna güçlendirme-1.tip (c).Üstten boyuna güçlendirme-2.tip (d). Alttan ve üstten boyuna güçlendirme-3.tip (e). Alttan eğrisel güçlendirme-4.tip (f). Üstten eğrisel güçlendirme-5.tip (g). Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme-6.tip (h).Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme-7.tip (i).Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme-8.tip (j).Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme-9.tip

Bu kısımda verilecekleri özetleyecek olursak; öncelikle güçlendirilmemiş tonozun mikro ve makro modelleri oluşturulmuş bu modeller tepe çizgisi hattı boyunca daha önce literatürdeki deneylere bağlı olarak belirlenmiş 40 N/mm'lik çizgisel yükle yüklenmiştir. Tonozların uygulanan bu çizgisel yük ve kendi ağırlıklarının etkisi altında statik ve modal analizleri yapılmıştır. Güçlendirme tipleri daha öncede belirtildiği üzere çekme gerilmelerinin olduğu kısımlara göre belirlenmiştir. Güçlendirme malzemesi olarak BFRP ile CFRP kompozitler karşılaştırılıp hangi malzemenin daha etkin sonuçlar verdiği ve hangi güçlendirme tiplerinin nasıl katkı sağladığı incelenmiştir. Güçlendirme tiplerinin sağladığı katkıları belirlemede makro modelleme yöntemiyle modellenip analizleri yapılan güçlendirilmemiş tonozla ait toplam deformasyon ve çekme gerilmesi değerleri referans olarak alınmıştır.

Daha öncede belirtildiği üzere alttan boyuna güçlendirme, üstten boyuna güçlendirme, alttan ve üstten boyuna güçlendirme, alttan eğrisel güçlendirme, üstten eğrisel güçlendirme, alttan ve üstten eğrisel güçlendirme, alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme, üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme, hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme olmak üzere 9 farklı güçlendirme tipi güçlendirme malzemelerinin 15 cm genişliğe sahip olacak şekilde sarılmasıyla oluşturulmuştur. Tüm güçlendirme tiplerinin analizlerinde kullanılan sonlu eleman sayısı ve düğüm noktası Çizelge 4.5'de

verilmiştir.

Çizelge 4.5. Güçlendirme tiplerine göre kullanılan eleman ve düğüm noktası sayıları

Güçlendirme Şekli	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Güçlendirmesiz(Referans)	9310	44316
1.tip	10058	45332
2.tip	9560	44706
3.tip	10308	45722
4.tip	9566	44724
5.tip	9694	44916
6.tip	9950	45324
7.tip	10314	45740
8.tip	9944	45306
9.tip	10948	46760

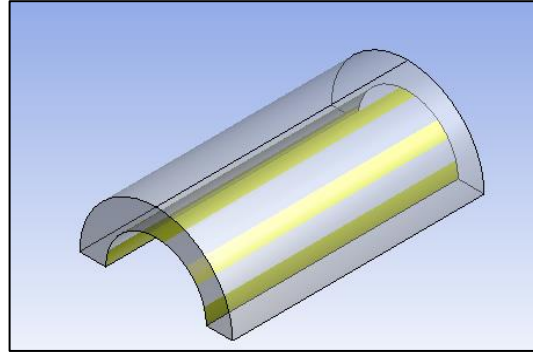
BFRP ve CFRP malzemeleri ile oluşturulan her bir güçlendirme şeklinin analiz sonucu aşağıda sunulmuştur.

4.2.1. Alttan boyuna güçlendirme - 1.tip

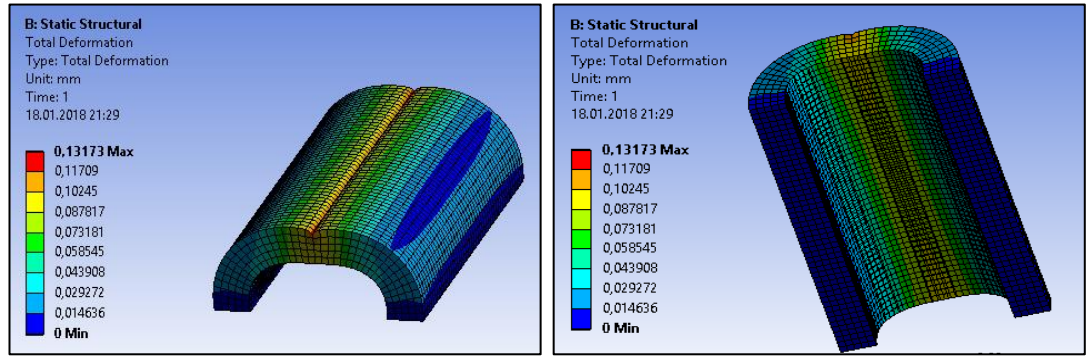
Bu güçlendirme tipinde malzemeler 15 cm genişliğindeki şeritlerle 5 parça olarak çekme gerilmelerini karşılayabileceği düşünülen kısımlara tonozun alt kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır. Şeritler 20 cm ve eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.13.(a) da verilmiştir.

BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.13.(b) ve Şekil 4.13.(c) de gerilme dağılımı ise Şekil 4.15’de verilmiştir.

CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.14’de gerilme dağılımı ise Şekil 4.16’da verilmiştir.



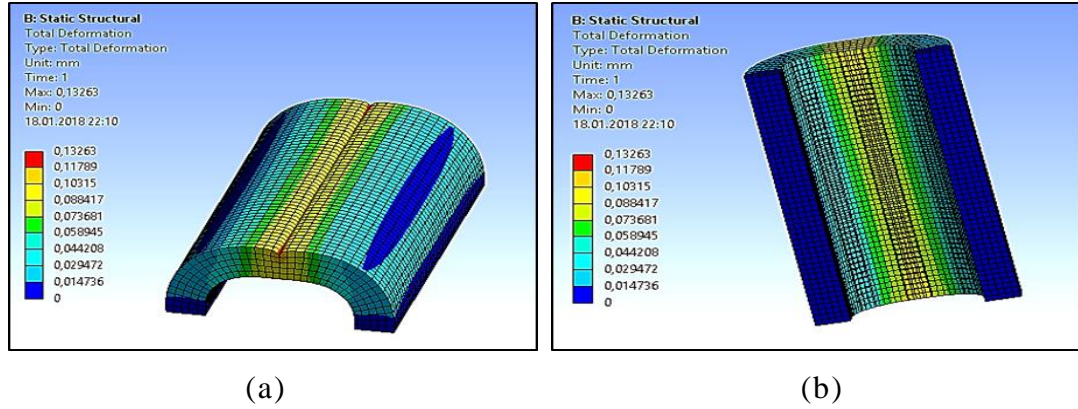
(a)



(a)

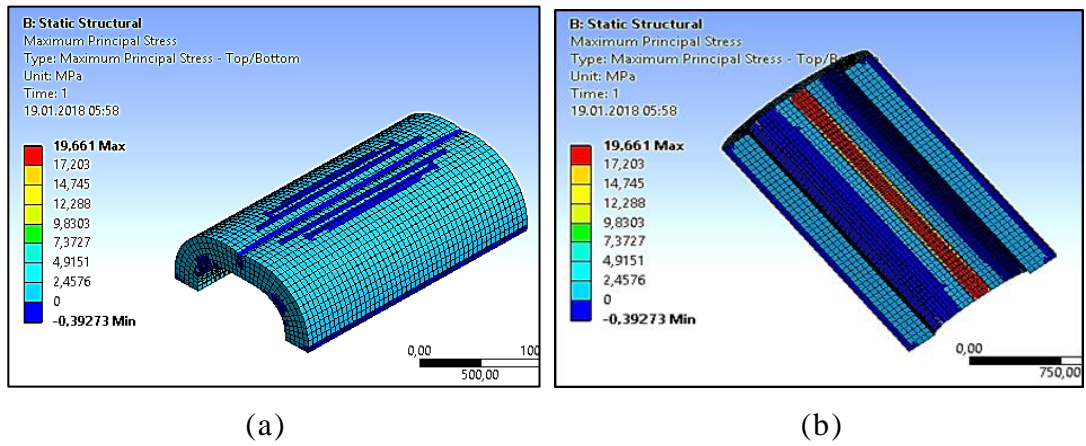
(b)

Şekil 4.13. Alttan boyuna güçlendirme şekli ve bu şekilde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)güçlendirme şekli (b)üstten görünüm (c) alttan görünüm

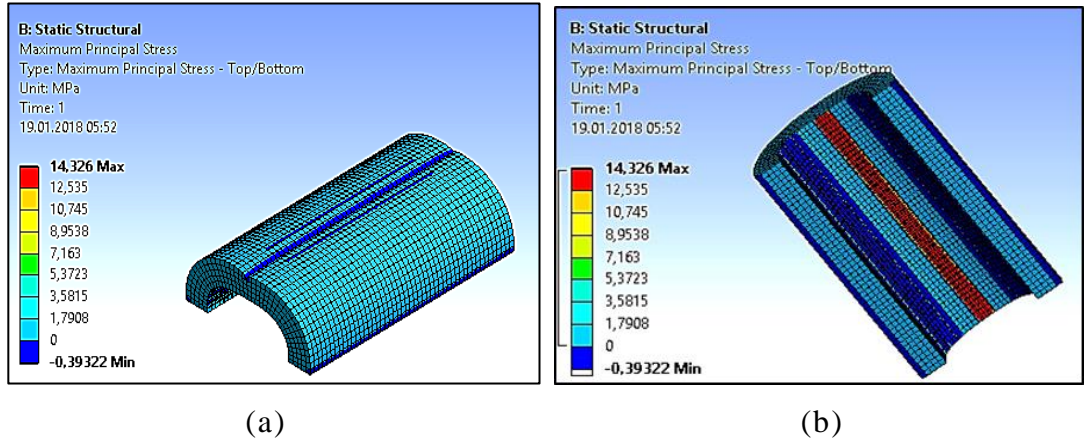


Şekil 4.14. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

Toplam deformasyon sonuçlarına bakıldığında her iki malzeme ile de güçlendirmenin deformasyon miktarını azalttığı görülmektedir. Öte yandan BFRP malzemesinin deformasyon miktarını azaltmadaki katkısı CFRP malzemesine göre bir miktar daha iyi olduğu da analiz sonuçlarından okunmaktadır.



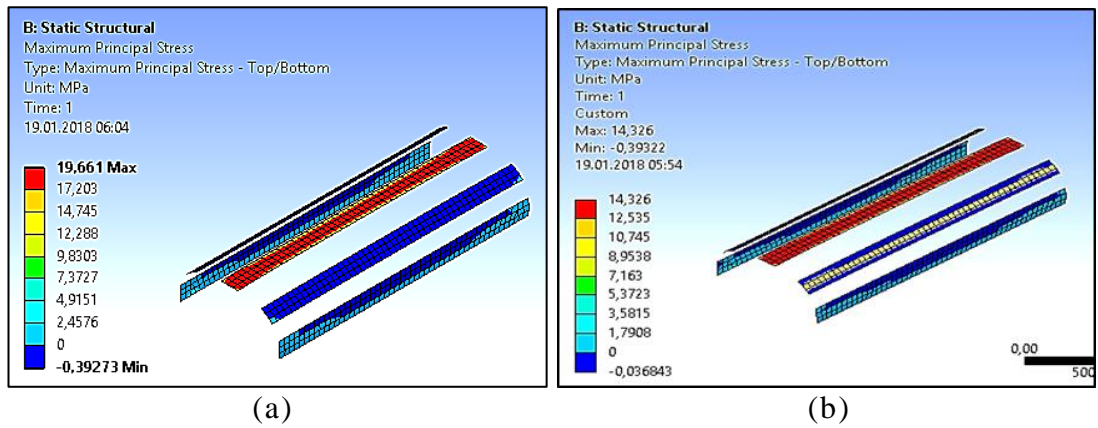
Şekil 4.15. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm



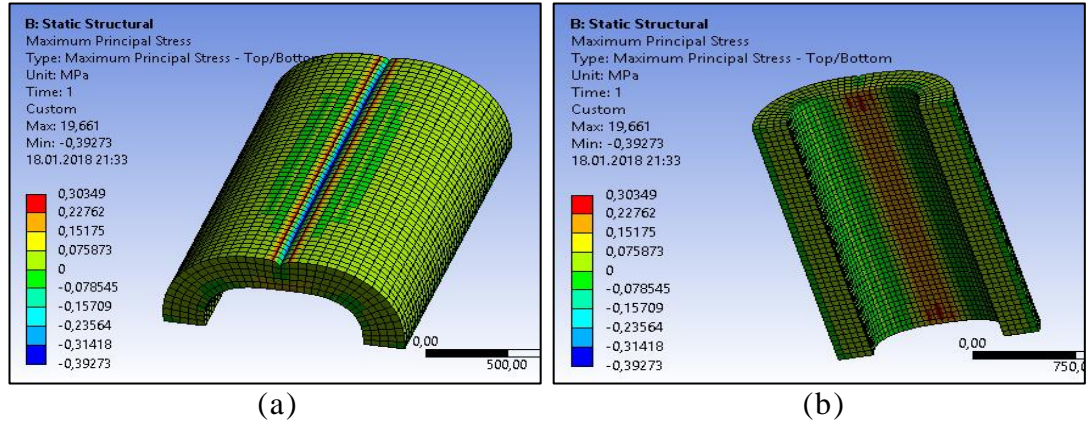
Şekil 4.16. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

Güçlendirme tipi için yapılan analiz sonucunda güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri ile tonozun üzerinde oluşan çekme gerilmeleri ayrı ayrı elde edilmiş ve böylelikle güçlendirme malzemelerinin tonoz malzemesinde oluşan gerilme dağılımını ne ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

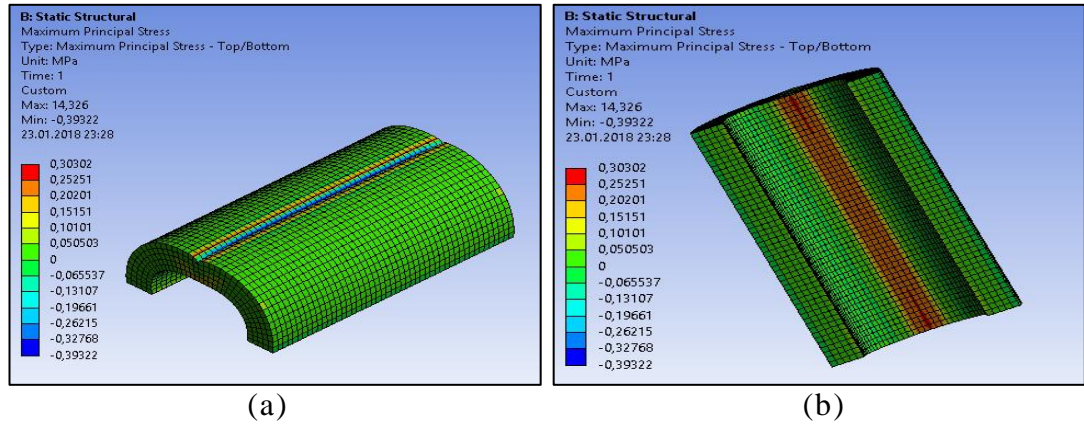
Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.17.'de, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.18'de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.17. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde
(a)BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.18. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilme durumunda tonoz üzerinde meydana gelen gerilmeler;
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

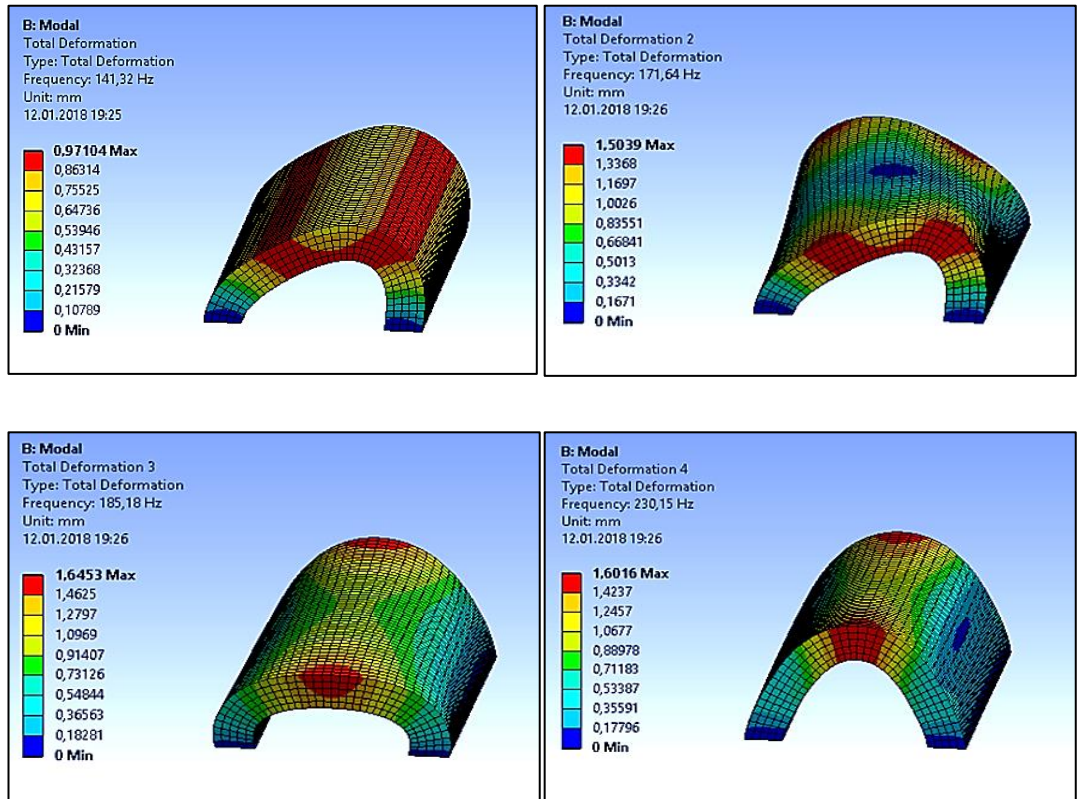


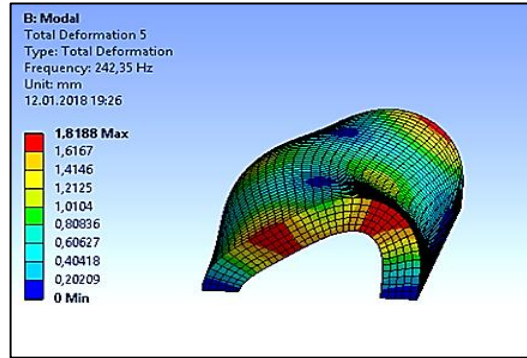
Şekil 4.19. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilme durumunda tonoz üzerinde meydana gelen gerilmeler;
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

Güçlendirme sonrası tonoz üzerinde kalan gerilmeler incelendiğinde maksimum gerilmelerin olduğu alt orta kısımda CFRP ile yapılan güçlendirme sonrası maksimum gerilme değeri 0,3396 MPa dan 0,2020-0,2525 MPa aralığına düşmüştür. BFRP ile yapılan güçlendirme sonrasına bakarsak ortadaki çizgisel hat boyunca turuncu rengin hakim olduğu görülmekte olup gerilme değeri 0,1518-0,2277 MPa arasında bir değer almaktadır. Her iki güçlendirme malzemesi içinde kırmızı gerilme çizgisi çok seyrekleşmiş olup BFRP malzemesi, uygulandığı bölgedeki maksimum gerilme değerini %33 ile %55 kadar azaltırken CFRP malzemesi, uygulandığı bölgedeki maksimum gerilme değerini %25 ile %40 kadar azaltabilmiştir.

Şekil 4.17'deki çekme gerilmeleri dağılımı incelendiğinde bu güçlendirme tipi için CFRP malzemesi BFRP malzemesine göre daha az gerilmeye maruz kalmıştır. Güçlendirme malzemelerindeki gerilme dağılımları incelendiğinde ortadaki güçlendirme malzemelerinin maksimum gerilmeleri aldıkları mesnete yakın bulunan güçlendirme malzemelerinin üzerinde de bir miktar çekme gerilmesinin olduğu görülmektedir.

Modal analiz sonuçlarına bakıldığında (Şekil 4.20) mod şekillerinin değişmediği görülmekte olup frekans değerleri Çizelge 4.6'de sunulmuştur. Burada güçlendirme şeklinin aynı olması durumunda farklı malzemeler ile güçlendirilse de mod şekillerinin değişmediği görülmektedir.





Şekil 4.20. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ve CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmenin ilk 5 mod şekli

Çizelge 4.6. Alttan boyuna güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 1.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)			(b)		
	Mode	Frequency [Hz]		Mode	Frequency [Hz]
1	1,	141,39	1	1,	140,38
2	2,	170,42	2	2,	169,35
3	3,	182,96	3	3,	182,25
4	4,	229,94	4	4,	229,1
5	5,	240,57	5	5,	239,35
6	6,	252,73	6	6,	251,7

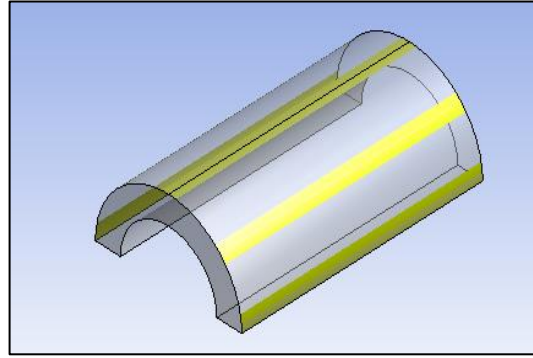
1.tip güçlendirmede her iki malzemeyle yapılan güçlendirmede de tonozun frekans değerleri artış göstermiş olup BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme frekans değerini CFRP ye göre daha fazla artırmıştır.

4.2.2. Üstten boyuna güçlendirme - 2.tip

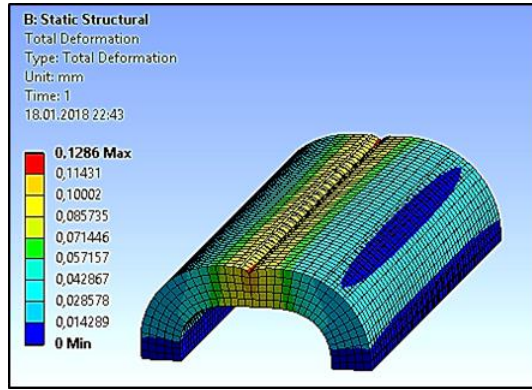
Bu güçlendirme tipinde malzemeler 15 cm genişliğindeki şeritlerle 5 parça olarak çekme gerilmelerini karşılayabileceği düşünülen kısımlara tonozun üst kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır. Şeritler 20 cm ve eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.21(a) da verilmiştir.

BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.21(b) ve Şekil 4.21(c)'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.23'de verilmiştir.

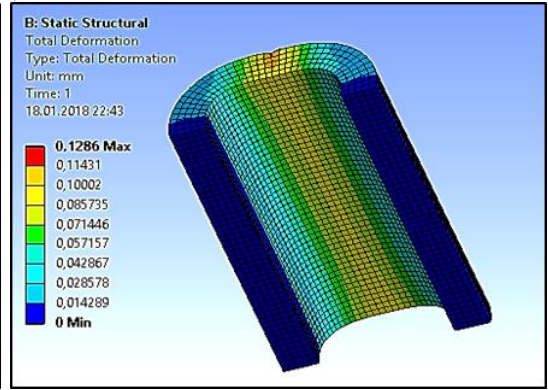
CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.22'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.24'de verilmiştir.



(a)

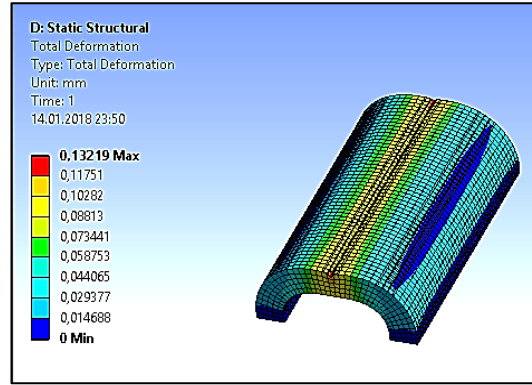


(a)

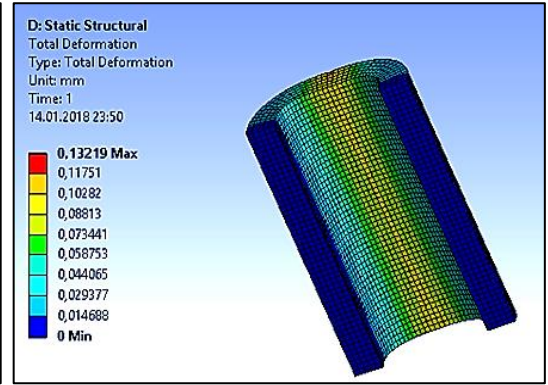


(b)

Şekil 4.21. Üstten boyuna güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) güçlendirme şekli (b) üstten görünüm (c) alttan görünüm



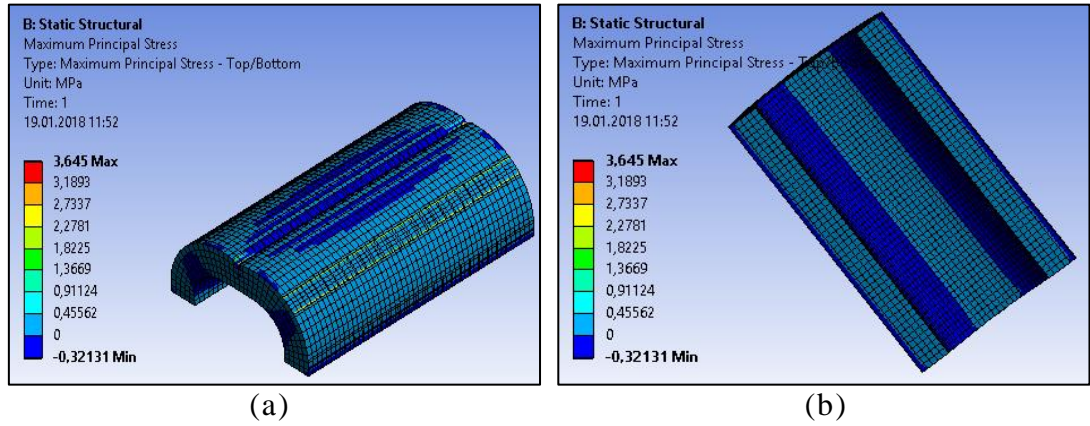
(a)



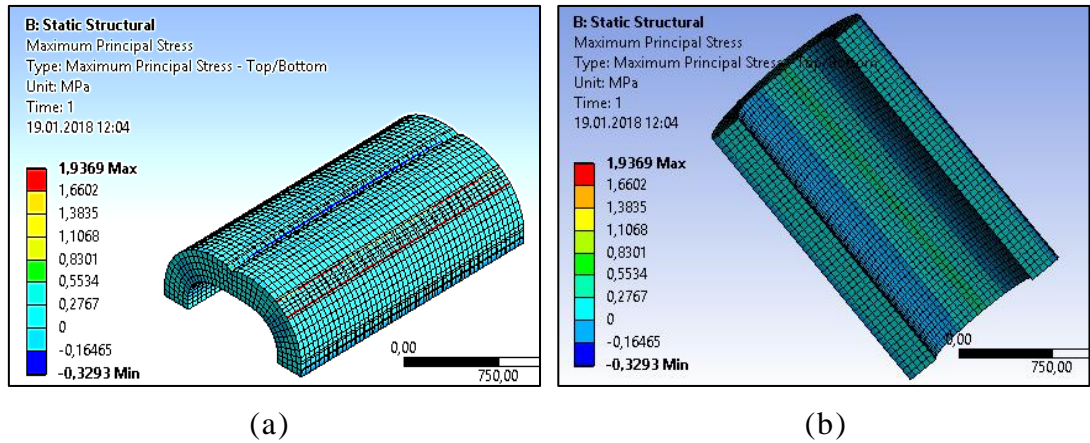
(b)

Şekil 4.22. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

2.tip güçlendirme için analiz sonuçlarına bakıldığında 1.tip güçlendirmedeki gibi BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirme CFRP ile yapılan güçlendirmeye göre deformasyon sınırlamada daha aktiftir. Güçlendirmesiz duruma göre ise BFRP toplam deformasyonu %5 CFRP malzemesi ise %2 kadar sınırlanmış ve 2. Tip güçlendirmenin deformasyon sınırlamada daha etkin olduğu görülmüştür.



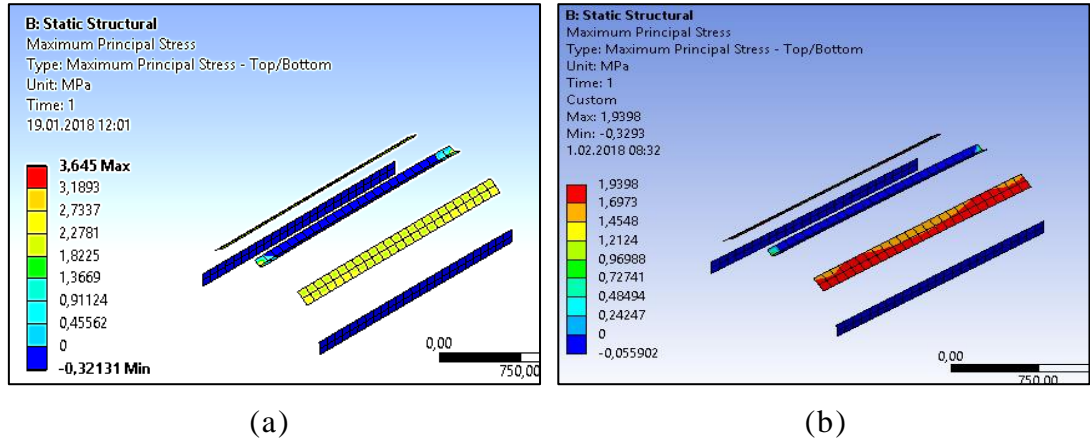
Şekil 4.23. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm



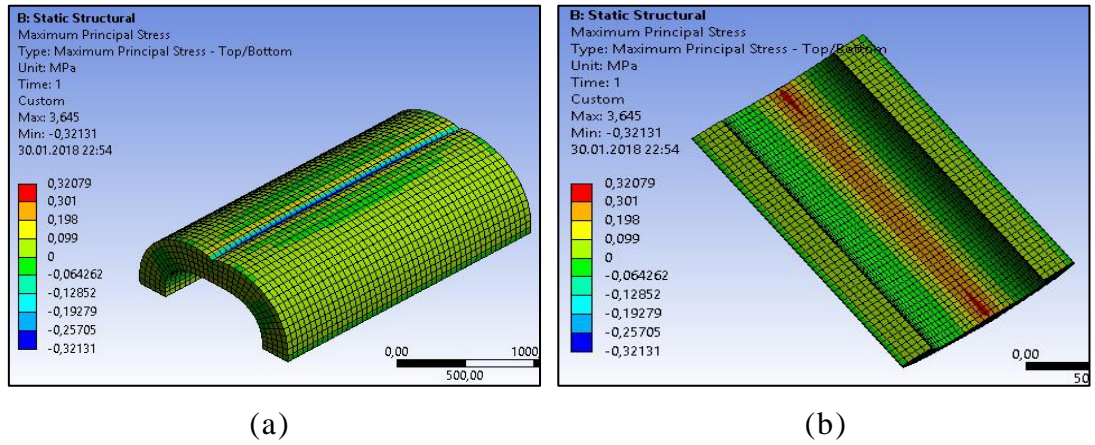
Şekil 4.24. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

1. tip güçlendirmeye göre 2. tip güçlendirmede malzemeler daha az çekme gerilmesine maruz kalmaktadırlar.

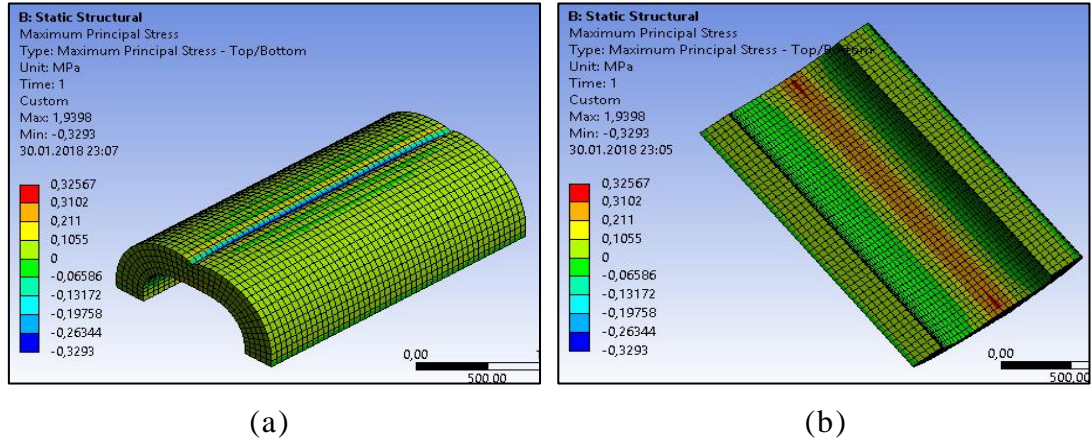
Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.25’de, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.26’da, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.25. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde (a)BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.26. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 4.27. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Tonoz üzerinde kalan çekme gerilmesi değerlerine bakıldığında her iki malzeme de maksimum çekme gerilmesinin meydana geldiği orta alt kısımda güçlendirmesiz duruma göre çekme gerilmelerini sınırlasa da bu güçlendirme tipinde her iki malzeme ile yapılan güçlendirmede de tonozun maruz kaldığı maksimum çekme gerilmesi değeri 1.tip güçlendirme tipine göre artış göstermiştir. Yani üstten yapılan güçlendirmede malzemeler çekme gerilmelerini alttan güçlendirmenin karşıladığı kadar karşılayamamışlardır. BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede orta alt kısımdaki gerilme değeri 0,198-0,301 MPa aralığına çekilmiş olup %11-42 aralığında etkinlik göstermiştir. CFRP malzemesi ile güçlendirilen tonoz üzerinde ise 0,211-0,3102 MPa aralığında tonoz orta alt kısmında gerilme kalmıştır. Yani CFRP malzemesi gerilme değerini %9-38 aralığında sınırlandırmıştır. Modal analiz sonuçlarında ise frekans değerleri aşağıdaki Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP (a) ve CFRP (b) malzemeleriyle yapılmış 2.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)

(b)

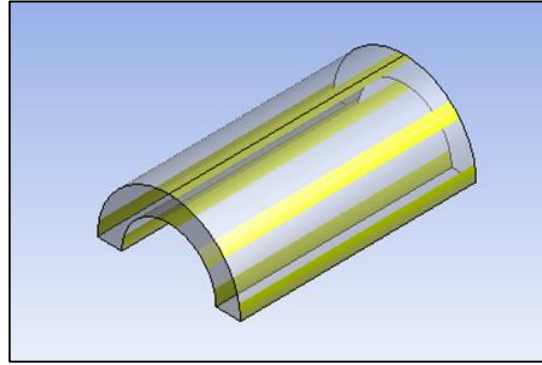
	Mode	Frequency [Hz]		Mode	Frequency [Hz]
1	1,	140,45	1	1,	139,74
2	2,	169,	2	2,	168,35
3	3,	182,13	3	3,	181,73
4	4,	228,77	4	4,	228,27
5	5,	238,71	5	5,	238,03
6	6,	250,9	6	6,	250,45

2.tip güçlendirmede her iki malzemeyle yapılan güçlendirmede de tonozun frekans değerleri artış göstermiş olup BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme, frekans değerini CFRP ye göre daha fazla artırmıştır.

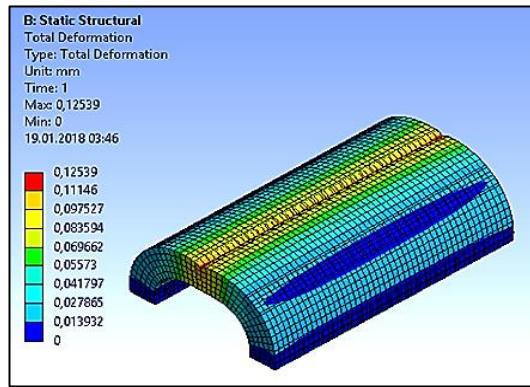
4.2.3. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme - 3.tip

Bu güçlendirme tipinde malzemeler 15cm genişliğindeki şeritlerle 5 parça olarak çekme gerilmelerini karşılayabileceği düşünülen kısımlara tonozun hem alt kısmından hem de üst kısmından 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır. Şeritler eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.28.(a)'da verilmiştir.

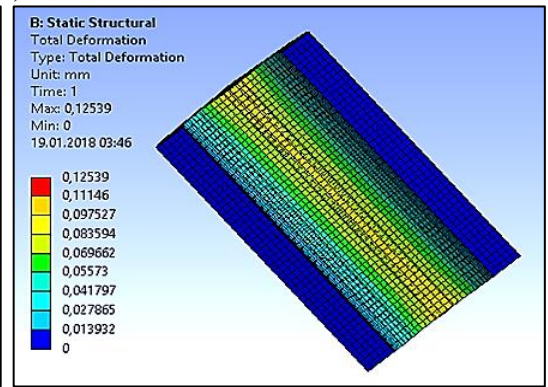
BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.28.(b) ve Şekil 4.28.(c)'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.30'da verilmiştir. CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.29'da gerilme dağılımı ise Şekil 4.31'de verilmiştir.



(a)

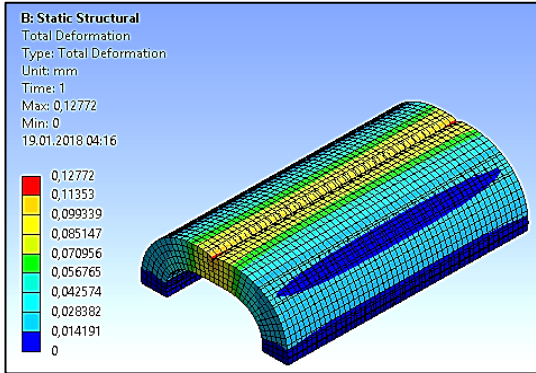


(b)

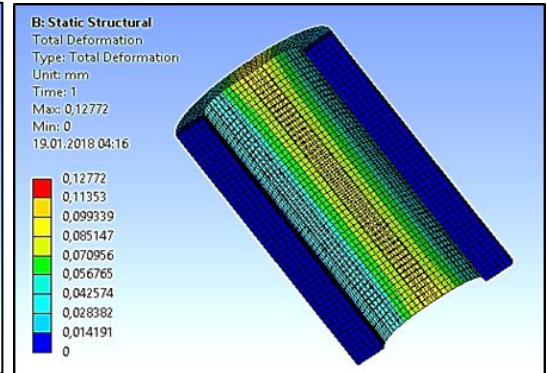


(c)

Şekil 4.28. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)güçlendirme şekli (b) üstten görünüm (c) alttan görünüm



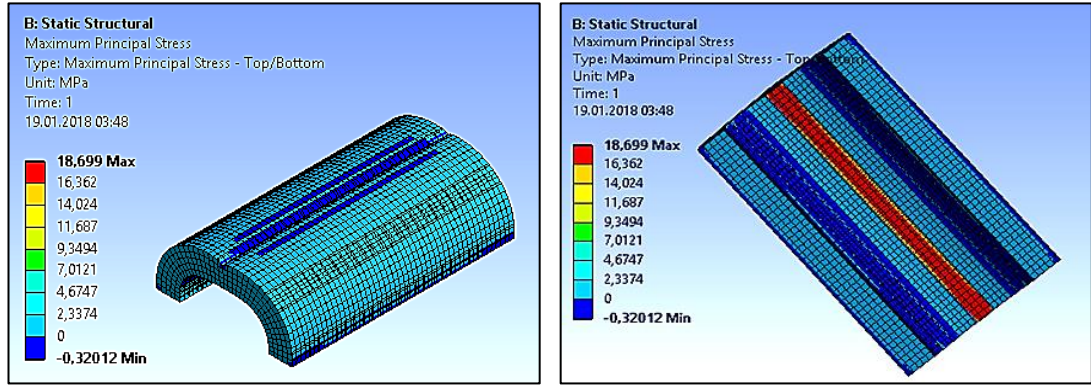
(a)



(b)

Şekil 4.29. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)üstten görünüm (b)alttan görünüm

Bu güçlendirme tipinde BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme deformasyon sınırlamada CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmeye göre daha iyi performans sergilemiştir. BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirme %7 kadar etkinlik gösterirken CFRP malzemesi %5 kadar deformasyon sınırlayabilmiştir.

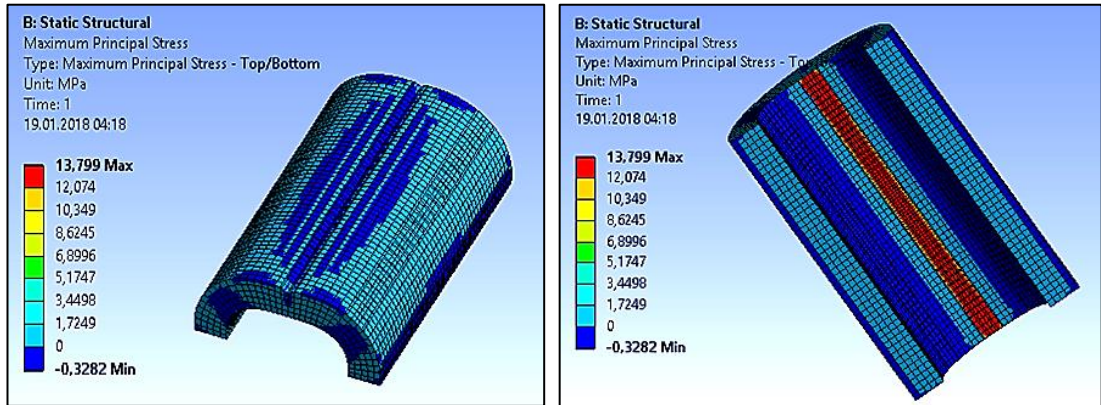


(a)

(b)

Şekil 4.30. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm



(a)

(b)

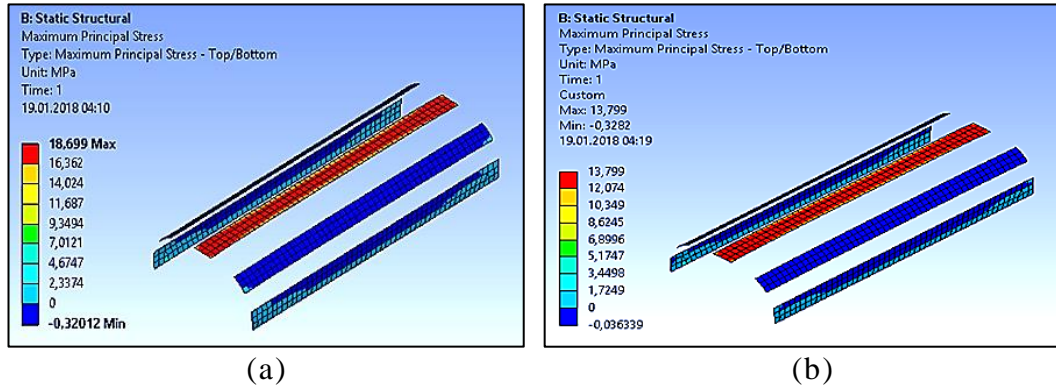
Şekil 4.31. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.34'de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.35'de

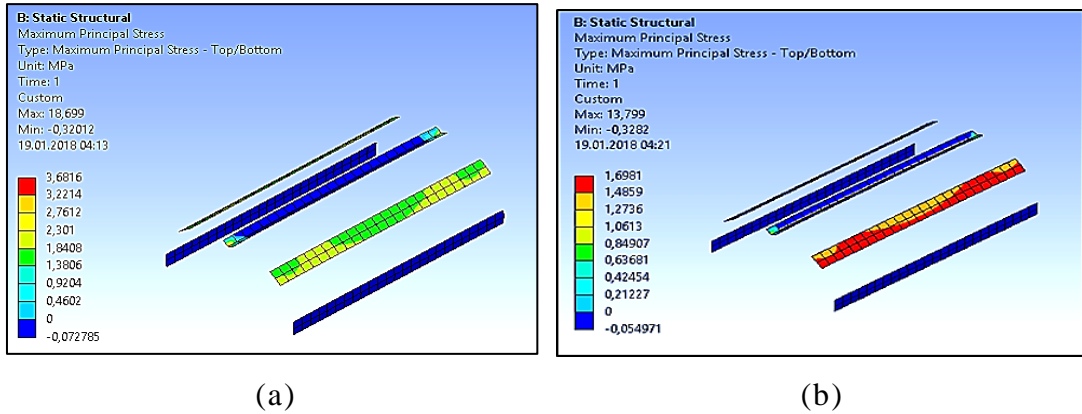
verilmiştir.

Çekme gerilme dağılımları diğer güçlendirme tiplerinde olduğu gibi BFRP malzemesinde daha yüksek değerler göstermektedir. Yani BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede malzeme daha yüksek çekme gerilmesine maruz kalmaktadır



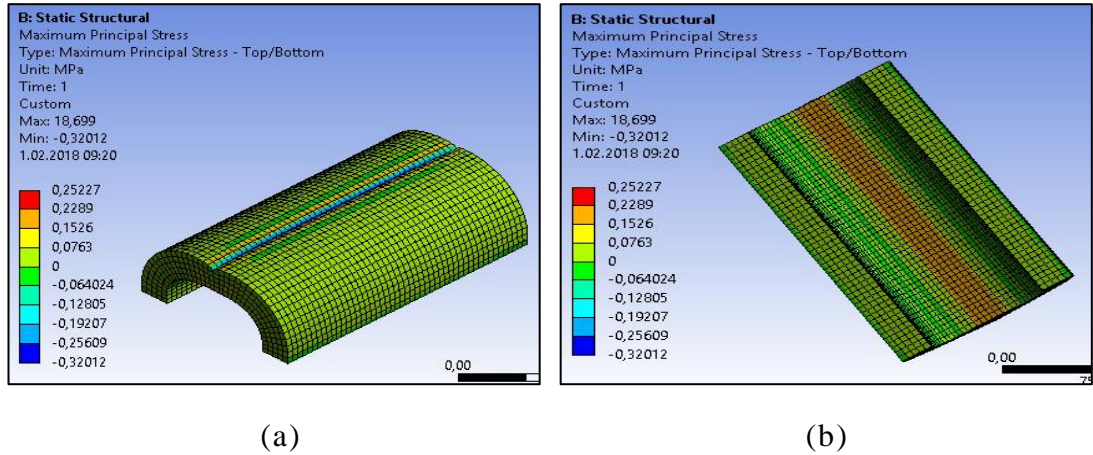
Şekil 4.32. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler

Alt kısımdaki gerilme dağılımı her iki malzeme üzerinde de aynı olup maksimum gerilme değerleri ortadaki malzeme üzerinde oluşmuştur.

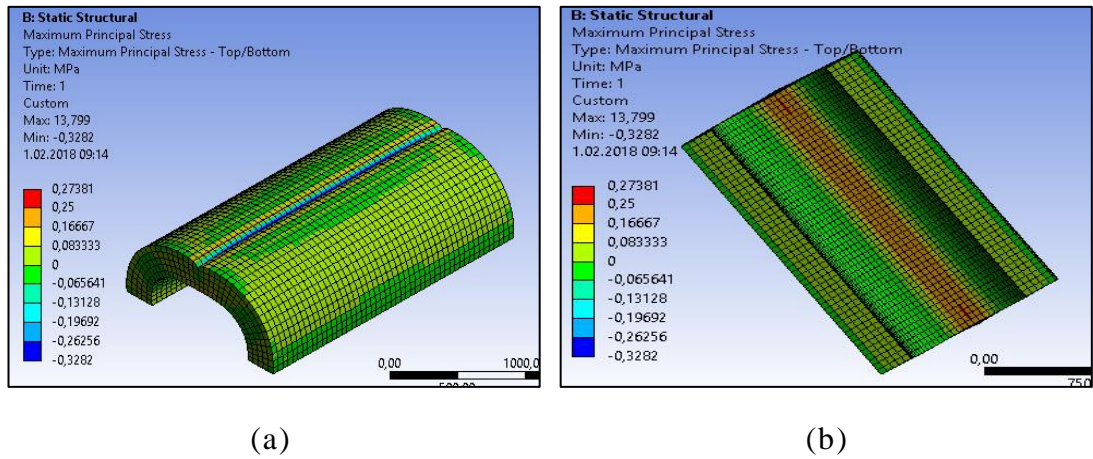


Şekil 4.33. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde a)Üst kısımdaki (a)BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler ((b) Üst kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler

Şekil 4.33’de açıkça görülmektedir ki üst kısımdaki malzemeler tonoz elemanın çekme gerilmesine maruz kaldığı kanat kısımlarındaki gerilmeleri almışlardır. Ve yine çekme gerilmesi değerleri CFRP malzemesinde BFRP malzemesine göre daha düşüktür.



Şekil 4.34. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 4.35. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Tonoz üzerinde kalan çekme gerilmesi değerlerine bakıldığında maksimum çekme gerilmesi değerinin BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede daha fazla sınırlandırıldığı görülmektedir. Tonozda meydana gelen gerilme dağılımına bakacak olursak BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmede BFRP malzemesi gerilmeyi tüm tonozda daha iyi

yaymış olmakla birlikte CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmede gerilme belirli alanlara yayılmış ve tonoz üzerinde BFRP malzemesinin tüm tonozla yaydığı gerilmeden daha büyük değerlerde gerilme bırakmıştır. CFRP malzemesi gerilmeyi 0,167-0,250 MPa aralığına çekip %26-51 aralığında etkinlik göstermiştir. BFRP malzemesi gerilmeyi 0,1526-0,2289 MPa aralığına çekip %33-55 aralığında etkinlik göstermiştir.

Modal analiz sonuçlarından frekans değerleri aşağıdaki Çizelge 4.8.de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Alttan ve üstten boyuna güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 3.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)			(b)		
	Mode	Frequency [Hz]		Mode	Frequency [Hz]
1	1,	144,2	1	1,	142,5
2	2,	172,81	2	2,	171,11
3	3,	184,32	3	3,	183,23
4	4,	231,99	4	4,	230,67
5	5,	242,9	5	5,	241,01
6	6,	254,44	6	6,	252,98

Frekans değerleri diğer güçlendirme tiplerinde olduğu gibi güçlendirmesiz duruma göre artmıştır. Yine diğer güçlendirme tiplerinde görüldüğü gibi BFRP malzeme ile güçlendirilmiş tonozun frekans değerleri CFRP malzemeye göre daha yüksektir. Üstteki güçlendirmelere göre frekans değerlerinin en yüksek değerleri aldığı güçlendirme tipidir.

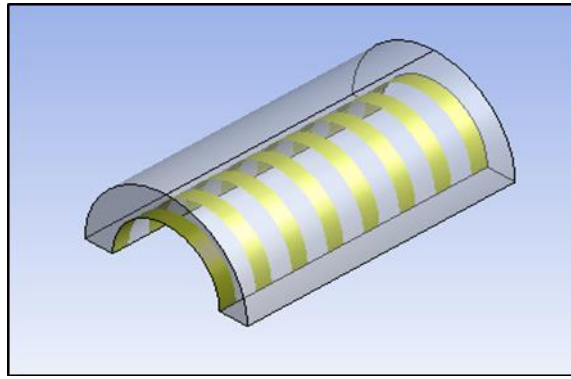
4.2.4. Altan eğrisel güçlendirme - 4.tip

Bu güçlendirme tipinde malzemeler yine 15 cm genişliğinde kullanılmıştır. Fakat eğrisel olarak kullanılırken parça sayısı daha önceki alttan boyuna güçlendirmede kullanılan kompozitin toplam yüzey alanına eşit olacak şekilde hesap edilmiş ve 8 parça kompozit yaklaşık 18,5 cm eşit aralıklarla tonozun alt kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır.

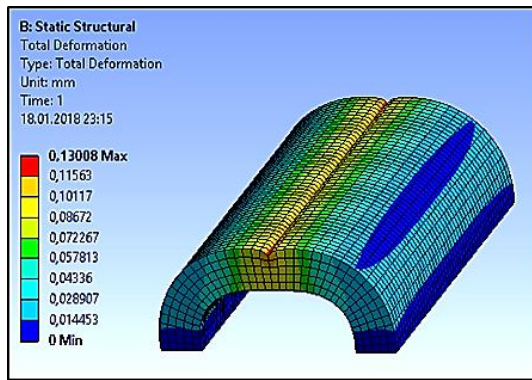
Şeritler eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.36.(a) da verilmiştir.

BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.36.(b) ve Şekil 4.36.(c)'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.38. de verilmiştir.

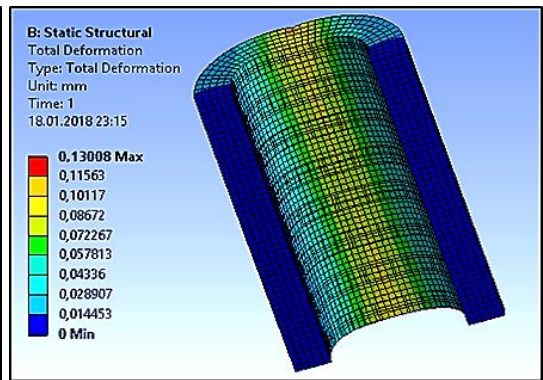
CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.37'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.39'da verilmiştir.



(a)

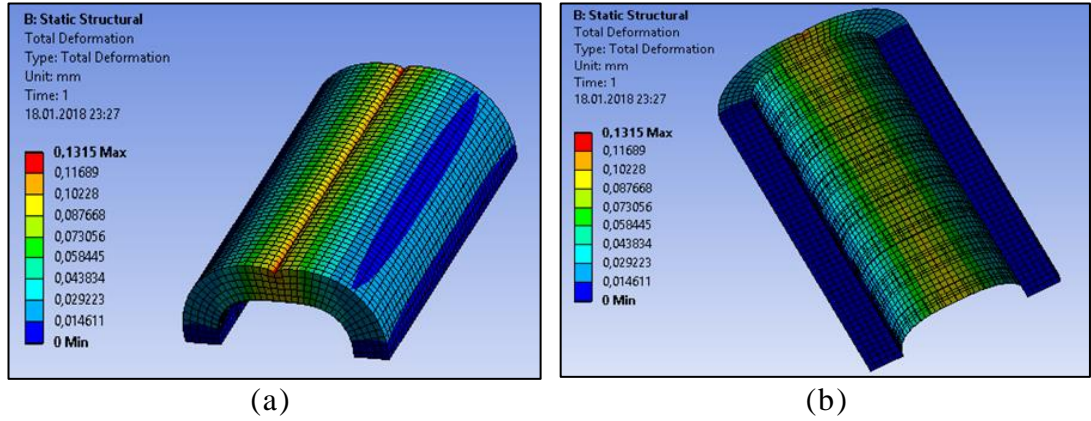


(b)



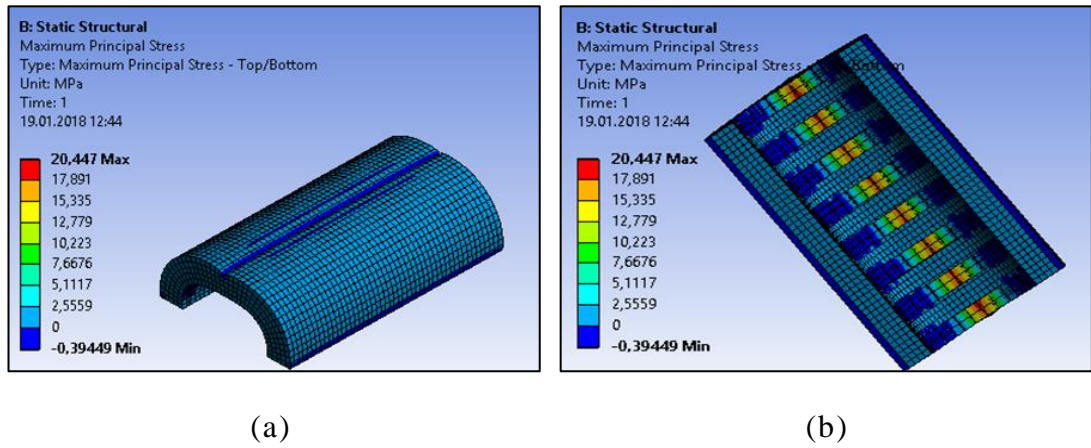
(c)

Şekil 4.36. Alttan eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)güçlendirme şekli (b)analiz sonucu üstten görünüm (c)analiz sonucu alttan görünüm

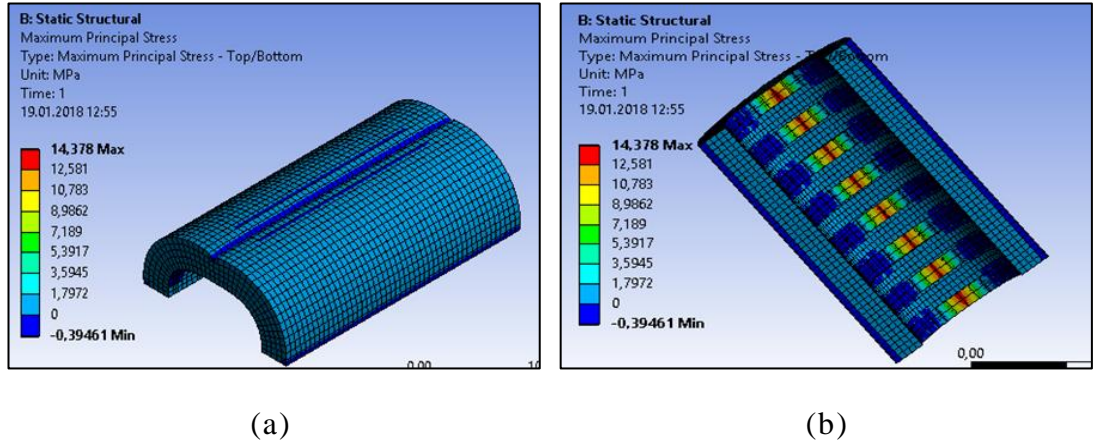


Şekil 4.37. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) analiz sonucu üstten görünüm (b) analiz sonucu alttan görünüm

Toplam deformasyon sonuçlarına bakıldığında bu güçlendime tipinde diğerlerine göre net bir şekilde gelişim görülmektedir. Diğer güçlendirme tiplerinde olduğu gibi BFRP ile güçlendirilen tonozun deformasyonu daha iyi sınırlandırılmış olmakla birlikte birbirlerine yakın değerlerde fayda sağlamışlardır. BFRP malzeme %10 fayda sağlarken CFRP malzeme de %9 kadar fayda sağlamaktadır.

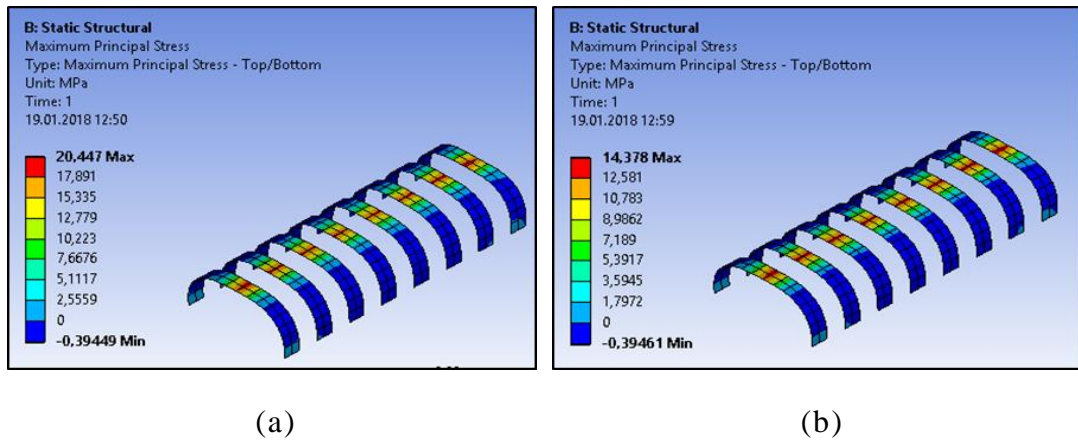


Şekil 4.38. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

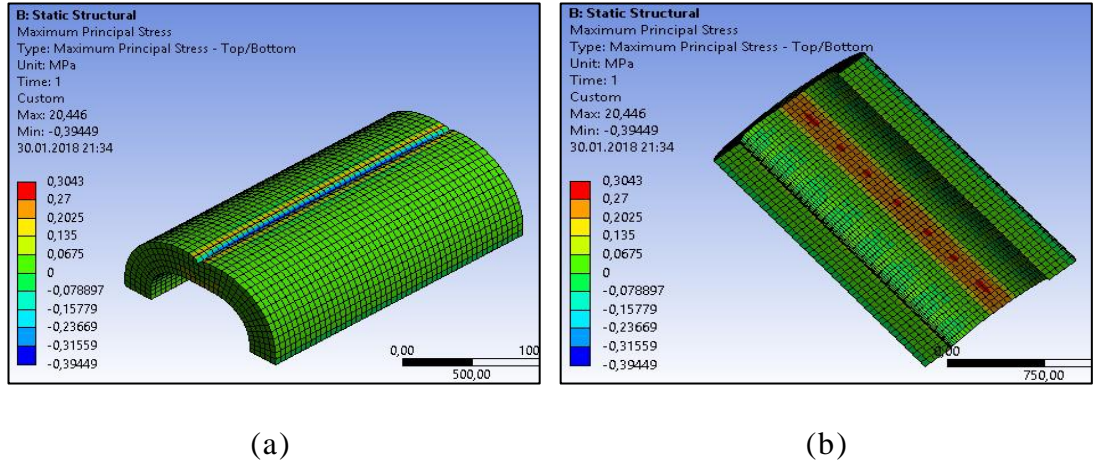


Şekil 4.39. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

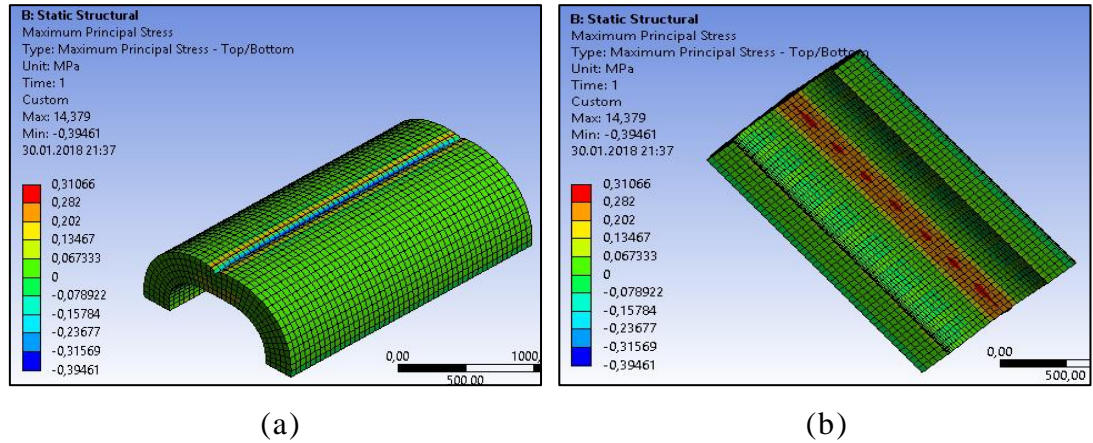
Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.40.'da, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.41'de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.42'de verilmiştir.



Şekil 4.40. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde (a) BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b) CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.41. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 4.42. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Bu güçlendirme tipi için her iki malzemedeki gerilme dağılımları aynı olmakla birlikte maksimum gerilme değeri birbirine yakındır. BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede orta alt kısımdaki hakim gerilme turuncu renk olup CFRP ye göre daha düşük bir değer almıştır. Maksimum gerilme sınırlamada BFRP %21 CFRP %17 civarında etkinlik göstermiştir. Modal analizden elde edilen frekans değerleri Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. Alttan eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 4.tip güçlendirmenin frekans değerleri

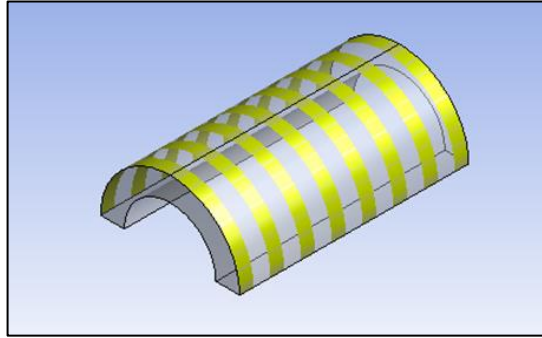
(a)			(b)		
	Mode	✓ Frequency [Hz]		Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	141,1	1	1,	140,1
2	2,	170,43	2	2,	169,3
3	3,	183,24	3	3,	182,44
4	4,	231,44	4	4,	230,04
5	5,	240,66	5	5,	239,36
6	6,	253,82	6	6,	252,39

Frekans değerleri diğer güçlendirme tiplerinde olduğu gibi artmış olup BFRP ile yapılan güçlendirmenin frekans değerleri CFRP ile olana göre daha yüksektir. Diğer güçlendirme tiplerinden en yüksek frekans değerlerinden birisi bu tipte elde edilmiştir.

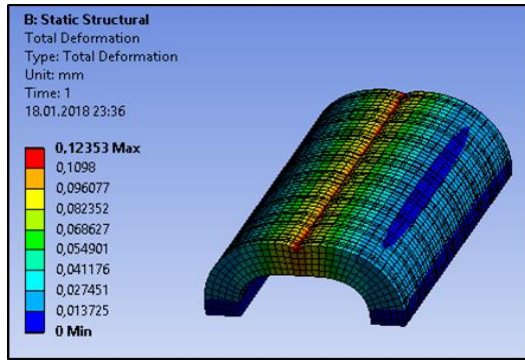
4.2.5. Üstten eğrisel güçlendirme - 5.tip

Bu güçlendirme tipinde malzemeler yine 15 cm genişliğinde kullanılmıştır. Fakat eğrisel olarak kullanılırken parça sayısı daha önceki güçlendirmelerde kullanılan kompozitin toplam yüzey alanına eşit olacak şekilde hesap edilmiş ve 8 parça kompozit yaklaşık 18,5 cm eşit aralıklarla tonozun üst kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır.

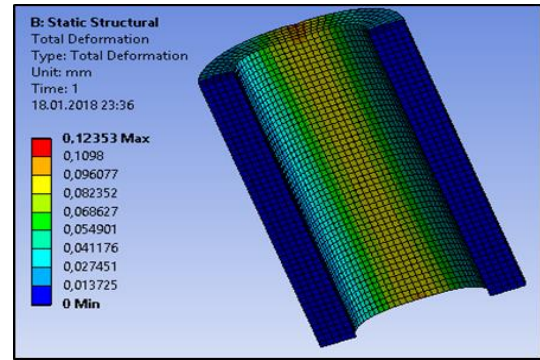
Şeritler eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.43.(a) da verilmiştir. BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.43.(b) ve Şekil 4.43.(c) de gerilme dağılımı ise Şekil 4.45’de verilmiştir. CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.44’de gerilme dağılımı ise Şekil 4.46’da verilmiştir.



(a)

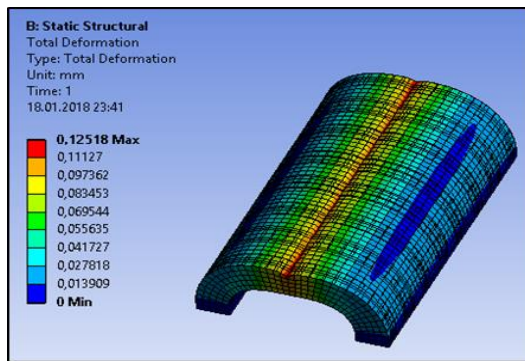


(b)

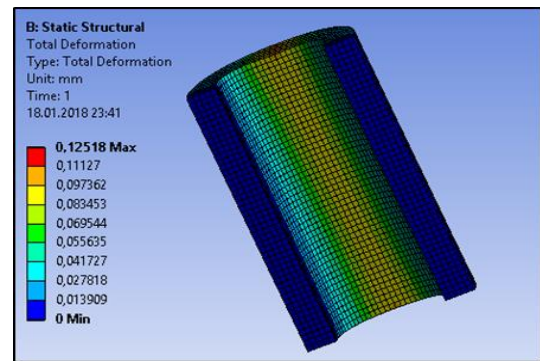


(c)

Şekil 4.43. Üstten eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)güçlendirme şekli (b)analiz sonucu üstten görünüm (c)analiz sonucu alttan görünüm



(a)

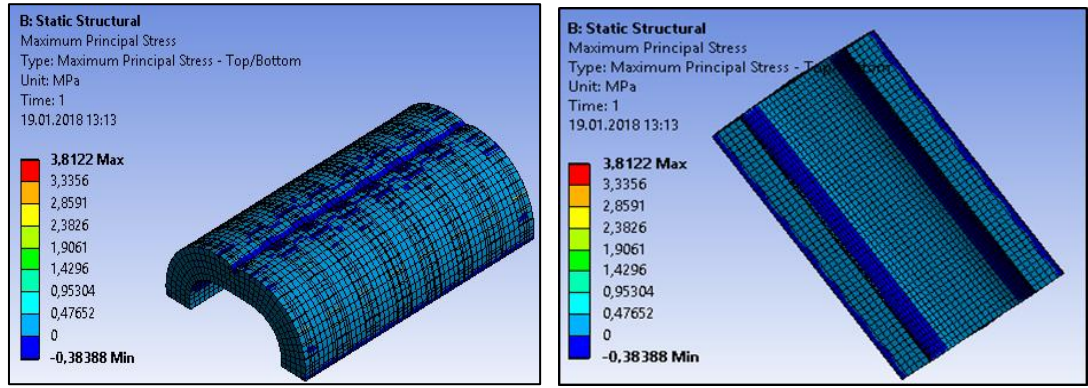


(b)

Şekil 4.44. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) analiz sonucu üstten görünüm (b) analiz sonucu alttan görünüm

Bu güçlendirme tipinde BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme deformasyon

sınırlamada CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmeye göre daha iyi performans sergilemiştir. BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede deformasyon %9 kadar sınırlanırken CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede bu oran %7 olmaktadır.

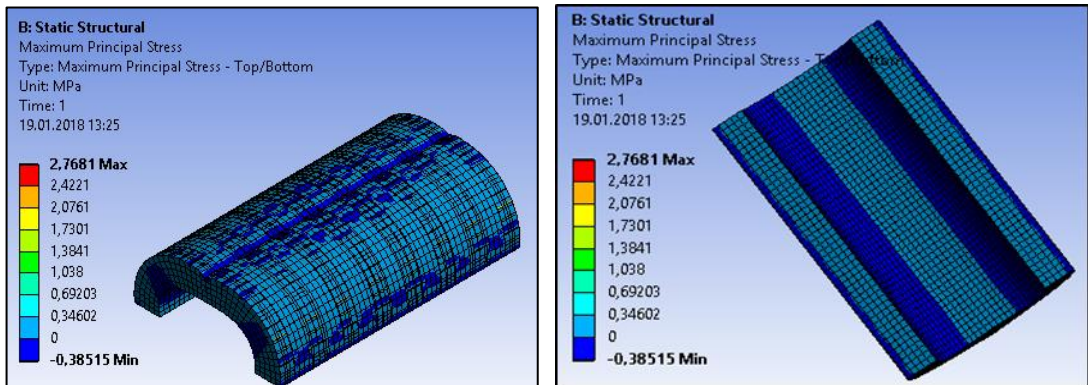


(a)

(b)

Şekil 4.45. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm



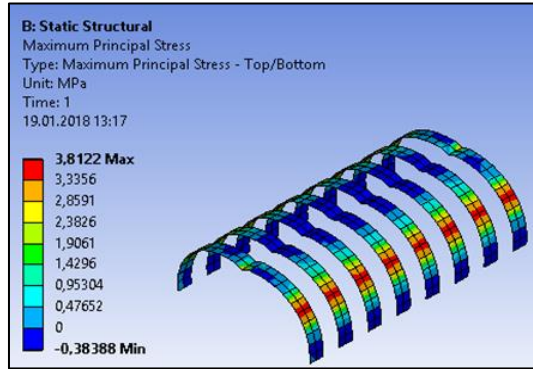
(a)

(b)

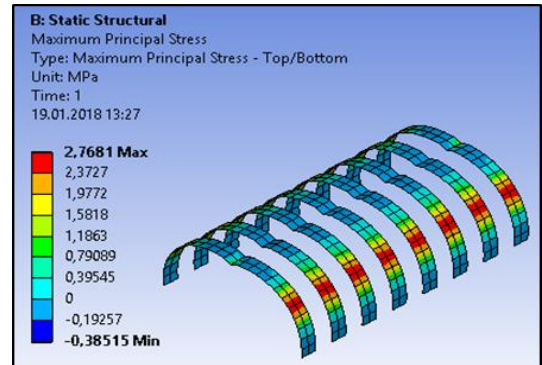
Şekil 4.46. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.47’de, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.48’de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.49’da verilmiştir.

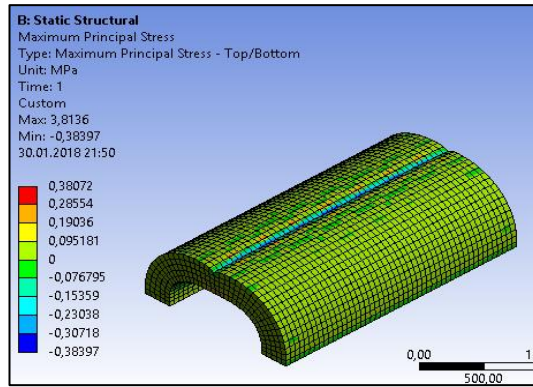


(a)

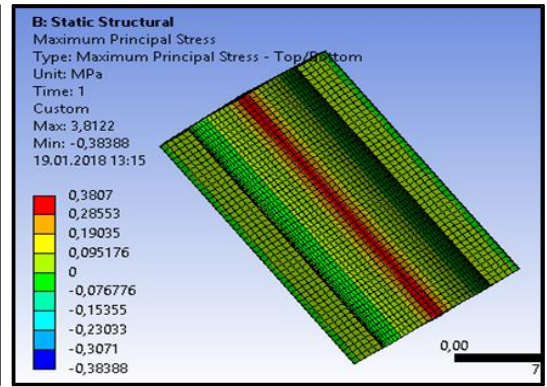


(b)

Şekil 4.47. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde (a) BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b) CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler

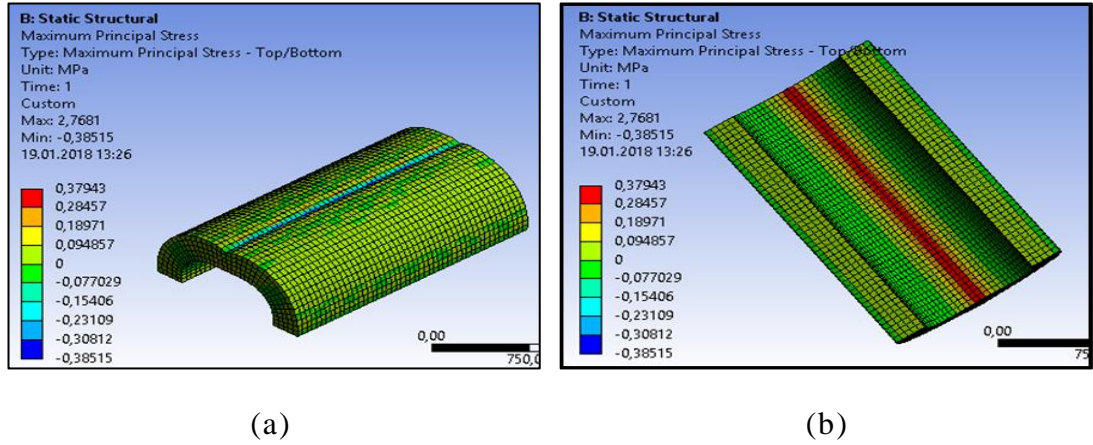


(a)



(b)

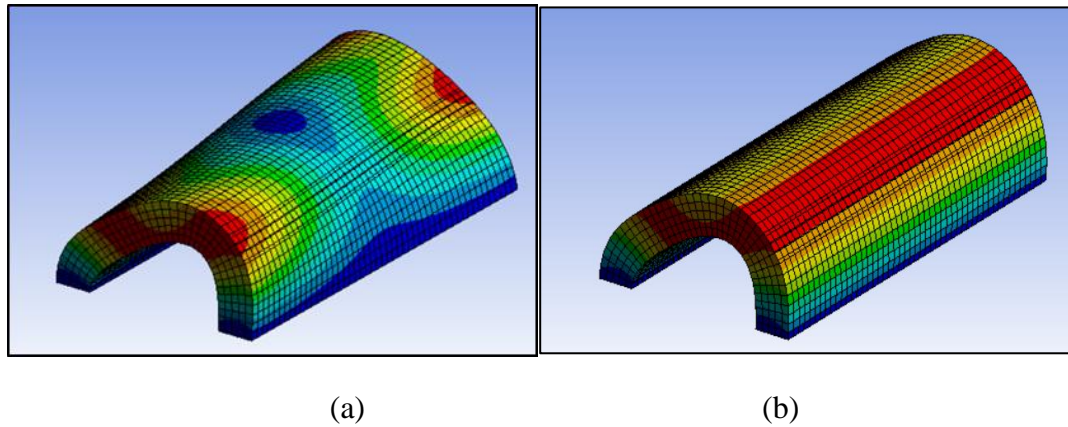
Şekil 4.48. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



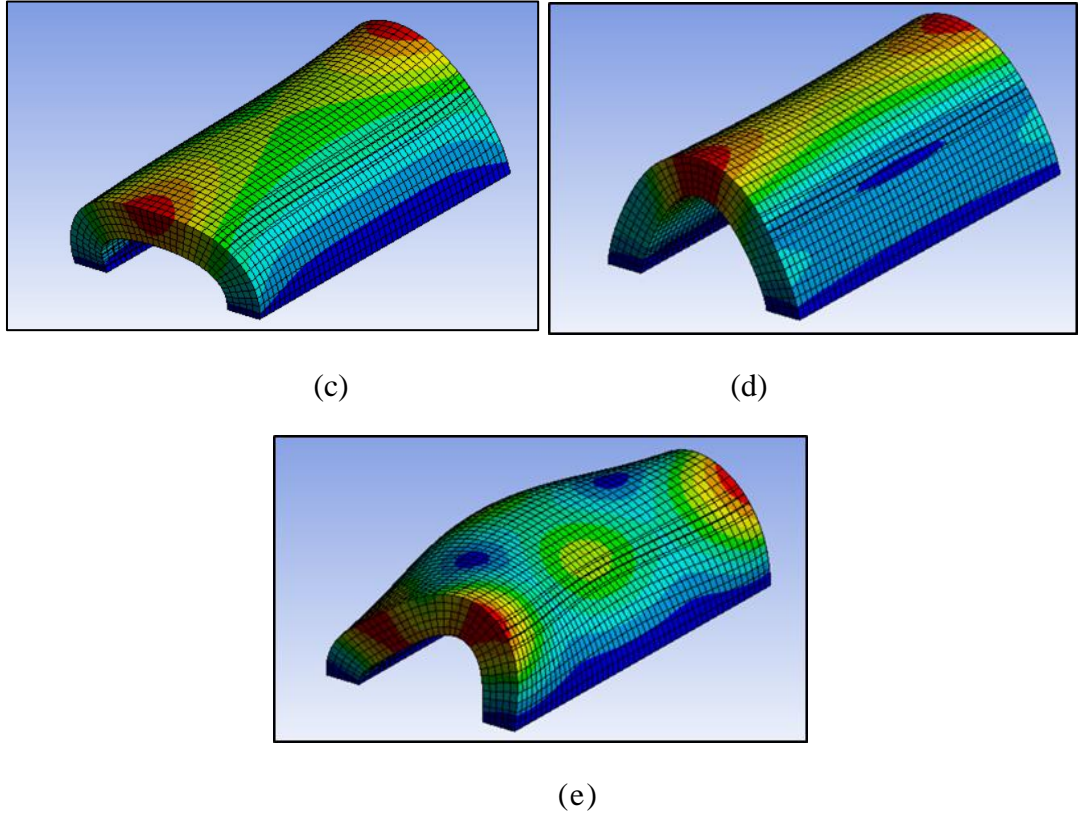
Şekil 4.49. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Bu güçlendirme tipinde her iki malzemede tonoz üzerindeki gerilmeyi benzer şekilde dağıtmıştır. Maksimum çekme gerilmesinin oluştuğu hat daralmakla birlikte çekme gerilmesi değerleri artış göstermiş olup bu anlamda faydalı bir güçlendirme olamamıştır.

Modal analiz sonuçları Şekil 4.50’de verilmiştir.



Şekil 4.50. (devam)



Şekil 4.50. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde İlk 5 moda ait mod şekilleri
(a) 1.mod (b) 2.mod (c) 3.mod (d) 4.mod (e) 5.mod

Mod şekillerine bakıldığında mod şekillerinin değişmediği görülmektedir. Daha önce 1.tip mod şekilleri üzerinden güçlendirme şeklinin aynı olması durumunda farklı malzemeler ile güçlendirilsede mod şekillerinin değişmediği görülmüştü. Burada ise aynı malzemenin farklı güçlendirme şeklinde dahi olsa mod şeklinin değişmediği kısaca mod şeklinin güçlendirme malzemesi ve şeklinden etkilenmediği sonucu çıkarılmıştır.

Frekans değerleri ise aşağıdaki Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. Üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) VE CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 5.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)

(b)

	Mode	✓ Frequency [Hz]		Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	140,11	1	1,	139,44
2	2,	169,34	2	2,	168,55
3	3,	182,35	3	3,	181,85
4	4,	229,41	4	4,	228,65
5	5,	239,83	5	5,	238,85
6	6,	251,73	6	6,	251,

Frekans değerleri tüm modlar için her iki malzemeyle güçlendirme durumunda da diğer güçlendirme tiplerinde de olduğu gibi artmış olup BFRP malzemesiyle güçlendirilmiş tonozdaki frekans değerleri CFRP ye göre bir miktar daha fazladır.

4.2.6. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme - 6.tip

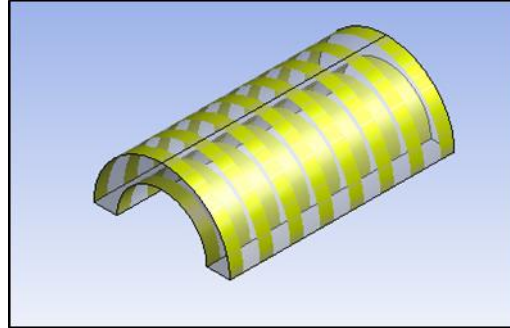
Bu güçlendirme tipinde malzemeler yine 15 cm genişliğinde kullanılmıştır. Fakat eğrisel olarak kullanılırken parça sayısı daha önceki güçlendirmelerde kullanılan kompozitin toplam yüzey alanına eşit olacak şekilde hesap edilmiş ve 8 parça kompozit yaklaşık 18,5 cm eşit aralıklarla tonozun üst kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır.

Şeritler eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.51.(a) da verilmiştir.

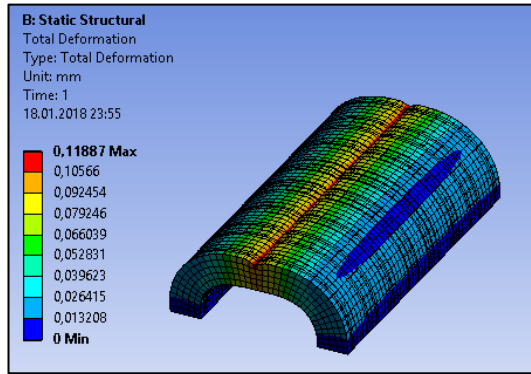
BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.51.(b) ve Şekil 4.51.(c) de gerilme dağılımı ise Şekil 4.53’de verilmiştir.

CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.52’de gerilme dağılımı ise Şekil 4.54’de

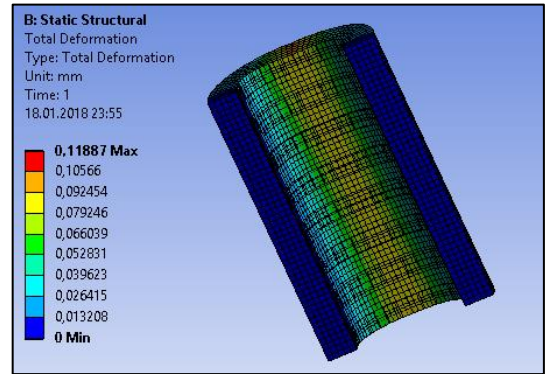
verilmiştir.



(a)

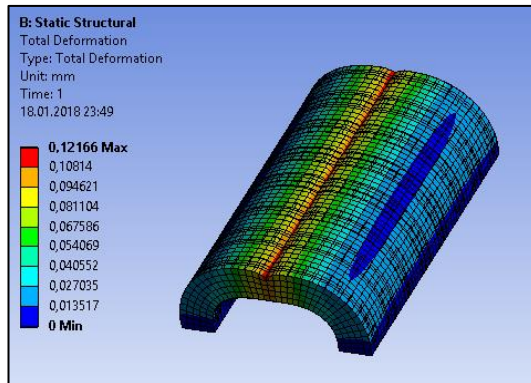


(b)

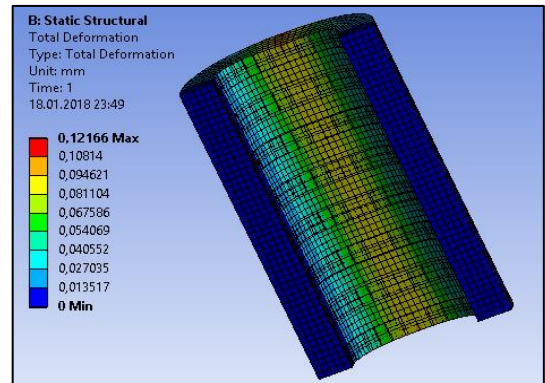


(c)

Şekil 4.51. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)güçlendirme şekli (b)analiz sonucu üstten görünüm (c)analiz sonucu alttan görünüm



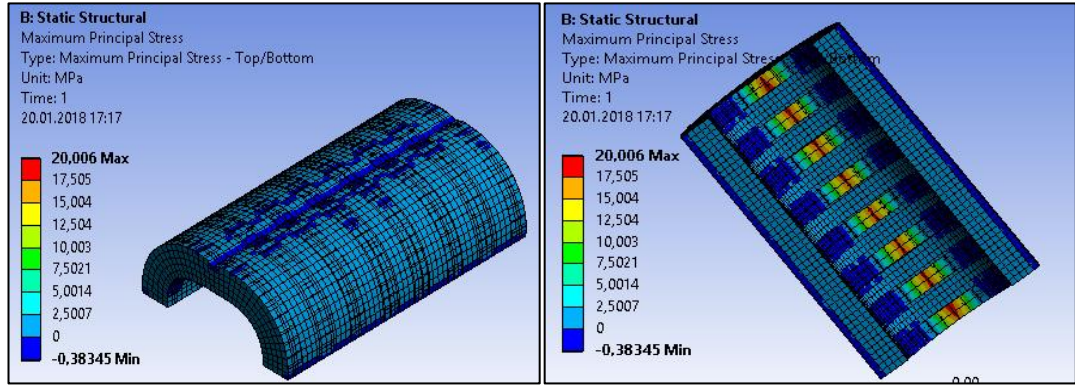
(a)



(b)

Şekil 4.52. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) analiz sonucu üstten görünüm (b) analiz sonucu alttan görünüm

Bu güçlendirme tipinde BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme deformasyon sınırlamada CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmeye göre daha iyi performans sergilemiştir. BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede deformasyon %12 kadar sınırlanırken CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmede bu oran %10 olmaktadır.

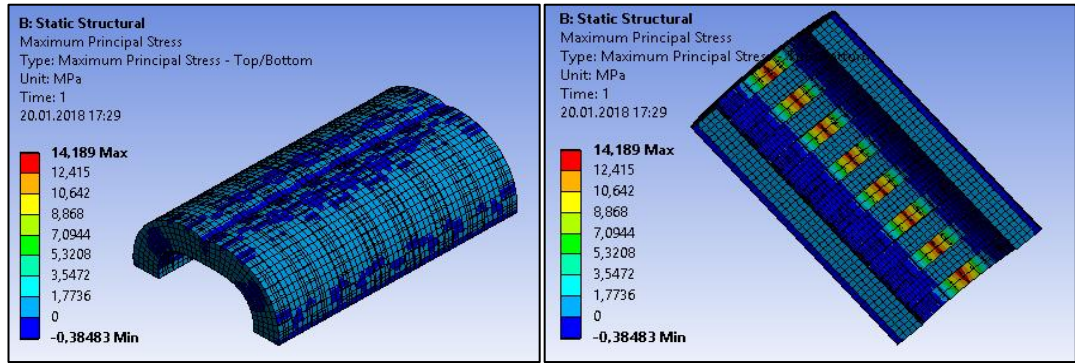


(a)

(b)

Şekil 4.53. Altan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm



(a)

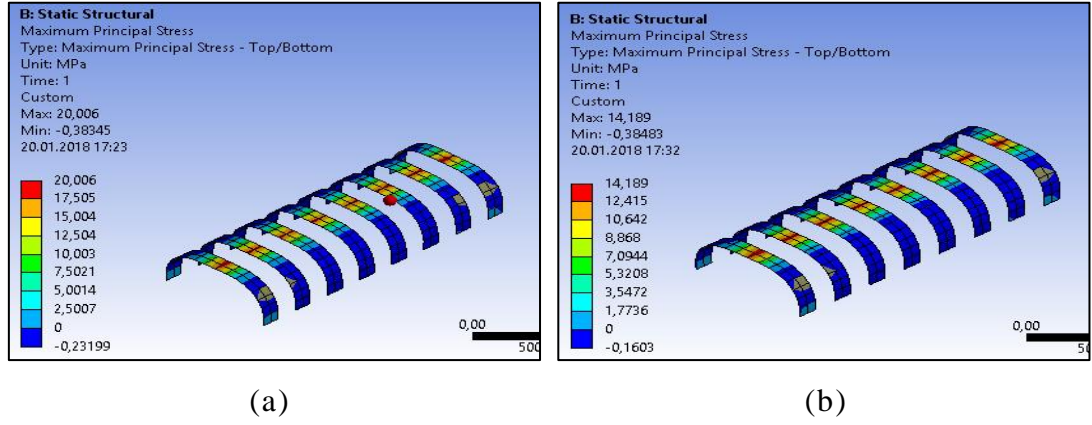
(b)

Şekil 4.54. Altan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

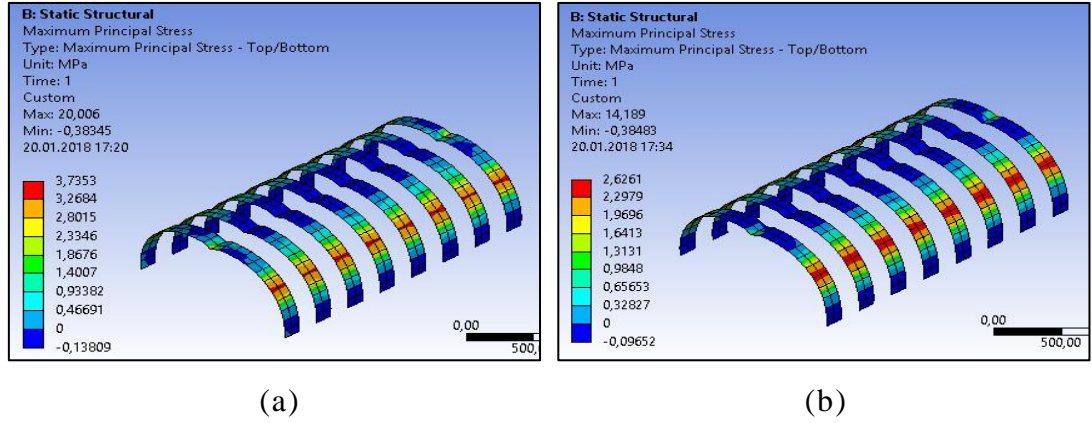
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.57'de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.58'de

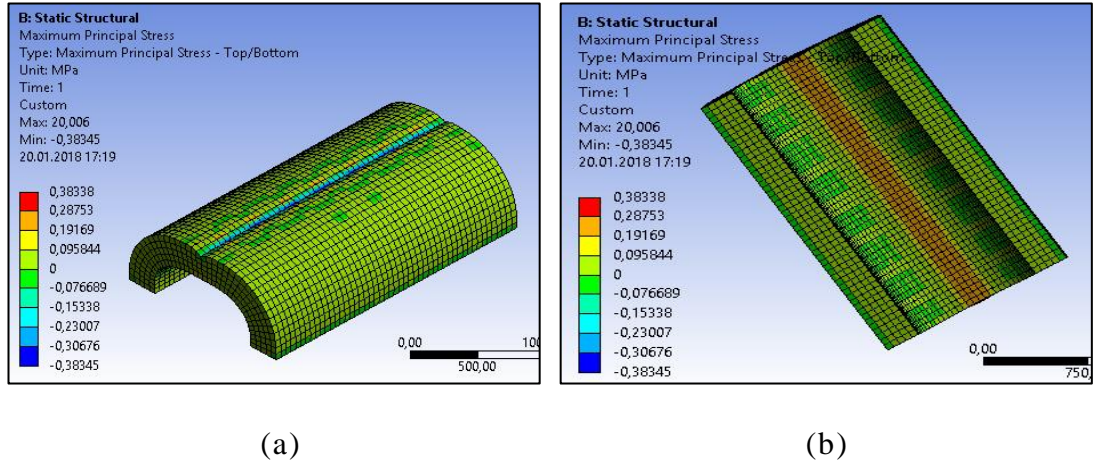
verilmiştir.



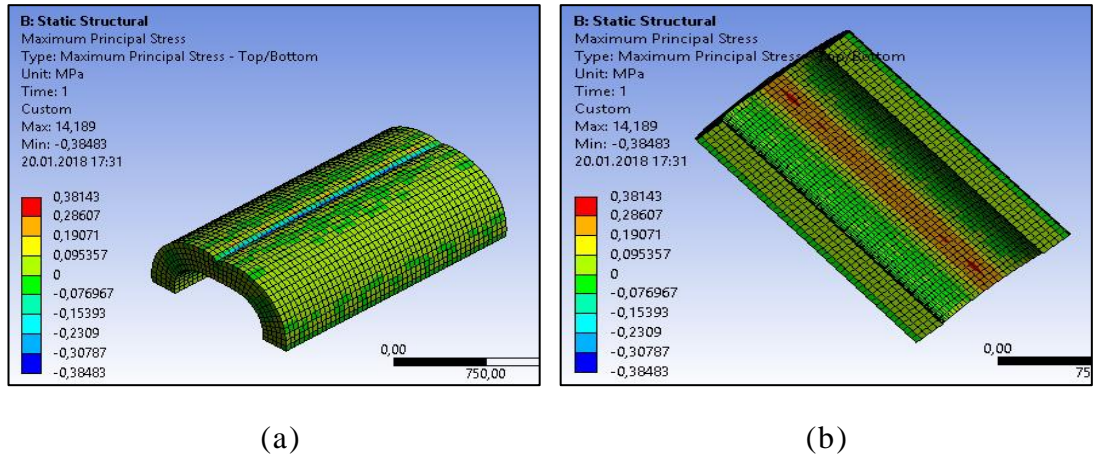
Şekil 4.55. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.56. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.57. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 4.58. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Bu güçlendirme tipinde her iki malzemede tonozun üzerindeki gerilmeyi benzer şekilde dağıtmış olup orta kısımda meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değeri her iki malzemede de ciddi bir şekilde sınırlandırılmıştır. BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmede güçlendirilmemiş tonozda meydana gelen 0,3396 MPa değerindeki maksimum çekme gerilmesi değeri 0,1917-0,2875 MPa değerlerine çekilmiştir. CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmede bu değer 0,1907-0,2861 MPa değerlerine çekilmiştir. Her iki malzemede %16-44 arasında bir etkinlik göstermiştir. Modal analiz sonuçlarından frekans değerleri aşağıdaki Çizelge 4.11’de sunulmuştur.

Çizelge 4.11. Alttan ve üstten eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 6.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)			(b)		
	Mode	Frequency [Hz]		Mode	Frequency [Hz]
1	1,	143,59	1	1,	141,93
2	2,	173,16	2	2,	171,26
3	3,	184,82	3	3,	183,53
4	4,	234,11	4	4,	231,98
5	5,	244,09	5	5,	241,83
6	6,	256,35	6	6,	254,22

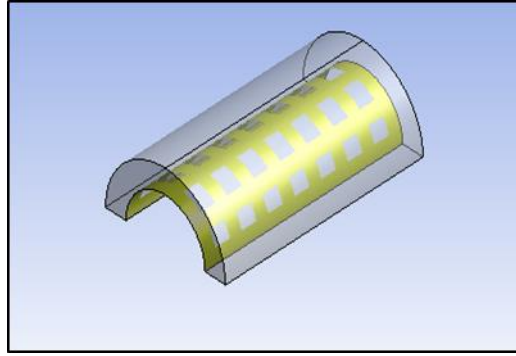
4.2.7. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme - 7.tip

Bu güçlendirme tipinde malzemeler yine 15 cm genişliğinde kullanılmıştır. Diğer güçlendirmelerde olduğu gibi boyuna güçlendirmelerde aralarında yaklaşık 20 cm boşluk olacak şekilde 5 parça, eğrisel olarak kullanılırken parça sayısı daha önceki güçlendirmelerde kullanılan kompozitin toplam yüzey alanına eşit olacak şekilde hesap edilmiş ve 8 parça kompozit yaklaşık 18,5 cm eşit aralıklarla tonozun alt kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır.

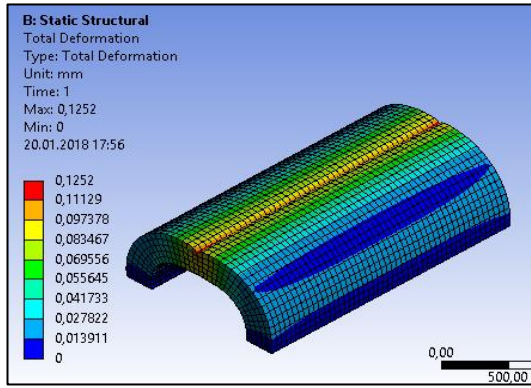
Şeritler eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.59.(a)'da verilmiştir.

BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.59.(b) ve Şekil 4.59.(c)'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.61'de verilmiştir.

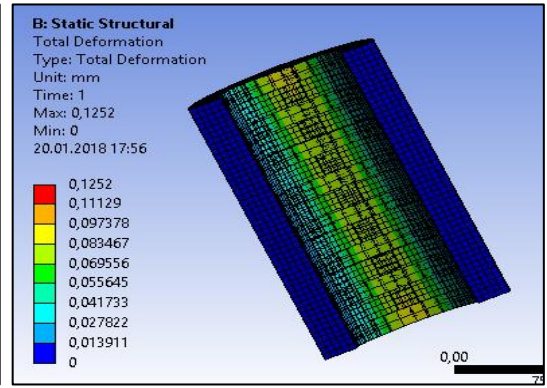
CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.60'da gerilme dağılımı ise Şekil 4.62'de verilmiştir.



(a)



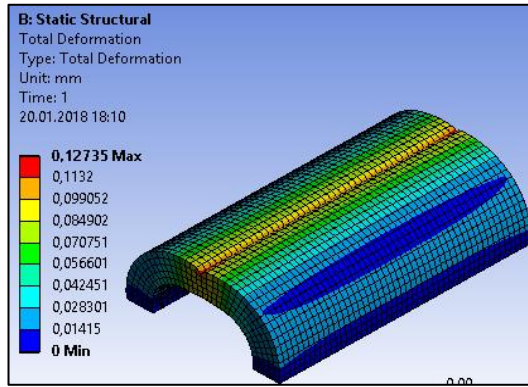
(b)



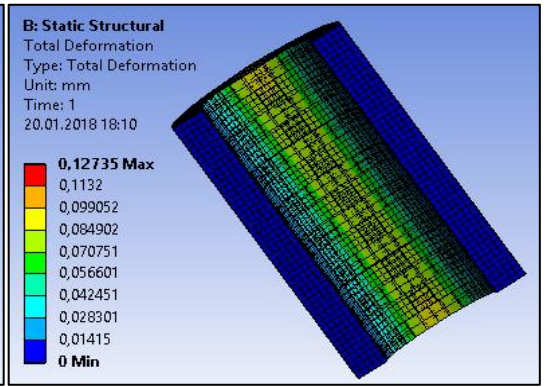
(c)

Şekil 4.59. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları

(a)güçlendirme şekli (b)analiz sonucu üstten görünüm (c)analiz sonucu alttan görünümü



(a)

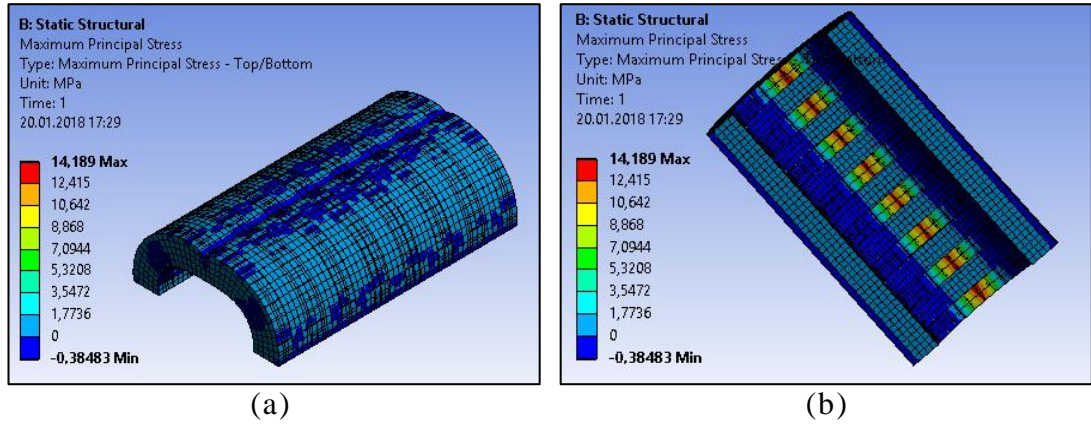


(b)

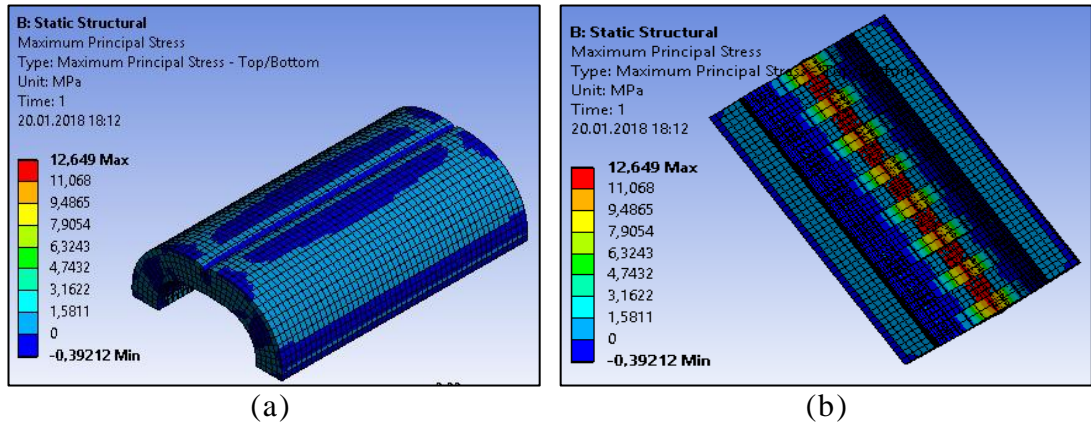
Şekil 4.60. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları

(a) analiz sonucu üstten görünüm (b) analiz sonucu alttan görünüm

Bu güçlendirme tipinde birbirine yakın olmakla birlikte BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme deformasyon sınırlamada CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmeye göre daha iyi performans sergilemiştir.

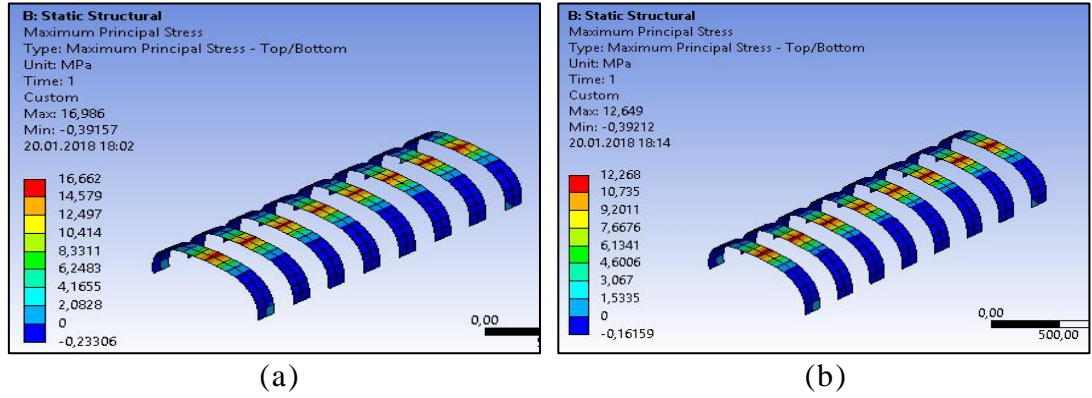


Şekil 4.61. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

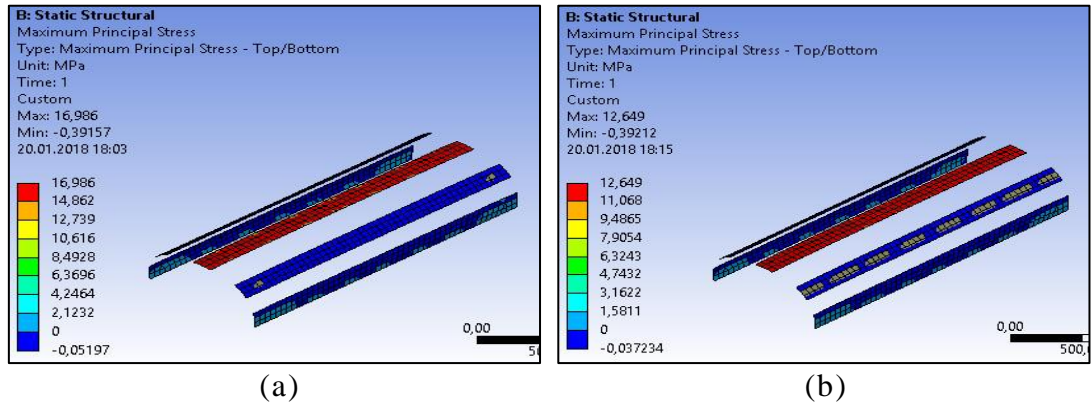


Şekil 4.62. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

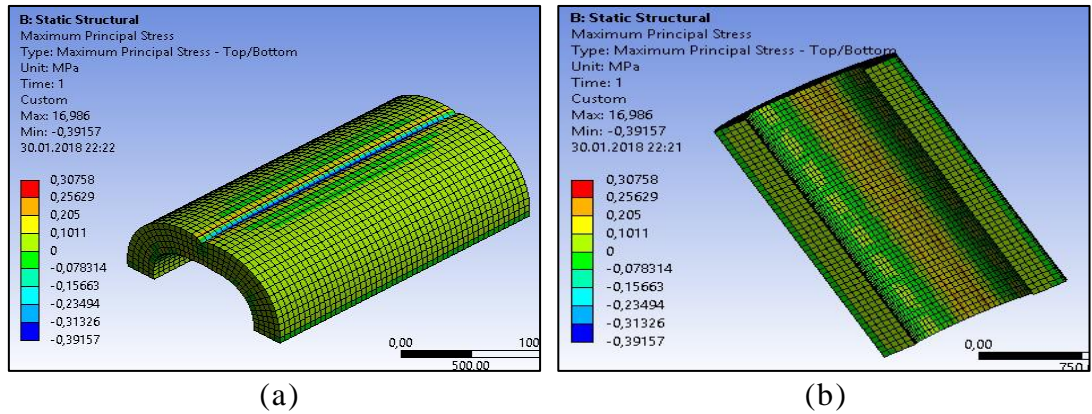
Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’de, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.65’de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.66’da verilmiştir.



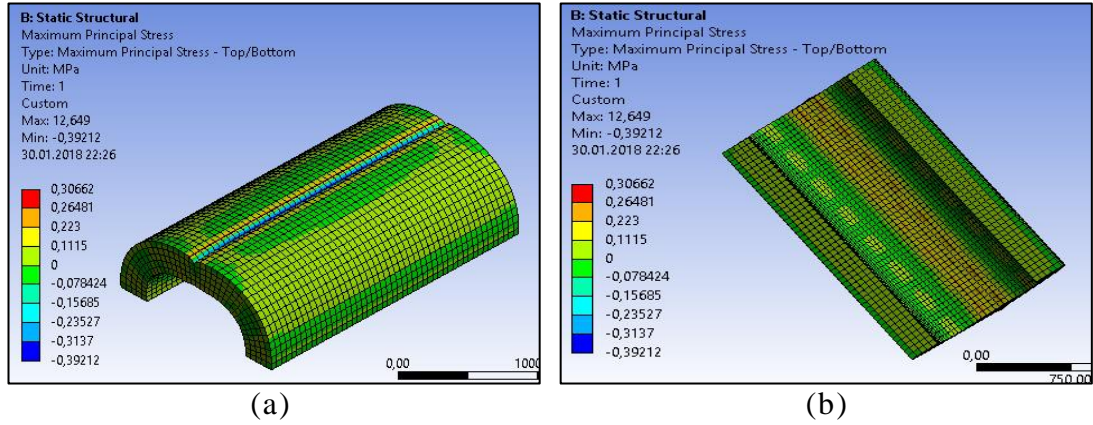
Şekil 4.63. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.64. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki boyuna BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki boyuna CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.65. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 4.66. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Bu güçlendirme tipinde tonoz üzerinde kalan gerilme dağılımları birbirine benzerlik göstermekle birlikte maksimum çekme gerilmesinin meydana geldiği alt orta hattaki kırmızı renkte gösterilmiş olan gerilme yer yer kırmızı dağılım gösterebilmekle birlikte turuncu dağılıma dönüşmüştür. BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmede buradaki hakim çekme gerilmesi değeri 0,1011-0,205 MPa aralığına çekilmiş olup CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmede ise bu değer 0,1115-0,223 MPa aralığına çekilmiştir. BFRP malzemesi %40-70 aralığında bir etkinlik göstermekte iken CFRP malzemesi %33-67 aralığında etkinlik göstermektedir. Öte yandan BFRP malzemesi ile CFRP malzemesi eşdeğer bir katkı sağlamış gözükse de gerilme dağılımına bakıldığında BFRP malzemesiyle güçlendirilmiş tonozun maksimum gerilmesinin meydana geldiği hattaki gerilme renklerindeki kırmızı dağılımın CFRP ile güçlendirilmiş tonozun maksimum gerilmesinin meydana geldiği hattaki gerilme renklerindeki kırmızı dağılımdan daha az olduğu görülmektedir.

Modal analiz sonuçlarından frekans değerleri aşağıdaki Çizelge 4.12’de sunulmuştur.

Çizelge 4.12. Alttan boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 7.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)

(b)

	Mode	✓ Frequency [Hz]		Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	145,06	1	1,	143,21
2	2,	174,39	2	2,	172,36
3	3,	185,71	3	3,	184,12
4	4,	235,2	4	4,	232,95
5	5,	244,98	5	5,	242,59
6	6,	257,94	6	6,	255,43

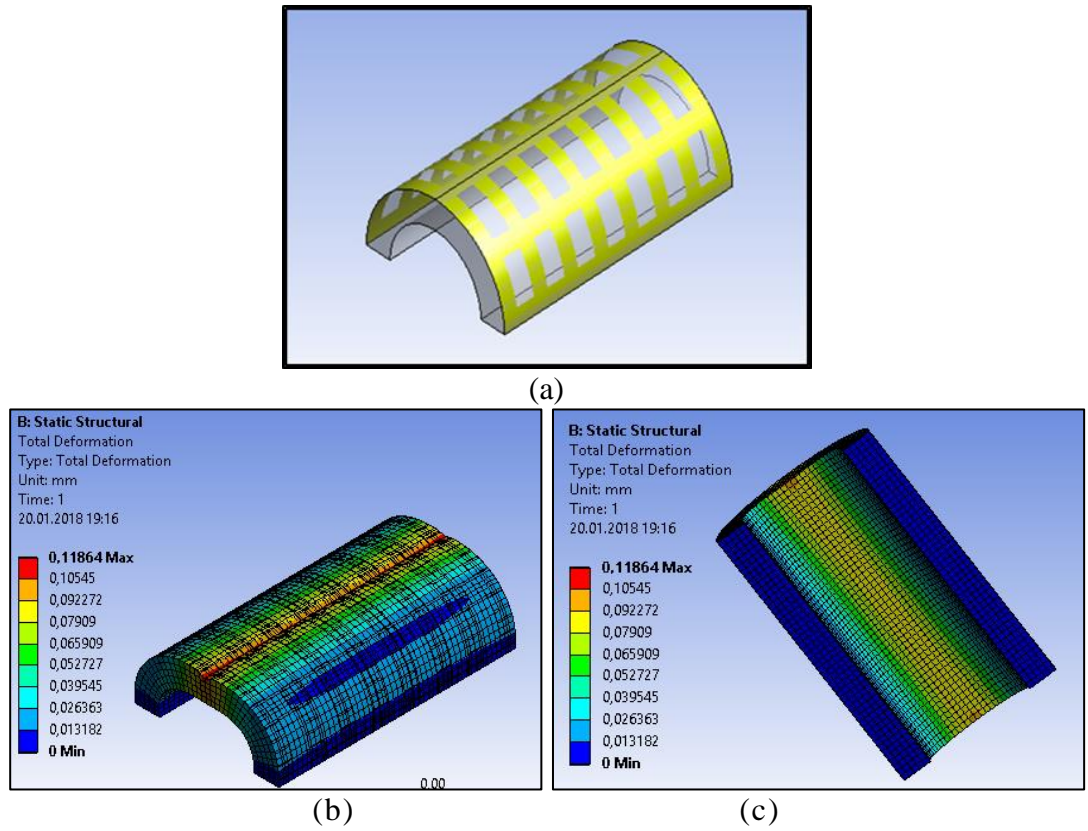
4.2.8. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme - 8.tip

Bu güçlendirme tipinde malzemeler yine 15 cm genişliğinde kullanılmıştır. Diğer güçlendirmelerde olduğu gibi boyuna güçlendirmelerde aralarında yaklaşık 20 cm boşluk olacak şekilde 5 parça, eğrisel olarak kullanılırken parça sayısı daha önceki güçlendirmelerde kullanılan kompozitin toplam yüzey alanına eşit olacak şekilde hesap edilmiş ve 8 parça kompozit yaklaşık 18,5 cm eşit aralıklarla tonozun üst kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır.

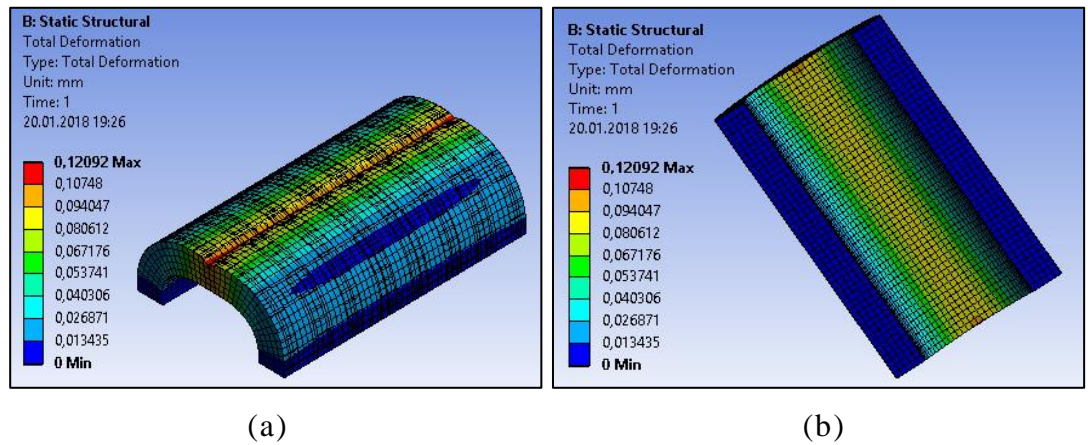
Şeritler eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.67.(a)'da verilmiştir.

BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.67.(b) ve Şekil 4.67.(c)'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.69'da verilmiştir.

CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.68'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.70'de verilmiştir.

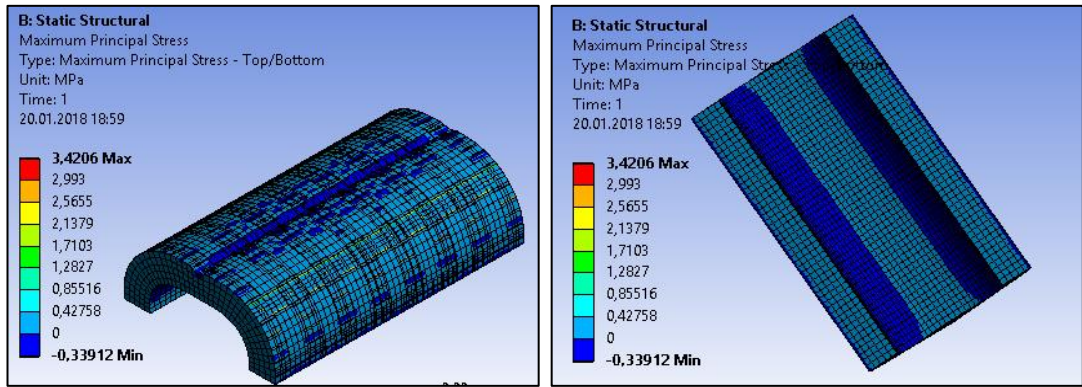


Şekil 4.67. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)güçlendirme şekli (b)analiz sonucu üstten görünüm (c)analiz sonucu alttan görünümü



Şekil 4.68. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) analiz sonucu üstten görünüm (b) analiz sonucu alttan görünüm

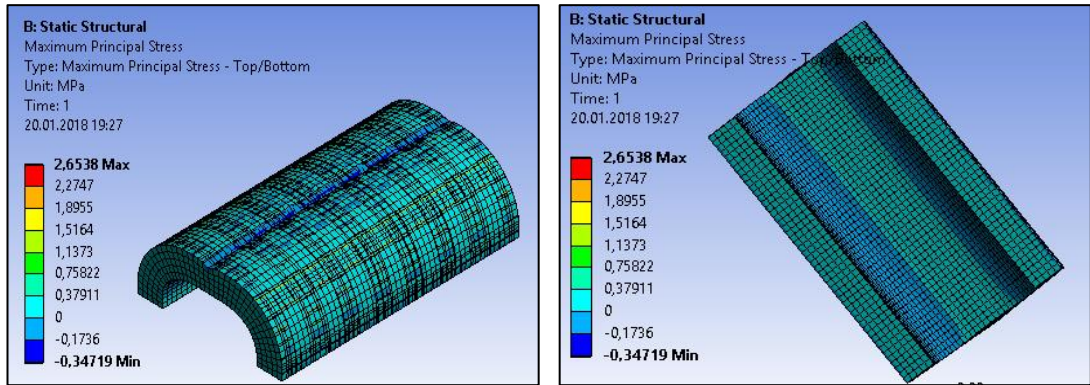
Bu güçlendirme tipinde BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme deformasyon sınırlamada CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmeye göre daha iyi performans sergilemiştir. BFRP malzemesi %12 kadar deformasyon sınırlarken CFRP malzemesi %10 kadar etkinlik göstermiştir. Bu güçlendirme şeklinde her iki malzeme içinde deformasyon sınırlama yüzdeleri önceki güçlendirme şekillerine göre deformasyon sınırlamada daha faydalı bir güçlendirme şekli olduğunu göstermektedir.



(a)

(b)

Şekil 4.69. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

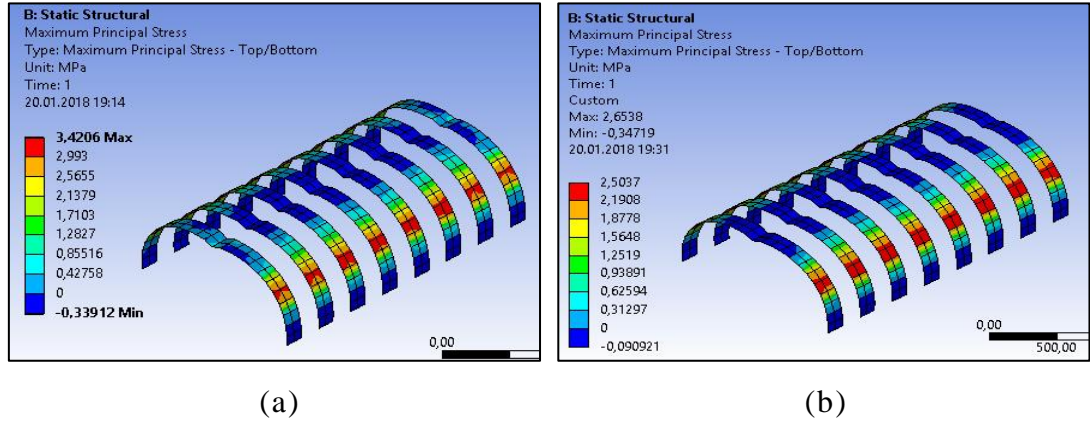


(a)

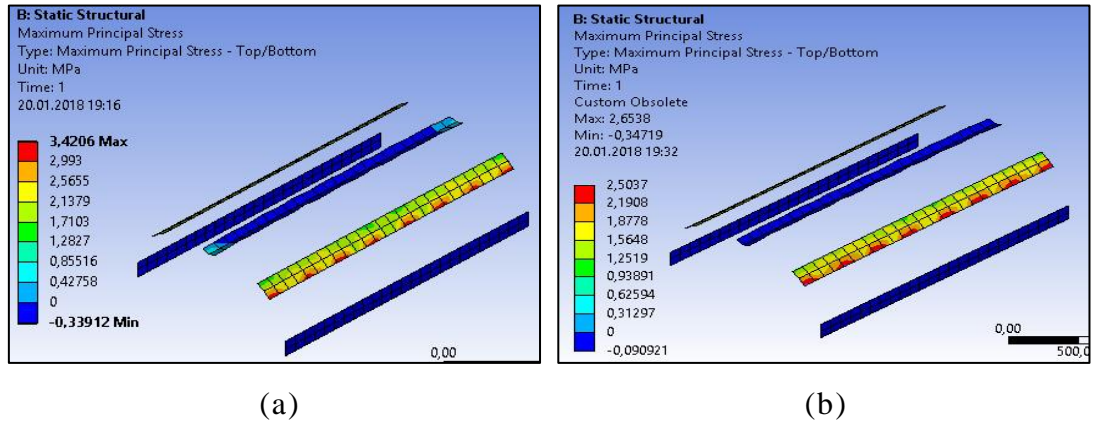
(b)

Şekil 4.70. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

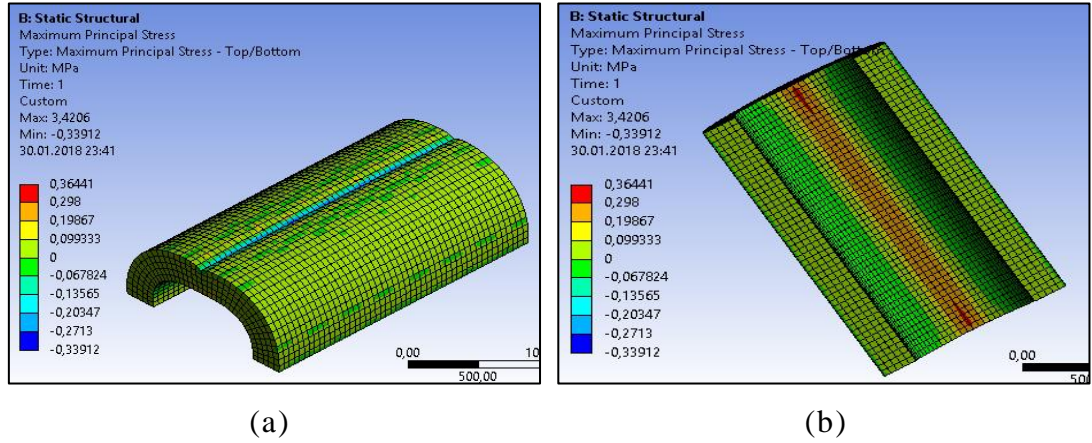
Güçlendirme elemanlarının aldığı çekme gerilmeleri BFRP ve CFRP için Şekil 4.71 ve Şekil 4.72’de, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme için Şekil 4.73’de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.74’de verilmiştir.



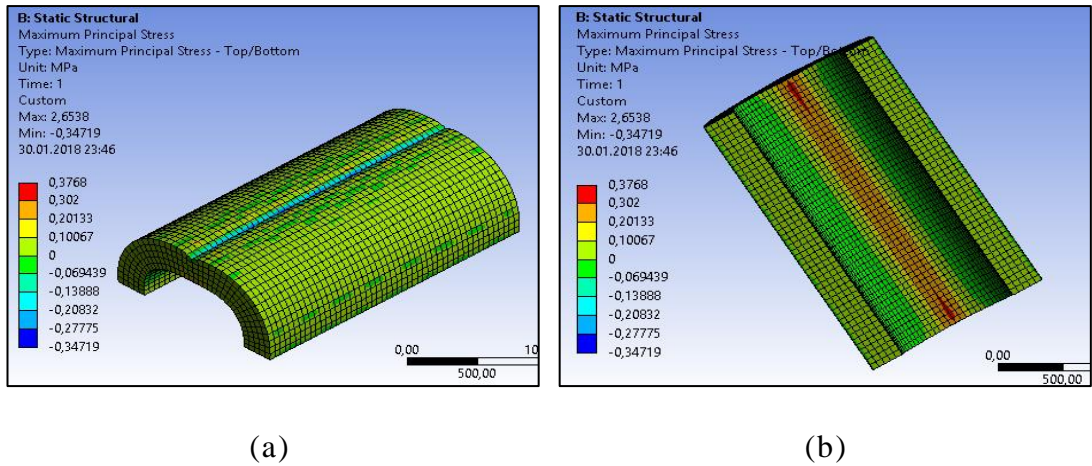
Şekil 4.71. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.72. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki boyuna BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki boyuna CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.73. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 4.74. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Bu üstten yapılan güçlendirme tipinde tonoz orta alt kısmındaki maksimum gerilme değeri BFRP ile yapılan güçlendirmede 0,199-0,298 MPa aralığına çekilmiş olup %12-41 aralığında bir çekme gerilmesi sınırlaması getirmiştir. CFRP ile yapılan güçlendirmede bu değer 0,201-0,302 aralığına kadar sınırlanabilmiş olup BFRP ile yaklaşık aynı fayda sağlanabilmiştir.

Modal analiz sonuçlarından frekans değerleri Çizelge 4.13’de sunulmuştur.

Çizelge 4.13. Üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 8.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)

(b)

	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	143,45
2	2,	172,31
3	3,	183,98
4	4,	231,8
5	5,	242,83
6	6,	253,71

	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	142,21
2	2,	170,95
3	3,	183,06
4	4,	230,59
5	5,	241,13
6	6,	252,55

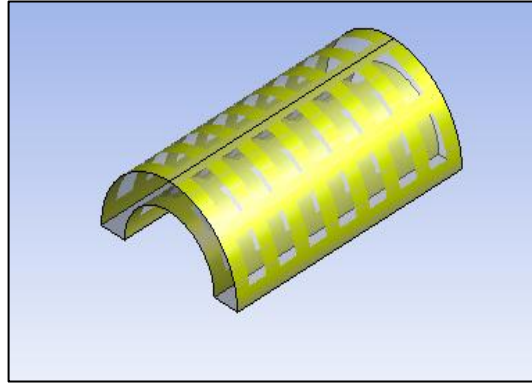
4.2.9. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme - 9.tip

Bu güçlendirme tipinde malzemeler yine 15 cm genişliğinde kullanılmıştır. Diğer güçlendirmelerde olduğu gibi boyuna güçlendirmelerde aralarında yaklaşık 20 cm boşluk olacak şekilde 5 parça, eğrisel olarak kullanılırken parça sayısı daha önceki güçlendirmelerde kullanılan kompozitin toplam yüzey alanına eşit olacak şekilde hesap edilmiş ve 8 parça kompozit yaklaşık 18,5 cm eşit aralıklarla tonozun alt ve üst kısmından ve 2,5 m derinliği boyunca uygulanmıştır.

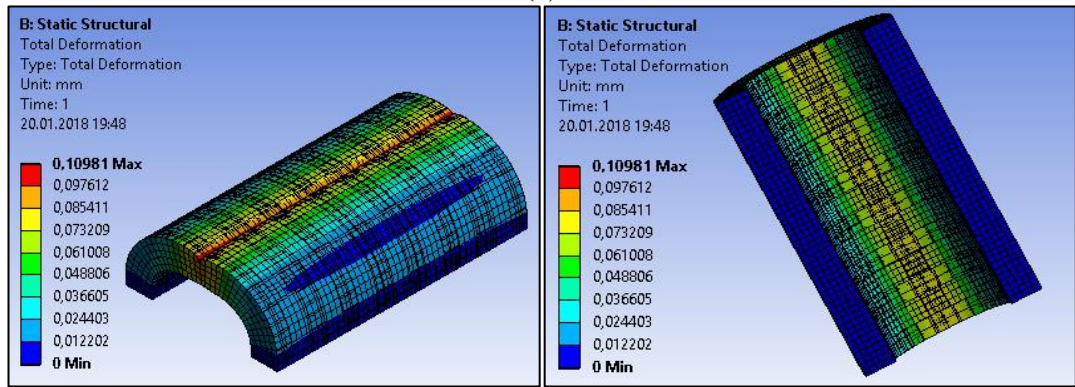
Şeritler eşit aralıklarla uygulanmış olup güçlendirme şekline ait görünüm Şekil 4.75.(a) da verilmiştir.

BFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.75.(b) ve Şekil 4.75.(c)'de gerilme dağılımı ise Şekil 4.77'de verilmiştir.

CFRP malzemesi kullanılarak yapılan güçlendirmeye ilişkin analizler sonucu elde edilen toplam deformasyonlar Şekil 4.76'da gerilme dağılımı ise Şekil 4.78'de verilmiştir.



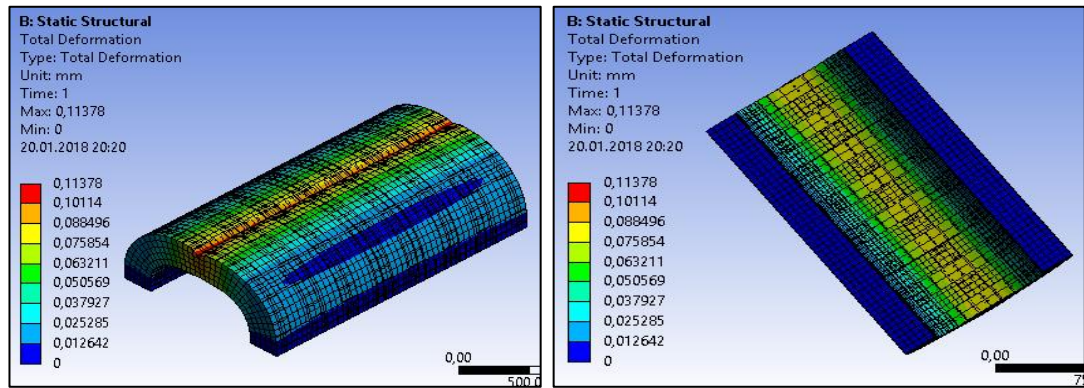
(a)



(b)

(c)

Şekil 4.75. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şekli ve BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a)güçlendirme şekli (b)analiz sonucu üstten görünüm (c)analiz sonucu alttan görünümü



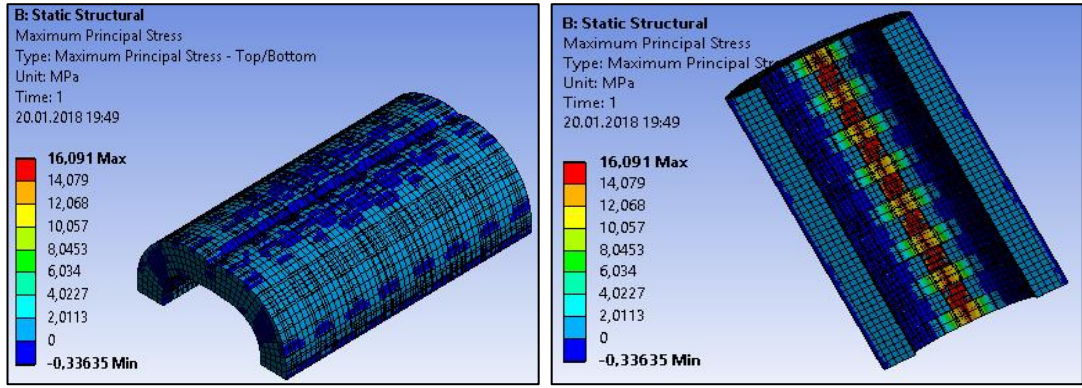
(a)

(b)

Şekil 4.76. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait toplam deformasyon sonuçları
(a) analiz sonucu üstten görünüm (b) analiz sonucu alttan görünüm

Bu güçlendirme tipinde BFRP malzemesiyle yapılan güçlendirme deformasyon

sınırlamada CFRP malzemesiyle yapılan güçlendirmeye göre daha iyi performans sergilemiştir. BFRP malzemesi %19 kadar deformasyon sınırlarken CFRP malzemesi %16 kadar etkinlik gösterebilmiştir.

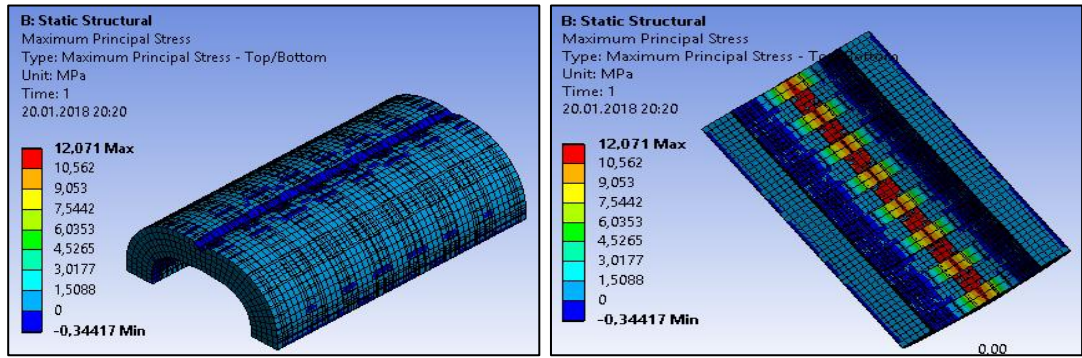


(a)

(b)

Şekil 4.77. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm



(a)

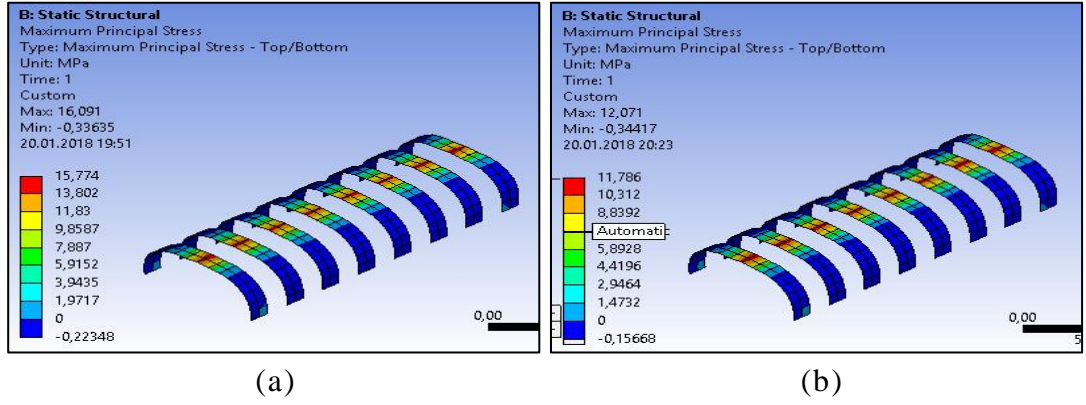
(b)

Şekil 4.78. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeye ait gerilme dağılımları

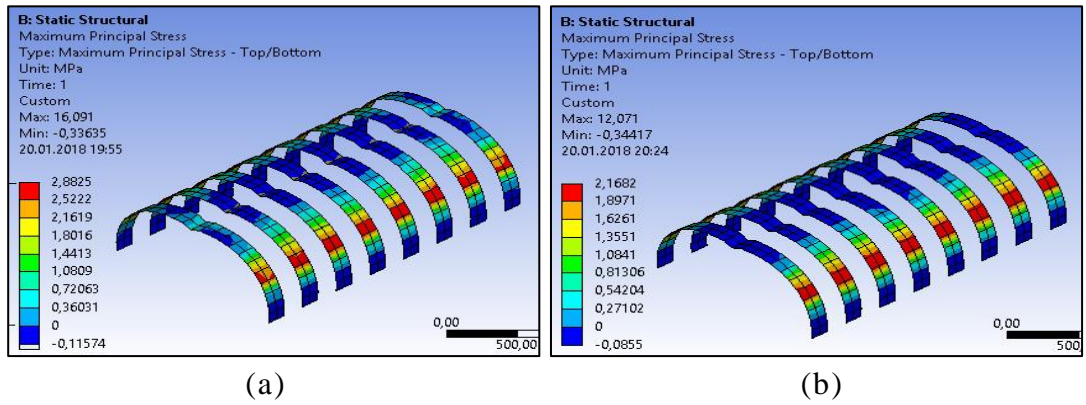
(a) üstten görünüm (b) alttan görünüm

BFRP ve CFRP için alt kısımdaki eğrisel güçlendirmeye ait çekme gerilmesi dağılımı Şekil 4.79’da üst kısımdaki eğrisel güçlendirmeye ait çekme gerilmesi dağılımı Şekil 4.80’de, alt kısımdaki doğrusal güçlendirmeye ait çekme gerilmesi dağılımı Şekil 4.81’de üst kısımdaki doğrusal güçlendirmeye ait çekme gerilmesi dağılımı Şekil 4.82’de, tonoz üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin dağılımı ise BFRP ile güçlendirme

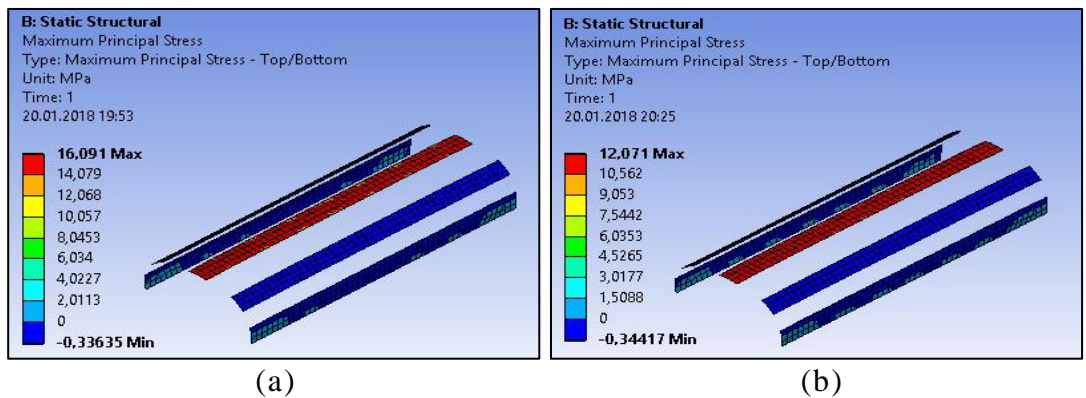
için Şekil 4.83’de, CFRP ile güçlendirme durumu için ise Şekil 4.84’de verilmiştir.



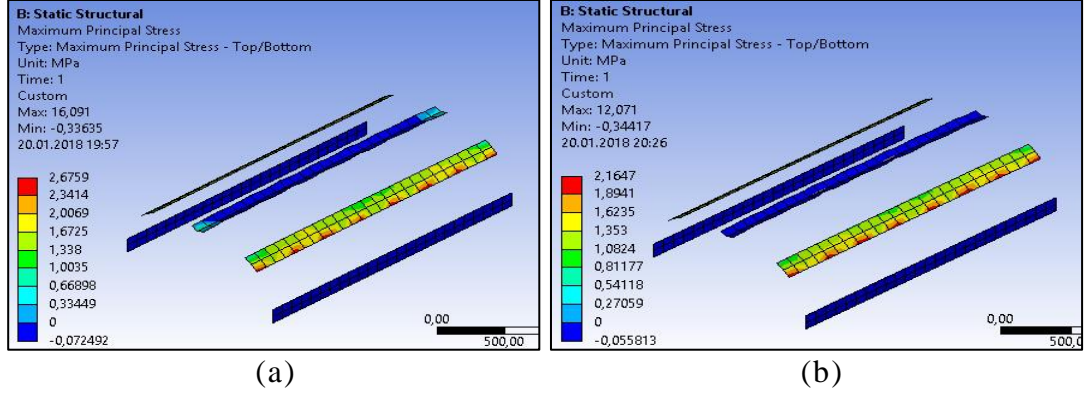
Şekil 4.79. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısım eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



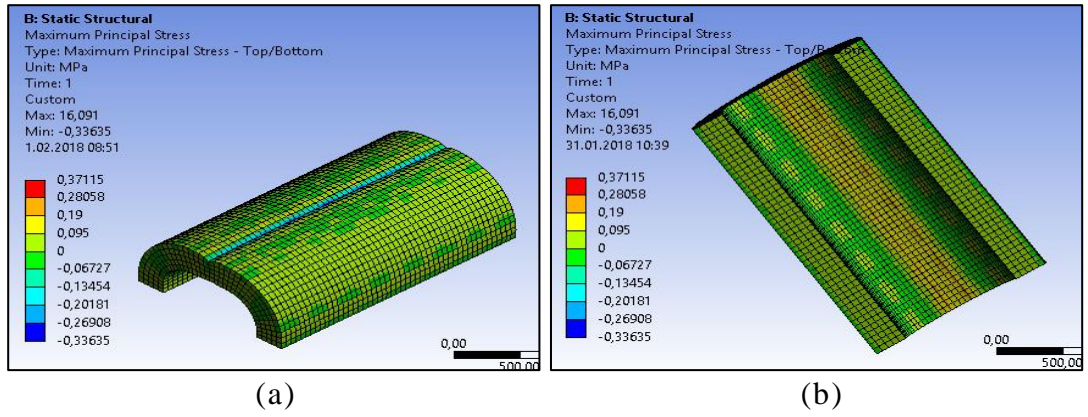
Şekil 4.80. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Üst kısımdaki eğrisel BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Üst kısımdaki eğrisel CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



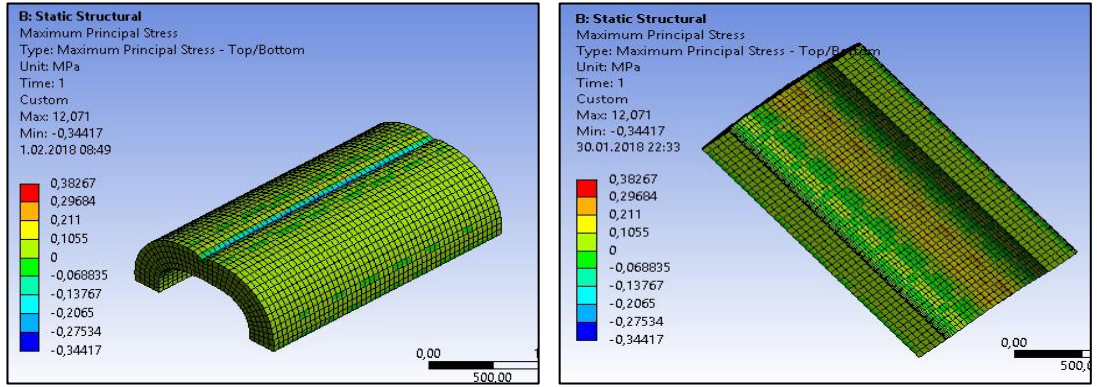
Şekil 4.81. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde (a)Alt kısımdaki boyuna BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b)Alt kısımdaki boyuna CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.82. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde a)Üst kısımdaki BFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler (b) Üst kısımdaki CFRP malzemelerinde meydana gelen gerilmeler



Şekil 4.83. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı



(a)

(b)

Şekil 4.84. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri dağılımı

Bu güçlendirme tipinde her iki malzeme ile yapılan güçlendirmede de gerilme dağılımları birbirine benzemektedir. Bununla birlikte BFRP malzemesi ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde kalan maksimum gerilmenin olduğu hatta bakıldığında güçlendirme öncesi hakim olan 0,3396 Mpa değerindeki kırmızı dağılımın yerini güçlendirme sonrası (yer yer turuncu dağılımda mevcut olsada) hakim dağılımın 0,095 - 0,190 Mpa aralığında gerilme değerlerine sahip olan sarı dağılım olduğu görülmektedir. Bu verilere göre BFRP malzemesi çekme gerilmesini almada %44-72 aralığında bir etkinlik göstermektedir. CFRP malzemesi ile güçlendirilmiş tonoz üzerinde güçlendirme sonrası yarı yarıya turuncu ve sarı dağılım görülmektedir. Bu dağılımların gerilme değerleri aralığı skalaya göre 0,1055 - 0,211 Mpa'dır. Bu verilere göre CFRP malzemesi %38 - 69 aralığında bir etkinlik göstermektedir.

Çizelge 4.14. Hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinde BFRP(a) ve CFRP(b) malzemeleriyle yapılmış 9.tip güçlendirmenin frekans değerleri

(a)

	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	150,72
2	2,	179,97
3	3,	188,82
4	4,	240,08
5	5,	251,31
6	6,	262,33

(b)

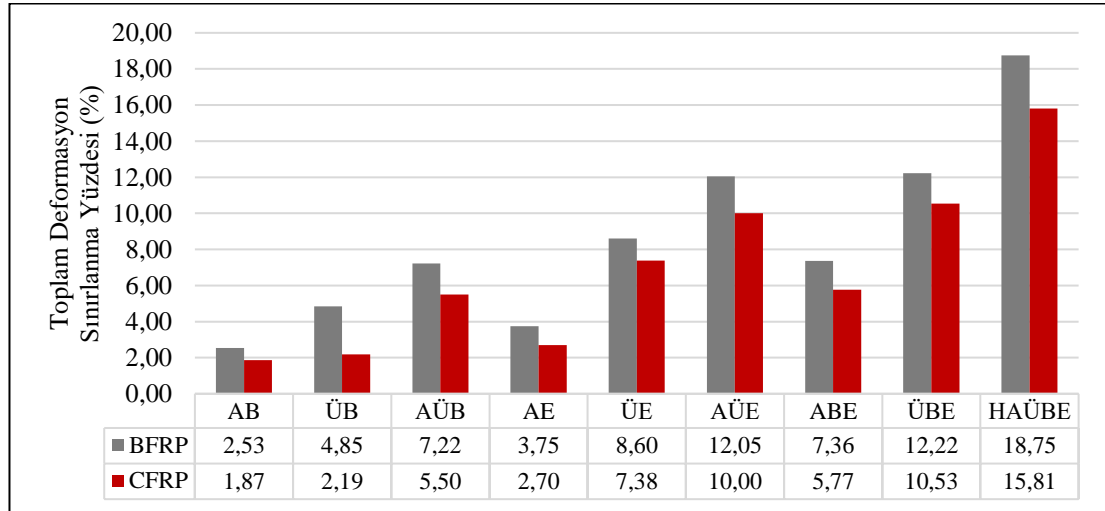
	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	147,69
2	2,	176,61
3	3,	186,36
4	4,	236,68
5	5,	247,24
6	6,	258,71

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu kısımda sonuçların sunumunu kolaylaştırmak için güçlendirme isimlerinde kısaltmalar yapılmıştır; Alttan Boyuna güçlendirme - AB, Üstten Boyuna güçlendirme - ÜB, Alttan ve Üstten Boyuna güçlendirme - AÜB, Alttan Eğrisel güçlendirme - AE, Üstten Eğrisel güçlendirme - ÜE, Alttan ve Üstten Eğrisel güçlendirme - AÜE, Alttan Boyuna ve Eğrisel güçlendirme - ABE, Üstten Boyuna ve Eğrisel güçlendirme - ÜBE, Hem Alttan Hem Üstten Boyuna ve Eğrisel güçlendirme - HAÜBE

Toplam deformasyon sonuçlarına göre güçlendirilmemiş tonozun toplam deformasyon değeri baz alınarak güçlendirme sonrası her malzeme ve güçlendirme şekli için deformasyon değerlerini sınırlama miktarları yüzdesel olarak Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Güçlendirme uygulamalarının güçlendirme malzemesi ve şekline göre toplam deformasyon değerini sınırlamaya olan katkılarının yüzdesel olarak gösterimi

Toplam deformasyon sonuçlarına bakıldığında öncelikle tüm güçlendirme şekillerinde; toplam deformasyonun bir miktar sınırlandığı, en iyi deformasyon sınırlamasının BFRP malzemesiyle sağlanabildiği söylenebilmektedir.

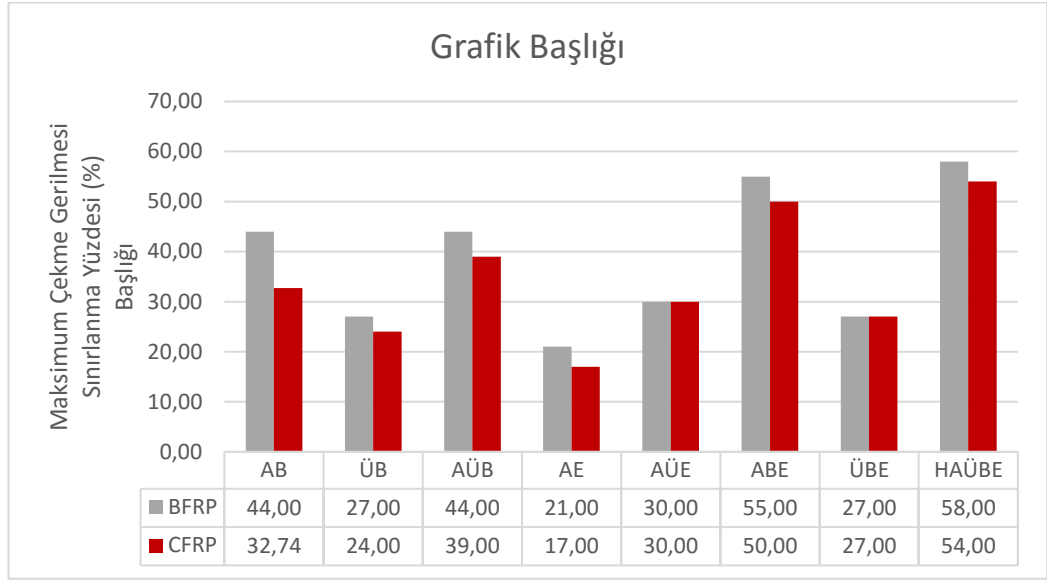
Her iki malzeme içinde deformasyon sınırlama bakımından en etkin güçlendirme şekili Hem Alttan Hem Üstten Boyuna ve Eğrisel güçlendirmedir. Genel olarak üstten yapılan güçlendirme uygulamalarının toplam deformasyon sınırlamada alttan olanlara göre daha etkin olduğu görülmüştür.

AB-ÜB-AÜB 1. seri, AE-ÜE-AÜE 2. Seri ve ABE-ÜBE-HAÜBE 3.seri olarak düşünülürse her seri kendi içerisinde toplam deformasyon sınırlama bakımından şöyle bir etkinlik faydası sıralamasına sahiptir;

- 1-Her serinin alttan ve üstten uygulanan güçlendirmeleri toplam deformasyon sınırlamada diğerlerine göre daha etkin sonuçlar vermiştir
- 2-Her serinin üstten uygulanan güçlendirmeleri alttan uygulanan güçlendirmelerine göre toplam deformasyon sınırlamada daha etkin sonuçlar vermiştir.

Genel olarak üstten yapılan güçlendirmeler deformasyon sınırlamada daha etkin sonuçlar vermiştir. Bu durum üstten uygulanan güçlendirme durumunda yükün önce kompozitler elemanlarca taşınmasına bağlanmaktadır.

Çekme gerilmesi sonuçlarına göre güçlendirilmemiş tonozun maksimum gerilme değerinin olduğu orta alt kısımdaki gerilme değeri baz alınarak güçlendirme sonrası her malzeme ve güçlendirme şekli için bu bölgedeki maksimum çekme gerilmesi değerlerini sınırlama miktarları yüzdesel olarak Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Güçlendirme uygulamalarının güçlendirme malzemesi ve şekline göre maksimum çekme gerilmesi değerini sınırlamaya olan katkılarının yüzdesel olarak gösterimi

Maksimum çekme gerilmesi sonuçlarına bakıldığında Üstten Eğrisel güçlendirme şekli dışındaki güçlendirme şekillerinde her iki malzeme içinde tonoz alt kısmında oluşan maksimum çekme gerilmesi değeri sınırlandırılabilmiştir. İlave olarak maksimum çekme gerilmesi değerini sınırlama açısından da tüm güçlendirme tiplerinde BFRP malzemesi ile yapılan güçlendirmeler CFRP ile yapılan güçlendirmelere göre daha iyi sonuç vermektedir.

Üstten Eğrisel güçlendirme şeklinde her iki malzeme ile yapılan güçlendirmelerden sonra güçlendirilmemiş tonozun alt orta kısmında meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değeri artış gösterdiğinden bu güçlendirme şekli çekme gerilmesini sınırlamada faydalı olmamıştır. Bu sebeplede bu güçlendirme şeklinde çekme gerilmesi sınırlandırılmadığı için Şekil 5.2’de yer verilmemiştir.

Çekme gerilmesini sınırlamada en etkin güçlendirme şekli Hem Alttan Hem Üstten Boyuna ve Eğrisel güçlendirme olarak belirlenmiştir. %50-55 değerindeki bir etkinliğe sahip olan Alttan Boyuna ve Eğrisel güçlendirme en etkin olarak belirttiğimiz Hem Alttan Hem Üstten Boyuna ve Eğrisel güçlendirme şeklinin sağladığı etkinliğe çok

yakın bir değere sahip olup kullanılan malzemenin daha az olması sebebiyle daha optimum bir çözüm olarak tercih edilebileceği görülmektedir.

Toplam deformasyon sonuçlarıyla çekme gerilmesi sonuçları birlikte düşünülürse Hem Alttan Hem Üstten güçlendirme şekli her iki malzeme için de deformasyon ve maksimum çekme gerilmesini sınırlamada en etkin güçlendirme şeklidir.

Modal analiz sonuçlarına göre her iki malzeme tipi içinde tüm güçlendirme şekillerinde güçlendirilmemiş duruma göre literatüre paralel olarak frekans değerleri artış göstermiştir. Güçlendirilmemiş durum referans kabul edilerek tüm güçlendirme durumlarına göre frekans değerleri toplu olarak Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Güçlendirme uygulamalarının güçlendirme malzemesi ve şekline göre ilk 5 moda ait frekans değerleri

Güçlendirme Şekilleri	Mod Şekilleri	1.mod	2.mod	3.mod	4.mod	5.mod
	Referans	137,59	166,57	180,73	226,67	236,37
AB	BFRP	141,39	170,42	182,96	229,94	240,57
	CFRP	140,38	169,35	182,25	229,1	239,35
ÜB	BFRP	140,45	169	182,13	228,77	238,71
	CFRP	139,74	168,35	18,73	228,27	238,03
AÜB	BFRP	144,2	172,81	184,32	231,99	242,9
	CFRP	142,5	171,11	183,23	230,67	241,01
AE	BFRP	141,1	170,43	183,24	231,44	240,66
	CFRP	140,1	169,3	182,44	230,04	239,36
ÜE	BFRP	140,11	169,34	182,35	229,41	239,83
	CFRP	139,44	168,55	181,85	228,65	238,85
AÜE	BFRP	143,59	173,16	184,82	234,11	244,09
	CFRP	141,93	171,26	183,53	231,98	241,83
ABE	BFRP	145,06	174,39	185,71	235,2	244,98
	CFRP	143,21	172,36	184,12	232,95	242,59
ÜBE	BFRP	143,45	172,31	183,98	231,8	242,83
	CFRP	142,21	170,95	183,06	230,59	241,13
HAÜBE	BFRP	150,72	179,97	188,82	240,08	251,31
	CFRP	147,69	176,61	186,36	236,68	247,24

Literatüre paralel olarak mod şekillerinin güçlendirme şekli ve kullanılan malzemeden bağımsız olduğu yapılan analizler sonucunda görülmüştür.

5.2. Öneriler

- Farklı şekillerde güçlendirme uygulamaları için analizler yapılarak daha etkin bir güçlendirme şekli araştırılabilir.
- Kompozit malzemeler farklı genişliklerde kullanılarak daha etkin bir güçlendirme şekli araştırılabilir.
- Kompozit malzemelerin üst üste uygulanması durumunda toplam deformasyon ve çekme gerilmesi değerleri daha da sınırlandırılabilir.
- Sonuçlar kısmında belirtildiği üzere BFRP malzeme güçlendirme uygulamalarında CFRP malzemesine göre daha faydalı bir malzemedir. Bu sebeple güçlendirme uygulamalarında kullanılması tavsiye edilmektedir.
- Farklı yapı elemanlarının güçlendirilmesi uygulamalarında kullanımı durumunda etkinliğini incelemeye yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Bu çalışma kapsamında en etkin faydayı veren hem alttan hem üstten boyuna ve eğrisel güçlendirme şeklinin yığma tuğla tonoz güçlendirmede kullanımı tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Acar, V., Akbulut, H., Sarikanat, M., Seydibeyoglu, M., Seki, Y. ve Erden, S., 2013. Karbon Elyaf Takviyeli Prepreg Kompozitlerde Arayüzey Mekanizmasının Karbon Nanoyapı Katkısıyla İyileştirilmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10, 43-51.
- Aktan, H., 2008. Daire Eksenli Çubukların Düzlem İçi Dinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alecci, V., Focacci, F., Rovero, L., Stipo, G. ve De Stefano, M., 2016. Extrados Strengthening Of Brick Masonry Arches With PBO-FRCM Composites: Experimental And Analytical Investigations. Composite Structures, 149, 184-196.
- Ali, U., 2009. Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Anonim-I, 2013. Hexcel, Prepreg Technology. https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Manufacturing_of_Polymer_Composites/FS2017/Prepreg_Technology.pdf, (09.01.2018).
- Anonim-II, 2017. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Personel/comoglu/depremnedir/index.htm>, (09.01.2018).
- Anonim-III, 2017. Auroville Earth Institute, <http://www.earth-auroville.com/index.php?nav=menu&pg=vault&id1=2&txt=text,2005.>, (03.01.2018).
- Anonim-IV, 2017. https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/enus/help/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html, (01.01.2018).
- Anonim-V, 2017. Takviye ve Matris Malzemeleri. Dokuz Eylül Üniversitesi, http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/kompozit/2_%20Takviye%20ve%20Matris%20Malzemeleri.pdf (01.01.2018).
- Arıcasoy, O., 2006. Kompozit sektör raporu. İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 11,
- Aslan, T. A., 2016. Eğrisel Yapı Elemanlarının Etkin Sayısal Analizi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ataş, A., 2017. Kompozit Malzemeler ve Mekanizması. kompozit.balikesir.edu.tr/wp-content/.../Bölüm-1-Kompozit-Malzemelere-Giriş.pdf, (06.01.2018).
- Bagcı, M., 2003. Yatay Yükler Etkisindeki Dolgulu Betonarme Düzlem Çerçevelerin Malzeme Bakımından Non-Lineer Analizi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir,
- Bashbolagh, S. P., 2016. İran'daki Kemer, Tonoz ve Kubbelerin Yapısal Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayraktar, A., 2006. Tarihi yapıların analitik incelenmesi ve sismik güçlendirme

- metodları. Beta Basım Yayım Dağıtım AŞ,
- Binici, B., Canbay, E., Yakut, A., Aldemir, A. ve Çobanoğlu, B., 2014. Risk Değerlendirmesi için Gerçek Yığma Yapılar Üzerinde Sismik Deneyler. www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/2bee01c3f5f96ab_ek.pdf?tipi=2&turu... (09.01.2018).
- Çakır, F., 2011. Assessment of Structural Integrity And Seismic Retrofit Of Masonry Bridges Using Micropiles. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, College of the Illinois Institute of Technology, Department Of Civil, Architectural And Environmental Engineering, Chicago.
- Çakır, F., 2014. Nano Partikül Takviyeli Kompozit Malzemelerle Yığma Kemerlerin Güçlendirilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Can, H. ve Ünay, A., 2012. Tarihi Yapıların Deprem Davranışını belirlemek İçin Sayısal Analiz Yöntemleri. GÜ Müh. Mim. Fak. Dergisi, 27, 211-217.
- Caporale, A., Feo, L. ve Luciano, R., 2012. Limit analysis of FRP strengthened masonry arches via nonlinear and linear programming. Composites Part B: Engineering, 43, 439-446.
- Çavuş, M. ve Dayı, M., 2013. Tarihi Niksar Kırk Kızlar Türbesinin Sismik Davranışı.
- Çavuş, M., 2011. Tarihi Yapılarda Üst Örtülerin Çelik Malzeme İle Sağlamlaştırılmasının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Chawla, K. K. ve Meyers, M., 1999. Mechanical behavior of materials. Prentice Hall, Como, M., 2017. Statics of Historic Masonry Constructions. Springer, 661p, Cham, Switzerland.
- Corradi, M., Borri, A., Castori, G. ve Coventry, K., 2015. Experimental analysis of dynamic effects of FRP reinforced masonry vaults. Materials, 8, 8059-8071.
- Değirmenci, İ. ve Sarıbiyık, M., 2015. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve FRP Malzemelerin Kullanımı. Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 338-347.
- Döndüren, M. S., Şişik, Ö. ve Demiröz, A., 2017. Tarihi Yapılarda Görülen Hasar Türleri. Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, 45-58.
- Fırat, F. K. ve Eren, A., 2015. Tarihi Yığma Yapılardaki Hasarlı Kemerler Üzerinde FRP Etkisinin İncelenmesi. Journal Of The Faculty Of Engineering & Architecture Of Gazi University, 30,
- Frunzio, G., Monaco, M. ve Gesualdo, A., 2001. 3D FEM analysis of a roman arch bridge. Historical constructions, 591-598.
- Gardeshi, N., 2015. Kubbe Formundaki Yapıların Strüktür Ve Malzeme Açısından İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Gedik, Y. H., 2008. Analysis, Repair And Strengthening Of Historical Masonry Structures; Case Study: Mehmet Aga Mosque. M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University, Institute Of Science And Technology, İstanbul.
- Jafarov, O., 2012. Lifli Polimerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Modellenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kanit, R., 2007. Tuğla Kemerlerin Deneysel Davranışı Ve Bilgisayar Modeli Analizleri.

- Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22,
- Karaca, N., 2014. Düzlemsel Çubukların Taşıma Ve Rijitlik Matrisi Metodu İle Statik Ve Dinamik Analizi.Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Kaya, Ç., 2010. Yığma Duvarların Elastik-Plastik Hesabı.Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kayalar, R., 2010. Geniş Açıklıklı Binalarda Belirli Kimi Taşıyıcı Sistemlerin Malzeme ve Formlarının Açıklık Geçme Açısından İncelenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Koçak, A., Tugay, Ş. ve Kilit, Z., Antalya’da Bulunan Tarihi Bir Yapının Restorasyon Çalışması ve Deprem Performansının Artırılması. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1, (2007).
- Köksal, T., 1995. Sonlu Elemanlar Metodu. Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul,
- Kolyvas, C. ve Karantzikis, M., 2011. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesinde Donatılı Harç Sistemleri.
- Kurrer, K.-E., 2008. The history of the theory of structures: from arch analysis to computational mechanics. International Journal of Space Structures, 23, 193-197.
- Kuruşcu, A. O., 2012. Yığma Duvar ve Temelerde Doğrusal Olmayan Modelleme.Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lourenço, P. B. 1996. A user/programmer guide for the micro-modeling of masonry structures. Report.
- Lourenço, P. B., 2002. Computations on historic masonry structures. Progress in Structural Engineering and Materials, 4, 301-319.
- Onat, A., 2015. Kompozit Malzemeleri Ders Notu. content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/.../kompozit_malzemeler_ders_notu.p... (08.01.2018).
- Örmecioglu, H. T., 2010. Tarihi Yapıların Yapısal Güçlendirilmesinde Ana İlkeler ve Yaklaşımlar. Politeknik Dergisi, 13,
- Özer, S. S., 2006. Geleneksel Yığma Yapılarda Strüktürel Elemanların Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, sf, 43, 44-45.
- Peker, K., 2003. Tarihi Yapıların Yapısal Analizinde Performans Tabanlı Yaklaşımlar Ve Bir Örnek Çalışma. Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30.
- Ramage, M., Ochsendorf, J., Block, P., Rich, P. ve Architects, P. R., 2008. Advanced Geometry, Rudimentary Construction: Structural form finding for unreinforced thin-shell masonry vaults. Advances in Architectural Geometry,
- Santis, S., D., 2017, Bond Behaviour of Steel Reinforced Grout For The Extrados Strengthening Of Masonry Vaults, Construction and Building Materials 150, 367-382.
- Siddiqui, N. A., Khan, S. U., Ma, P. C., Li, C. Y. ve Kim, J.-K., 2011. Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepregs containing carbon nanotubes. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42, 1412-1420.
- Taranu, N., Oprisan, G., Budescu, M., Taranu, G. ve Bejan, L. 2010. Improving structural response of masonry vaults strengthened with polymeric textile

- composite strips. Proceeding of the 3rd WSEAS International conference on engineering mechanics, structures, engineering geology, GREECE.
- Ural, A. ve Doğangün, A., 2007. Arch bridges in East Blacksea Region of Turkey and effects of infill materials on a sample bridge. ARCH, 543-550.
- Ural, A., Oruç, Ş., Doğangün, A. ve Tuluk, Ö. İ., 2008. Turkish historical arch bridges and their deteriorations and failures. Engineering Failure Analysis, 15, 43-53.
- Valvona, F., Toti, J., Gattulli, V. ve Potenza, F., 2017. Effective seismic strengthening and monitoring of a masonry vault by using Glass Fiber Reinforced Cementitious Matrix with embedded Fiber Bragg Grating sensors. Composites Part B: Engineering, 113, 355-370.
- Zaid Bin Nissar, M. P., 2017. Analytical And Experimental Behavior Of Unstrengthened Masonry Arches. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 8, 906-915.
- Zhang, Q. W., Chang, T.-Y. P. ve Chang, C. C., 2001. Finite-element model updating for the Kap Shui Mun cable-stayed bridge. Journal of Bridge Engineering, 6, 285-293.
- Zhang, X., Fan, X., Yan, C., Li, H., Zhu, Y., Li, X. ve Yu, L., 2012. Interfacial microstructure and properties of carbon fiber composites modified with graphene oxide. ACS Appl Mater Interfaces, 4, 1543-1552.
- Zor, M., Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler. (2015).

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Samsun’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Samsun’da tamamladı. 2008 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2013 yılında bölüm 1.si olarak mezun oldu. 2014-2015 yılında Şırnak’da vatani görevini yedek subay olarak yerine getirdi. 2016 yılı ocak ayında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2016 şubat ayında Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı ile Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı Mekanik Bilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Şubat- Eylül 2016 tarihleri arasında İstanbul Teknik Üniversitesi’nde ingilizce dil eğitimini tamamladı. Ekim 2016 tarihinden itibaren 35. Madde kapsamında aldığı görevlendirme ile halen Araştırma Görevlisi olarak Atatürk Üniversitesi’nde görevini sürdürmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.